

# Les étudiants, la diffraction de Fraunhofer et la formation des images en éclairage cohérent

## Students, the Fraunhofer diffraction and the coherent illumination optical imaging

Laurence MAURINES

IUFM de Créteil  
LDPES, Université Denis Diderot Paris 7, case 7086  
2 Place Jussieu, 75251 Paris cedex 05, France.

### Résumé

*Cette recherche analyse comment les étudiants interprètent le schéma utilisé dans l'étude de la diffraction de Fraunhofer et envisagent la formation des images dans des situations relevant de l'optique physique. Elle confirme leur tendance à employer un raisonnement de nature « géométrique » dans une situation ondulatoire. Ce raisonnement entraîne que l'image d'une source ponctuelle à l'infini est située derrière le plan focal image de la lentille lorsque la diffraction ne peut être négligée, que les images de la source et d'un objet transparent éclairé n'existent pas simultanément ou sont confondues. Elle révèle de plus une tendance à considérer qu'il n'y a pas d'image en présence de diffraction.*

**Mots clés :** *raisonnement commun, université, image, diffraction, éclairage cohérent.*

### **Abstract**

*This research analyses the ways students consider the ray diagram used in Fraunhofer diffraction and cope with the formation of images in situations where wave optics need to be used. It validates the hypothesis concerning the students' tendency to reason in a wave situation as if it was a geometric situation. Consequently, the image of a point source located at infinity is placed behind the image focus of the lens when diffraction has to be considered, the images of the source and of an illuminated transparent object cannot exist simultaneously or are confused. A tendency to consider that diffraction and optical imaging are two separate phenomena is revealed.*

**Key words** : *common reasoning, university, image, diffraction, coherent illumination.*

### **Resumen**

*Esta investigación analiza cómo los estudiantes interpretan el esquema utilizado en el estudio de la difracción de Fraunhofer y conciben la formación de las imágenes en situaciones relevantes de la óptica física. La misma confirma su tendencia a emplear un razonamiento de naturaleza « geométrica » dentro de una situación ondulatoria. Este razonamiento deduce que la imagen de una fuente puntual en el infinito, está situada detrás del plano focal de la imagen de la lente cuando la difracción no puede ser despreciada, y que las imágenes de la fuente y de un objeto transparente iluminada, no existen simultáneamente o están confundidos. Además revela una tendencia a considerar que no hay imagen en presencia de difracción.*

**Palabras claves** : *razonamiento común, universidad, imagen, difracción, iluminación coherente.*

## **1. INTRODUCTION**

Dans une précédente recherche (Maurines, 1997a, 1999a), nous avons analysé les difficultés rencontrées par les étudiants lors de la modélisation géométrico-ondulatoire de la propagation d'une onde dans un milieu de dimension trois, en présence ou non d'obstacles. Dans le cadre de cette modélisation, une onde est décrite au niveau macroscopique à l'aide de rayons de propagation de l'énergie et de surfaces d'onde et est reconstruite à partir d'un niveau « microscopique » fictif à l'aide du principe de Huygens-Fresnel. Nous nous sommes intéressés aux représentations graphiques et aux explications, données par des étudiants ayant suivi un

enseignement universitaire sur les ondes, à propos de deux situations géométriques (propagation en milieu illimité et face à un plan réfléchissant) et d'une situation ondulatoire (propagation à travers une « petite » ouverture « diffractante »), que ce soit dans le cas de la lumière ou du son. Nous avons constaté que le raisonnement « commun » sur la propagation des ondes en dimension trois a les caractéristiques suivantes :

– il tend à **simplifier** les phénomènes et les modèles. Les étudiants ne différencient pas clairement les concepts mis en jeu mais les amalgament ou les lient (il en est ainsi des concepts de surface d'onde et de surface isoamplitude, de rayon et de surface d'onde) ou bien encore les utilisent de manière dissociée (surface d'onde pour le son et le modèle ondulatoire, rayon pour la lumière et le modèle géométrique) ;

– il relève d'un modèle « **géométrique** » et non ondulatoire. Quelle que soit la situation, les étudiants restent au niveau macroscopique ; ils décrivent ce qui arrive aux rayons de propagation de l'énergie et les considèrent comme indépendants. Dans une situation de diffraction, l'onde du niveau macroscopique n'est pas reconstruite grâce aux sources de Huygens ; tout se passe comme si les rayons de propagation de l'énergie de l'onde incidente étaient réfléchis ou réfractés par les bords de l'ouverture et restaient indépendants après passage de l'ouverture ;

– il est de type **mécaniste**. Les étudiants semblent raconter l'histoire au niveau macroscopique d'objets fictifs qui se déplacent le long de trajectoires-rayons indépendants. De la non différenciation des concepts d'amplitude et de phase, il résulte que les étudiants semblent raisonner sur les « objets » des modèles géométriques (la « lumière », le « son »). Il existe cependant une différence importante entre les « objets » que l'on peut introduire pour rendre compte du raisonnement des étudiants et ceux des modèles géométriques. Tout se passe comme si les « objets » sur lesquels s'appuie le raisonnement des étudiants possédaient « quelque chose » leur permettant d'avancer, d'avoir une intensité, une forme, etc., ce « quelque chose » pouvant varier lors de la propagation. Pour rendre compte des différentes caractéristiques de ces objets une seule notion suffit. Cette notion est un concept hybride regroupant nombre des concepts mis en jeu dans un phénomène ondulatoire (la phase, l'intensité, la surface d'onde, la vitesse de propagation, la fréquence, etc.) et entraînant la variation simultanée de plusieurs grandeurs physiques. Elle a été appelée « capital » pour reprendre un terme introduit par Viennot (1979) et utilisé dans nos recherches antérieures sur la propagation des signaux selon une direction ;

– il tend à **matérialiser** les concepts, c'est-à-dire à les appréhender au travers d'aspects immédiats et perceptifs des phénomènes ou en référence à l'idée d'objet matériel. Les étudiants relient le concept de phase à celui d'intensité de l'onde et raisonnent ainsi sur une grandeur directement

accessible à l'observateur. Ils assimilent le concept de rayon à celui de trajectoire de particules et non à celui de direction de propagation de l'énergie.

Une fois ce raisonnement dégagé, la question s'est posée de le mettre à l'épreuve. D'une part, nous avons validé son caractère mécaniste dans la situation de propagation d'une onde à travers une « petite » ouverture « diffractante » (Maurines, 1997b). D'autre part, nous avons testé son caractère « géométrique » dans d'autres situations nécessitant l'utilisation d'un modèle ondulatoire scalaire : la diffraction de Fraunhofer et la formation des images en éclairage cohérent en présence ou non de diffraction (Maurines, 1999b). Ce sont les résultats de cette dernière recherche que nous présentons ici. Les difficultés soulevées par le modèle ondulatoire scalaire ont été peu explorées sur le plan de la didactique. La plupart des recherches parues sur les conceptions et les raisonnements dans le domaine des ondes concernent des situations dans lesquelles l'optique géométrique peut être utilisée : on trouve en particulier des études portant sur la formation des images par une lentille (Fawaz & Viennot, 1986 ; Goldberg & Mc Dermott, 1987 ; Feher & Rice, 1987 ; Kaminsky, 1989 ; Galili, 1996). Les autres concernent la propagation du son (Linder & Erickson, 1989 ; Linder, 1993) et celles que nous avons menées sur la propagation des signaux selon une direction (Maurines, 1986, 1992, 1998).

Nous traiterons chacun des thèmes de recherche séparément. Nous présenterons tout d'abord les questions explorées et le pourquoi de ces questions, puis la méthodologie utilisée et les résultats obtenus. Nous terminerons la présentation de chaque thème par une brève discussion. Quelques propositions pédagogiques concluront cet article.

## **2. DIFFRACTION DE FRAUNHOFER**

### **2.1. Objectif**

Dans la recherche précédemment citée sur la diffraction d'une onde à travers une « petite » ouverture (Maurines, 1997a), nous avons analysé comment des étudiants ayant suivi un enseignement universitaire sur les ondes expliquent et représentent graphiquement cette situation. Nous avons constaté que leurs réponses sont identiques à celles fournies par des élèves n'ayant reçu aucun enseignement sur les ondes (Maurines, 1997b) : elles concernent le niveau macroscopique et la déviation des rayons de propagation de l'énergie de l'onde incidente. La question s'est posée de savoir si le même type de raisonnement se manifestait dans des situations plus « scolaires » de diffraction de Fraunhofer. Pour cela, nous avons choisi

d'examiner comment les étudiants interprètent le schéma habituellement utilisé au niveau universitaire dans cette situation (voir le schéma 1). Précisons de suite que dans la deuxième partie de cet article nous nous intéresserons de nouveau à cette diffraction car c'est elle qui accompagne la formation des images optiques.

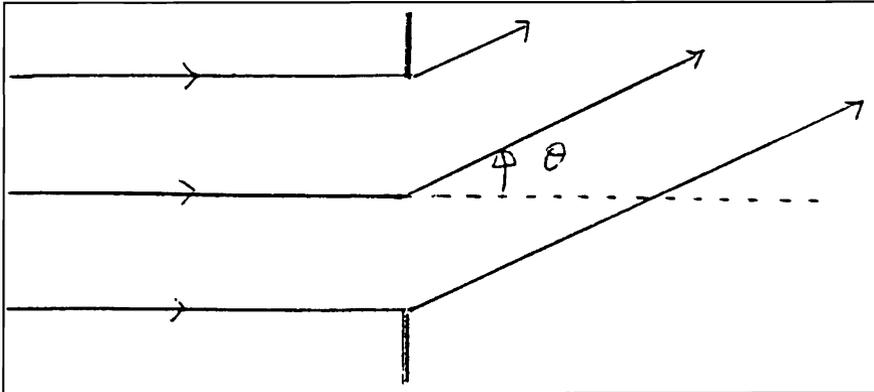


Schéma 1 : Schéma utilisé au niveau universitaire pour l'étude de la diffraction de Fraunhofer

## 2.2. Quelques remarques sur les différentes interprétations possibles du schéma de la diffraction de Fraunhofer

La diffraction de Fraunhofer est une situation ondulatoire étudiable par un modèle ondulatoire scalaire. Deux formulations en existent : l'onde du niveau macroscopique peut être décomposée sur une base d'ondes sphériques, celles émises par les sources de Huygens (modèle basé sur le principe de Huygens-Fresnel que nous avons appelé modèle « géométrico-ondulatoire ») ou sur une base d'ondes planes (modèle spectral de la diffraction - voir Françon, 1972 ; Goodman, 1972). Cela fait que l'interprétation du schéma n'est pas simple car elle n'est pas univoque. Nous parlerons dans ce qui suit d'interprétation au niveau des ondes élémentaires dès lors que l'on se place dans l'une de ces bases.

Dans le cas d'une **interprétation au niveau des ondes élémentaires basée sur le modèle géométrico-ondulatoire**, on considère que l'amplitude de l'onde en un point donné derrière l'ouverture est la somme des amplitudes des ondes sphériques émises par les sources de Huygens réparties sur l'ouverture. Les lignes parallèles tracées après l'ouverture « diffractante » sont alors considérées comme les rayons de propagation de la phase des ondes émises par les sources de Huygens. Le schéma

donné correspond au schéma habituellement utilisé dans le calcul de l'amplitude de l'onde résultant de la superposition de plusieurs ondes cohérentes, mais dans ce cas le point d'observation est amené à l'infini. L'amplitude de l'onde se propageant derrière l'ouverture dans la direction  $\Theta$  à l'infini est obtenue grâce à cette interprétation du schéma : le calcul montre que cette amplitude est égale à la transformée de Fourier de la répartition en amplitude de l'onde incidente sur l'ouverture. Les lignes représentées après l'ouverture ne sont donc pas les rayons d'une onde plane et il y a discontinuité de nature entre ce qui est représenté avant et après l'ouverture. En effet, les lignes correspondent à des rayons de propagation de la phase et de l'énergie de l'onde incidente, avant l'ouverture, alors qu'après, ce ne sont que des rayons de propagation de la phase d'ondes émises par les sources de Huygens. Le schéma à ce niveau pose problème puisqu'il y a continuité dans la représentation des lignes tracées.

Dans le cas d'une **interprétation au niveau des ondes élémentaires basée sur le modèle spectral**, on considère que l'amplitude d'une onde dans un plan perpendiculaire à sa direction de propagation est égale à la somme des amplitudes d'ondes planes sinusoïdales se propageant dans toutes les directions. La direction de propagation de ces ondes planes est caractérisée par des fréquences spatiales. La fonction donnant l'amplitude des ondes planes en fonction des fréquences spatiales est appelée « spectre angulaire ». Ce spectre angulaire est égal à la transformée de Fourier de l'amplitude de l'onde étudiée dans le plan initialement considéré. L'angle de la direction de propagation d'une des composantes de la base d'ondes planes avec celle de l'onde étudiée est d'autant plus grand que la fréquence spatiale est grande. La propagation des composantes d'ondes planes depuis ce plan introduit pour chaque composante un déphasage. Ce déphasage dépendant de la valeur de la fréquence spatiale, les répartitions d'amplitudes de l'onde étudiée dans des plans successifs ne sont pas identiques. Le spectre d'ondes planes d'une onde arrivant sur une ouverture est élargi par passage à travers l'ouverture. L'interprétation du schéma peut alors se faire de la manière suivante. Avant l'ouverture sont représentés les rayons de propagation de la phase et de l'énergie de l'onde plane incidente. Après l'ouverture, le spectre de l'onde ne se réduisant plus à une seule composante d'ondes planes, sont représentés les rayons de propagation de la phase d'une des composantes de la base d'ondes planes. L'amplitude de cette composante est donnée par la transformée de Fourier de la répartition en amplitude de l'onde étudiée sur l'ouverture. Dans cette interprétation, aucune source secondaire n'intervient et le schéma peut poser problème. D'une part, une onde plane n'est pas localisée et les lignes tracées après l'ouverture ne proviennent que de la partie du plan où se situe l'ouverture. D'autre part, si les lignes tracées avant l'ouverture peuvent être interprétées, au niveau

macroscopique, comme représentant les rayons de propagation de l'énergie de l'onde incidente et, au niveau des ondes élémentaires, comme l'unique composante spectrale de l'onde incidente, les lignes tracées après l'ouverture ne peuvent être interprétées qu'au niveau des ondes élémentaires et les lignes tracées sur le schéma sont représentées de la même façon avant et après l'ouverture.

