

Les difficultés d'étudiants post-bac pour une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'image optique

Coherent conceptualization of diffraction and optical imaging : university students' difficulties

Philippe COLIN, Laurence VIENNOT

Laboratoire de Didactique de la Physique dans l'Enseignement Supérieur
Université Denis Diderot, Case 7086
2, place Jussieu
75251 Paris cedex 05, France.

Résumé

Cet article vise à mettre en évidence les difficultés d'étudiants (deuxième et troisième années universitaires) à propos de situations d'optique qui s'analysent classiquement, dans l'enseignement, à l'aide de deux « modèles » à la fois : « géométrique » et « ondulatoire ». Les résultats de trois questionnaires confirment l'existence de problèmes importants pour une compréhension intégrée de ces deux approches. Ils nous amènent à souligner la nécessité de construire une présentation du contenu en cause – situations d'optique impliquant à la fois diffraction et imagerie optique – qui soit adaptée à ce public tout en restant cohérente. Quelques germes pour cette construction sont proposés ici : importance de la notion de

« groupement de rayons » et raisonnement « par l'aval », c'est-à-dire à partir du point d'observation.

Mots clés : difficultés des étudiants, diffraction, optique ondulatoire, optique géométrique, enseignement universitaire.

Abstract

This paper focuses on undergraduate students' difficulties when analysing situations in Optics which imply, in traditional teaching, two models : geometrical optics and wave optics. The findings of three questionnaires show that many students are a long way from a global understanding of these two models. We underline the necessity to build a content analysis of this subject both coherent and well adapted to undergraduate students. Some germs are proposed for this building : emphasis on the notion of « grouping of paths of light » and use of a « backwards » reasoning, starting from the arrival point of the light, in other words from its impact on the considered receiver.

Key words : students' difficulties, diffraction, wave optics, geometrical optics, university teaching.

Resumen

Este artículo pretende poner en evidencia las dificultades de los estudiantes (segundo y tercer año universitario) con relación a situaciones de óptica que se analizan clásicamente en la enseñanza, con la ayuda de los modelos : « geométrico » y « ondulatorio ». Los resultados de tres cuestionarios confirman la existencia de problemas importantes para una comprensión integrada de esas dos aproximaciones. Ello conduce a resaltar la necesidad de construir una presentación del contenido en causa – situaciones de óptica implicando a la vez difracción e imagerie óptica – que sea adaptada a ese público sin perder la coherencia. Algunos germenos para esta construcción son propuestos : importancia de la noción de « grupo de rayos » y razonamiento « por aval », es decir, a partir del punto de observación.

Palabras claves : dificultades de los estudiantes, difracción, óptica ondulatoria, óptica geométrica, enseñanza universitaria.

INTRODUCTION

L'analyse des difficultés des étudiants dans le domaine des sciences physiques a fait, ces vingt dernières années, l'objet de très nombreuses recherches en didactique (Pfundt & Duit, 1994 ; Tiberghien et al., 1998).

Beaucoup de ces difficultés ont été qualifiées de « communes » non seulement parce qu'elles étaient très répandues, mais aussi parce qu'elles semblaient liées davantage au sens commun qu'à l'enseignement précédemment reçu.

Sur certains domaines, pourtant, il est particulièrement difficile de s'en tenir à l'idée d'une origine non scolaire des difficultés observées, tant il s'agit d'une connaissance élaborée, distante de la vie quotidienne. Cela ne signifie pas que des tendances générales du sens commun ne s'y manifestent pas, comme on a pu l'observer maintes fois (Viennot, 1996a). Mais il est raisonnable de penser que, sur des sujets très académiques, il est particulièrement nécessaire, pour comprendre les réponses des étudiants, d'analyser le contenu de la physique, celui probablement dispensé lors de l'enseignement, celui présenté dans les manuels.

Cet article porte sur les difficultés observées chez des étudiants de deuxième et troisième années universitaires à propos de situations nécessitant une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'imagerie optique. Il s'agit de concilier deux manières de modéliser les phénomènes optiques longtemps présentées, dans l'enseignement, comme exclusives, ne se côtoyant que « à la limite ».

Certes, au niveau où nous nous situons, et même plus tard, chacune pose encore, en elle-même, de gros problèmes aux élèves. Alors que le dispositif optique est le « rassembleur » d'une information optique qui, sans lui, se diluerait dans l'espace, la lentille mince, par exemple, est souvent réduite au rôle de « retourneur » d'une image comprise comme voyageant en bloc de l'objet à l'écran (Fawaz & Viennot, 1986 ; Kaminski, 1989 ; Goldberg & Mac Dermott, 1987 ; Galili, 1996). Un cache sur une lentille mince, dans cette perspective, se traduit (à tort) par la prévision d'un trou dans l'image. La propagation des ondes conduit elle aussi à des difficultés (Maurines, 1986, 1993, 1995, 1997) du fait de la mise en œuvre par les étudiants d'un raisonnement où le signal s'apparente à un mobile répondant plus ou moins aux lois de la mécanique du solide. Nous faisons le choix ici, malgré la connaissance de ces lacunes dans la conceptualisation des étudiants, d'aller voir au delà, au carrefour de ces deux modèles, géométrique et ondulatoire.

C'est, bien sûr, à des élèves initiés à ces deux modèles que nous nous adressons. En France, quelques aspects de l'optique géométrique

sont d'abord introduits, ceci dès le collège et même parfois, en ce qui concerne les ombres, dès l'école primaire. Les premières notions sur les ondes lumineuses viennent avec l'introduction de la diffraction, en seconde actuellement, complétées en terminale par la présentation des interférences lumineuses. L'enseignement universitaire reproduit souvent la même séquence pour aboutir, au plus tard en licence, à un enseignement conséquent des ondes, des interférences et de la diffraction, à travers des dispositifs qui impliquent souvent des lentilles avec leur cortège plus ou moins familier de foyers, plans focaux, conjugaisons objet-image au sens de l'optique géométrique.

Tel est, en principe, c'est-à-dire dans l'intention des enseignants, l'acquis des étudiants dont nous avons recueilli les réponses et analysé les difficultés.

Notons que cette investigation se situe dans un cadre très proche de la pratique courante d'enseignement : elle comporte une question propre à l'enquête portant sur un montage classique de travaux pratiques, et deux questions d'examen, inspirées par les premiers constats de l'enquête et négociées avec un groupe d'enseignants en situation classique d'enseignement. Ce cadre d'interrogation, peu habituel en enquête sur les raisonnements communs, ne doit pas étonner ici : c'est bien aux raisonnements en situation d'enseignement classique, et aussi comme reflets des attentes des enseignants, que nous nous intéressons.

Dans une brève analyse du contenu physique en cause, nous soulignons qu'un point crucial, dans l'usage des tracés qui servent de support de raisonnement en optique, est celui du regroupement de tels tracés que l'on est amené à effectuer, regroupement essentiellement lié au point d'observation. Cet aspect nous sert ensuite de ligne d'analyse pour l'exploration des difficultés d'étudiants manifestées à propos des trois questions, que nous présenterons successivement. Une discussion des résultats introduira la nécessité d'une réflexion approfondie sur la présentation d'un tel contenu.

