



HAL
open science

Deux modèles dans une situation de physique: le cas de l'optique. Difficultés des étudiants, points de vue des enseignants et propositions pour structurer des séquences d'enseignement.

Philippe Colin

► To cite this version:

Philippe Colin. Deux modèles dans une situation de physique: le cas de l'optique. Difficultés des étudiants, points de vue des enseignants et propositions pour structurer des séquences d'enseignement.. Enseignement de la physique [physics.ed-ph]. Université Denis Diderot Paris 7, 1999. Français. NNT : . tel-01275439

HAL Id: tel-01275439

<https://theses.hal.science/tel-01275439>

Submitted on 25 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE PARIS 7
Denis Diderot

THESE

présentée pour obtenir le grade de Docteur

Spécialité : Didactique des disciplines
Option : Didactique des Sciences Physiques

par Philippe COLIN

**DEUX MODELES DANS UNE SITUATION DE PHYSIQUE :
LE CAS DE L'OPTIQUE**

**Difficultés des étudiants, points de vue des enseignants
et propositions pour structurer des séquences d'enseignement**

soutenue le 15 décembre 1999 devant la commission d'examen constituée de

M. Mathias FINK	Président
M. Jean-Michel DUSSEAU	Rapporteur
M. Gérard MARY	Rapporteur
Mme Elena SASSI	Rapporteur
Mme Laurence VIENNOT	Directeur de thèse

Laboratoire de Didactique des Sciences Physiques

UNIVERSITE PARIS 7
Denis Diderot

THESE

présentée pour obtenir le grade de Docteur

Spécialité : Didactique des disciplines
Option : Didactique des Sciences Physiques

par Philippe COLIN

**DEUX MODELES DANS UNE SITUATION DE PHYSIQUE :
LE CAS DE L'OPTIQUE**

**Difficultés des étudiants, points de vue des enseignants
et propositions pour structurer des séquences d'enseignement**

Directeur de thèse : Laurence VIENNOT

Laboratoire de Didactique des Sciences Physiques

Je tiens à remercier très sincèrement

Messieurs les Professeurs M. FINK et G. MARY qui ont bien voulu s'intéresser à cette recherche et mettre leurs compétences de physicien à l'analyse d'un travail de didactique,

Madame le Professeur E. SASSI et Monsieur Le Professeur J-M. DUSSEAU qui ont accepté de consacrer leur temps et leurs compétences au jugement de ce travail.

Je remercie chaleureusement les membres de l'équipe du LDSP pour m'avoir accueilli dans leur laboratoire. Je remercie tout particulièrement G. REBMANN qui a bien voulu relire cette thèse et m'apporter de précieux conseils, et F. CHAUVET pour sa participation très active.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers les enseignants de l'Université Paris 7 qui ont accepté, au cours de longs entretiens, de me fournir la "matière première" sans laquelle ce travail n'aurait pu aboutir.

Mes remerciements s'adressent également aux enseignants de l'Université Paris 7 C. BRUILLARD, M. DEVAUD et B. PERRIN pour les discussions très fructueuses et très stimulantes autour de la physique mise en jeu dans mon travail.

Enfin, il m'est impossible d'exprimer en quelques mots tout ce que ce travail doit à Madame Le Professeur L. VIENNOT. Je tiens à la remercier ici très vivement, tout d'abord, pour m'avoir donné l'envie, lors de ma formation en didactique, de m'orienter vers ce domaine de recherche et, ensuite, pour avoir accepté de diriger ce travail qui, sans son soutien amical et enthousiaste et sans sa critique rigoureuse et efficace, ne serait sans doute pas arrivé à son terme.

SOMMAIRE

Prologue p 1

Chapitre 1 : En guise d'introduction **Les difficultés d'étudiants post-bac pour une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'image optique**

- 1. Introduction** p 3
- 2. Analyse des situations en termes de regroupements de « rayons »** p 4
- 3. Première mise en évidence de difficultés** p 6
 - 3.1. Présentation du questionnaire 1 p 6
 - 3.2. Les réponses attendues en questionnaire 1 : « deux modèles » p 7
 - 3.3. Conditions d'enquête p 9
 - 3.4. Analyse des réponses p 9
 - 3.5. Bilan pour le questionnaire 1 p 10
- 4. Image géométrique d'un objet diffractant : questionnaire 2** p 11
 - 4.1. Enoncé du questionnaire 2 p 11
 - 4.2. Réponse attendue p 12
 - 4.3. Analyse des réponses p 13
 - 4.4. Bilan pour le questionnaire 2 p 15
- 5. Figure de diffraction d'un objet : questionnaire 3** p 15
 - 5.1. Enoncé des questions (questionnaire 3) p 16
 - 5.2. Réponses attendues p 16
 - 5.3. Analyse des réponses au questionnaire 3 p 17
 - 5.3.1. Question 1 du questionnaire 3 p 17
 - 5.3.2. Question 2 du questionnaire 3 p 18
 - 5.4. Bilan pour le questionnaire 3 p 18
- 6. Discussion** p 20

Chapitre 2

Analyse de contenu : caractérisation des situations physiques

- 1. Introduction** p 23
- 2. Analyse de situations prototypiques d'optique** p 23
 - 2.1. Entrée en matière : le « rayon isolé » p 24
 - 2.2. Situations d'optique géométrique p 25
 - 2.2.1. Le rayon lumineux p 25
 - 2.2.2. Les bases de l'optique géométrique p 26

a) Hypothèses de Descartes	p 26
b) Principe de Fermat	p 27
c) Théorème de Malus	p 27
d) Principe d'Huygens	p 29
2.2.3. Les situations prototypiques d'optique géométrique	p 30
2.2.3.1. Incohérence des sources	p 30
2.2.3.2. Cohérence des sources	p 32
2.3. Limites de l'optique géométrique	p 35
2.4. Situations d'optique ondulatoire	p 37
2.4.1. Situations de type «superposition simple»	p 38
2.4.2. Situations de type «superposition combinée »	p 44
2.4.2.1. Diffraction et image optique	p 44
2.4.2.2. Formation d'une image et optique de Fourier	p 48
2.4.2.3. Filtrage optique	p 50
2.4.2.4. Conclusion sur l'analyse des situations de type «superposition combinée»	p 51
3. Récapitulation pour l'analyse des situations prototypiques	p 52
3.1. Idées fortes pour la caractérisation des situations	p 52
3.2. Catégorisation des situations prototypiques	p 53
4. Bilan du chapitre : deux aspects critiques pour la compréhension du domaine	p 55
4.1. Sélection par l'aval : rupture du lien entre dispositif et cadre d'analyse	p 55
4.2. Polysémie de la schématisation	p 55
4.2.1. Eléments graphiques à considérer prudemment	p 55
4.2.2. Les pièges du retour inverse	p 56
4.2.2.1. Figure de diffraction de Fraunhofer d'un objet	p 56
4.2.2.2. Agrandissement d'une figure de diffraction	p 57