Une onde sphérique pouvant être décomposée sur une base d'ondes planes et vice versa, **on peut passer de la décomposition sur une base d'ondes sphériques à la décomposition sur une base d'ondes planes**. Une interprétation graphique de ce passage est possible si on décide de représenter une onde plane par un vecteur et non par un ensemble de lignes parallèles. Les lignes représentées après l'ouverture seront alors considérées comme les composantes d'ondes planes émises par chacune des sources secondaires réparties sur l'ouverture.

Dans le cas de l'**interprétation au niveau macroscopique**, on donne priorité au fait que l'onde diffractée à l'infini est localement plane et donc que les rayons d'énergie sont localement parallèles. Les lignes tracées après l'ouverture sont alors considérées comme les rayons de propagation de la phase ou de l'énergie de l'onde localement plane dans la direction  $\Theta$ . L'amplitude de cette onde est différente de celle de l'onde incidente : elle est égale à la transformée de Fourier de la répartition en amplitude de l'onde incidente sur l'ouverture diffractante. Dans cette interprétation, le schéma pose problème car étant à l'infini, ce qui vient d'être dit n'est pas valable près de l'ouverture et les lignes partent de l'ouverture et sont tracées en continuité des rayons de l'onde incidente.

On peut passer de l'**interprétation du niveau macroscopique aux interprétations du niveau des ondes élémentaires** de la manière suivante :

– l'onde localement plane se propageant dans la direction  $\Theta$  est assimilée à la composante de la base d'ondes planes se propageant dans la même direction ;

– l'onde localement plane peut être considérée comme étant la superposition des ondes sphériques émises par les sources secondaires, ces ondes secondaires étant planes car on est à l'infini et déphasées les unes par rapport aux autres du fait de la propagation.

On peut résumer ce qui précède en disant que l'onde localement plane du niveau macroscopique est confondue à l'infini avec la composante d'onde plane se propageant dans la même direction, cette composante étant égale d'une part à la superposition des composantes d'ondes planes émises par les sources de Huygens et d'autre part à celle des ondes

sphériques émises par les sources de Huygens, ondes assimilées à des ondes planes puisqu'on est à l'infini.

Terminons ce point sur les interprétations possibles du schéma en soulignant que :

– les lignes tracées après l'ouverture, quelle que soit la manière de les interpréter, **donnent une information uniquement sur la direction de propagation** des ondes considérées. Aucun renseignement ne peut être obtenu sur l'amplitude de ces ondes par simple lecture du schéma ;

– **la donnée seule du schéma ne permet pas de savoir dans quel cadre l'interpréter**. Selon le contexte, on utilisera une interprétation plutôt qu'une autre. Ainsi, dans le calcul de l'amplitude de l'onde se propageant derrière l'ouverture dans la direction  $\Theta$ , on considérera que les lignes tracées derrière l'ouverture sont les rayons de propagation de la phase des ondes émises par les sources de Huygens réparties sur l'ouverture ; dans le cas de la formation de l'image d'un point à l'infini accompagnée de diffraction, on considérera plutôt que ce sont les composantes d'ondes planes émises par chaque source de Huygens ou les rayons de propagation de la phase de la composante d'onde plane résultant de leur superposition ; dans le cas des expériences de filtrage spatial, on retiendra plutôt l'interprétation en termes de composante d'onde plane ;

– la représentation graphique de lois et d'outils mathématiques (principe de Huygens-Fresnel et décomposition sur une base d'ondes sphériques, décomposition sur une base d'ondes planes) n'est pas simple et soulève les problèmes que nous venons d'esquisser.

### 2.3. Méthodologie

Pour connaître la façon dont les étudiants interprètent le schéma de la diffraction de Fraunhofer, nous avons mis au point le questionnaire de l'annexe 1. Il comporte une question sur la signification des lignes tracées après l'ouverture (question 2) et deux autres questions devant permettre d'analyser plus finement les réponses pouvant correspondre à une interprétation macroscopique du schéma. L'une demande quelle est l'amplitude de l'onde plane se propageant derrière l'ouverture (question 2b) et l'autre quelle est la phase des sources de Huygens réparties sur l'ouverture (question 1). Il nous semblait en effet que la tendance à considérer la diffraction comme une simple déviation de l'onde incidente pouvait amener les étudiants à penser que l'onde derrière l'ouverture est plane et de même amplitude que l'onde incidente, que les sources de Huygens réparties sur l'ouverture ne sont pas en phase puisque cette ouverture n'est pas sur un

plan d'onde de l'onde émergeant de l'ouverture. Le questionnaire a été passé à 79 étudiants : 27 d'entre eux ont suivi un enseignement de niveau premier cycle universitaire (étudiants en deuxième année d'université) et 52 un enseignement de niveau deuxième cycle (candidats à un concours pour devenir professeur de physique et chimie dans le secondaire). Bien que les enseignements suivis par ces deux populations étaient susceptibles d'être différents (c'est au niveau du deuxième cycle universitaire que la décomposition sur une base d'ondes planes est en général introduite lors de l'étude de la formation des images en éclairage cohérent), les résultats ne font pas apparaître de différence significative et ont pu être regroupés.

## 2.4. Résultats

### 2.4.1. Les sources de Huygens réparties sur l'ouverture sont-elles en phase ?

Quarante quatre pour cent **des étudiants répondent que les sources de Huygens réparties sur l'ouverture ne sont pas en phase**, alors qu'elles le sont puisque l'ouverture est contenue dans une surface équiphasse de l'onde incidente.

Les justifications correspondant à cette réponse montrent que les étudiants au lieu de s'intéresser à l'onde incidente s'intéressent aux lignes tracées après l'ouverture (100 % des 31 justifications sont de ce type). Les lignes étant de longueur différente (ce que la plupart des schémas font apparaître, voir la figure 1 de l'encadré 1), ils en déduisent l'existence d'une différence de phase entre les sources :

*« Une différence de marche apparaît entre les rayons issus des différentes sources. Ce qui entraîne des différences de phase entre les sources  $\phi = 2\pi \delta/\lambda$  »*

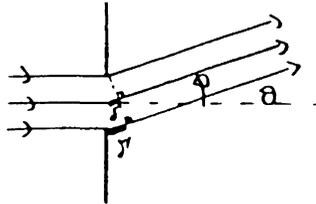
*« Car elles ne parcourent pas le même chemin optique. Il existe une différence de marche  $\delta$  entre 2 rayons successifs. »*

Les étudiants s'intéressent aux chemins optiques parcourus par les différentes ondes de Huygens et ne font référence à aucune origine spatiotemporelle. Ils ne raisonnent pas sur la phase d'une onde en un point donné mais sur la différence de phase entre deux points. Cette erreur rappelle celle consistant à assimiler abscisse et distance parcourue et est certainement liée au fait que, pour beaucoup d'étudiants, le terme « phase » renvoie à « différence de phase du mouvement de deux points du milieu » et non pas à « phase d'une onde progressive » (Maurines, 1995).

Quarante sept pour cent **des étudiants répondent que les sources de Huygens réparties sur l'ouverture sont en phase**.

ENCADRÉ 1

Exemples de réponses d'étudiants portant sur l'interprétation du schéma utilisé pour l'étude de la diffraction de Fraunhofer



« Non, elles n'ont pas la même phase car  $d\delta = 2\pi d\delta/\lambda$  et il y a une différence de marche  $d\delta$  entre 2 faisceaux émergeant de 2 sources voisines. »

Figure 1

la fente fait "introduit" un déphasage - d'onde et alors sphérique

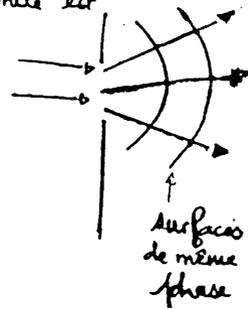


Figure 2

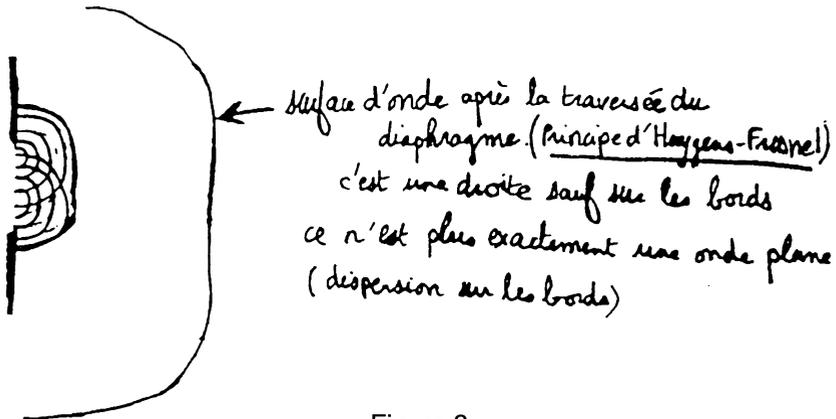


Figure 3

Soixante seize pour cent de ces réponses sont accompagnées d'une justification. Seules 54 % de ces justifications (19 % sur la population totale) sont correctes et font référence au fait que l'ouverture est située dans un plan équiphase de l'onde incidente :

*« Car l'onde incidente tombe sous une incidence normale sur le diaphragme. Par conséquent, d'après le théorème de Malus, le diaphragme est un plan équiphase ».*

Les autres justifications font référence à la cohérence de la lumière émise par le laser, au fait que les points considérés sont des sources secondaires, que tous les rayons font le même angle avec la direction initiale de propagation.

#### **2.4.2. Que représentent les lignes tracées après l'ouverture ?**

Il est à noter tout d'abord le nombre élevé de non réponses à cette question (22 %). Trente huit pour cent des étudiants pensent que les lignes représentées après l'ouverture sont les rayons d'une onde plane et 40 % qu'elles ne le sont pas.

Intéressons-nous aux justifications.

Soixante trois pour cent des réponses (19 étudiants) disant que les lignes tracées après l'ouverture sont les rayons d'une onde plane sont justifiées.

**On constate que 17 étudiants sur 19 (22 % sur l'ensemble des 79 étudiants interrogés) font une interprétation du schéma au niveau macroscopique uniquement :**

– dix d'entre eux font une lecture directe du schéma :

*« Les rayons se propagent dans une direction unique. »*

*« Les rayons sont orthogonaux à un même plan. Celui-ci représente le front d'onde. Il est perpendiculaire à la direction de propagation des ondes issues des différentes sources. » ;*

– six autres font référence à l'onde incidente et la diffraction semble correspondre à une déviation de cette onde :

*« Oui, car le changement de direction ne fait pas varier la nature de l'onde. »*

*« Car elle provient d'une source primaire (le laser) émettant elle-même une onde plane. »*

*« Car l'onde d'origine est une onde provenant de l'infini donc plane. » ;*

– un autre précise qu'on est à l'infini.

Les deux derniers étudiants disant que les lignes sont les rayons d'une onde plane font une interprétation à la fois au niveau macroscopique et au niveau des ondes élémentaires. L'onde est plane et résulte de la superposition des ondes émises par les sources de Huygens :

*« Les surfaces d'onde sont les surfaces normales aux rayons. Par conséquent, les rayons représentés correspondent à une onde plane. Cette onde plane est reconstituée par la superposition cohérente des ondes sphériques produites par chaque source secondaire du diaphragme ».*

La question sur l'amplitude de l'onde plane, ajoutée lors d'une deuxième passation du questionnaire, n'a été posée qu'à 47 étudiants. Parmi les 14 étudiants (30 %) qui pensent que les lignes représentées après l'ouverture sont les rayons d'une onde plane :

– six ne précisent rien sur l'amplitude ;

– deux pour lesquels l'onde plane résulte de la superposition des ondes émises par les sources de Huygens, donnent sa valeur exacte :

*« D'après le principe de Huygens, l'amplitude de l'onde plane se propageant dans la direction  $\theta$  est du type  $s_0 \text{sinc}(\pi a \theta / \lambda)$  » ;*

– **six qui font une interprétation du schéma uniquement au niveau macroscopique donnent une valeur incorrecte :**

*« Amplitude de l'onde incidente/surface de la fente. »*

Il est à noter que, pour deux d'entre eux, l'amplitude de l'onde plane se propageant derrière l'ouverture est égale à celle de l'onde incidente :

*« L'amplitude de l'onde plane est celle de l'onde incidente avant passage de la fente ».*

Quatre vingt un pour cent des réponses (28 étudiants) disant que les lignes représentées après l'ouverture ne sont pas les rayons d'une onde plane sont justifiées.