1. ANALYSE DES SITUATIONS EN TERMES DE REGROUPEMENTS DE « RAYONS »

La conjugaison objet-image en optique géométrique, dans le cadre du stigmatisme, s'exprime classiquement par le fait que tout rayon issu d'un point A de l'objet passe, à la sortie du dispositif optique, par un point image A'. L'image permet de reconnaître l'objet. Elle lui est homothétique. Nous n'en disons guère plus ici sur les « rayons » en question. Chacun sait au moins qu'ils sont censés représenter des trajets de la lumière, lesquels

sont rectilignes en l'absence d'obstacle et de changement d'indice. Insistons en revanche sur l'idée de groupement de rayons qui est intrinsèquement liée à celle de conjugaison objet-image : celle-ci implique que convergent au point image A' tous les rayons issus de A, du moins tous ceux qui passent dans le dispositif optique (encadré 1, (a)).

La relation entre ouverture diffractante (éclairée par une onde plane ou sphérique de fréquence donnée) et figure de diffraction (y compris des trous d'Young ou des réseaux) est tout autre : son analyse implique, cette fois, le regroupement de « rayons » issus de points différents de l'ouverture et parvenant en un point donné (encadré 1, (b)). Là encore, nous gardons le terme de « rayon » sans analyse serrée du contenu, nous contentant de répercuter un usage fréquent. De manière plus neutre, nous emploierons aussi le terme de « tracé ».

Rappelons enfin que ces tracés sont en relation simple avec la notion d'onde lorsqu'il s'agit d'onde plane ou sphérique puisqu'alors ils sont perpendiculaires à des surfaces d'ondes (lieu des points où la phase de l'onde est la même) bien définies.

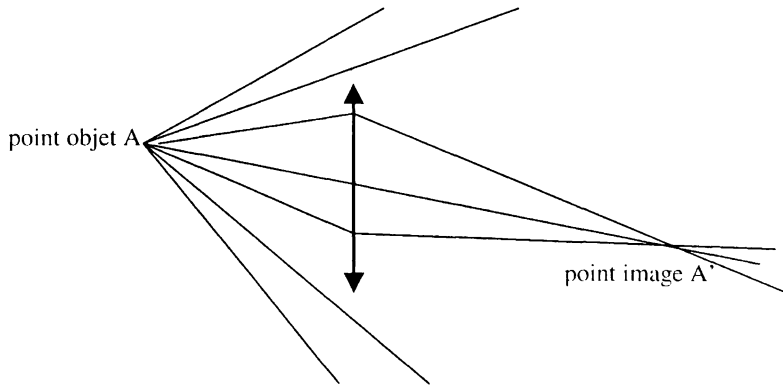
Selon la situation, il est nécessaire de faire fonctionner l'un, l'autre ou les deux types de regroupement. Dans tous les cas, l'analyse de ce que l'on observe en un point part, en quelque sorte, à « rebrousse-rayon » : c'est la position du plan d'observation (plan image conjugué ou plan focal image de la lentille) qui fixe le type de regroupement à opérer (Viennot, 1996b ; Colin, 1997).

Les trois situations analysées ici confrontent, de manière plus ou moins explicite, les étudiants à ce choix de regroupement. Dans chaque cas, nous situerons les réponses données par les étudiants par rapport aux réponses classiquement attendues que nous rappellerons pour chaque question. Nous n'envisagerons pas l'intervention d'un traitement analytique complet en termes d'optique de Fourier appliquée à la conjugaison optique comme aux situations classiques de diffraction (voir par exemple Goodman, 1972).

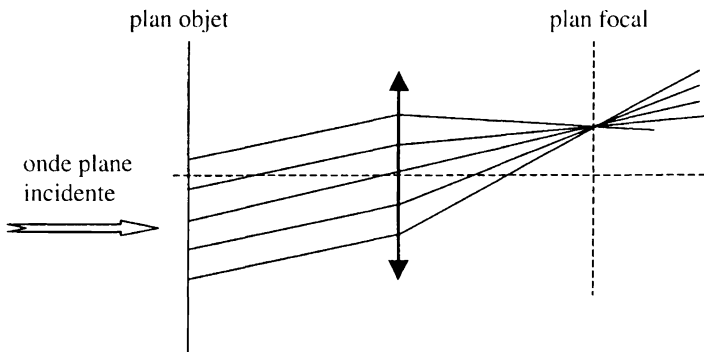
Notre analyse ne constitue qu'une étape vers une explicitation du contenu que pourrait viser l'enseignement, à propos de ce que l'on nomme souvent les modèles « géométrique » et « ondulatoire ». Nous comptons sur d'autres volets de notre recherche (analyse fine du contenu, analyse de manuels, enquête auprès d'enseignants) pour informer une tentative de formulation d'un contenu qui soit accessible à la population d'étudiants concernée tout en restant cohérente.

ENCADRÉ 1

Analyse classique de situations en termes de regroupements de « rayons » dans deux cas : conjugaison d'optique géométrique (a), figure de diffraction (b).



(a) Conjugaison objet-image en optique géométrique



(b) Obtention de la figure de diffraction d'un objet

2. PREMIÈRE MISE EN ÉVIDENCE

2.1. Présentation du questionnaire 1

Le texte de ce questionnaire (Dreyer, 1996) se fonde sur une situation courante en travaux pratiques d'optique : on « agrandit » une figure d'interférence par l'usage d'une lentille. On pourrait d'ailleurs, de la même manière, « agrandir » une figure de diffraction.

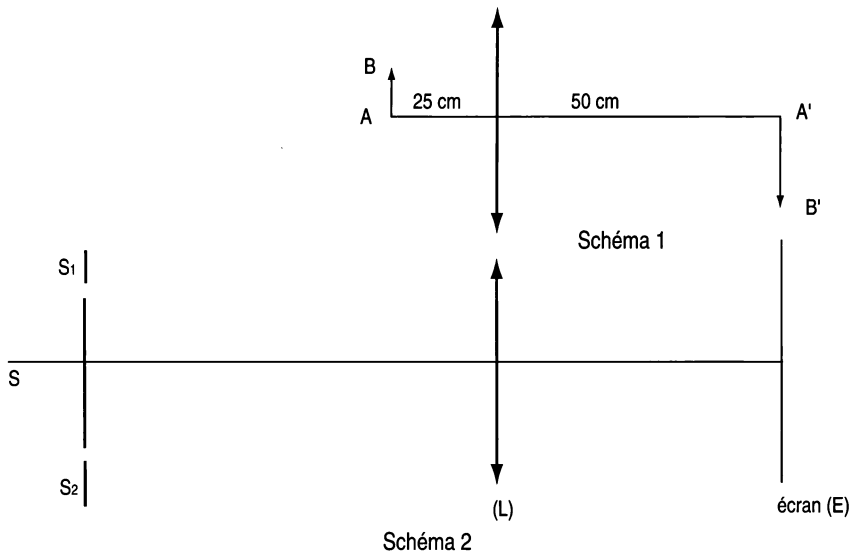
Il s'agit donc d'une invitation à expliciter le contenu d'une expérience classique d'enseignement.

Le texte du questionnaire est reproduit en encadré 2.

ENCADRÉ 2

Texte du questionnaire

Dans le dispositif représenté sur le schéma 2, la lentille (L) est telle qu'on obtient la correspondance objet réel-image réelle suivant le schéma 1. La lentille (L) est utilisée pour faire apparaître sur l'écran (E) des franges d'interférence dues aux sources ponctuelles cohérentes S_1 et S_2 .



L'échelle des schémas 1 et 2 selon l'axe horizontal est la même.
L'écartement des sources S_1 et S_2 N'EST PAS à la même échelle.

Questions

On observe sur (E) des franges nettes : ceci est-il l'image de quelque chose à travers (L) ?

Oui De quoi est-ce l'image ? Expliquer.

Non De quoi d'autre s'agit-il ? Expliquer.