Chapitre 3

Les enseignants et notre analyse

1. Introduction	p 59
2. Mode d'investigation	p 60
2.1. Méthode d'analyse	p 60
2.2. Protocole	p 61
3. Entrée en matière	p 63
4. Analyse thématique	p 66
4.1. Statut des tracés	p 66
4.1.1. Outils d'analyse	p 66
4.1.2. Statut du rayon lumineux	p 67
4.1.3. Statut des tracés en optique ondulatoire	p 68
4.1.3.1. Des réponses très partagées	p 68
4.1.3.2. Diffraction et interférences : analogie ?	p 70
4.1.4. Comparaison des statuts en optique géométrique et en optique ondulatoire	p 73

4.1.5. Bilan	p 74
4.2. Sélection par l'aval	p 75
4.2.1. Analyse pour le thème de la sélection par l'aval : plus de détail	p 75
4.2.2. Première approche	p 78
4.2.2.1. Hétérogénéité des analyses	p 78
4.2.2.2. Sélection et superposition au point d'arrivée	p 79
4.2.2.3. Manque de stabilité de la mise en œuvre de la notion de la sélection par l'aval	p 79
4.2.3. Les moments où interviennent sélection par l'aval et superposition	p 79
4.2.3.1. Caractère « non spontané » de la mise en œuvre de la sélection par l'aval	p 80
4.2.3.2. Caractère non « stable » de la mise en œuvre de la sélection par l'aval	p 81
4.2.4. Bilan sur l'utilisation de la sélection par l'aval	p 83
4.3. Récapitulation sur l'analyse thématique des entretiens	p 83
5. Une grille de lecture pour situer les blocages	p 84
5.1. Présentation du « contre-modèle »	p 85
5.2. Points communs entre certains aspects des analyses des enseignants et le « contre-modèle »	p 85
5.2.1. Les « rayons » de l'optique ondulatoire	p 85
5.2.2. « Sources » et « objets »	p 87
5.2.3. Les « ondes »	p 89
5.2.4. La lentille comme système imageur	p 89
5.2.5. Lecture gauche-droite	p 92
5.2.5.1. Lecture gauche-droite des situations : quelques exemples	p 93
5.2.5.2. Lecture gauche-droite et énergie	p 94
5.2.5.3. Lecture gauche-droite et différence de marche entre trajets	p 95
5.2.5.4. Lecture gauche-droite et superposition	p 95
6. Indications d'acceptabilité pour nos propositions	p 97
7. Conclusion sur l'analyse des entretiens	p100
Conclusion générale et propositions	p102
Références bibliographiques	p116
Annexe 1	
Analyse de contenu : aspects techniques	
Annexe 2	
Analyse de manuels	

Prologue

Ce travail vise à éclairer la mise en place d'enseignements sur les ondes à des niveaux compris entre une classe de Terminale scientifique et une licence de Physique.

C'est, comme souvent en didactique, à partir d'un constat de difficultés que s'est décidée une telle entreprise. Le premier chapitre de ce travail, consacré à un tel constat au niveau de la licence, sert ainsi d'introduction au corps du texte. On y trouvera détaillé notre angle d'attaque : s'agissant d'un domaine hautement formalisé, où interviennent à la fois des éléments d'optique géométrique et d'autres relatifs à la superposition des ondes, nous ne nous intéressons pas seulement à un éventuel raisonnement naturel dans ce domaine, mais bien au résultat de l'enseignement classiquement dispensé évalué à partir de questionnements proches de ceux que les étudiants peuvent rencontrer en situation d'enseignement. En fait, ce sont surtout les situations qui leur sont présentées qui ont ce caractère classique. Les questions même, on le verra, sont à la fois proches et distinctes de ce que distille l'habitude enseignante.

Une fois fait ce constat, comment progresser ?

Une démarche classique en didactique est de mettre au point une séquence innovante en tenant compte d'une analyse imbriquée du contenu et des difficultés observées, le tout dans la perspective générale de conduire les apprenants à s'impliquer au maximum dans la construction de leurs connaissances. On peut ensuite envisager les phases d'évaluation et l'étude de transférabilité auprès des enseignants. Le travail précurseur de Colette Hirn, à propos du programme d'optique de quatrième lancé en France en 1993, montre à quel point cette phase de transfert est loin d'aller de soi, et rappelle fortement cette évidence : les enseignants sont loin d'être des transducteurs passifs des innovations qu'on leur propose. Dans les transformations qu'ils opèrent, on peut repérer des tendances marquées.

Notre point de vue est que, plutôt que de construire, aussi judicieusement que possible, une séquence didactique pour constater ensuite, et tenter de surmonter, tous les obstacles que dressent les habitudes et les choix délibérés des enseignants concernés, il peut être utile de se soucier d'emblée de ces données relatives aux interlocuteurs cruciaux que sont les maîtres.

Nous souhaitons donc ancrer des propositions à la fois sur une analyse de contenu et sur une consultation d'enseignants, ces deux aspects étant très articulés avec l'étude initiale de difficultés communes.

Notre plan d'étude est donc le suivant :

Chapitre 1 : en guise d'introduction

Position du problème, via une étude de difficultés d'étudiants de licence à propos de situations mettant en œuvre à la fois des lentilles et la superposition d'ondes cohérentes.

Chapitre 2

Analyse de contenu dans des termes qui font écho aux difficultés des étudiants, sachant que les aspects les plus classiques ou les plus techniques sont rappelés en annexe 1 et qu'une annexe 2 présente l'analyse de manuels scolaires ou universitaires qui illustre les problèmes que nous soulevons.

Chapitre 3

Etude sur les points de vue des enseignants à partir de dix entretiens sur les difficultés des étudiants et sur notre analyse des contenus correspondants, ceci dans le but d'estimer le caractère plus ou moins acceptable d'éventuelles suggestions pour l'enseignement.

Conclusion générale et propositions

Il s'agira d'éclairer, à partir de nos résultats, les choix d'enseignement pour ce domaine de la physique dans les premières années universitaires ou en Terminale, c'est-à-dire lorsqu'il s'agira d'ondes sans que ce soit encore dans le cadre d'une optique de Fourier généralisée. Nous envisagerons plusieurs formats pour nos propositions, sachant bien qu'il s'agit seulement d'une phase très préliminaire dans la construction de séquences. La suite consisterait bien évidemment à spécifier dans le détail les objectifs et stratégies didactiques compte tenu des contraintes particulières d'un cadre institutionnel donné, puis d'évaluer aussi complètement que possible la séquence ainsi construite. C'est la suite que nous prévoyons pour ce travail de thèse.

Chaque introduction, pour ces quatre chapitres, développera notre problématique et fera référence aux acquis de la recherche en didactique plus avant que ne l'autorise ce prologue délibérément bref. Nous espérons ainsi permettre au lecteur pressé une entrée rapide dans le vif du sujet, ainsi qu'une éventuelle lecture séparée des chapitres de la thèse.

Chapitre 1 En guise d'introduction

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

Ce chapitre reprend un article de même titre (Colin et Viennot) accepté à Didaskalia en 1998.