Soixante huit pour cent des 28 étudiants ne se servent pas du schéma mais font référence à la forme de la surface d'onde, que ce soit de l'onde du niveau macroscopique ou des ondes élémentaires émises par les sources de Huygens ;

– **treize étudiants mentionnent le fait qu'après l'ouverture l'onde au niveau macroscopique n'est pas plane mais sphérique et certains la représentent** (voir la figure 2 de l'encadré 2) :

*« Au voisinage de la fente, l'onde est sphérique ».*

*« Car à la sortie de la fente la lumière se propage dans toutes les directions ».*

*« C'est une onde sphérique car une onde plane ne peut être obtenue grâce à un trou » ;*

– six étudiants mentionnent le fait que les ondes élémentaires émises par les sources de Huygens ne sont pas planes mais sphériques :

« *Chaque point de la fente réémet dans toutes les directions d'après le principe de Huygens-Fresnel (on fait l'approximation d'ondes sphériques en ondes planes) » ;*

– un seul étudiant donne une réponse faisant appel aux deux niveaux d'interprétation et basée sur le principe de Huygens (voir la figure 3 de l'encadré 1).

Vingt cinq pour cent des 28 étudiants donnent une interprétation au niveau des ondes élémentaires uniquement : les lignes tracées représentent les rayons des ondes émises par les sources de Huygens dans une direction donnée. Les points situés sur une surface parallèle à l'ouverture étant en phase, ils arrivent à un paradoxe car les lignes tracées après l'ouverture ne sont pas perpendiculaires à cette surface. Comme les étudiants n'envisagent pas l'onde au niveau macroscopique comme superposition d'ondes planes, ils ne peuvent résoudre le paradoxe en considérant que la différence de marche apparaissant sur le schéma est un déphasage entre des ondes planes. Ils sont ainsi amenés à refuser l'interprétation du niveau macroscopique :

« *Non, car les surfaces équiphasées restent des plans parallèles à ceux de l'onde incidente (la traversée du trou n'introduit pas de déphasage et la propagation se fait à la même célérité pour chaque rayon). Ils représentent la trajectoire des rayons lumineux issus des sources secondaires dans la direction  $\Theta$  » ;*

« *Non, après la fente, les plans d'onde ne sont pas orthogonaux aux rayons émergents. Ils représentent une direction dans laquelle émet chaque source secondaire. »*

## 2.5. Discussion

Les résultats obtenus révèlent des difficultés à interpréter correctement le schéma et une tendance à raisonner au niveau macroscopique. En effet :

– à la première question portant sur la phase des sources de Huygens réparties sur l'ouverture, seuls 19 % des étudiants donnent une réponse et une justification correctes. **Les réponses données par 44 % des étudiants sont compatibles avec une lecture macroscopique du schéma** : tout se passe comme si les rayons tracés derrière l'ouverture étaient ceux d'une onde plane et que le plan de l'ouverture n'était pas une surface équiphasée. Les justifications révèlent la même difficulté quant à la notion de phase que celles mises en évidence dans nos précédentes

recherches. La question reste entière de savoir pourquoi les étudiants raisonnent en partant de l'onde se propageant derrière l'ouverture et non de l'onde incidente ;

– à la deuxième question portant sur la nature des lignes tracées derrière l'ouverture, 22 % des étudiants ne répondent pas et 24 % répondent en ne se servant pas du schéma. **La tendance consistant à raisonner en restant au niveau macroscopique, que ce soit en utilisant le schéma ou non, est majoritaire (38 %)**. Elle se manifeste préférentiellement à celle consistant à raisonner au niveau des ondes élémentaires, celle-ci n'apparaissant que sur 21 % des réponses. Parmi ces réponses, rares sont celles qui font un lien entre le niveau des ondes élémentaires et le niveau macroscopique (4 % sur la population totale) et qui donnent une amplitude correcte à l'onde plane se propageant dans la direction  $\Theta$  (2 %). Il est à signaler que la décomposition sur une base d'ondes planes n'est jamais évoquée par les étudiants, y compris par ceux ayant suivi un enseignement de niveau deuxième cycle universitaire.

## 2.6. Quelques remarques sur l'enseignement

En conclusion à cette étude sur l'interprétation des schémas de diffraction de Fraunhofer, nous voudrions souligner deux points.

Tout d'abord, la tendance « spontanée » à rester au niveau macroscopique peut être renforcée par le fait signalé plus haut que, sur le schéma utilisé traditionnellement dans l'étude de la diffraction à l'infini, il n'apparaît pas de discontinuité au niveau de l'ouverture dans la représentation graphique des rayons.

Ensuite, la tendance des étudiants à ne raisonner que sur le niveau des ondes élémentaires ne peut être remise en question par l'enseignement. En effet, rares sont les manuels du supérieur qui, dans une situation de diffraction, relient le niveau des ondes élémentaires au niveau macroscopique et mettent sur le même plan la décomposition sur une base d'ondes sphériques et celle sur une base d'ondes planes.

Un des manuels consultés se distingue des autres sur ces points (Hecht, 1987). De nombreux schémas basés sur l'utilisation de rayons ou de surfaces d'onde y figurent (voir quelques exemples tirés du chapitre sur la diffraction à l'encadré 2). Certains schémas portent seulement sur le niveau macroscopique (schéma 10.3), d'autres seulement sur le niveau des ondes élémentaires (10.5, 10.6 a et b, 10.10 c et d), d'autres encore sur les deux niveaux (10.10 b). Les schémas du niveau des ondes élémentaires concernent soit la décomposition sur une base d'ondes planes

ENCADRÉ 2

Quelques schémas utilisés dans l'étude de la diffraction de Fraunhofer (Hecht, 1987)

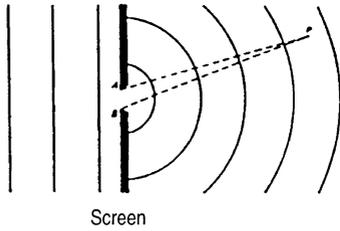


Figure 10.3 Diffraction at a small aperture

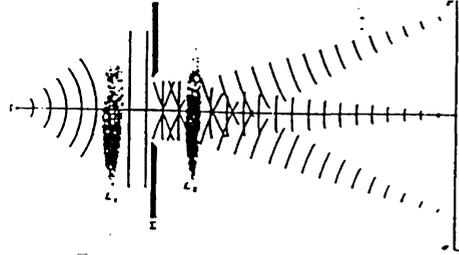


Fig. 10.5 Fraunhofer diffraction

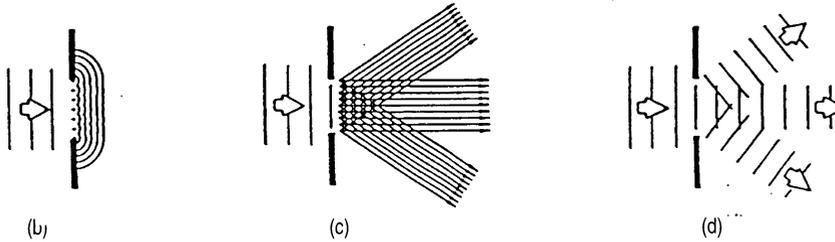


Figure 10.10

(b) Huygens wavelets emitted across the aperture. (c) The equivalent representation in terms of rays. Each point emits rays in all direction. The parallel rays in various directions are seen. (d) These ray bundles correspond to plane waves, which can be thought of as the three-dimensional Fourier components.

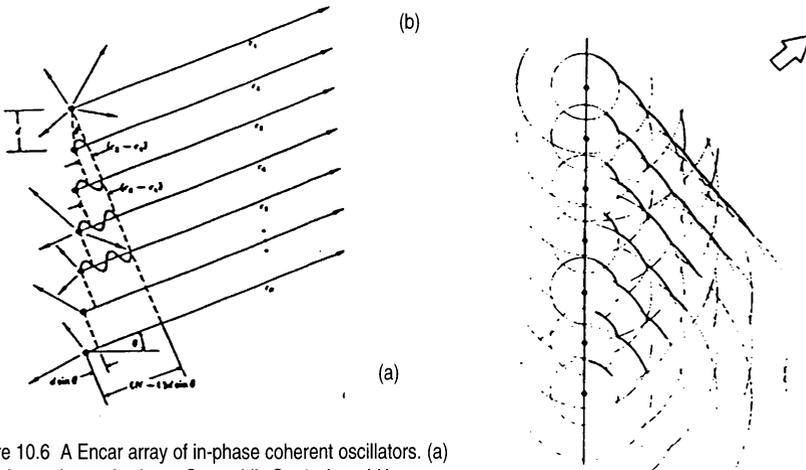


Figure 10.6 A Encar array of in-phase coherent oscillators. (a) Note that at the angle shown  $\delta = x$  while  $\delta = 0$ .  $d$  would be zero. (b) One of many acts of wavefronts emitted from a line of coherent point sources.

(10.5, 10.10 d), soit celle sur une base d'ondes sphériques (10.6 a), soit les deux (10.10 c, 10.6 b). Il est à noter, d'une part, que la plupart des schémas concernent le niveau des ondes élémentaires uniquement, et que d'autre part, les rayons interprétés comme rayons de propagation de la phase des ondes secondaires (10.6 a) sont accompagnés d'une sinusoïde. Ce n'est pas le cas de ceux interprétés comme rayons de propagation de la phase d'une composante d'onde plane ou de ceux donnant lieu à cette double interprétation (10.10 c). On peut regretter cependant que les schémas ne soient pas accompagnés de commentaires plus détaillés, notamment ceux reliant deux cadres d'interprétation (10.6 b, 10.10 b et c).

### 3. FORMATION DES IMAGES EN ÉCLAIRAGE COHÉRENT

Afin de justifier le choix des questions explorées et de situer les réponses des étudiants, nous allons tout d'abord faire quelques remarques sur les modèles permettant d'expliquer la formation des images. Précisons avant toute chose que nous accordons au terme « image » le sens que lui donne Goodman, celui-ci l'introduisant et le définissant de la manière suivante : « *si on place un objet devant une lentille et si on l'éclaire, dans certaines conditions il apparaît alors, dans un second plan, **une distribution d'intensité lumineuse qui ressemble étroitement à l'objet**. Cette distribution en intensité est appelée image de l'objet* » (Goodman, 1972, p. 84).

#### 3.1. Quelques remarques sur les modèles permettant d'expliquer la formation des images

Les propriétés de l'image donnée par une lentille (position, forme, répartition de l'intensité) peuvent être expliquées par deux modèles : le modèle géométrique et le modèle ondulatoire. Le modèle choisi dépendra de la situation étudiée. Le **modèle géométrique** peut être utilisé dans les situations géométriques de formation d'image, c'est-à-dire quand l'objet peut être considéré comme une source de lumière **incohérente** (source lumineuse « étendue » ou objet éclairé par une telle source) et que l'image d'un point est un point (système **stigmatique** rigoureux ou approché : les aberrations géométriques et la diffraction sont négligeables). Le **modèle ondulatoire** doit être utilisé dans les situations ondulatoires de formation d'image, c'est-à-dire quand l'objet peut être considéré comme une source de lumière **cohérente** (source lumineuse monochromatique « ponctuelle » ou laser, objet éclairé par de telles sources) ou quand l'image d'un point

n'est pas un point (la **diffraction** ou les aberrations géométriques ne sont pas négligeables). Dans les situations géométriques, ce modèle conduit aux mêmes résultats que le modèle géométrique, mais avec un travail plus long !

Le modèle **géométrique** explique ce qui se passe en restant au niveau macroscopique. Il s'appuie sur les concepts de **points-objets et points-images incohérents**, de **rayons de propagation de l'énergie**, **d'indépendance des rayons**.

L'image d'un point donnée par une lentille est obtenue en appliquant les lois de Descartes aux rayons de propagation de l'énergie issus de ce point et en prenant l'intersection des rayons émergeant de la lentille (la lentille étant « parfaite », deux rayons suffisent). Les rayons de propagation de l'énergie issus du point-objet ne dépendent pas des conditions aux limites, nous dirons qu'ils sont indépendants. Ceci se traduit expérimentalement par le fait que la suppression d'une partie de la lumière issue de la lentille change l'intensité de l'image mais pas sa forme (celle-ci reste ponctuelle). Les schémas 1 et 2 du tableau 1 illustrent ce qui vient d'être dit dans le cas particulier de l'image d'un point à l'infini.

Pour obtenir l'image d'un objet étendu, on décompose l'objet en une infinité de points-objets et on en cherche les points-images. Les points-objets étant incohérents, les rayons de propagation de l'énergie des ondes émises par ces différents points sont indépendants les uns des autres : « ils se croisent en gardant leur identité propre ». Ceci se traduit expérimentalement par le fait que l'image d'un point-objet ne dépend pas des images des autres points-objets. Les rayons de propagation de l'énergie ne dépendent pas des conditions aux limites, la suppression d'une partie de la lumière issue de la lentille change l'intensité de l'image étendue mais pas sa forme. L'indépendance des rayons d'énergie et la non-cohérence des points-objets font que l'intensité de l'image est obtenue en utilisant la conservation du flux énergétique dans un faisceau et en ajoutant les intensités des ondes émises par les différents points-objets (photométrie).