2.2. Les réponses attendues au questionnaire 1 : « deux modèles »

Une réponse couramment considérée comme correcte est qu'on observe sur l'écran l'image de la distribution lumineuse (des franges d'interférences) dans le plan conjugué, à 25 cm en avant de la lentille. Il nous semble au moins aussi correct de dire que les franges observées sur l'écran, derrière la lentille, sont la distribution d'intensité lumineuse résultant des interférences entre les ondes diffractées en S_1 et S_2 (voir en annexe un rappel du principe du dispositif des trous d'Young). Chacune de ces ondes subit, dans la lentille, une transformation de type conjugaison optique (entre S_1 et son image S'_1 , respectivement S_2 et S'_2). Aux points situés à 25 cm en avant de la lentille, les deux ondes se superposent sans avoir, sauf exceptionnellement, la même phase. Remarquons pourtant que chacun de ces points ne constitue pas un objet ponctuel au sens habituel du terme puisqu'il n'est pas la source d'une onde sphérique.

En tout état de cause, l'argumentation doit mettre en œuvre à la fois un phénomène d'interférences typiquement ondulatoire et l'action de la lentille sur la lumière en relation avec la conjugaison optique.

Si l'on souhaite déterminer les deux trajets de lumière aboutissant au point d'observation M' , ce qui n'était pas demandé, le plus simple est de procéder comme suit.

La connaissance des positions des plans objet et image, telles que figurées sur le schéma 1 de l'énoncé de la question 1 (encadré 2), permet de construire l'image de tout point appartenant au plan objet en se servant, par exemple, du rayon central non dévié par la lentille. De là, on peut déduire tout trajet de lumière parvenant en M . La construction des trajets de la lumière issus de S_1 et S_2 qui aboutissent au point M' est donnée en figure 1. Elle s'effectue, en quelque sorte, à « rebrousse-rayon » : à partir de la connaissance du point M' de l'écran, on peut déterminer la position du point M et, enfin, effectuer les tracés correspondants entre la source et ce point M .

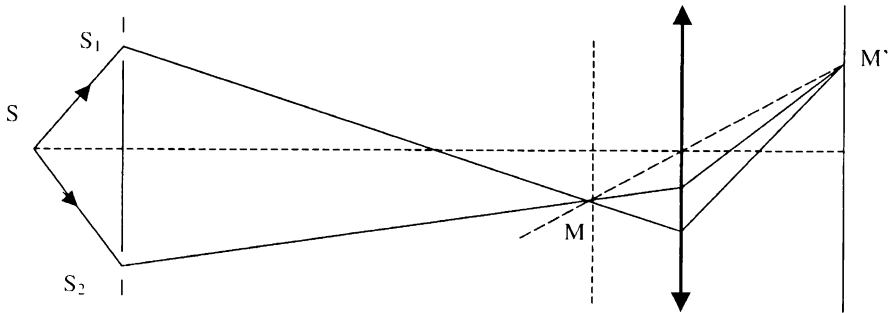


Figure 1 : **Schéma correct (non demandé) pour le dispositif du questionnaire 1**

L'égalité entre les deux chemins optiques correspondant aux deux trajets joignant M et M' assure que l'état interférentiel est le même en ces deux points. On comprend alors pourquoi la distribution d'intensité lumineuse sur l'écran est identique, au grandissement près, à celle que l'on obtiendrait en mettant un écran au plan objet.

Nous voyons donc que la situation proposée ne nécessite, à ce niveau d'analyse, aucun algorithme complexe. La difficulté réside plus ici dans la combinaison de deux situations classiques, dispositif des trous d'Young d'une part, « déviation » d'un trajet de lumière et formation d'une image par une lentille de l'autre. Ces questions appartiennent par tradition à deux approches différentes, optique ondulatoire et optique géométrique, ici impliquées dans une situation « mixte ». Il est alors nécessaire de mettre en oeuvre les deux approches afin de comprendre, d'une part, la sélection opérée sur tous les tracés que l'on peut envisager à partir des sources diffractantes S_1 et S_2 pour trouver ceux qui parviennent au point M' et, d'autre part, le statut de ce qui est observé sur l'écran.

2.3. Conditions d'enquête

Cette enquête porte sur un ensemble de 120 étudiants : 71 étudiants de classes de Mathématiques Spéciales Technologiques d'un lycée parisien et 49 étudiants de l'université Denis Diderot (Paris 7) en licence de physique. Les résultats très voisins de ces deux échantillons ont été regroupés. La durée de passation du questionnaire est de 15 minutes environ. Elle intervient après enseignement des interférences.

2.4. Analyse des réponses

Nous avons analysé ces réponses en nous centrant sur l'utilisation des modèles géométrique et/ou ondulatoire opérée par les étudiants pour justifier leurs réponses. La teneur de ces justifications nous intéresse plus, en l'occurrence, que l'affirmation ou la négation de la formation d'une image sur l'écran. Les catégories regroupant l'ensemble des réponses ont été construites relativement à cette problématique. Elles sont décrites de manière brève dans le tableau 1, assorties des taux d'occurrence correspondants. Les commentaires que nous citons dans l'analyse qui suit préciseront la signification de ces catégories.

catégorie de réponses	réponses brutes	
(1) « deux modèles » avec localisation du plan objet	OUI	11 %
(2) « deux modèles » mais pas de localisation du plan objet	OUI	13 %
(3) « un seul modèle (géométrique) »	OUI ou NON	18 %
(4) « un seul modèle (ondulatoire) »	NON	28 %
(5) autres justifications fausses	OUI ou NON	6 %
(6) sans justification ou sans réponse	OUI ou NON ou rien	24 %

Tableau 1 : Types de réponses au questionnaire 1 et pourcentages associés

Tout d'abord, nous constatons la faiblesse du pourcentage de réponses (24 % : catégories (1) et (2)) s'appuyant sur deux modèles. Parmi celles-ci, la moitié seulement (11 % : catégorie (1)) manifeste une compréhension, encore incomplète, de la conjugaison objet-image. Ensuite, nous remarquons la forte proportion d'étudiants (24 % : catégorie (6)) n'apportant aucune réponse ou des réponses sans justification.

Enfin, et c'est pour nous le résultat le plus important, nous notons que près d'un étudiant sur deux (46 % : catégories (3) et (4)) n'utilise qu'un seul des deux modèles pour tenter d'interpréter la situation.

Pour les étudiants qui ne s'appuient que sur l'optique géométrique (catégorie (3)), les franges présentes sur l'écran sont considérées comme une image et impliquent donc la recherche des sources lumineuses constituant l'objet. Les seules présentes étant les sources S_1 et S_2 , les étudiants donnent la réponse type suivante : « *c'est l'image des sources ponctuelles S_1 et S_2* ». Certains vont même jusqu'à écrire « *on observe l'image de l'objet AB* » marquant leur souci de trouver une source « matérielle » là où il n'en existe pas.