Dans un premier temps, ce chapitre vise à mettre en évidence les difficultés d'étudiants (deuxième et troisième années universitaires) à propos de situations d'optique qui s'analysent classiquement, dans l'enseignement, à l'aide de deux « modèles » à la fois : « géométrique » et « ondulatoire ». Les résultats de trois questionnaires confirment l'existence de problèmes importants pour une compréhension intégrée de ces deux approches. Ils amènent à souligner la nécessité de construire une présentation du contenu en cause - situations d'optique impliquant à la fois diffraction et imagerie optique - qui soit adaptée à ce public tout en restant cohérente. Quelques germes pour cette construction sont proposés : importance de la notion de « groupement de rayons » et raisonnement « par l'aval », c'est-à-dire à partir du point d'observation.

1. Introduction

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

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

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

Ce chapitre porte sur les difficultés observées chez des étudiants de deuxième et troisième années universitaires à propos de situations nécessitant une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'imagerie optique.

Il s'agit de concilier deux manières de modéliser les phénomènes optiques longtemps présentées, dans l'enseignement, comme exclusives, ne se côtoyant que « à la limite ».

Certes, au niveau où nous nous situons et même plus tard, chacune pose encore, en elle-même, de gros problèmes aux élèves. Alors que le dispositif optique est le « rassembleur » d'une information optique qui, sans lui, se diluerait dans l'espace, la lentille mince, par exemple, est souvent réduite au rôle de « retourneur » d'une image comprise comme voyageant en bloc de l'objet à l'écran (Fawaz et Viennot 1986 ; Kaminski 1989 ; Goldberg et Mac Dermott 1987 ; Galili 1996). Un cache sur une lentille mince, dans cette perspective, se traduit (à tort) par la prévision d'un trou dans l'image. La propagation des ondes conduit elle aussi à des difficultés (Maurines 1986, 1993, 1995, 1997, Linder 1993) du fait de la mise en œuvre par les

étudiants d'un raisonnement où le signal s'apparente à un mobile répondant plus ou moins aux lois de la mécanique du solide. Wittmann (1998) a également souligné que, s'agissant des situations classiques d'optique ondulatoire - interférences à deux ondes par exemple - les étudiants se centrent plus sur des descriptions globales - à l'image des vagues observées sur une cuve à ondes - que sur les phénomènes locaux résultant de la mise en application du principe de superposition.

Nous faisons le choix ici, malgré la connaissance de ces lacunes dans la conceptualisation des étudiants, d'aller voir au delà, au carrefour de ces deux modèles, géométrique et ondulatoire.

Des travaux récents (Ambrose et al 1999) ont d'ailleurs souligné que ce carrefour occasionne de nombreux problèmes pour les étudiants lors de l'analyse d'une situation d'optique. En particulier, ceux-ci se révèlent très souvent incapables de mettre en œuvre le modèle approprié - géométrique ou ondulatoire - pour interpréter l'éclairage d'un écran.

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

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

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

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

Une discussion des résultats introduira la nécessité d'une réflexion approfondie sur la présentation d'un tel contenu.

2. Analyse des situations en termes de regroupements de « rayons »

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

convergent au point image A' tous les rayons issus de A, du moins tous ceux qui passent dans le dispositif optique (encadré 1, (a)).

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

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

Selon la situation, il est nécessaire de faire fonctionner l'un, l'autre ou les deux types de regroupement. Dans tous les cas, l'analyse de ce que l'on observe en un point part, en quelque sorte, à « rebrousse-rayon » : c'est la position du plan d'observation (plan image conjugué ou plan focal image de la lentille) qui fixe le type de regroupement à opérer (Viennot 1996b, Colin 1998, 1999).

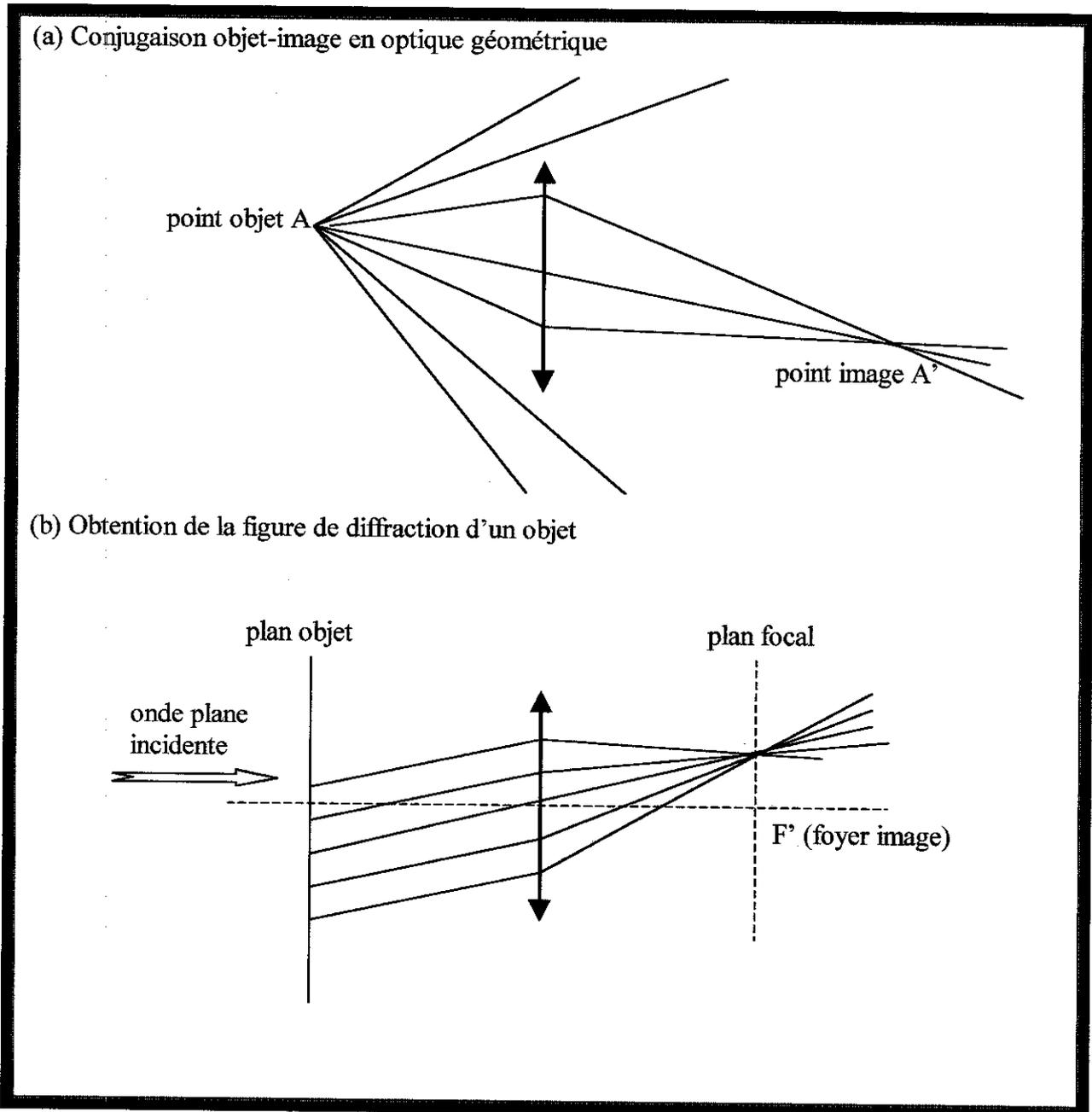
Les trois situations analysées ici confrontent, de manière plus ou moins explicite, les étudiants à ce choix de regroupement.