Le modèle **ondulatoire** explique ce qui se passe au niveau macroscopique **en partant du niveau des ondes élémentaires**. On retrouve les deux formulations précédemment décrites à propos de l'interprétation du schéma utilisé dans l'étude de la diffraction de Fraunhofer : celle décomposant l'onde du niveau macroscopique sur une base d'ondes sphériques (modèle géométrico-ondulatoire) et celle utilisant une base d'ondes planes (modèle spectral de la diffraction).

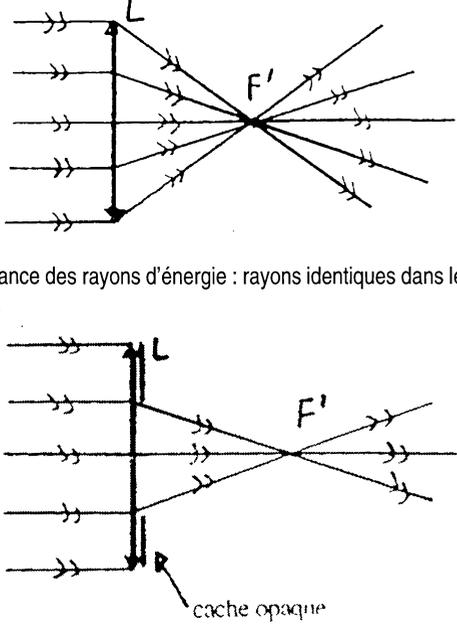
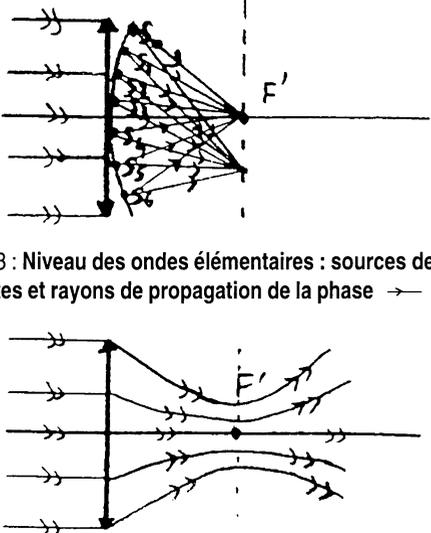
<p>modèle géométrique</p>	 <p>indépendance des rayons d'énergie : rayons identiques dans les deux situations</p> <p>Schémas 1 et 2 : Rayons de propagation de l'énergie →→</p>
<p>modèle ondulatoire</p>	 <p>Schéma 3 : Niveau des ondes élémentaires : sources de Huygens cohérentes et rayons de propagation de la phase →</p> <p>Schéma 4 : Niveau macroscopique : rayons de propagation de l'énergie interdépendants (la présence d'un cache sur la lentille les modifie) ; simplification d'un schéma tiré de Boivin et al (1967) obtenu dans le cadre d'un modèle vectoriel</p>

Tableau 1 : Schémas utilisés lors de l'étude de la formation de l'image d'un point à l'infini donnée par une lentille

Dans le modèle **géométrico-ondulatoire**, la formation de l'image d'un point donnée par une lentille est expliquée en décomposant la surface d'onde de l'onde émergeant de la lentille en une infinité de **sources de Huygens cohérentes** et en considérant que l'onde en un point donné derrière la lentille résulte de la superposition des ondes émises par ces sources (Françon, 1972 ; Goodman, 1972). On peut montrer que c'est dans le plan-image conjugué du plan dans lequel se trouve le point que l'on trouve une distribution d'intensité ressemblant le mieux à celle du point-objet considéré. Dans ce plan, l'amplitude de l'onde émergeant de la lentille correspond à celle donnée par la diffraction de Fraunhofer de l'onde incidente par la lentille. Lorsque la diffraction est négligeable, l'amplitude de l'onde émergente prend une valeur importante uniquement en une tache assimilable à un point. Ce point coïncide avec le point-image du point-objet prévu par le modèle géométrique. Lorsque la diffraction n'est pas négligeable, l'amplitude de l'onde émergente n'est pas nulle dans un petit domaine entourant l'image géométrique du point-objet. La **tache** correspondant à ce domaine est l'image du **point-objet**. Elle est toujours dans le plan-image mais n'est plus ponctuelle. Sa forme dépend de la forme de l'ouverture limitant l'onde émergente. Les rayons de propagation de l'énergie de l'onde au niveau macroscopique dépendant des conditions aux limites, nous dirons qu'ils sont **interdépendants**. Les schémas 3 et 4 du tableau 1 illustrent ce qui vient d'être dit dans le cas particulier de l'image d'un point à l'infini.

Dans le cadre de ce modèle, l'image d'un objet étendu donnée par une lentille est obtenue en décomposant l'objet en une infinité de points-objets et en appliquant ce qui précède à chaque point-objet. Ceci concerne non seulement les sources de lumière mais aussi les **objets éclairés**, en particulier, les objets transparents ayant une action sur l'amplitude de l'onde utilisée pour les éclairer (par exemple, un diaphragme) ou ceux ayant une action sur la phase de l'onde (par exemple, un échantillon très fin que l'on observe au microscope), que l'on néglige ou non la diffraction de la lumière par l'objet éclairé. Pour obtenir l'intensité lumineuse dans le plan image, il est nécessaire de tenir compte de la nature de la lumière émise par l'objet : le système est en effet linéaire en amplitude dans le cas d'une lumière cohérente, linéaire en intensité dans le cas d'une lumière incohérente. Cela revient à dire que **l'image de l'objet éclairé résulte de la superposition de taches-images de diffraction cohérentes si l'éclairage est cohérent, incohérentes sinon**. L'image d'un objet éclairé en lumière cohérente et celle obtenue en lumière incohérente peuvent être considérées en première approximation comme identiques – en fait, il existe une influence de l'éclairage sur la qualité de l'image et celle-ci est très complexe (voir Goodman, 1972) –. La méthode qui vient d'être présentée de la formation de l'image d'un objet étendu a été proposée pour la première fois par Lord

Rayleigh en 1896 (Hecht, 1987, p. 563). Basée sur la décomposition de l'objet en points-objets, elle est proche de la méthode utilisée dans le modèle géométrique mais s'en distingue par le fait que l'image d'un point-objet est une tache de diffraction et que les taches-images doivent être considérées comme cohérentes dans le cas d'un éclairage cohérent. Dans le cas d'un éclairage incohérent et d'une lentille supposée « parfaite », cette méthode redonne les résultats du modèle géométrique.

Dans le cas d'un système comprenant non seulement une source de lumière et une lentille mais aussi un autre objet éclairé, il existe derrière la lentille deux images : celle de la source de lumière et celle de l'objet éclairé. Dans le cas où la lentille est supposée « parfaite », on considère que l'image de la source de lumière résulte de la superposition des ondes émises par tous les points-objets répartis sur la surface de l'objet éclairé. On est ramené aux méthodes précédemment décrites de la formation d'une image ponctuelle ou étendue par une lentille. La forme de l'image de la source dépend donc de la nature de l'objet éclairé (« diffractant » ou non : nous signifions par ce raccourci que la diffraction de la lumière par l'objet n'est pas négligeable dans le premier cas alors qu'elle l'est dans le second).

Le **modèle spectral de la diffraction** fait appel aux méthodes de l'analyse de Fourier. On retrouve le fait que l'amplitude de l'onde émergente du plan où se trouve l'objet peut être considérée comme étant égale à la somme des amplitudes d'ondes planes sinusoïdales se propageant dans toutes les directions. Chaque point lumineux dans le plan focal image de la lentille correspond au point de focalisation d'une composante d'onde plane et indique la présence d'une fréquence spatiale particulière dans le spectre de l'amplitude de l'onde dans le plan objet (Hecht, 1987 ; Goodman, 1972). Selon l'interprétation proposée pour la première fois par Abbe en 1873, l'image d'un objet éclairé en lumière cohérente résulte de la superposition cohérente des ondes émises par tous les points lumineux du plan focal image de la lentille (Hecht, 1987, p. 563).

Dans le modèle ondulatoire, les rayons de propagation de l'énergie de l'onde au niveau macroscopique vérifient les lois de Descartes uniquement si la diffraction est négligeable. Ils ne dépendent pas des conditions aux limites dans ce cas, autrement ils en dépendent : dans une situation de diffraction en éclairage cohérent, on ne peut supprimer une partie de la lumière issue de la lentille en plaçant un cache dans son plan focal image sans modifier, non seulement l'intensité de l'image de l'objet éclairé, mais aussi sa forme (expérience de filtrage spatial). Nous dirons là encore que les rayons sont interdépendants.

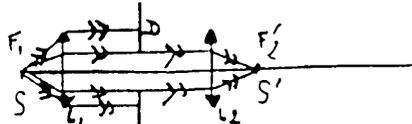
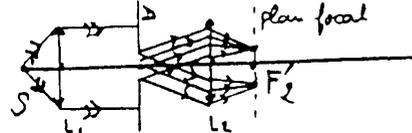
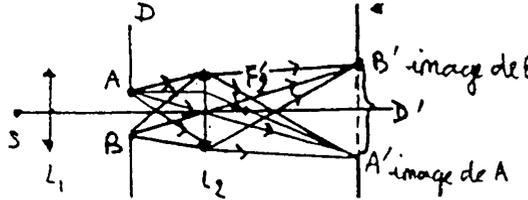
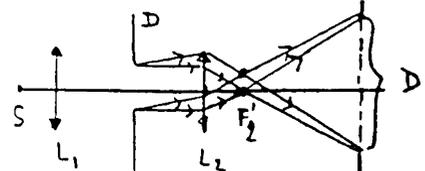
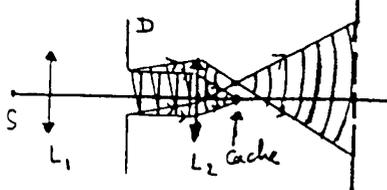
Situation physique	Réponses correctes
Formation de l'image d'un point source en absence de diffraction.	<p>Image ponctuelle au foyer image de la lentille d'observation moins lumineuse que dans la situation de référence mais de même forme.</p>  <p>Schéma 1 : <b>Modèle géométrique : rayons de propagation de l'énergie indépendants</b></p>
Formation de l'image d'un point source en présence de diffraction.	<p>Image déformée par la diffraction existant au niveau du diaphragme, située dans le plan focal image de la lentille.</p>  <p>Schéma 2 : <b>Rayons de propagation de la phase</b> : schéma pouvant correspondre au modèle géométrico-ondulatoire ou au modèle spectral</p>
Formation de l'image d'un diaphragme éclairé par un faisceau parallèle.	<p>Image de forme identique à celle de l'objet, située dans le plan image conjugué prévu par l'optique géométrique.</p>  <p>Schéma 3 : <b>Modèle géométrico-ondulatoire, interprétation de Rayleigh</b> : rayons de propagation de la phase d'ondes sphériques cohérentes, points-objets et points-images cohérents</p>  <p>Schéma 4 : <b>Modèle spectral, interprétation d'Abbe</b> : rayons de propagation de la phase d'ondes planes cohérentes</p>
Formation de l'image d'un diaphragme «diffractant» quand une partie de la lumière émergeant de la lentille est supprimée.	<p>Forme de l'image modifiée : les rayons de propagation de l'énergie de l'onde cohérente du niveau macroscopique sont interdépendants, les ondes élémentaires sont cohérentes.</p>  <p>Schéma 5 : <b>Modèle spectral</b> : suppression d'une des composantes d'ondes planes</p>

Tableau 2 : **Éléments de réponses correctes à des situations de formation d'images**

Les schémas utilisés pour expliquer la formation des images font intervenir des ondes incohérentes pour ceux relevant du modèle géométrique et des ondes cohérentes pour ceux relevant du modèle ondulatoire. Les rayons apparaissant sur le premier type de schémas sont des rayons de propagation de l'énergie. Ceux apparaissant sur le deuxième type de schémas et concernant le niveau des ondes élémentaires sont des rayons de propagation de la phase. Qu'il y ait diffraction ou non, les rayons de propagation de la phase du modèle ondulatoire obéissent aux lois de Descartes. Comme nous l'avons déjà signalé dans l'étude concernant le schéma de la diffraction de Fraunhofer, les schémas ne donnent aucune information sur l'amplitude des ondes.

Les schémas du modèle ondulatoire portant sur le niveau des ondes élémentaires font apparaître soit des ondes sphériques émises par des points-sources cohérents (sources de Huygens réparties sur la surface d'onde de l'onde émergeant du système optique ou points-objets répartis sur la surface d'un objet éclairé en lumière cohérente), soit des ondes planes émergeant du plan dans lequel se trouve l'objet éclairé (voir le tableau 2). Le premier type de schéma relève du modèle géométrico-ondulatoire et met bien en évidence la localisation de l'image d'un objet éclairé (schéma 3 du tableau 2). Par contre, il rend difficilement compte des expériences de filtrage spatial. Le second type de schéma, quant à lui, relève du modèle spectral. Il met bien en évidence la formation de l'image d'un objet éclairé par superposition des composantes d'ondes planes (schéma 4 du tableau 2) et permet de comprendre la modification de la forme de cette image lors d'un filtrage spatial (schéma 5 du tableau 2), mais par contre, pose problème quant à la localisation de l'image. Celle-ci semble être là où se trouve l'écran.