Les réponses négatives s'appuyant sur le modèle ondulatoire (catégorie (4)) font référence, plus ou moins explicitement, à la formation sur l'écran de quelque chose (figure ou franges d'interférences) sans liaison explicite avec la conjugaison mise en jeu en optique géométrique. Voici deux exemples de ce type de réponses :

« *Ce n'est pas une image, c'est une interférence entre les ondes lumineuses cohérentes.* »

« *Ce n'est pas une image, c'est une figure d'interférence entre les deux ondes lumineuses issues des foyers secondaires S_1 et S_2 .* »

Dans certaines de ces formulations apparaît le terme « rayon » dont on ne peut exclure qu'il soit associé à l'optique géométrique, mais le rôle de la lentille est passé sous silence :

« *Ce n'est pas une image, ce sont des franges d'interférences dues à l'intersection de deux rayons provenant de S_1 et S_2 .* »

« *Ce n'est pas une image. On visualise les interférences entre les rayons issus de S_1 et ceux issus de S_2 sur l'écran.* »

La difficulté de la synthèse entre optiques géométrique et ondulatoire peut même s'exprimer par une assez brutale négation du rôle de la lentille, uniquement pensée comme système « imageur » :

« *Non, ce n'est pas une image. Pour qu'il y ait une image d'un objet sur l'écran par rapport à la lentille, il faudrait que l'objet soit placé à 25 cm avant la lentille. Donc la lentille n'a pas de rôle. On voit les franges de l'interféromètre d'Young sur l'écran.* »

Enfin elle peut se traduire graphiquement, comme sur le schéma reproduit en figure 2.

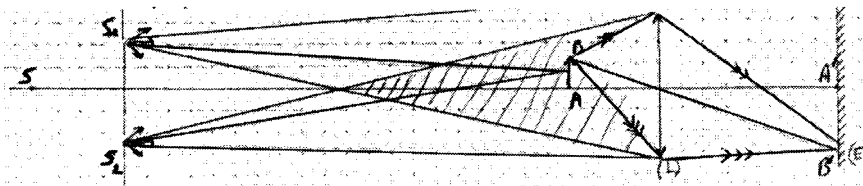


Figure 2 : **Un schéma en réponse au questionnaire 1**
Disjonction de deux types de construction

Sur ce schéma, fourni spontanément par l'étudiant, aucune relation n'est suggérée entre la partie gauche représentant une situation d'interférences et la partie droite reproduisant la construction de l'image $A'B'$ de l'objet AB .

D'autres constructions du même type seront largement rencontrées à propos des deux questionnaires analysés plus bas.

2.5. Bilan pour le questionnaire 1

Nous avons souligné les difficultés inhérentes à la situation proposée : bien que celle-ci soit très classique, elle n'en est pas pour autant simple à analyser puisqu'elle combine deux situations, l'une typique d'optique ondulatoire – le dispositif des trous d'Young – l'autre typique de l'optique géométrique – la formation d'une image par une lentille mince convergente. Les étudiants sont donc amenés à mettre en oeuvre les deux modèles.

Outre la faiblesse du pourcentage de réponses faisant apparaître clairement les deux modèles (11 %), nous retiendrons que près d'un étudiant sur deux ne semble utiliser qu'une seule approche à la fois, géométrique ou ondulatoire, et ne peut donc pas parvenir à une synthèse cohérente. Une difficulté apparaît ici liée au caractère non classique de « l'objet » : franges d'interférences non « matérialisées ».

En matière de schéma, rien n'était demandé. Il suffisait de s'appuyer sur la définition de la conjugaison optique objet-image et, à la limite, un schéma était susceptible de compliquer les choses. Celui que nous avons cité en montre bien toute la difficulté : comment utiliser les mêmes tracés dans deux types de construction ? Les tracés utilisés pour interpréter l'état interférentiel d'un point du plan conjugué de l'écran (en figure 2) s'arrêtent net, dans ce schéma, lorsqu'il faut aborder la lentille pour poursuivre la construction.

Les questionnaires suivants mettent l'accent, cette fois, sur les constructions de schémas et donc sur les regroupements de tracés. En revanche, ils évitent la difficulté signalée sur le caractère non classique de « l'objet ». La conjugaison optique absente dans la situation précédente est cette fois pleinement assurée (questionnaire 2) par la présence d'un objet bien matériel : une diapositive.

3. IMAGE GÉOMÉTRIQUE D'UN OBJET DIFFRACTANT : QUESTIONNAIRE 2

Le cadre de l'enquête est celui d'un examen (juin 1996) après un enseignement de licence sur les ondes, dont la diffraction a constitué l'un des derniers sujets traités. L'essentiel du problème posé porte sur le phénomène de diffraction observé dans le plan focal d'une lentille. La

formation de l'image géométrique n'intervient que comme question préliminaire (c'est sur elle que portera notre analyse) et comme question finale où l'on demande de décrire l'aspect de l'image obtenue après un filtrage spatial. L'analyse s'appuie sur les réponses de 169 étudiants.

3.1. Énoncé du questionnaire 2

L'encadré 3 donne le texte du questionnaire 2.

ENCADRÉ 3

Image géométrique d'un objet diffractant : questionnaire 2

Une diapositive représentant un motif géométrique est placée, comme l'indique le schéma ci-dessous, à une distance $p = 75$ cm d'une lentille convergente de distance focale $f = 50$ cm, perpendiculairement à l'axe optique de la lentille. La diapositive est éclairée, sous incidence nulle, par une onde plane monochromatique (longueur d'onde $\lambda = 500$ nm).

L'image de la diapositive se forme sur un écran placé à une distance d de la lentille. Sur un schéma analogue à celui du texte, tracer les trajectoires d'au moins trois rayons issus de la diapositive et convergeant en un point P de l'écran, en dehors de l'axe optique.

3.2. Réponse attendue

L'objet « flottant » que constituait les franges d'interférences du questionnaire précédent, se trouve remplacé ici par un objet tout à fait matériel, une diapositive. Les deux modèles géométrique et ondulatoire

interviennent conjointement : chaque point de la diapositive constitue par diffraction un point dont la lentille fournit l'image optique (nous ne pouvons pas ici entrer dans le détail des mécanismes intervenant au sein de la diapositive et nous nous contenterons de rappeler qu'il s'agit d'une approximation dont les conditions de validité sont satisfaites dans la situation présentée). Voici donc bien en oeuvre deux approches : diffraction et imagerie optique.

Classiquement, la construction de l'image optique s'appuie sur le tracé de rayons particuliers dont nous connaissons la marche. Le tracé d'un seul rayon suffit pour trouver le point objet correspondant au point image P puisque les positions des plans image et objet sont connues. On attend donc, par exemple, le tracé du rayon (1) passant par le centre optique de la lentille ou d'un rayon (2) passant par un foyer (figure 3). Les tracés des autres rayons demandés devant passer par les points objet et image peuvent ensuite être déterminés grâce à la seule connaissance du couple objet-image en cause.

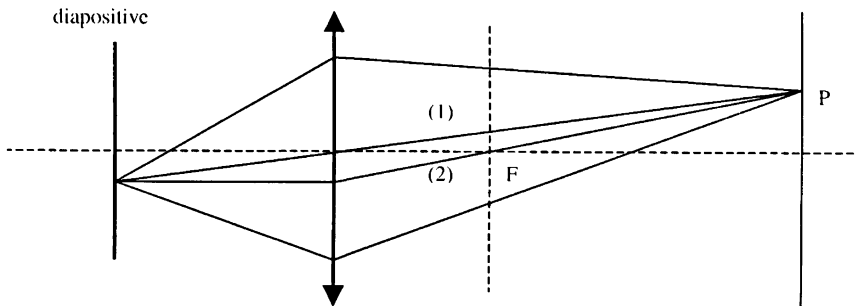


Figure 3 : Une réponse correcte au questionnaire 2

3.3. Analyse des réponses

Les résultats sont donnés dans le tableau 2.