Dans chaque cas, nous situerons les réponses données par les étudiants par rapport aux réponses classiquement attendues que nous rappellerons pour chaque question. Nous n'envisagerons pas l'intervention d'un traitement analytique complet en termes d'optique de Fourier appliquée à la conjugaison optique comme aux situations classiques de diffraction (voir par exemple Goodman 1972).

Cette analyse ne constitue qu'une étape vers une explicitation du contenu que pourrait viser l'enseignement, à propos de ce que l'on nomme souvent les modèles « géométrique » et « ondulatoire ». Nous comptons sur les autres volets de notre recherche (analyse fine du contenu au chapitre 2, analyse de manuels en annexe 2, enquête auprès d'enseignants au chapitre 3) décrits dans la suite pour informer une tentative de formulation d'un contenu qui soit accessible à la population d'étudiants concernée tout en restant cohérente.

Encadré 1

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



3. Première mise en évidence des difficultés

3.1. Présentation du questionnaire 1 : « Image ? »

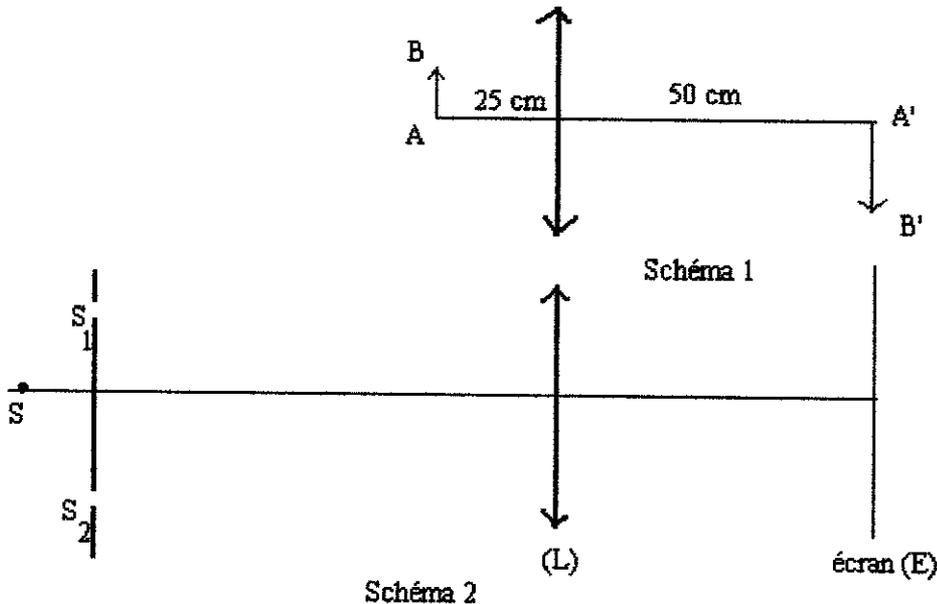
Le texte du questionnaire utilisé (voir aussi Dreyer 1996) se fonde sur une situation courante en travaux pratiques d'optique : on « agrandit » une figure d'interférence par l'usage d'une lentille. On pourrait d'ailleurs de la même manière « agrandir » une figure de diffraction.

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

Le texte du questionnaire est reproduit en encadré 2.

Encadré 2 : texte du questionnaire 1 « Image ? »

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



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

Questions

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

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

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

3.2. Les réponses attendues en questionnaire 1 : « deux modèles »

Une réponse couramment considérée comme correcte est qu'on observe sur l'écran l'image de la distribution lumineuse (des franges d'interférences) dans le plan conjugué, à 25 cm en avant de la lentille.

Il nous semble au moins aussi correct de dire que les franges observées sur l'écran derrière la lentille sont la distribution d'intensité lumineuse résultant des interférences entre les ondes diffractées en S_1 et S_2 (voir en note un rappel du principe du dispositif des trous d'Young). Chacune de ces ondes subit dans la lentille une transformation de type conjugaison optique (entre S_1 et son image S'_1 , respectivement S_2 et S'_2). Aux points situés à 25 cm en

avant de la lentille, les deux ondes se superposent sans avoir, sauf exceptionnellement, la même phase. Remarquons pourtant que chacun de ces points ne constitue pas un objet ponctuel au sens habituel du terme puisqu'il n'est pas la source d'une onde sphérique.

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

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

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

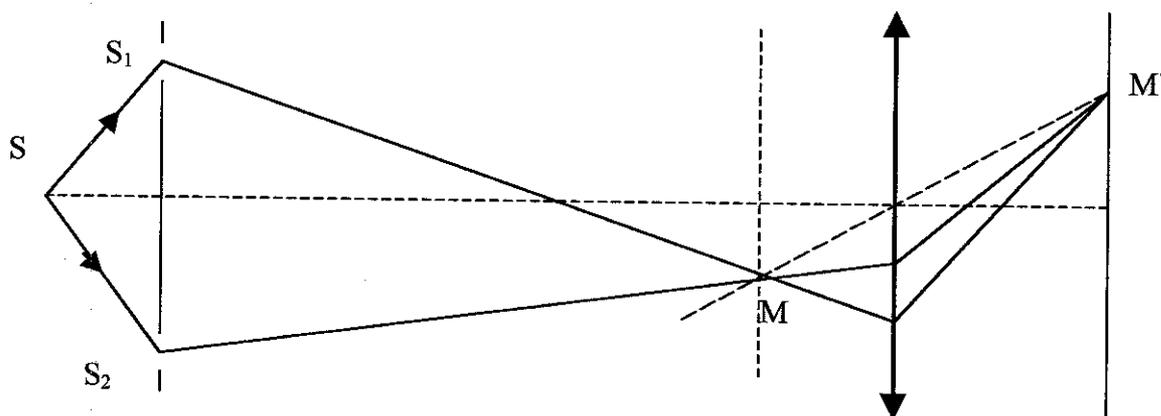


Figure 1 : schéma correct (non demandé) pour le dispositif du questionnaire 1

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

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

3.3. Conditions d'enquête

Cette enquête porte sur un ensemble de 120 étudiants : 71 étudiants de classes de Mathématiques Spéciales Technologiques d'un lycée parisien et 49 étudiants de l'université Denis Diderot (Paris 7) en licence de physique. Les résultats très voisins de ces deux échantillons ont été regroupés.

La durée de passation du questionnaire est de 15 minutes environ. Elle intervient après enseignement des interférences.