Terminons ces remarques en disant que la donnée seule d'un schéma ne permet pas toujours de savoir dans quel cadre l'interpréter. Il en est ainsi des schémas du modèle ondulatoire portant sur le niveau des ondes élémentaires. Ceux qui ne font apparaître que des rayons (schéma 2 du tableau 2) soulèvent les problèmes évoqués dans l'étude précédente. Ceux relevant du modèle géométrico-ondulatoire et concernant la formation de l'image d'un objet éclairé étendu dans le cas où la lentille est supposée « parfaite » peuvent, eux-aussi, prêter à confusion (schéma 3 du tableau 2) : seule la prise en compte de l'onde incidente permet de faire apparaître la cohérence des points-objets et ainsi de différencier ces schémas de ceux du modèle géométrique.

### 3.2. Questions explorées

Pour tester la nature « géométrique » du raisonnement mis en oeuvre par les étudiants, nous avons choisi des situations de formation d'image nécessitant l'utilisation d'un modèle ondulatoire. Celles-ci concernent la formation de l'image d'un point en présence de diffraction et la formation de l'image d'un objet transparent d'amplitude (diaphragme) éclairé en lumière cohérente. En effet, tout laissait supposer l'existence de difficultés quant à la position des images et à l'interdépendance des rayons lumineux dans la situation de diffraction, quant à l'existence de l'image d'un diaphragme éclairé en lumière parallèle. De plus la question se posait également d'examiner si dans ce type de situations, le raisonnement en termes d'image voyageuse mis en évidence dans des situations d'optique géométrique pouvait se manifester.

L'étude présentée ici répond aux questions suivantes.

Pour les étudiants, un point source situé à l'infini a-t-il une image quand la diffraction ne peut être négligée ? Si oui, cette image se trouve-t-elle dans le plan focal image de la lentille ou ailleurs ?

Pour les étudiants, un diaphragme éclairé par un faisceau de lumière parallèle a-t-il une image ? Si oui, où est-elle ? Leur réponse dépend-elle de la nature du diaphragme (« diffractant » ou non) ? Comment est pour eux l'image d'un diaphragme « diffractant » ?

Pour les étudiants, les rayons de propagation de l'énergie dans une situation de diffraction sont-ils interdépendants ou non (autrement dit, comment sont les images lorsqu'on supprime une partie de la lumière issue de la lentille) ?

situation physique <i>énoncé des questions</i>	questions explorées <i>modèle à utiliser</i>	hypothèses testées et tendances de raisonnement mises en évidence
formation de l'image d'un point-source en absence de diffraction  <i>annexe 2 question 1a</i>	existence, position de l'image du point-source  <i>optique géométrique</i>	question posée pour comparaison
formation de l'image d'un point-source en présence de diffraction  <i>annexe 2 question 1b</i>	existence, position de l'image du point-source  <i>optique physique</i>	suivre les rayons d'énergie issus de la source et qui divergent après le diaphragme
formation de l'image d'un diaphragme « non diffractant » éclairé par un faisceau parallèle  <i>annexe 2 question 2a</i>	existence, position de l'image du diaphragme « non diffractant »  <i>optique physique</i>	suivre les rayons d'énergie issus de la source
formation de l'image d'un diaphragme « diffractant » éclairé par un faisceau parallèle  <i>annexe 2, question 2b annexe 3, question 1</i>	existence, position, forme de l'image du diaphragme « non diffractant »  <i>optique physique</i>	suivre les rayons d'énergie issus de la source  raisonner en terme d'image voyageuse
formation de l'image d'un diaphragme « diffractant » quand une partie de la lumière émergeant de la lentille est supprimée  <i>annexe 2, question 3b annexe 3, question 2</i>	existence, forme de l'image du diaphragme « diffractant »  <i>optique physique</i>	suivre les rayons d'énergie issus de la source  considérer les rayons d'énergie comme indépendants  raisonner en terme d'image voyageuse

**Tableau 3 : Questions explorées concernant la formation des images**

### 3.3. Méthodologie

Nous avons débuté cette étude à l'aide d'un questionnaire papier-crayon (voir l'énoncé en annexe 2). La situation « classique » à deux lentilles utilisée dans l'étude de la diffraction de Fraunhofer est présentée une fois avec un diaphragme « diffractant », une fois avec un diaphragme « non diffractant ». La première question du questionnaire porte sur l'image du point-source en présence ou non de diffraction, la deuxième sur l'image des diaphragmes. La troisième question porte sur ce qui se passe quand on supprime une partie de la lumière issue de la lentille. La question sur l'image du diaphragme « diffractant » n'étant pas assez précise (elle ne demande pas quelle est sa forme), nous avons été conduit à élaborer un deuxième questionnaire (voir l'énoncé en annexe 3). Dans celui-ci, on précise que l'image du diaphragme « diffractant » est observée et on demande quelle est sa forme en présence ou en absence de cache. Le tableau 3 récapitule les situations et les questions explorées, les hypothèses que l'on voulait tester. Les éléments de réponses correctes donnés au tableau 2 concernent les situations proposées aux étudiants.

Environ une centaine d'étudiants ayant reçu un enseignement universitaire sur la formation des images ont été interrogés : une trentaine ont suivi un enseignement de niveau premier cycle (étudiants en classe de mathématique spéciale), les autres de niveau second cycle (candidats à un concours pour devenir professeur de physique et chimie dans le secondaire). Aucune différence notable n'apparaissant entre les résultats fournis par ces deux populations, nous les avons regroupés.

### 3.4. Résultats

#### 3.4.1. Existence et position de l'image du point-source en l'absence de diffraction

Pour 96 % des étudiants (N=73), l'image du point-source T existe toujours quand on introduit le diaphragme « non diffractant » celui-ci ayant pour simple rôle de limiter le faisceau lumineux arrivant sur la deuxième lentille et ainsi de diminuer la luminosité de l'image :

*«  $D_1$  ne sert à rien : on peut tout aussi bien l'enlever (il fait juste baisser l'intensité) ».*

Il est à noter que trois étudiants pensent que l'image du point-source n'existe plus car c'est le diaphragme qui est devenu l'objet :

*« Non, car le trou  $D_1$  est désormais le nouveau trou source ».*

*« Non, on observe l'image du trou de la fente  $D_1$  ».*

Ce type de réponse très minoritaire dans le cas présent va réapparaître dans la suite.

### 3.4.2. Existence et position de l'image du point-source en présence de diffraction

Même si une majorité d'étudiants (55 %, N=73) répond correctement en confirmant l'existence d'une image pour le point-source, beaucoup d'étudiants (42 %) pensent qu'elle n'existe plus.

Intéressons-nous tout d'abord aux étudiants qui pensent que l'image du point-source T existe :

– deux tiers des étudiants qui précisent la position de cette image répondent correctement : l'image est dans le plan focal image de la deuxième lentille. Les commentaires et les dessins accompagnant cette réponse montrent que les étudiants se placent au niveau des ondes élémentaires (figure 1 de l'encadré 3).

– un tiers des étudiants qui précisent la position de cette image la situe derrière le plan focal image de la deuxième lentille (14 % de la population totale). Les justifications et schémas accompagnant cette réponse (figure 2 de l'encadré 3) indiquent que **les étudiants utilisent les rayons d'énergie du niveau macroscopique pour déterminer la place de l'image**. Ces rayons étant divergents et non parallèles, l'image du point-source est derrière le plan focal image :

« Les rayons n'arrivent plus parallèles sur  $L_2$  ».

« On peut observer l'image du trou source. L'endroit de localisation de l'image sera différent car les rayons après diffraction n'auront pas la même direction de propagation que dans la situation de référence ».

Intéressons-nous à présent aux étudiants qui pensent que l'image du point-source n'existe pas. Leurs justifications sont de trois types :

– ce n'est pas l'image du point-source qui est observée mais une figure de diffraction (figure 3 de l'encadré 3) (14 étudiants, c'est-à-dire 19 % de la population totale) :

« Il y a diffraction, on observe donc une figure de diffraction et non plus une image du trou » ;

– ce n'est pas l'image du point-source qui est observée mais celle du diaphragme  $D_2$  (6 étudiants, c'est-à-dire 8 % de la population totale). On retrouve ici un type de justifications données pour le diaphragme  $D_1$  :

« La fente  $D_2$  se comporte comme une nouvelle source (« perte de la mémoire » de l'existence de T) » (figure 4 de l'encadré 3).

« La source de lumière pour  $L_2$  est une source secondaire, à savoir  $D_2$ . On occulte alors complètement le fait qu'il y ait une source primaire (T) et  $D_2$  est alors la nouvelle source de lumière pour  $L_2$  » ;

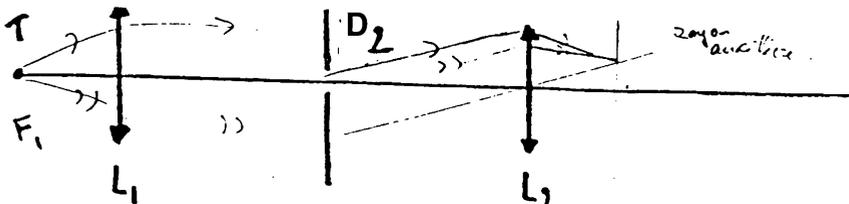
– il n'y pas d'image car il y a diffraction (6 étudiants, c'est-à-dire 8 % de la population totale) :

« Non, car les rayons sont diffractés »

Nous avons séparé ces réponses de celles qui précèdent car il n'est pas fait mention de l'observation de quelque chose. La lecture des commentaires nous amène à faire deux hypothèses dans le but d'expliquer ce type de réponses. Tout d'abord, une image ne pourrait exister en présence de diffraction car le trajet des rayons ne peut être prévu par les lois de l'optique géométrique : « Les rayons sont diffractés : ils partent dans des directions aléatoires, on ne peut donc appliquer les lois de l'optique géométrique ». Ensuite, une image ne pourrait exister en présence de diffraction car l'intersection des rayons émergents n'est pas un point : « L'image du trou source  $T$  ne peut être observée derrière la lentille  $L_2$  car les rayons ne convergent pas vers le même point » (figure 5 de l'encadré 3).

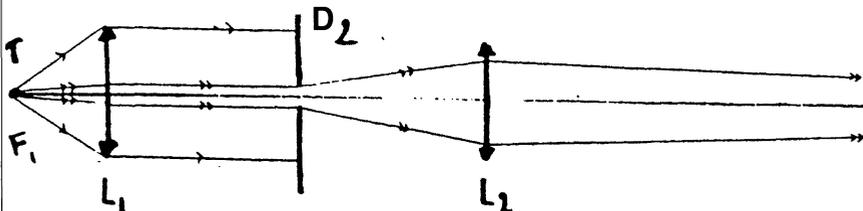
### ENCADRÉ 3

#### Exemples de réponses d'étudiants à propos de l'image du point source lorsqu'il y a de la diffraction



« Oui, il y a diffraction, mais on aura pas uniquement un point image car il sera accompagné de tache de diffraction. »

Figure 1



« Oui, on peut observer l'image de  $T$ , mais pas au même endroit (il faut éloigner l'écran)  $T'$  aurait alors la même forme mais pas le même éclairement. »

Figure 2

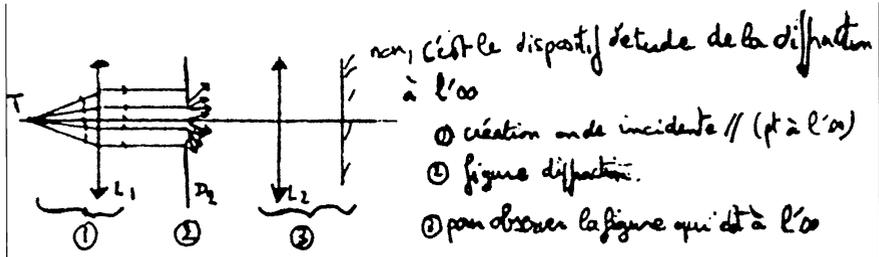
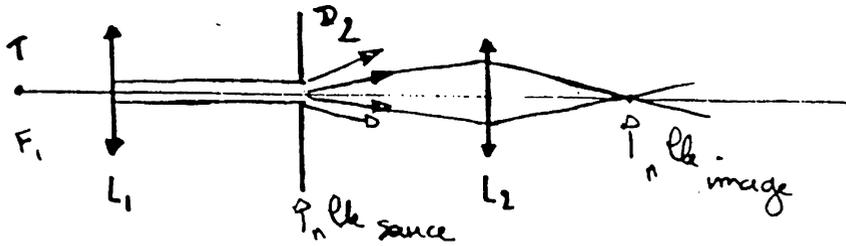
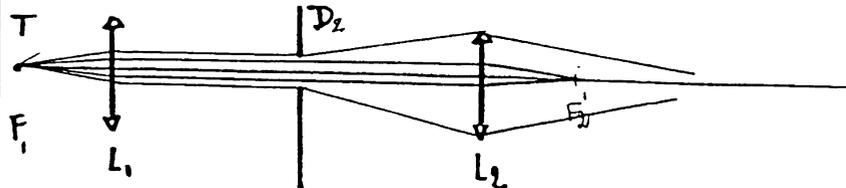


Figure 3



« Non, la fente  $D_2$  se comporte comme une nouvelle source de lumière ("perte de la mémoire" de l'existence de T). »

Figure 4



« Non, on ne peut observer l'image de T car à la sortie de  $L_2$ , les rayons ne vont pas tous converger vers le même point. »

Figure 5

### 3.4.3. Existence et position de l'image d'un diaphragme « non diffractant »

Quarante cinq pour cent des étudiants (N=73) pensent que l'image d'un diaphragme « non diffractant » existe (ce qui est correct) alors que pour 49 % elle n'existe pas.