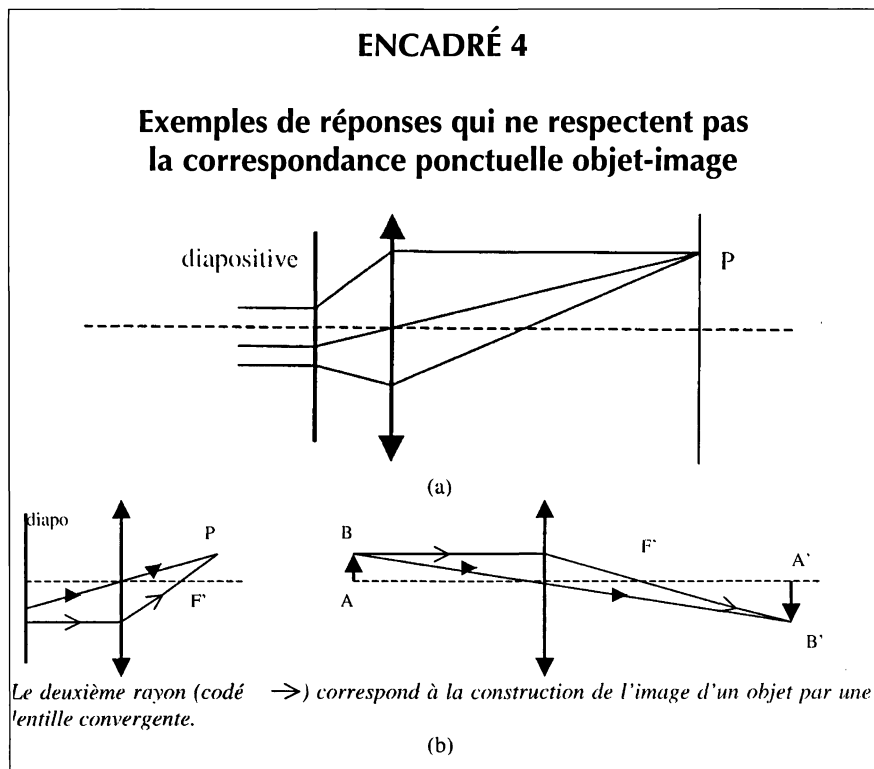
Construction correcte	27 %
Construction incomplète (traçage de deux rayons seulement)	2 %
Construction fautive	59 %
Sans réponse	12 %

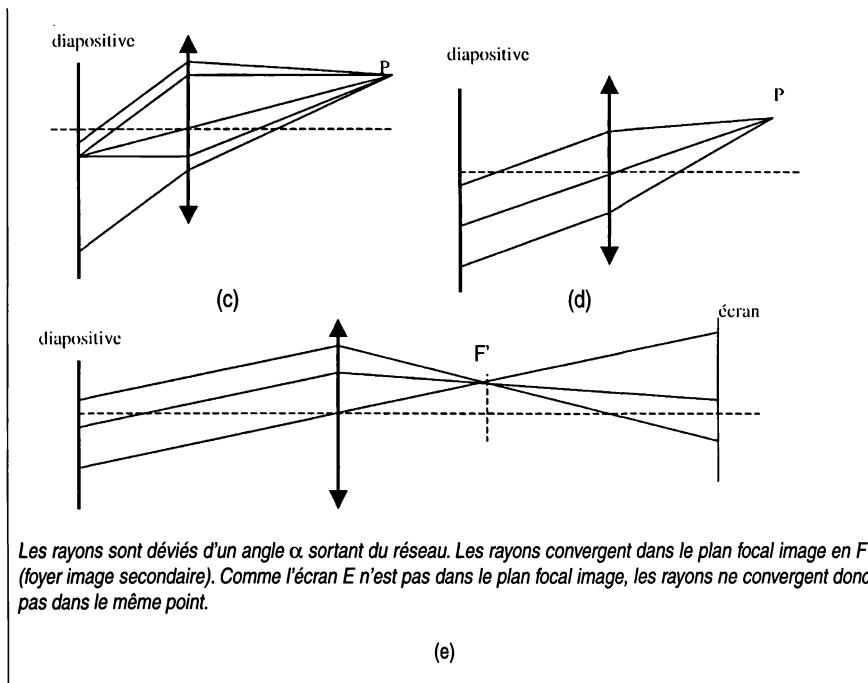
Tableau 2 : Catégories de réponses au questionnaire 2 et pourcentages associés

Seul un étudiant sur quatre effectue correctement la construction.

L'examen des constructions fausses (59 %) autorise un premier constat : dans la presque totalité de ces cas (54 % du total), la correspondance point à point n'est pas réalisée : pour plus d'un étudiant sur deux, l'idée de groupement de rayons issus d'un point et convergeant en un autre point n'a pas prévalu dans cette situation qui implique aussi la diffraction. L'encadré 4 rassemble des exemples de telles réponses.

Un aspect commun à ces schémas est la convergence vers un point P au delà de la lentille. Cependant les tracés en cause ne proviennent pas tous du même point de la diapositive. Dans la moitié de ces réponses (soit un quart de l'effectif total : 27 %), les rayons incidents proviennent de points différents mais respectent certaines règles de l'optique géométrique (réponse (a)). La réponse (b) montre que ce n'est pas faute d'une connaissance du schéma prototypique. Seulement, cette connaissance n'a pas installé l'essentiel, c'est-à-dire le critère auquel est astreint le groupement des rayons convergeant au point image P : tous les rayons issus du point objet, et rien que ceux-là, convergent au point image.





Pour l'autre moitié (23 % de l'effectif total), c'est la nécessité de parallélisme des rayons incidents qui semble avoir prévalu (réponse (d)). Tous les rayons incidents sur la lentille sont parallèles entre eux, comme lorsque l'on étudie la diffraction et elle seule. Ces rayons convergent en un point qui est censé appartenir à l'image de la diapositive formée par la lentille.

La réponse (e), inadaptée mais correcte, rappelle d'ailleurs que si l'on est parti comme d'habitude de la diapositive avec des rayons parallèles, il est bien difficile d'assurer ensuite la convergence requise au point P.

La réponse (c) illustre une catégorie minoritaire de réponses (4 % de l'effectif total), intermédiaire entre les types de réponses (a) et (d), où tout irait bien sans l'adjonction de rayons parallèles entre eux, et donc issus de points différents de la lentille.

3.4. Bilan pour le questionnaire 2

Nous avons pensé que la mise en oeuvre de la conjugaison optique serait facilitée du fait du remplacement de l'objet « flottant » du premier questionnaire, les franges d'interférence, par un objet matériel, la diapositive

en l'occurrence. Or, dans ces conditions apparemment plus favorables, la mise en œuvre de la conjugaison optique apparaît ici comme très perturbée par la situation de diffraction.

Un étudiant sur cinq va jusqu'à faire subir à un ensemble de rayons parallèles, regroupement classique en étude de diffraction, le sort normalement assigné à un ensemble de rayons émis par un point unique de la diapositive, dont la lentille formerait l'image sur l'écran si celui-ci se trouvait dans le plan conjugué de la diapositive.

Du fait de la complexité de l'onde diffractée par l'objet, il est nécessaire, pour l'analyser, d'effectuer une sélection bien précise des tracés envisagés. Cette idée, et le critère de sélection à mettre en œuvre, semblent bien peu présents dans les réponses d'étudiants devant cette situation perturbante : introduction d'une question typique d'optique géométrique dans un contexte « fortement ondulatoire ».