3.4. Analyse des réponses

Nous avons analysé ces réponses en nous centrant sur l'utilisation des modèles géométrique et / ou ondulatoire opérée par les étudiants pour justifier leurs réponses. La teneur de ces justifications nous intéresse plus, en l'occurrence, que l'affirmation ou la négation de la formation d'une image sur l'écran.

Les catégories regroupant l'ensemble des réponses ont été construites relativement à cette problématique. Elles sont décrites de manière brève dans le tableau 1, assorties des taux d'occurrence correspondants.

Les commentaires que nous citons dans l'analyse qui suit préciseront la signification de ces catégories.

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

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

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

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

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

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

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

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

- *Ce n'est pas une image, ce sont des franges d'interférences dues à l'intersection de deux rayons provenant de S_1 et S_2 .*
- *Ce n'est pas une image. On visualise les interférences entre les rayons issus de S_1 et ceux issus de S_2 sur l'écran.*

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

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

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

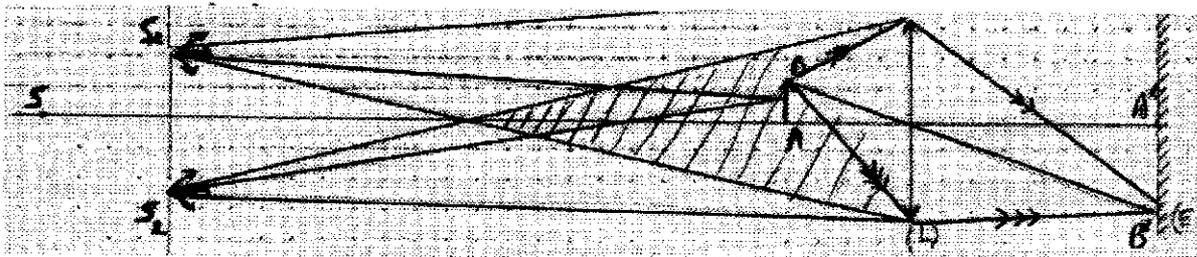


Figure 2 : un schéma en réponse au questionnaire 1
Disjonction de deux types de construction

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

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

3.5. Bilan pour le questionnaire 1 « Image ? »

Nous avons souligné les difficultés inhérentes à la situation proposée : bien que celle-ci soit très classique, elle n'est pas pour autant simple à analyser puisqu'elle combine deux situations, l'une typique d'optique ondulatoire - le dispositif des trous d'Young - l'autre typique

de l'optique géométrique - la formation d'une image par une lentille mince convergente -. Les étudiants sont donc amenés à mettre en oeuvre les deux modèles.

Outre la faiblesse du pourcentage de réponses faisant apparaître clairement les deux modèles (11%), nous retiendrons que près d'un étudiant sur deux ne semble utiliser qu'une seule approche à la fois, géométrique ou ondulatoire, et ne peut donc pas parvenir à une synthèse cohérente.

Une difficulté apparaît ici liée au caractère non classique de « l'objet » : franges d'interférences non « matérialisées ».

En matière de schéma, rien n'était demandé. Il suffisait de s'appuyer sur la définition de la conjugaison optique objet-image et, à la limite, un schéma était susceptible de compliquer les choses. Celui que nous avons cité en montre bien toute la difficulté : comment utiliser les mêmes tracés dans deux types de construction? Les tracés utilisés pour interpréter l'état interférentiel d'un point du plan conjugué de l'écran (en figure 3) s'arrêtent net, dans ce schéma, lorsqu'il faut aborder la lentille pour poursuivre la construction.

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

4. Image géométrique d'un objet diffractant : questionnaire 2

Le cadre de l'enquête est celui d'un examen (Juin 1996) après un enseignement de licence sur les ondes, dont la diffraction a constitué l'un des derniers sujets traités. L'essentiel du problème posé porte sur le phénomène de diffraction observé dans le plan focal d'une lentille. La formation de l'image géométrique n'intervient que comme question préliminaire (c'est sur elle que portera notre analyse) et comme question finale où l'on demande de décrire l'éclairement de l'écran obtenu après un filtrage spatial.

L'analyse s'appuie sur les réponses de 169 étudiants.

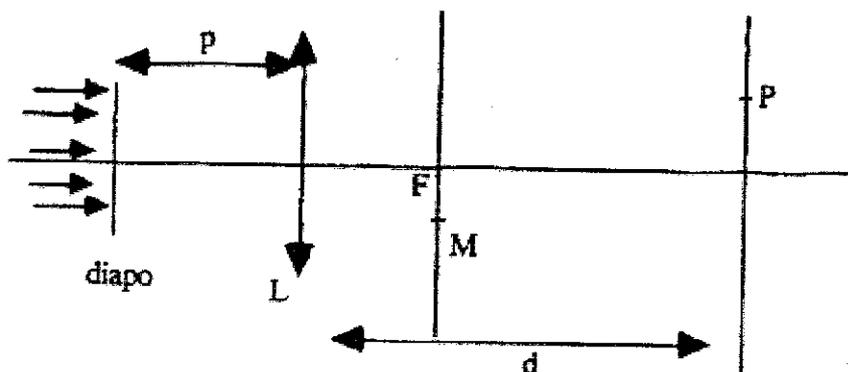
4.1. Enoncé du questionnaire 2

L'encadré 3 donne le texte du questionnaire 2

Encadré 3

Image géométrique d'un objet diffractant : questionnaire 2

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



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

4.2. Réponse attendue

L'objet « flottant » que constituaient les franges d'interférences du questionnaire précédent, se trouve remplacé ici par un objet tout à fait matériel, une diapositive. Les deux modèles géométrique et ondulatoire interviennent conjointement : chaque point de la diapositive constitue par diffraction un point dont la lentille fournit l'image optique (nous ne pouvons pas ici entrer dans le détail des mécanismes intervenant au sein de la diapositive et nous nous contenterons de rappeler qu'il s'agit d'une approximation dont les conditions de validité sont satisfaites dans la situation présentée). Voici donc bien en oeuvre deux approches : diffraction et imagerie optique.

Classiquement, la construction de l'image optique s'appuie sur le tracé de rayons particuliers dont nous connaissons la marche. Le tracé d'un seul rayon suffit pour trouver le point objet correspondant au point image P puisque les positions des plans image et objet sont connues. On attend donc, par exemple, le tracé du rayon (1) passant par le centre optique de la lentille ou d'un rayon (2) passant par un foyer (figure 4). Les tracés des autres rayons demandés devant passer par les points objet et image peuvent ensuite être déterminés grâce à la seule connaissance du couple objet-image en cause.