Parmi les étudiants qui répondent que cette image existe, 73 % (33 % sur la population totale) précisent où elle se situe :

– une minorité d'étudiants (11 % sur la population totale) la place correctement. Les schémas donnés (figure 1 de l'encadré 4) indiquent que les étudiants ne suivent pas les rayons de propagation de l'énergie issus de la source mais se placent au niveau des ondes élémentaires en cherchant l'image des sources de Huygens réparties sur le diaphragme ;

– les schémas (figure 2 de l'encadré 4) et les justifications donnés par une majorité d'étudiants (22 % sur la population totale), révèlent que pour eux, l'image est dans le plan focal image de la deuxième lentille. **Ces étudiants suivent les rayons de propagation de l'énergie issus de la source et restent à un niveau macroscopique. Ils sont ainsi conduits à confondre l'image du diaphragme et l'image du point-source T :**

« Les rayons sont parallèles et vont converger au foyer image de  $L_2$  ( $F'_2$ ) ».

« On a une image de  $D_1$  si celui-ci est placé à une distance supérieure à la distance focale de  $L_2$ . L'image sera alors en  $F'_2$  ».

La majorité des justifications fournies par les étudiants qui pensent que l'image du diaphragme « non diffractant » (36 % sur la population totale) n'existe pas montrent que les étudiants suivent les rayons d'énergie du **niveau macroscopique**.

La plupart note le fait que les rayons sont parallèles :

« On ne peut observer l'image de  $D_1$ , car d'après le dispositif, il n'émerge de  $D_1$  qu'un faisceau de lumière parallèle (qui converge après la lentille en  $T'$ ) donc on ne peut pas récupérer l'image de  $D_1$  ».

Certains explicitent le fait que le diaphragme ne peut être considéré comme une source car les rayons à la sortie du diaphragme sont parallèles :

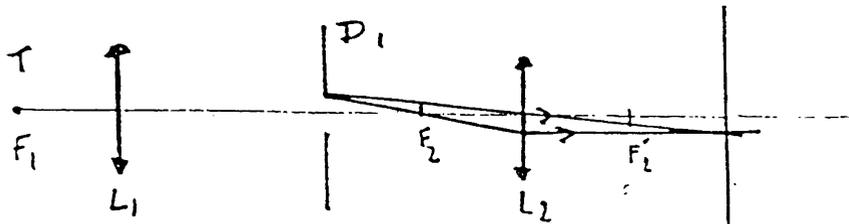
«  $D_1$  n'est pas considérable en tant que source lumineuse :  $D_1$  n'émet pas dans toutes les directions ».

D'autres disent que ce que l'on observe c'est l'image du point-source :

« On observe l'image de  $T$  ».

### ENCADRÉ 4

#### Exemples de réponses d'étudiants à propos de l'image d'un diaphragme éclairé par un faisceau de lumière parallèle



« Oui, il faut placer l'écran d'observation dans le plan image conjugué par  $L_2$  du plan objet contenant  $D_1$ . »

Figure 1

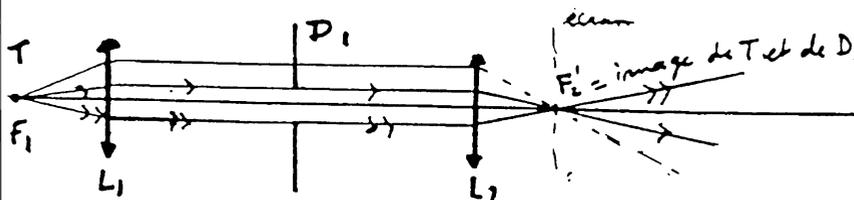
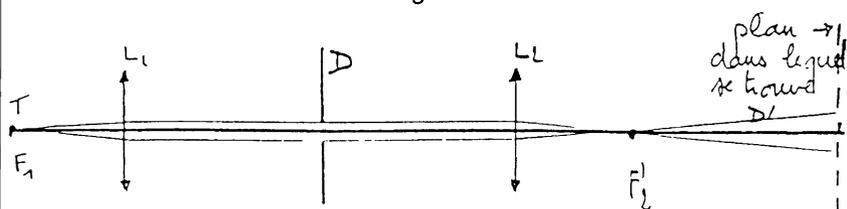
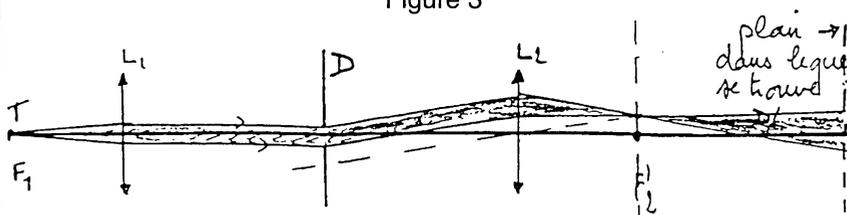


Figure 2



« Oui, on obtient une tache circulaire : image du trou. En dehors, la lumière est légèrement diffusée par diffraction mais comme on n'est pas dans le plan focal, l'image de diffraction est floue. »

Figure 3



« Le plan est situé à une distance de  $L_2$  supérieure à la distance focale de cette dernière. Par conséquent, la tache est circulaire. »

Figure 4

### 3.4.4. Existence, position et forme de l'image d'un diaphragme « diffractant ».

Le pourcentage de réponses indiquant que l'image du diaphragme « diffractant » existe est légèrement plus élevé que dans le cas du diaphragme « non diffractant » (53 % au lieu de 45 %, N=73). Il est à noter que sur 28 % de ces réponses, il est fait mention que le diaphragme se comporte comme un objet ou une source à cause de la diffraction :

«  $D_2$  agit comme un objet dans le cas de la diffraction ».

« Le trou  $D_2$  peut être considéré comme une source. En effet la lumière est émise dans toutes les directions (principe de Huygens) ».

Intéressons-nous à présent à la position de l'image de ce diaphragme.

Un tiers des réponses (18 % sur la population totale) sont correctes quant à son positionnement.

Un tiers des réponses sont incorrectes. Comme dans le cas du diaphragme « non diffractant », l'image est dans le plan focal image de la deuxième lentille :

« Au plan focal image de  $L_2$  ».

«  $D_2$  se comporte comme une source secondaire (parce qu'elle diffracte la lumière). Les lentilles sont convergentes et  $D_2$  est un objet réel pour  $L_2$ . Son image sera réelle à droite de  $L_2$  sur le schéma. Elle est confondue avec l'image de  $T$  ».

Certains étudiants disent que l'image du diaphragme est la figure de diffraction ou son centre :

« Image de  $D_2$  : image géométrique à travers  $L_2$ , c'est à dire dans le plan image  $F'_2$ . Cette image de  $D_2$  sera sur le centre de la figure de diffraction ».

« On peut observer l'image de  $D_2$  à travers sa figure de diffraction, c'est-à-dire que la frange centrale est l'image de  $D_2$  ».

Il y a 32 % d'étudiants qui pensent que l'image du diaphragme « diffractant » n'existe pas. La majorité des justifications (87 % d'entre elles, c'est-à-dire 18 % sur la population totale) mentionnent l'existence de la diffraction :

« Non, il y a diffraction ».

« Non, les rayons issus de  $D_2$  partent dans tous les sens ».

« Non, à cause de la diffraction : ce qu'on observe est une figure de diffraction ».

« Non, c'est un phénomène de diffraction qui n'est plus régi par les lois de l'optique géométrique ».

On retrouve un fait mentionné plus haut : il semble qu'il ne peut y avoir d'image en présence de diffraction, comme si les deux phénomènes s'excluaient mutuellement.

Quand on demande aux étudiants quelle est la forme de l'image d'un diaphragme « diffractant », on en rencontre beaucoup qui disent qu'elle ressemble à une figure de diffraction (réponse fournie par 47 % des 17 étudiants interrogés) ou à une tache de diffraction (24 %) :

*« C'est une tache brillante entourée d'anneaux sombres et clairs : c'est l'image de diffraction du diaphragme ».*

*« Nous avons une tache circulaire : l'image du trou. En dehors, la lumière est légèrement diffusée par diffraction mais comme on n'est pas dans le plan focal de la lentille, la figure de diffraction est floue ».*

**Ce qui est observé sur l'écran semble être la projection de la figure de diffraction observée dans le plan focal image de la lentille.**

Ceci apparaît non seulement dans les commentaires :

*« D', image de D, est en fait la projection de cercles concentriques causés par la diffraction en D à travers la lentille  $L_2$  »*

mais aussi sur les quelques constructions graphiques accompagnant les réponses (figures 3 et 4 de l'encadré 4). Il y a toujours un seul rayon partant d'un point du diaphragme et allant vers l'écran.

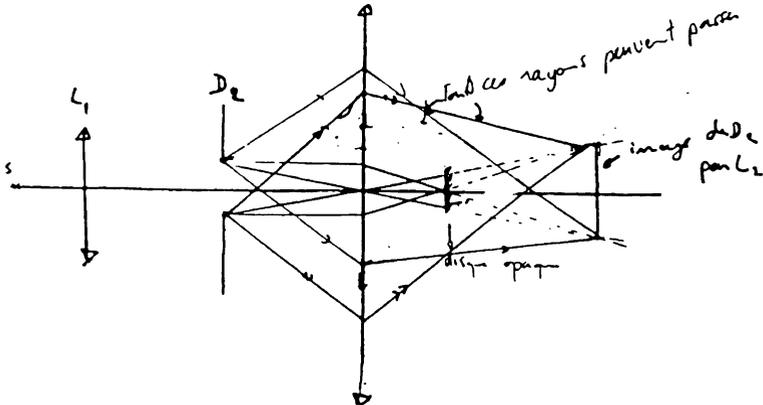
Terminons cette présentation des résultats sur l'existence et la position des images des diaphragmes en disant qu'une corrélation des réponses montre que seulement 18 % des étudiants envisagent l'existence d'une image pour chaque diaphragme, 3 d'entre eux précisant leur position correctement (4 % sur la population interrogée).

### ***3.4.5. Les rayons d'énergie sont-ils interdépendants dans une situation de diffraction ?***

À la question demandant ce qui se passe quand on supprime une partie de la lumière émergeant de la lentille en plaçant au foyer image un petit cache, beaucoup d'étudiants qui répondent que l'image des diaphragmes existait en l'absence de cache (ou qui ont répondu au questionnaire disant que l'image du diaphragme « diffractant » est observée) ne répondent pas : 25 % dans le cas du diaphragme « non diffractant » (N=44), 33 % dans le cas du diaphragme « diffractant » (N=61). Les autres étudiants répondent correctement : l'image du diaphragme « non diffractant » n'est plus observée alors que l'image du diaphragme « diffractant » l'est (61 % dans les deux cas). Les justifications tiennent compte du fait que, dans le cas du diaphragme « non diffractant », toute la lumière émergeant de la lentille converge au foyer de la lentille et est donc arrêtée, et que, dans le cas du diaphragme « diffractant », une partie de la lumière passe en dehors de ce point et n'est donc pas arrêtée.

ENCADRÉ 5

Exemples de réponses d'étudiants à propos de la forme de l'image d'un diaphragme « diffractant » quand une partie de la lumière émergente de la lentille est supprimée



« L'image est la même »

Figure 1

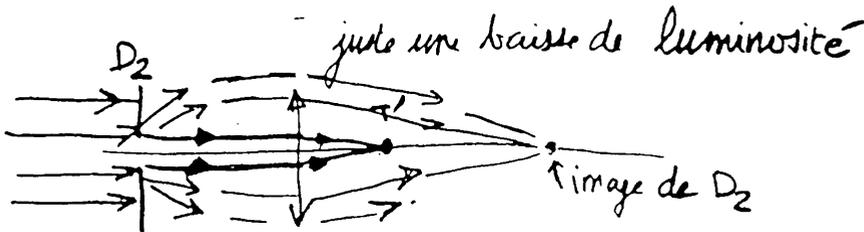
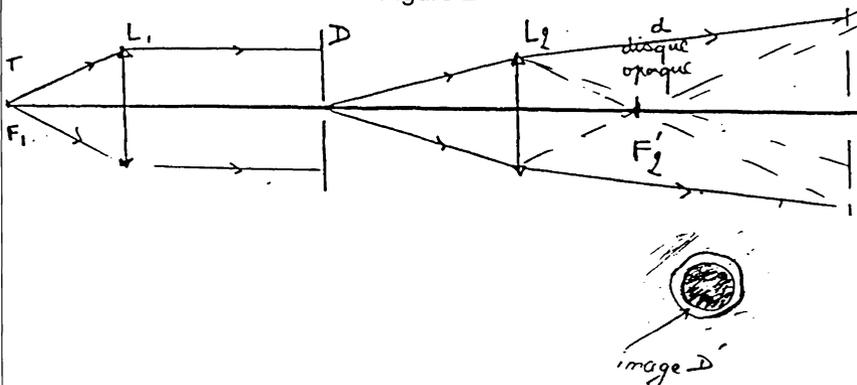


Figure 2



« Le diamètre du disque opaque est très inférieur à celui de l'image de D. On n'observe plus une tache circulaire mais un anneau lumineux autour d'un rond noir. »

Figure 3

À la question sur la forme de l'image du diaphragme « diffractant » quand une partie de la lumière issue de la lentille est arrêtée, on obtient un nombre élevé de non-réponses (32 %, N=37). Trois types de réponses sont données.