4. FIGURE DE DIFFRACTION D'UN OBJET : QUESTIONNAIRE 3

Si la diffraction apparaît perturbante dans le questionnaire 2, il est néanmoins tout à fait indispensable de la prendre en compte. En effet, sans une action de la diapositive sur l'onde plane, on voit mal comment l'onde, au delà de la diapositive, pourrait porter une information sur celle-ci. S'interroger sur la nature de cette action est alors essentiel. Les nombreux « rayons » obliques observés sur les schémas relatifs à la question précédente suggèrent que quelque chose du registre de la diffraction a été pris en compte, mais quoi ? Les questions proposées ici éclairent la façon dont les étudiants comprennent ce point. On notera que la démarche proposée dans cette série d'items procède, comme nous l'indiquions plus haut, à « rebrousse-rayons », c'est-à-dire de l'aval (le point M) vers l'amont (les trous).

Il faut aussi remarquer que cette situation, banale entre toutes dans un cours de licence qui concerne la diffraction, n'est pas si anodine que cela. En effet, tout se passe « normalement » jusqu'à la lentille : comme d'habitude en diffraction, on va se trouver en présence de tracés parallèles issus des divers points de la diapositive. En aucun cas, ceux-ci ne symbolisent une onde plane, un plan perpendiculaire à leur direction n'est pas davantage un plan d'onde : ne passe-t-on pas force heures d'enseignement à calculer les déphasages associés ? Mais la lentille va être, en général sans beaucoup d'explications préalables de la part du corps enseignant, considérée comme faisant sur ces « rayons » le même travail

que si ils appartenait à une onde plane : chacun est dévié vers le foyer secondaire correspondant. L'analyse porte sur les réponses de 251 étudiants de licence données à l'occasion d'un partiel sur les ondes (mai 1996).

4.1. Énoncé des questions (questionnaire 3)

L'énoncé des questions sur lesquelles porte l'analyse est donné en encadré 5.

ENCADRÉ 5

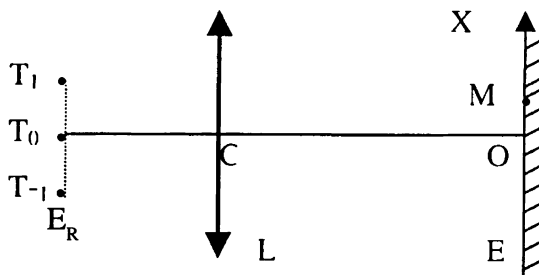
Figure de diffraction d'un objet : questionnaire 3 (présentation de la situation et questions)

Un écran (E_R) est percé de trois trous identiques T_0 , T_1 , T_{-1} , séparés par une distance l . Une lentille convergente (L) de distance focale f est disposée à la suite de l'écran (E_R), son axe optique coïncidant avec l'axe de symétrie de (E_R) perpendiculaire à cet écran.

Un autre écran (E) coïncide avec le plan focal image de (L)

On éclaire l'écran (E_R) avec une onde plane monochromatique de longueur d'onde λ , se propageant selon la direction perpendiculaire à l'écran.

On s'intéresse à la répartition de l'intensité lumineuse reçue sur l'axe OX de l'écran (E) (voir le schéma).



Les trois trous très fins sont assimilables à des sources ponctuelles.

On considère un point M sur OX , d'abscisse X .

Questions

- 1)
 - a) Représenter sur un schéma, identique à celui du texte, les trajets des pinceaux lumineux issus des trous et qui parviennent en M.
 - b) Expliquer votre réponse.
 - c) Quel phénomène, au niveau des trous, permet que la lumière suive effectivement ces trajets ?
- 2) Calculer l'amplitude lumineuse en M, à un facteur de phase près, en fonction de X et de l'amplitude U_0 de l'onde au niveau de chaque trou. Justifier le principe de ce calcul.

4.2. Réponses attendues

Une construction correcte (question 1a) est donnée figure 4.

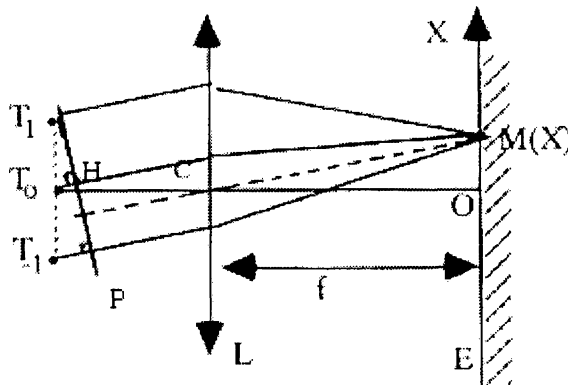


Figure 4 : **Schéma attendu*** en réponse au questionnaire 3 (*voir le texte)

Pour être jugée correcte, la réponse doit faire figurer le tracé CM joignant le centre C de la lentille au point M d'observation. En effet (question 1b), seuls les rayons parallèles à CM parviennent en M car M est un foyer secondaire. La justification de la construction doit donc faire référence aux propriétés des lentilles. Notons qu'en toute rigueur, il n'existe pas de pinceau lumineux issu d'un trou supposé ponctuel et convergeant strictement au point M mais bien un tracé unique. Si un pinceau issu d'un trou est tracé, il doit converger au point image de ce trou et non en M.

Pour justifier les trajets à partir des trous (question 1c), l'étudiant doit mentionner la diffraction : les trous sont suffisamment fins pour renvoyer, par diffraction, de la lumière dans un large éventail de directions ; l'ensemble « lentille-point M de l'écran » sélectionne l'une d'entre elles.

Le calcul du déphasage entre les ondelettes parvenant au point M (question 2) est très classique. Il utilise la relation de proportionnalité liant phase de l'ondelette et chemin optique parcouru. On se ramène donc pour calculer la différence de phase entre les ondelettes issues de deux trous, par exemple de T_0 et T_1 , au calcul de la différence de chemin optique pour aller de T_0 à M et de T_1 à M (figure 4). Cette différence est celle existant entre les distances de chaque trou à un plan P perpendiculaire à la direction commune des rayons incidents considérés (figure 4). En effet, au delà d'un tel plan, les chemins optiques qui restent à parcourir jusqu'à M sont tous égaux du fait des propriétés de la lentille.

4.3. Analyse des réponses au questionnaire 3

4.3.1. Question 1 du questionnaire 3

Quelques chiffres seulement suffiront à situer la difficulté globale ressentie par les étudiants, pour cette première question, que l'on pourrait considérer comme élémentaire à ce niveau d'études : seul un étudiant sur deux répond correctement aux questions 1a et 1b, et mentionne la diffraction en réponse à la question 1c.

Parmi les justifications correctes en 1b, on trouve chez un peu moins de 10 % des étudiants l'idée que ces tracés parallèles ont été sélectionnés par le choix du point M et la lentille.

Les justifications incorrectes, voire fausses, ou relatives à des constructions fausses, en question 1b et 1c concernent près d'un tiers des étudiants (respectivement 37 % et 28 %).

Pour ce qui concerne la construction demandée, nous retenons plus particulièrement les justifications fausses (14 % du total), qui accompagnent des tracés parallèles dessinés à la sortie des trous (29 % de l'effectif total ; ces tracés sont conformes, entre les trous et la lentille, à la réponse correcte). Y sont présentes les idées suivantes illustrées par les réponses de l'encadré 6 :

- les rayons incidents sur la lentille viennent de l'infini, « de la même source », « traversant tout droit » les trous (encadré 6 (a), (b), (c), (d)) ;
- chaque « rayon » émergeant d'un trou est *la (seule ?) suite* du rayon qui est arrivé sur ce trou, comme en témoignent les expressions « dévié », « déviation », ou des symbolisations continues (encadré 6 (e), (f), (g)).

Cette dernière idée, présente également en accompagnement de constructions fausses, concerne au total 14 % des étudiants.