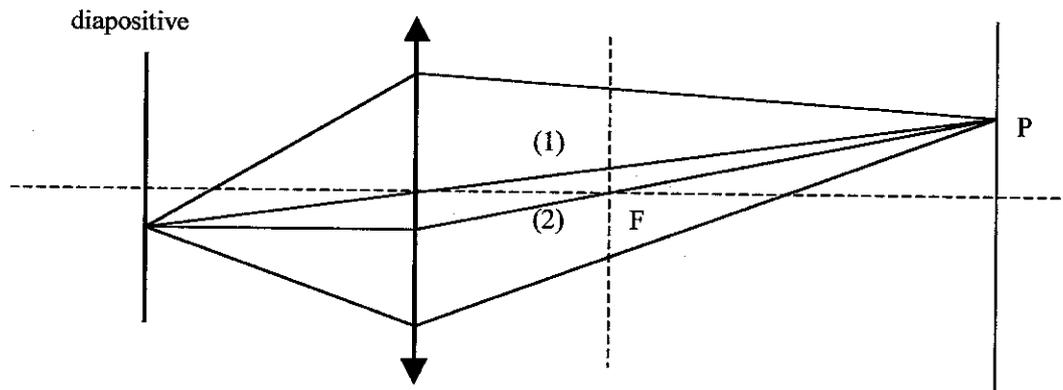


Figure 4 : une réponse correcte au questionnaire 2

4.3. Analyse des réponses

Les résultats sont donnés dans le tableau 2.

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

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

Seul un étudiant sur quatre effectue correctement la construction.

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

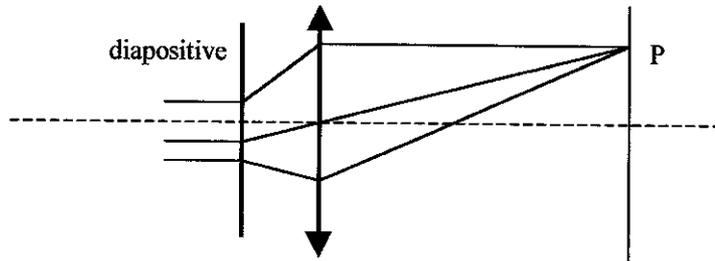
L'encadré 4 rassemble des exemples de telles réponses.

Un aspect commun à ces schémas est la convergence vers un point P au delà de la lentille. Cependant les tracés en cause ne proviennent pas tous du même point de la diapositive.

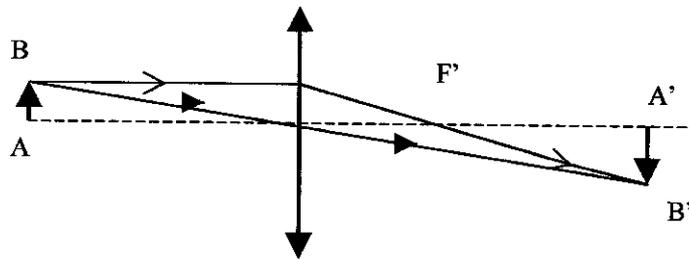
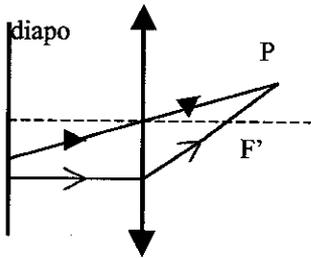
Dans la moitié de ces réponses (soit un quart de l'effectif total (27%)), les rayons incidents proviennent de points différents mais respectent certaines règles de l'optique géométrique (réponse (a)). La réponse (b) montre que ce n'est pas faute d'une connaissance du schéma prototypique. Seulement, cette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

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

Encadré 4 : exemples de réponses qui ne respectent pas la correspondance ponctuelle objet-image

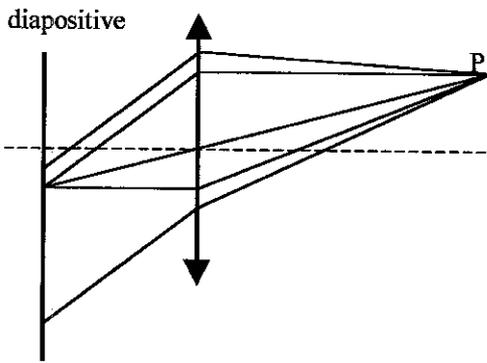


(a)

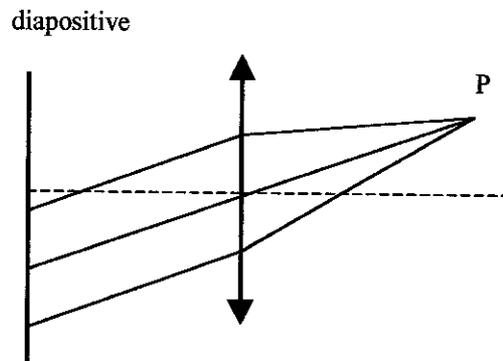


Le deuxième rayon (codé \rightarrow) correspond à la construction de l'image d'un objet par une lentille convergente.

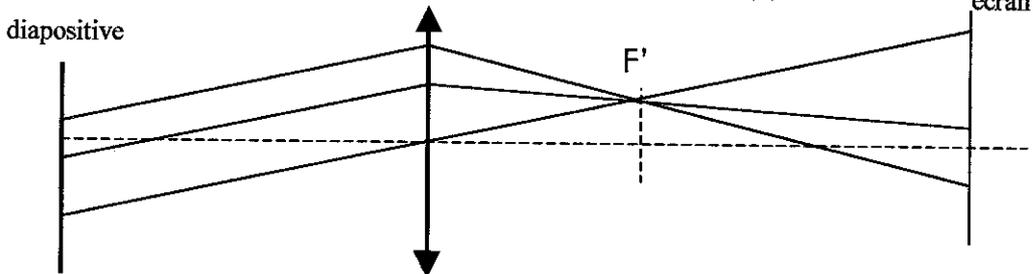
(b)



(c)



(d)



(e)

Les rayons sont déviés d'un angle α sortant du réseau. Les rayons convergent dans le plan focal image en F' (foyer image secondaire). Comme l'écran E n'est pas dans le plan focal image, les rayons ne convergent donc pas dans le même point.

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

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

4.4. Bilan pour le questionnaire 2

Nous avons pensé que la mise en oeuvre de la conjugaison optique serait facilitée du fait du remplacement de l'objet « flottant » du premier questionnaire, les franges d'interférence, par un objet matériel, la diapositive en l'occurrence. Or, dans ces conditions apparemment plus favorables, la mise en oeuvre de la conjugaison optique apparaît ici comme très perturbée par la situation de diffraction.

Un étudiant sur cinq va jusqu'à faire subir à un ensemble de rayons parallèles, regroupement classique en étude de diffraction, le sort normalement assigné à un ensemble de rayons émis par un point unique de la diapositive, dont la lentille ferait l'image à la position de l'image optique de la diapositive.

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

5. Figure de diffraction d'un objet : questionnaire 3

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

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

L'analyse porte sur les réponses de 251 étudiants de licence données à l'occasion d'un partiel sur les ondes (Mai 1996).