L'image est **identique** à celle obtenue en l'absence de disque (souvent, elle est dite moins lumineuse) (19 %) :

« *le cache ne gêne pas pour l'image géométrique de  $D_2$*  »

Ce type de réponse est compatible avec ce qui se passe dans le cas de la formation d'une image étendue en éclairage incohérent. Deux étudiants accompagnent leur réponse d'une construction graphique. Celle de la figure 1 de l'encadré 5 fait apparaître la décomposition de l'objet en points-objets mais tout se passe comme si ces points étaient incohérents. Celle de la figure 2 de l'encadré 5 concerne le niveau macroscopique : les rayons de propagation de l'énergie semblent indépendants.

**L'image est différente** (19 %). Un seul étudiant décrit précisément la forme de l'image (on voit les bords lumineux sur un fond noir) et fait référence à la strioscopie (ce qui est correct). Il n'explique pas pourquoi la forme a changé.

**Le centre de l'image manque** (30 %) :

« *non, le centre sera masqué* »

Comme dans la question portant sur la forme de l'image d'un diaphragme « diffractant », l'image semble être la projection de la figure de diffraction sur l'écran d'observation : le cache placé sur le centre de la figure de diffraction empêchant la lumière de passer, la figure observée sur l'écran n'a pas de centre. Cela apparaît sur la construction utilisée sur l'unique schéma fourni avec ce type de réponse (figure 3 de l'encadré 5). L'image n'est pas obtenue par décomposition de l'objet en points-objets (interprétation de Lord Rayleigh) ou par décomposition de l'onde émergente de l'ouverture sur une base d'ondes planes (interprétation d'Abbe).

Terminons ce point sur la forme de l'image d'un diaphragme « diffractant » en disant qu'il serait nécessaire de prolonger cette étude en augmentant l'effectif de la population interrogée. Par ailleurs l'image d'un trou « diffractant » obtenue par strioscopie étant proche de l'image tronquée prévue par les étudiants, il serait souhaitable de choisir comme ouverture « diffractante » non pas un trou mais une fente rectiligne.

### 3.5. Discussion

Les résultats précédents confirment les hypothèses faites quant à l'utilisation d'un raisonnement de nature « géométrique ». En effet :

1° Les étudiants restent au niveau macroscopique et suivent les rayons de propagation de l'énergie issus de la source au lieu de passer au niveau des ondes élémentaires et d'utiliser le principe de Huygens-Fresnel. Ces tendances se traduisent dans le cas présent par les erreurs suivantes :

- l'image d'un point à l'infini en présence de diffraction est derrière le plan focal image de la lentille d'observation ;
- l'image d'un diaphragme éclairé par un faisceau parallèle n'existe pas ou est confondue avec celle de la source.

2° Les quelques étudiants qui se placent au niveau des ondes élémentaires pour répondre aux questions sur l'image d'un diaphragme favorisent l'interprétation de Lord Rayleigh basée sur le concept de sources de Huygens au détriment de celle d'Abbe basée sur celui de composantes d'ondes planes : leur réponse est ainsi très voisine de celle donnée par le modèle géométrique.

3° Les rayons de propagation de l'énergie et les points objets que les étudiants font intervenir semblent être respectivement indépendants et incohérents. La situation de filtrage spatial en éclairage cohérent est assimilée à une situation de formation d'image en éclairage incohérent : l'image d'un diaphragme « diffractant », obtenue en présence d'un cache au foyer image de la lentille d'observation, est identique à celle obtenue en l'absence de cache.

Parallèlement à cette tendance vers un raisonnement de nature « géométrique », il est à noter l'existence d'une tendance vers une vision sélective de la formation des images. En effet, pour les étudiants :

- il ne peut y avoir d'image en présence de diffraction, que ce soit pour la source ponctuelle ou l'objet éclairé ;
- un objet éclairé en lumière parallèle a une image quand il « diffracte » la lumière. Il se pourrait que l'on retrouve ici la tendance à matérialiser les concepts dégagée lors de nos précédentes recherches sur la phase et la surface d'onde (Maurines, 1995, 1997a) et rejoignant celle mise en évidence par Bouwens (1987), Pérales et al (1989), Kaminsky (1989) à propos du rayon lumineux. Les étudiants traitent un objet éclairé comme une source de lumière et font intervenir les sources de Huygens pour positionner son image uniquement quand le faisceau lumineux issu de l'objet est divergeant, autrement dit quand ce faisceau ressemble à celui

issu d'une source usuelle de lumière. Toutes ces tendances pourraient traduire le fait noté par Smit & Finegold que pour les étudiants « *a model is depicted as being nearly similar to the real entity that serves as the subject of modelling* » (Smit & Finegold, 1995, p. 632).

Par ailleurs, on retrouve dans ces situations ondulatoires un raisonnement en termes d'image voyageuse, largement étudié dans des situations d'optique géométrique (Fawaz & Viennot, 1986 ; Goldberg & Mac Dermott, 1987 ; Feher & Rice, 1987 ; Kaminsky, 1989 ; Galili, 1996). L'image est considérée comme un tout : elle semble être la matérialisation sur un écran de l'objet qui voyage et se modifie au fur et à mesure des obstacles rencontrés sur son chemin. Ainsi, quand la diffraction ne peut être négligée quelque part dans un système optique, les images qui suivent sont toutes accompagnées de diffraction, comme si elles avaient gardé la mémoire de cette diffraction. L'image de la source n'existe pas, seule l'image du dernier obstacle rencontré (ici le diaphragme éclairé) existe. Le centre de l'image d'un diaphragme « diffractant » manque quand un petit cache est placé au foyer image de la lentille d'observation. Un seul rayon contribue à la formation de l'image d'un point.

### 3.6. Quelques remarques sur l'enseignement

En conclusion de cette étude sur la formation des images, nous voudrions montrer sur quelques points que l'enseignement actuel ne favorise pas une remise en cause de la tendance à utiliser un raisonnement de nature « géométrique » et que, sans doute, il induit les tendances à une vision sélective de la formation des images. En effet :

- en ce qui concerne la tendance à raisonner comme si la lumière était incohérente et à considérer des rayons d'énergie indépendants, certains manuels s'appuyant sur l'expérience de stioscopie pour introduire la diffraction ne précisent pas que la forme de l'image de l'objet éclairé est différente quand une partie de la lumière émergeant de la lentille est supprimée (Queyrel & Mesplède, 1996, p. 118) ;

- en ce qui concerne la tendance à considérer que seule la source a une image, ce n'est qu'à un niveau d'enseignement élevé qu'on s'intéresse aux images données par les objets intermédiaires d'un système optique. En optique géométrique, c'est lors de l'étude des pupilles et lucarnes d'entrée et de sortie que le problème se pose et encore le diaphragme apparaît-il plutôt comme limitateur de l'étendue d'un faisceau ou d'une image que comme objet transparent proprement dit. Ce n'est qu'en optique ondulatoire et dans des situations d'éclairage cohérent et de filtrage spatial qu'il est vraiment abordé sous cet angle ;

– en ce qui concerne la tendance à penser qu'un diaphragme éclairé en lumière parallèle a une image uniquement quand il « diffracte » la lumière, la plupart des manuels ne s'intéresse qu'à la forme et à la position de l'objet dont on cherche l'image, la nature matérielle de l'objet et à son interaction avec la lumière n'étant pas prises en compte. L'objet, quel qu'il soit, est assimilé à une source primaire, ponctuelle ou étendue, de lumière divergente. En ce qui concerne la tendance à faire intervenir les sources de Huygens uniquement quand le diaphragme « diffracte » la lumière, rares sont les livres montrant que le principe de Huygens-Fresnel peut être utilisé dans le cas de la propagation de la lumière à travers une « grande » ouverture ;

– en ce qui concerne la tendance à considérer que la formation des images et la diffraction sont deux phénomènes qui s'excluent, ce n'est qu'au niveau du deuxième cycle universitaire que ces deux phénomènes sont étudiés de manière conjointe. Dans les livres traitant des ondes et de la diffraction utilisés en premier cycle universitaire, il n'est pas toujours dit que la figure de diffraction observée dans le plan focal image de la lentille est l'image déformée par diffraction de la source à l'infini. Dans ceux traitant de l'optique géométrique, la déformation d'une image par diffraction n'est pas toujours mentionnée. Certaines définitions pourraient laisser penser qu'un point a une image uniquement si tous les rayons émergent d'un système optique se coupent en un seul point. Ainsi on lit : « *soit un système quelconque (S) et soit une source ponctuelle de lumière placée en A. Si toute la lumière issue de A vient converger après avoir traversé (S) en un point A', A' est l'image de A à travers (S)* » (Queyrel & Mesplède, 1995, p. 36). Par ailleurs, le concept de rayon semble être utilisable dans certains livres uniquement en absence de diffraction. Ainsi il est dit : « *dans un milieu isotrope, le rayon lumineux est défini par la droite normale à l'onde suivant laquelle l'énergie lumineuse se propage lorsqu'on néglige la diffraction* » (Pérez, 1994, p. 4), « *l'étude sommaire que nous venons de faire montre que pour pouvoir utiliser la notion de rayon lumineux, on doit considérer des faisceaux limités par des diaphragmes dont les dimensions linéaires sont grandes devant la longueur d'onde  $\lambda$*  » (Bertin et al, 1978, p. 6). Comme une image est obtenue en utilisant des rayons, se pourrait-il que les étudiants en concluent qu'en présence de diffraction, il n'y a pas d'image ?

Terminons ceci en signalant que les livres utilisés dans le premier cycle universitaire ne mentionnent pas le modèle spectral de la diffraction et ceci même lorsqu'il s'agit d'interpréter des expériences de filtrage spatial. Si ceux utilisés au deuxième cycle disent tous que la tache de diffraction observée dans le plan focal de la lentille correspond à la transformée de Fourier de l'amplitude de l'onde dans le plan de l'objet éclairé, rares sont ceux qui mentionnent l'interprétation d'Abbe et utilisent les schémas

correspondants. Il est d'ailleurs à noter que très peu de schémas sont utilisés dans les livres pour expliquer la formation des images. Seul un (Hecht, 1987), à notre connaissance, se distingue sur ce point.

## CONCLUSION

Les résultats obtenus sur les situations présentées ici confirment les hypothèses faites quant à l'existence de tendances vers un raisonnement « géométrique » en termes d'objet. Il reste des questions à approfondir, notamment en ce qui concerne la tendance à considérer qu'une image ne peut exister en présence de diffraction et celle à raisonner en partant de l'onde émergeant de l'ouverture diffractante. La question se pose également d'examiner ce que deviennent les réponses des étudiants dans des situations de formation d'images en éclairage incohérent et pour des objets éclairés autres que des diaphragmes. C'est dans cette dernière direction que nous avons orienté nos recherches.

Nous concluons simplement en mettant l'accent sur les trois points qui suivent.

Étudier une situation ondulatoire aussi bien au niveau des ondes élémentaires qu'au niveau macroscopique devrait permettre aux étudiants de faire un lien entre ces deux niveaux, autrement dit de mettre en regard le niveau concerné par le raisonnement commun et celui sur lequel l'enseignement actuel se focalise. Il n'est évidemment pas question de s'intéresser aux rayons de propagation de l'énergie dans n'importe quelle situation, l'étude pouvant nécessiter l'utilisation d'un modèle ondulatoire vectoriel. On peut par contre mentionner les deux niveaux d'analyse et chercher les rayons de propagation d'énergie d'une onde en champ lointain. On pourrait ainsi construire la surface d'onde d'une onde émergeant d'une ouverture en utilisant le principe de Huygens et en déduire les rayons de propagation de l'énergie. Dans une situation d'interférence à deux ondes, on pourrait s'intéresser à la structure de l'onde résultante.

Utiliser dans une même situation géométrique, aussi bien le modèle ondulatoire que le modèle géométrique, devrait permettre aux étudiants de comprendre que le modèle ondulatoire n'est pas réservé aux seules situations ondulatoires et les aider à ne pas matérialiser les concepts. Ceci pourrait être fait non seulement dans la situation de propagation à travers une « grande » ouverture mais aussi dans celle de la formation de l'image d'un point.

Terminons ces quelques remarques en disant que pour éviter une vision sélective de la formation des images, on devrait introduire la notion

d'image en partant de l'expérience (c'est une « copie » de l'objet), s'attarder sur le concept d'objet en explicitant les facteurs le caractérisant et susceptibles d'être pertinents (non seulement sa position et sa forme mais aussi sa nature matérielle, son interaction avec la lumière, etc.), s'intéresser aux images des différents objets constituant un système optique (pas seulement la source, mais aussi les diaphragmes, les lentilles, etc.) bien avant l'étude de la diffraction et du filtrage spatial.