4.3.2. Question 2 du questionnaire 3

Les aspects de réponses que l'on vient de mettre en évidence (question 1) trouvent un écho atténué dans les réponses à la question 2. Celle-ci prend un tour plus calculatoire, et d'ailleurs, sur 240 étudiants n'ayant pas proposé (à l'instar de 11 autres) une solution purement calculatoire s'appuyant sur l'optique de Fourier, 80 % parviennent à un résultat correct, 57 % accompagnant ceci d'un schéma correct, tandis que 20 % s'accommodent très bien d'un schéma faux pour aboutir à ce même résultat correct.

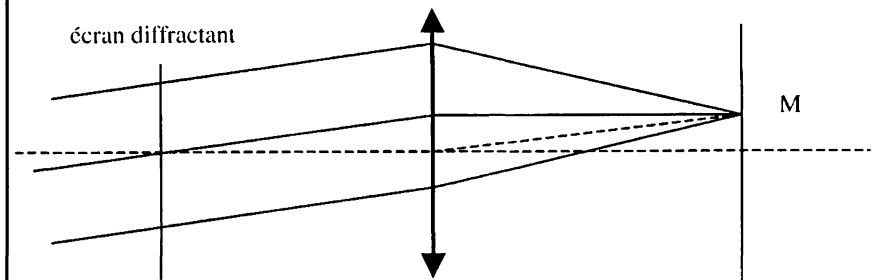
Seuls 19 % des étudiants donnent une justification de leur calculs. Le pourcentage de justifications réellement satisfaisantes reste difficile à estimer. Les justifications par une discussion de chemins optiques parcourus débouche sur des difficultés de mise en œuvre de résultats d'optique géométrique. Le théorème de Malus (voir par exemple Born & Wolf, 1980), souvent évoqué, met alors en scène des surfaces d'onde. Or on a bien dit qu'il n'y en avait guère de disponibles dans les parages. Revoilà la question soulevée plus haut : pour chaque « rayon » diffracté, on admet que la lentille fait comme s'il s'agissait d'un représentant d'une onde plane, mais l'ensemble concerné n'en constitue pas une.

ENCADRÉ 6

Quelques idées fausses à propos de la diffraction

Les rayons viennent de l'infini comme ceux d'une onde plane et traversent les trous tout droit.

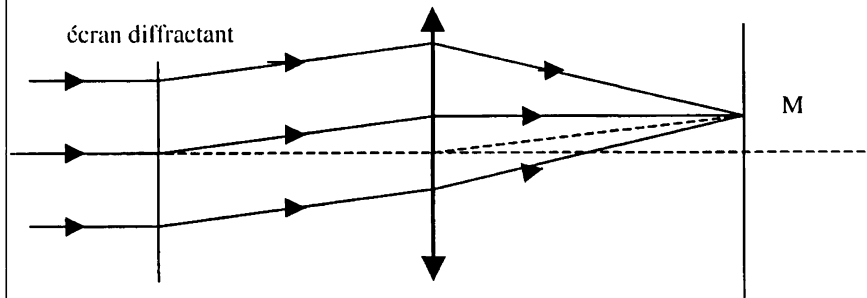
- (a) « Le faisceau lumineux provenant d'une source placée à l'infini, tous les rayons suivent un chemin parallèle les uns aux autres. Les trous laissent passer des rayons qui suivent toujours la même direction. »
- (b) « Le schéma définit un réseau à trois fentes (...) »



- (c) « Tous les pinceaux lumineux issus des trois trous convergent en un même point M de l'écran. En effet, ces trois faisceaux proviennent de l'infini (...) »
- (d) « L'écran E est dans le plan focal image de la lentille L. Donc le point M est l'image d'un objet venant de l'infini (...) »

Chaque rayon émergeant d'un trou est la suite du rayon qui est arrivé sur ce trou : le rayon est « dévié ».

- (e) « Les rayons incidents sont parallèles à l'axe et sont déviés d'un même angle. Tous les rayons émergents arrivent sur la lentille parallèles entre eux. »



- (f) « On considère les rayons parallèles qui sont déviés dû au phénomène de diffraction d'un même angle car ils sont parallèles avant d'atteindre les fentes (...) »
- (g) « Les rayons lumineux arrivant sur les fentes sont parallèles entre eux. Au passage des fentes, ces rayons sont déviés mais restent parallèles entre eux. »

4.4. Bilan pour le questionnaire 3

Nous nous proposons ici de mieux cerner la façon dont les étudiants prennent en compte le phénomène de diffraction, en centrant notre analyse sur les regroupements de « rayons » mis en jeu lors de l'obtention d'une figure de diffraction. Nous retenons les idées essentielles suivantes.

L'idée de sélection de tracés, fortement liée à celle de structure complexe de l'onde diffractée, semble souvent absente : ne sont pris en compte que les seuls tracés figurant sur les schémas, et rien, dans la plupart des réponses, ne suggère que chaque trou diffracte de la lumière dans un large éventail.

Cette absence peut conduire, d'une part, à une interprétation erronée de la diffraction comme une déviation des rayons incidents vers la direction des « rayons » diffractés représentés, d'autre part, à assimiler « rayons » diffractés dans une direction donnée et onde plane, assimilation déjà relevée dans plusieurs manuels d'enseignements (Colin, 1997).

De plus, l'absence d'un questionnement sur le statut des tracés amène certains étudiants à utiliser les règles de l'optique géométrique, par exemple celles données par le théorème de Malus, hors de leur cadre d'application : tous les tracés deviennent ainsi des rayons lumineux de l'optique géométrique, dont le parallélisme suggère l'existence d'une onde plane.

5. DISCUSSION

Le questionnaire portant sur le dispositif des trous d'Young (questionnaire 1) a mis en évidence combien il était difficile pour beaucoup d'étudiants de faire la synthèse des approches géométrique et ondulatoire. Près d'un étudiant sur deux apporte des réponses ne s'appuyant que sur un seul modèle, géométrique ou ondulatoire.

La « non-matérialité » de l'objet, en l'occurrence des franges d'interférence, ayant pu constituer un obstacle important, nous avons poursuivi notre enquête en utilisant un objet bien matériel, une diapositive (questionnaire 2). Même dans ce cas, la conjugaison optique, principe de base de la formation de l'image géométrique d'un objet, n'est pas mise en oeuvre par la moitié des étudiants. Elle se réduit pour beaucoup à la convergence au point image de « rayons » de provenance variée. Ceci est bien éloigné d'une compréhension en termes de regroupement de « rayons » issus du point objet et convergeant au point image.

La dernière partie de l'enquête (questionnaire 3) nous a permis de mettre en évidence les difficultés d'un grand nombre d'étudiants concernant le phénomène de diffraction, au regard plus particulièrement de la structure de l'onde diffractée et du statut des « rayons » représentés sur leurs schémas.

Nous avons souligné les points suivants :

- absence de l'idée de sélection des tracés suivant le point d'observation choisi, sans doute en étroite liaison avec la non-prise de conscience de la structure complexe de l'onde diffractée, si l'on en juge par la seule prise en compte des « rayons » diffractés suivant une direction donnée ;

– aucun questionnement sur le statut des tracés, ce qui amène à identifier ceux-ci systématiquement aux rayons lumineux de l'optique géométrique ; cette identification permet d'interpréter les faits suivants : d'une part présentation erronée de la diffraction comme une déviation des rayons incidents vers la direction (unique) des « rayons » diffractés représentés, d'autre part, assimilation des « rayons » diffractés dans une direction donnée à une onde plane, l'optique géométrique étant mise en oeuvre hors de son domaine de validité.