5.1. Enoncé des questions (questionnaire 3)

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

Encadré 5

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

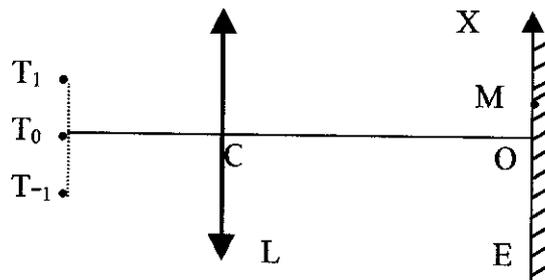
Un écran (E_R) est percé de trois trous identiques T_0 , T_1 , T_{-1} , séparés par une distance l . Une lentille convergente (L) de distance focale f est disposée à la suite de l'écran (E_R), son axe optique coïncidant avec l'axe de symétrie de (E_R) perpendiculaire à cet écran.

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

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

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

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



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

Questions

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

5.2. Réponses attendues

Une construction correcte (question 1a) est donnée figure 5.

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

bien un tracé unique. Si un pinceau issu d'un trou est tracé, il doit converger au point image de ce trou et non en M.

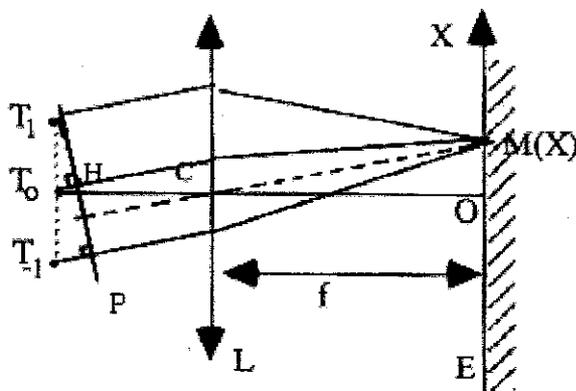


Figure 5 : schéma attendu* en réponse au questionnaire 3 (*voir le texte)

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

Le calcul du déphasage entre les ondelettes parvenant au point M (question 2) est très classique. Il utilise la relation de proportionnalité liant phase de l'ondelette et chemin optique parcouru. On se ramène donc pour calculer la différence de phase entre les ondelettes issues de deux trous, par exemple de T_0 et T_1 , au calcul de la différence de chemin optique pour aller de T_0 à M et de T_1 à M (figure 5). Cette différence est celle existant entre les distances de chaque trou à un plan P perpendiculaire à la direction commune des rayons incidents considérés (figure 5). En effet, au delà d'un tel plan, les chemins optiques qui restent à parcourir jusqu'à M sont tous égaux du fait des propriétés de la lentille.

5.3. Analyse des réponses au questionnaire 3

5.3.1. Question 1 du questionnaire 3

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

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

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

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

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

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

5.3.2. Question 2 du questionnaire 3

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

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

5.4. Bilan pour le questionnaire 3

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

Nous retenons les idées essentielles suivantes.

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

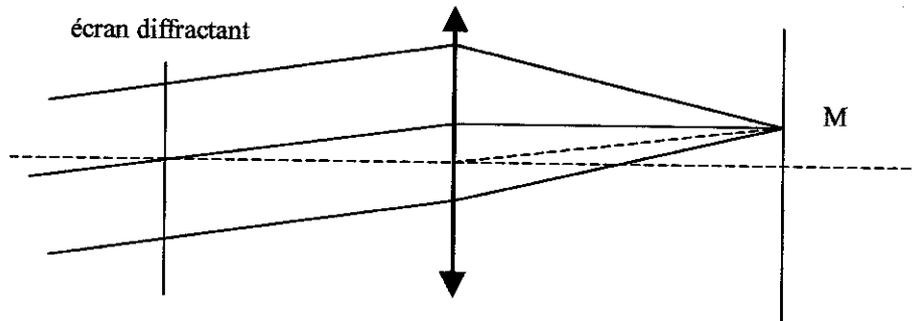
Cette absence peut conduire, d'une part, à une interprétation erronée de la diffraction comme une déviation des rayons incidents vers la direction des « rayons » diffractés représentés, d'autre part, à assimiler « rayons » diffractés dans une direction donnée et onde plane, assimilation déjà relevée dans plusieurs manuels d'enseignement (voir annexe 2).

Encadré 6

Quelques idées fausses à propos de la diffraction

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

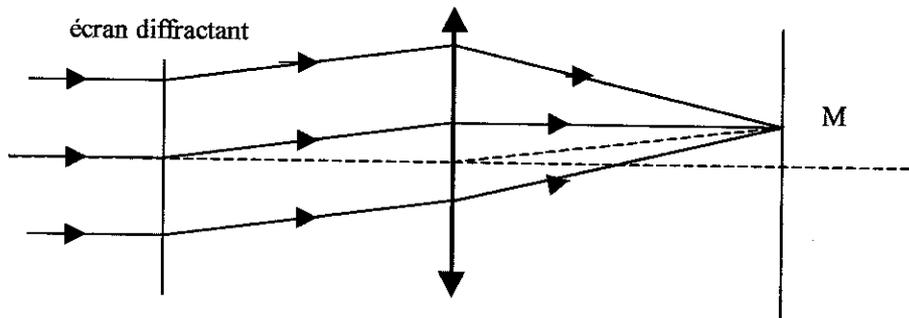
- (a) *Le faisceau lumineux provenant d'une source placée à l'infini, tous les rayons suivent un chemin parallèle les uns aux autres. Les trous laissent passer des rayons qui suivent toujours la même direction.*
- (b) *Le schéma définit un réseau à trois fentes. (...)*



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

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

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



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

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

6. Discussion

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

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

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

Nous avons souligné les points suivants :

- absence de l'idée de sélection des tracés suivant le point d'observation choisi, sans doute en étroite liaison avec la non-prise de conscience de la structure complexe de l'onde diffractée, si l'on en juge par la seule prise en compte des « rayons » diffractés suivant une direction donnée;
- aucun questionnement sur le statut des tracés, ce qui amène à identifier ceux-ci systématiquement aux rayons lumineux de l'optique géométrique ; cette identification permet d'interpréter les faits suivants : d'une part présentation erronée de la diffraction comme une déviation des rayons incidents vers la direction (unique) des « rayons » diffractés représentés, d'autre part, assimilation des « rayons » diffractés dans une direction donnée à une onde plane, l'optique géométrique étant mise en oeuvre hors de son domaine de validité.

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

Quand tant d'études sur les difficultés en optique géométrique nous apprennent la prégnance d'un modèle global du transport de l'information lumineuse, l'objet émettant une image de lui-même qui se transporte en bloc jusqu'à l'écran, quand plus largement on sait que les raisonnements les plus répandus dans la physique commune prennent le format d'une histoire, alors on ne peut s'étonner qu'il soit difficile d'analyser des situations par procédure de

tri dans un tout complexe, et encore plus d'effectuer ce tri à « rebrousse-rayons », c'est-à-dire comme si l'on remontait le temps.