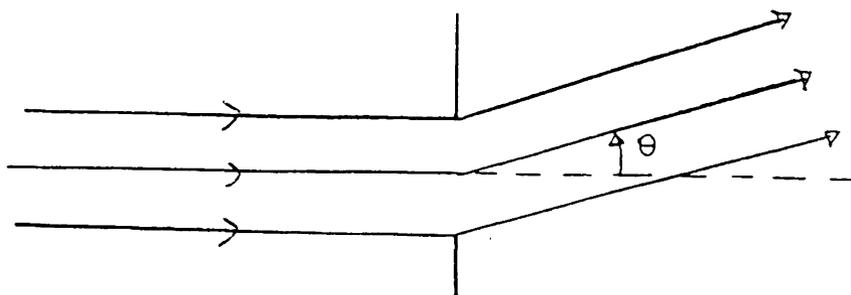
## BIBLIOGRAPHIE

- BERTIN M., FAROUX J.-P. & RENAULT J. (1978). *Optique géométrique*. Paris, Dunod.
- BOIVIN A., DOW J. & WOLF E. (1967). Energy flow in the neighborhood of the focus of a coherent beam. *Journal of the Optical Society of America*, vol. 57, n° 10, pp. 1171-1175.
- BORN M. & WOLF E. (1980). *Principles of optics*. New York, Pergamon Press.
- BOUWENS R. (1987). Misconceptions among pupils regarding geometrical optics. In J.D. Novak (Éd.), *Proceedings of the Second International Conference on Misconceptions and Educational Strategies in Sciences and Mathematics*. Ithaca, Cornell University, vol. 3, pp. 23-38.
- DETTWILLER L. (1990). *Qu'est-ce que l'optique géométrique ? Fondements et applications*. Paris, Dunod.
- FAWAZ A. & VIENNOT L. (1986). Image optique et vision. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 686, pp. 1125-1146.
- FEHER E. & RICE K. (1987). A comparison of teacher-students conceptions in optics. In J.D. Novak (Éd.), *Proceedings of the Second International Conference on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*. Ithaca, Cornell University, vol. 2, pp. 108-117.
- FRANÇON M. (1972). *Optique, Formation et traitement des images*. Paris, Masson.
- GALILI I. (1996). Students'conceptual change in geometrical optics. *International Journal of Science Education*, vol. 18, n° 7, pp. 847-868.
- 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, pp. 108-119.
- GOODMAN J.W. (1972). *Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie*. Paris, Masson.
- HECHT (1987). *Optics*. New York, Addison Wesley.
- KAMINSKY W. (1989). Conceptions des enfants et des autres sur la lumière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 973-996.
- LINDER C. & ERICKSON G. (1989). A study of tertiary students' conceptualizations of sound. *International Journal of Science Education*, vol. 11, special issue, pp. 491-501.
- LINDER C. (1993). University physics students' conceptualizations of factors affecting the speed of sound propagation. *International Journal of Science Education*, vol. 15, n° 6, pp. 655-662.
- MAURINES L. (1986). *Premières notions sur la propagation des signaux mécaniques : analyse des difficultés des étudiants*. Thèse, Université Paris 7.
- MAURINES L. (1992). Spontaneous reasoning on the propagation of visible mechanical signals. *International Journal of Science Education*, vol. 14, n° 3, pp. 279-293.

- MAURINES L. (1992). Mécanique du son. In Actes du deuxième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques, *Tréma*, n° 3-4, pp. 77-91.
- MAURINES L. (1998). Les élèves et la propagation des signaux sonores. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 800, pp. 1-22.
- MAURINES L. (1995). Les étudiants et la phase d'une onde progressive : résultats d'une enquête exploratoire. In G. Mary & W. Kaminsky (Coord.), *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. (1997a). Students and the wave-geometrical model of the propagation of waves in a three dimensional medium. In *Proceedings of the first international conference of ESEERA, Research in Science Education in Europe*. Rome, Kluwer, p. 103-112.
- MAURINES L. (1997b). Raisonnement spontané sur la diffraction. In J. Gréa (Éd.), *Actes du sixième séminaire national de recherche en didactique de la physique, de la chimie et de la technologie*. Lyon, Université Lyon 1, pp. 77-95.
- MAURINES L. (1999a). La propagation des ondes en dimension trois : analyse des difficultés des étudiants quant au modèle géométrico-ondulatoire. *Didaskalia*, vol. 15, pp. 87-122.
- MAURINES L. (1999b). Les étudiants et les situations ondulatoires de formation des images. In A. Durey (Éd.), *Actes des premières rencontres scientifiques de l'ARDIST*. Cachan, LIREST-ENS de Cachan, pp. 144-149.
- PERALES F.J. & CAZORLA F.N. & CERVANTES A. (1989). Misconceptions on geometric optics and their association with relevant educational variables. *International Journal of Science Education*, vol. 11, n° 3, pp. 273-286.
- PEREZ J.P. (1994). *Optique*. Paris, Masson.
- QUEYREL J.-L. & MESPLEDE J. (1995). *Précis de physique, Optique, Première année*. Paris, Bréal.
- QUEYREL J.-L. & MESPLEDE J. (1996). *Précis de physique, Optique, Deuxième année*. Paris, Bréal.
- SMIT J.J.A. & FINEGOLD M. (1995). Models in physics : perceptions held by final-year prospective physical science teachers studying at South African universities. *International Journal of Science Education*, vol. 17, n° 5, pp. 621-634.

**ANNEXE 1****Énoncé du questionnaire portant sur l'interprétation des schémas de diffraction de Fraunhofer**

Un laser émettant une onde plane monochromatique est placé devant un écran percé d'une fente fine infiniment longue. Dans l'étude de la diffraction à l'infini de la lumière émise par le laser, on s'intéresse à l'intensité de la lumière se propageant dans une direction  $\theta$  avec la direction incidente.



1) Les sources secondaires situées sur la fente diffractante dont parle le principe de Huygens-Fresnel et permettant de calculer l'intensité de la lumière dans la direction  $\theta$  sont-elles en phase ?

oui non pourquoi ?

2) Les rayons dessinés après la fente diffractante sont-ils ceux d'une onde plane ?

oui pourquoi ? quelle est son amplitude ?

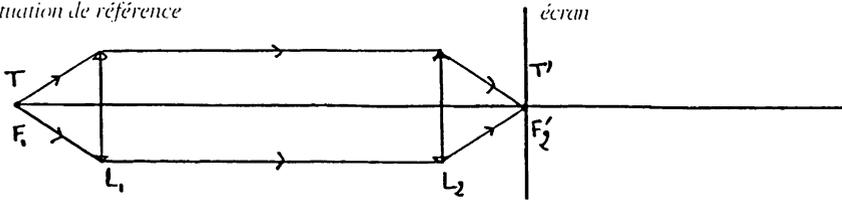
non pourquoi ? que représentent-ils ?

## ANNEXE 2

### Énoncé du questionnaire portant sur la formation des images en éclairage cohérent en présence ou en l'absence de diffraction

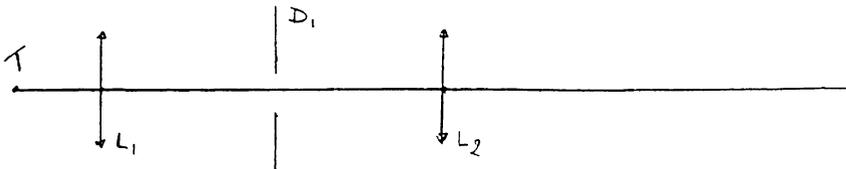
On éclaire un trou T grâce à une source de lumière jaune et à un condenseur (non représentés) et on fait l'image de T sur un écran E grâce à deux lentilles  $L_1$  et  $L_2$  de 10 cm de distance focale. Le trou T est dans le plan focal objet de la lentille  $L_1$  ( $F_1$  est le foyer objet de cette lentille) et l'écran E est dans le plan focal image de la lentille  $L_2$  ( $F_2$  est le foyer image de cette lentille).

*situation de référence*

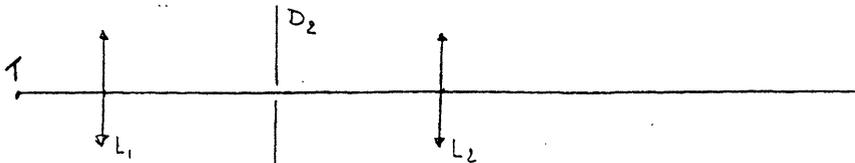


On intercale entre les deux lentilles un écran percé d'un trou. Le trou  $D_1$  est suffisamment grand pour que la diffraction puisse être négligée, le trou  $D_2$  a un diamètre tel qu'on ne peut négliger la diffraction de la lumière.

*schéma n° 1 : pas de diffraction*



*schéma n° 2 : diffraction*



1) Peut-on observer l'image du trou source T ?

*avec  $D_1$ :*

non, pourquoi ?

oui, pourquoi ? est-elle au même endroit que dans la situation de référence et de même forme ? oui, non, pourquoi ?

avec  $D_2$  :

non, pourquoi ?

oui, pourquoi ? est-elle au même endroit que dans la situation de référence et de même forme ? oui, non, pourquoi ?

2) Peut-on observer l'image du trou  $D_1$  ou  $D_2$  intercalé entre les deux lentilles ?

cas de  $D_1$  :

non, pourquoi ?

oui, pourquoi ? indiquer où sur le schéma n°1

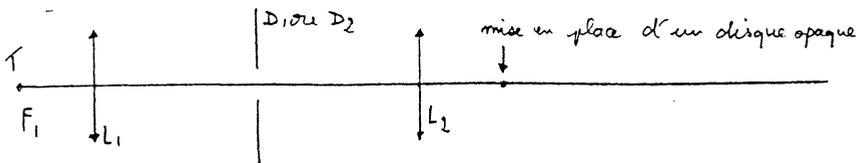
cas de  $D_2$  :

non, pourquoi ,

oui, pourquoi ? indiquer où sur le schéma n°2

3) Si vous avez répondu à la question 1 que l'on peut observer une image du trou source T, répondez aux questions suivantes :

On recouvre entièrement l'image de T obtenue en présence de  $D_1$  par un petit disque opaque et on utilise un disque identique pour recouvrir l'image de T obtenue en présence de  $D_2$ .



Observe-t-on l'image du trou  $D_1$  ?

non, pourquoi ?

oui, pourquoi ? est-elle identique à celle obtenue en l'absence de disque opaque ? oui non pourquoi ?

Observe-t-on l'image du trou  $D_2$  ?

non, pourquoi ?

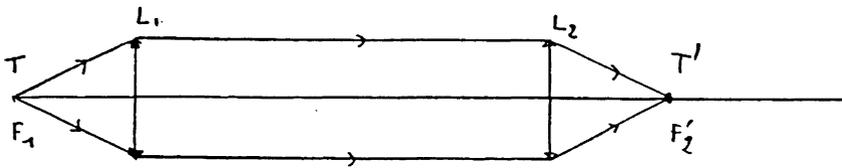
oui, pourquoi ? est-elle identique à celle obtenue en l'absence de disque opaque ? oui non pourquoi ?

### ANNEXE 3

## Énoncé du questionnaire portant sur la forme de l'image d'un diaphragme diffractant

On considère les situations suivantes :

#### situation 1



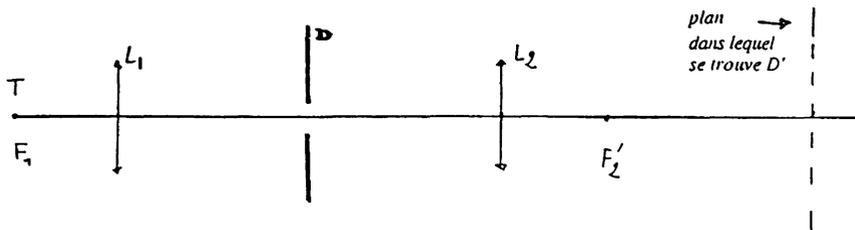
$T$  est un trou éclairé à l'aide d'une source de lumière jaune et d'un condenseur (non représentés).

$T'$  est l'image de  $T$  obtenue à l'aide des deux lentilles  $L_1$  et  $L_2$  de même distance focale.

Le trou est suffisamment petit pour que le faisceau lumineux émergent de la lentille  $L_1$  soit parallèle à l'axe optique du système.

#### situation 2

On intercale à présent entre les deux lentilles un diaphragme circulaire  $D$ . Le diamètre de  $D$  est suffisamment petit pour que la diffraction de la lumière ne puisse être négligée.  $D'$  est l'image que donne la lentille  $L_2$  du diaphragme  $D$ .



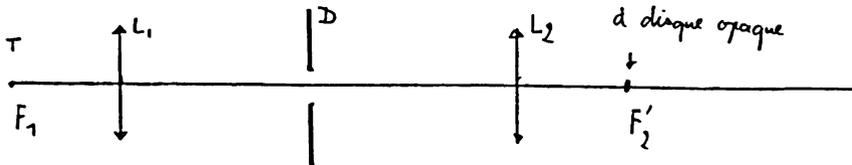
question : l'image  $D'$  du diaphragme  $D$  est-elle une tache circulaire ?

oui pourquoi ?

non pourquoi ? comment est-elle ?

**situation 3**

On place dans le plan focal image de la deuxième lentille un petit disque opaque  $d$ , centré en  $F'_2$ , de telle sorte que l'image  $T'$  du trou source soit recouverte.



*question* : Observe-t-on encore une image  $D'$  ?

oui pourquoi ?

est-elle identique à l'image observée dans la situation 2 ? oui non

pourquoi ?

non pourquoi ?

Cet article a été reçu le 10/06/1998 et accepté le 16/12/1998.