Au delà du constat habituel sur la distance entre les performances calculatoires des élèves et leur niveau de compréhension des phénomènes en cause, il nous semble important de revenir à la fois sur la nature des difficultés conceptuelles des étudiants et sur un éclairage des contenus enseignés qui réponde de manière appropriée à ces difficultés.

Quand tant d'études sur les difficultés en optique géométrique nous apprennent la prégnance d'un modèle global du transport de l'information lumineuse, l'objet émettant une image de lui-même qui se transporte en bloc jusqu'à l'écran, quand plus largement on sait que les raisonnements les plus répandus dans la physique commune prennent le format d'une histoire, alors on ne peut s'étonner qu'il soit difficile d'analyser des situations par procédure de tri dans un tout complexe, et encore plus d'effectuer ce tri à « rebrousse-rayons », c'est-à-dire comme si l'on remontait le temps.

Autre aspect des difficultés : les « rayons », chemins de lumière, prennent eux-mêmes le statut de héros de l'histoire, leurs tracés en deviennent le compte rendu. Cette vision qui réduit l'histoire à la géométrie laisse en route une partie de l'information : la phase. Elle n'autorise qu'une seule histoire pour un dessin donné : ainsi, des tracés parallèles représentent une onde plane, ils « viennent » de l'infini, nécessairement.

Ces résultats et ces réflexions nous semblent poser très fortement la question de la présentation adoptée, dans l'enseignement, pour les deux approches des phénomènes optiques impliqués : géométrique et ondulatoire. Quelle place fait-on traditionnellement, quel éclairage convient-il d'adopter, pour les aspects que nous venons de soulever ? Pourquoi laisser penser, par une symbolisation identique, qu'avant et après un trou d'Young, il s'agit du même rayon ? Comment signale-t-on, justifie-t-on, qu'un même tracé de « rayon diffracté » n'appartenant, de manière évidente, à aucune onde plane ou sphérique, se calque ensuite, à travers la première lentille rencontrée, sur le tracé d'un « rayon d'optique géométrique » qui serait lui associé à une onde plane ou sphérique ? Y a-t-il lieu de souligner que le statut d'un tracé dépend hautement de l'ensemble de tels tracés dans lequel on a décidé de l'inclure pour l'analyse d'un aspect donné de la situation ?

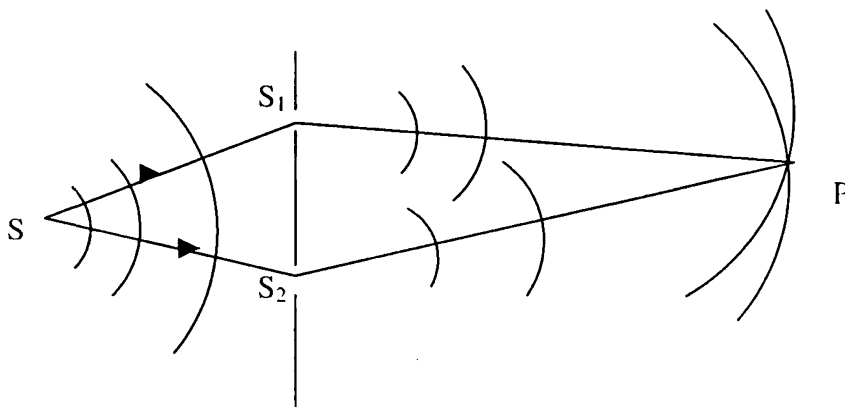
Telles sont les questions, au centre de nos recherches présentes, qu'il nous semble essentiel de prendre en compte si l'on veut définir, pour les situations impliquant à la fois diffraction et imagerie optique, un niveau de conceptualisation qui soit cohérent, moins complexe qu'une optique de Fourier généralisée, et adapté aussi bien aux étudiants de licence qu'à leurs enseignants. Ces derniers ne sont pas les moins importants à considérer puisque c'est d'abord eux qu'il conviendrait de convaincre pour la mise en place de toute proposition innovante.

BIBLIOGRAPHIE

- BORN M. & WOLF E. (1980). *Principles of Optics. Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Oxford, Pergamon Press.
- COLIN P. (1997). *Passage de l'optique géométrique à l'optique ondulatoire : l'idée de sélection par l'aval de l'information lumineuse*. Mémoire de tutorat, Université Paris 7.
- DREYER Y. (1996). *Optique géométrique et ondulatoire : enquête sur les difficultés des étudiants de Licence*. Rapport de stage de didactique. Paris Centre, C.I.E.S.
- FAWAZ A. & VIENNOT L. (1986). Image optique et vision : enquête en classe de Première au Liban. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 686, pp. 1125-1146.
- KAMINSKI W. (1989). Conceptions des enfants et des autres sur la lumière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 973-996.
- GALILI I. (1996). Student's conceptual change in geometrical optics. *International Journal of Science Education*, vol. 18, n° 7, pp. 847-868.
- GOLDBERG F.M. & MAC DERMOTT L. (1987). An investigation of student's understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. *American Journal of Physics*, vol. 55, n° 2, pp. 108-119.
- GOODMAN J. W. (1972). *Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie*. Paris, Masson.
- MAURINES L. (1986). *Premières notions sur la propagation des signaux mécaniques : étude des difficultés des étudiants*. Thèse, Université Paris 7.
- MAURINES L. (1993). Mécanique spontanée du son. *Tréma*, n° 3-4, pp. 77-91.
- MAURINES L. (1995). Les étudiants et la phase propagative : résultats d'une enquête exploratoire. In G. Mary & W. Kaminsky (Éds), *Actes du cinquième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques*. Reims, Université de Reims-Champagne-Ardennes et IUFM de Reims, pp. 107-123.
- MAURINES L. (1997). Raisonement spontané sur la diffraction. In J. Gréa (Éd.), *Actes du sixième séminaire national de la recherche en didactique de la physique, de la chimie et de la technologie*. Lyon, LIRDHiST, pp. 77-95.
- PFUNDT H. & DUIT R. (1994). *Student's Alternative Framework and Science Education*. Kiel, IPN.
- TIBERGHIAN A., JOSSEM E.-L. & BAROJAS J. (Éds) (1998). *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education (section C Student's knowledge and learning)* <http://www.physics.ohio-state.edu/jossem/ICPE/BOOKS.html>.
- VIENNOT L. (1996a). *Raisonnement en physique. La part du sens commun*. Louvain-la-Neuve, De Boeck Université.
- VIENNOT L. (1996b). *Le rayon lumineux en optique géométrique et en optique ondulatoire*. Rapport interne LDPEs, Université Paris 7.

ANNEXE

Le dispositif des trous d'Young peut s'analyser à partir du schéma suivant.



L'onde sphérique émise par la source ponctuelle S est diffractée par chacun des trous. Nous supposons les sources secondaires S_1 et S_2 ponctuelles. Ces sources sont cohérentes puisqu'elles sont issues de la même source ponctuelle S et elles émettent des ondes considérées comme sphériques. La cohérence temporelle des trains d'onde concernés est assurée (sauf « grande » différence de chemin optique entre les trajets SS_1P et SS_2P). L'intensité lumineuse en un point résulte de la superposition des deux ondes. Sa valeur dépend donc de leur phase relative au point P , laquelle se détermine en évaluant la différence des trajets (SS_1P et SS_2P) entre la source S et le point d'observation (il s'agit plus précisément des « chemins optiques », produits des distances parcourues par l'indice de l'air, mais cela revient au même ici). Bien entendu, un autre point d'observation amènerait à choisir d'autres tracés à partir de S_1 et S_2 .

Cet article a été reçu le 15/06/98 et accepté le 26/01/99.