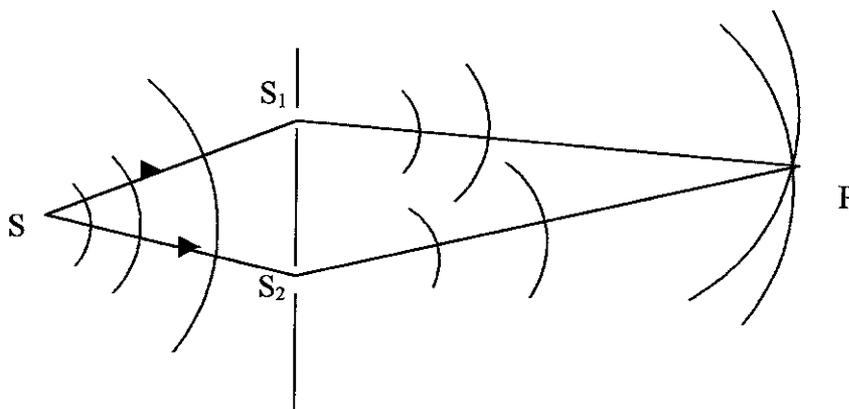
Autre aspect des difficultés : les « rayons », chemins de lumière, prennent eux-mêmes le statut de héros de l'histoire, leurs tracés en deviennent le compte rendu. Cette vision qui réduit l'histoire à la géométrie laisse en route une partie de l'information : la phase. Elle n'autorise qu'une seule histoire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

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

Telles sont les questions, au centre de ce travail de thèse, qu'il nous semble essentiel de prendre en compte si l'on veut définir, pour les situations impliquant à la fois diffraction et imagerie optique, un niveau de conceptualisation qui soit cohérent, moins complexe qu'une optique de Fourier généralisée, et adaptée aussi bien aux étudiants qu'à leurs enseignants. Ces derniers ne sont pas les moins importants à considérer puisque c'est d'abord eux qu'il conviendrait de convaincre pour la mise en place de toute proposition innovante. C'est pourquoi, après une analyse du contenu des situations sur lesquelles se fonde ce travail, c'est auprès d'enseignants que nous allons chercher la matière principale de notre étude.

Note

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



L'onde sphérique émise par la source ponctuelle S est diffractée par chacun des trous. Nous supposons les sources secondaires S₁ et S₂ ponctuelles. Ces sources sont cohérentes puisqu'elles sont issues de la même source ponctuelle S et elles émettent des ondes considérées comme sphériques. La cohérence temporelle des trains d'onde concernés est assurée (sauf

« grande » différence de chemin optique entre les trajets SS_1P et SS_2P). L'intensité lumineuse en un point résulte de la superposition des deux ondes. Sa valeur dépend donc de leur phase relative au point P, laquelle se détermine en évaluant la différence des distances (S_1P et S_2P) entre les sources secondaires et le point d'observation (il s'agit plus précisément des « chemins optiques », produits des distances parcourues par l'indice de l'air, mais cela revient au même ici). Bien entendu, un autre point d'observation amènerait à choisir d'autres tracés à partir de S_1 et S_2 .

Chapitre 2

Analyse de contenu : caractérisation des situations physiques

1. Introduction

La phase exploratoire de notre étude a mis en évidence les difficultés des étudiants confrontés à des problèmes dont la résolution nécessite la conciliation des domaines, relativement disjoints, du fait des programmes et des pratiques d'enseignement, de l'optique géométrique et de l'optique ondulatoire.

A ce stade, il s'avère nécessaire d'aborder de façon plus précise l'analyse de contenu de la physique. Il s'agit notamment de préciser notre analyse des situations présentées aux enseignants lors des entretiens à la base de notre étude, et de celles qui interviennent dans nos propositions. Afin de faciliter la lecture, nous avons placé en annexe 1 les aspects plus techniques concernant notamment le phénomène de diffraction. La lecture de cette partie technique n'est pas indispensable à la compréhension de notre analyse des situations.

Nous tentons ici de donner sur certains points réputés sans problème parce que construits sur des bases communément admises, des éclairages quelque peu inhabituels, en tout cas dans le cadre de la pratique enseignante courante.

Nous nous proposons de répondre de la façon la plus claire possible aux questions suivantes : sur quels critères déclare-t-on qu'une situation d'optique appartient au cadre de l'optique géométrique ? Au cadre de l'optique ondulatoire ? Quels types de traitement sont mis en jeu dans chacun des deux cadres pour analyser une situation ? Quelles difficultés attendre pour ce classement ?

Pour une première lecture rapide, le lecteur peut se diriger vers le § 3.

2. Analyse de situations prototypiques d'optique

Notre analyse repose sur la notion de sélection par l'aval présentée par L. Viennot (1996b). L'appartenance d'une situation à un cadre, géométrique ou ondulatoire, ne peut être simplement déduite d'une lecture de gauche à droite de la situation, type de lecture privilégié par l'optique géométrique « traditionnelle ». Elle impose au contraire une lecture de droite à gauche que nous avons baptisée « par l'aval » ou « à rebrousse-rayons ».

Il ne s'agit pas de substituer un nouveau dogme à l'ancien. L'optique géométrique élémentaire peut bien légitimement suivre le trajet de rayons issus d'un point objet et s'interroger sur leur point de convergence, et sur la position du plan image. Dans des situations classiques, avec image réelle « recueillie » sur un écran, c'est une position unique de l'écran qui apparaît comme intéressante, et l'on perçoit mal ce que viendrait faire une sélection par l'aval, sorte de pêche à l'information lumineuse. Mais dès que la vision directe entre en ligne de compte, c'est déjà la position imposée de la rétine par rapport au cristallin qui détermine ce qui est vu et / ou l'accommodation nécessaire. La même remarque se transpose à la pellicule d'un appareil photographique dont la position par rapport à un objectif donné détermine quelle partie du paysage sera la plus nette.

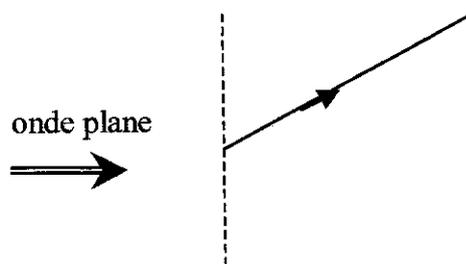
Des situations plus complexes d'optique géométrique amènent aussi, pour un dispositif donné, à changer le point de départ de l'analyse en fonction du problème qui se pose « en aval ». Ainsi, pour déterminer le cercle oculaire d'une lunette, s'intéresse-t-on à la pupille d'entrée. Les situations de filtrage de couleur (voir annexe 2 p36) avec un prisme éclairé en lumière blanche et « parallèle » conduisent aussi à voir non pas la source mais la face d'entrée comme un objet, dont l'image optique par une lentille située plus loin devrait être blanche sans intervention dans le plan focal et colorée dans le cas contraire. L'autre

filtrage, celui où le rôle dispersif du prisme est remplacé par la diffraction par un objet et où les fréquences susceptibles d'être filtrées sont spatiales, abondamment analysé ici, rend impérative la double analyse - l'une géométrique pour l'image optique du réseau, l'autre ondulatoire pour la figure de diffraction -, analyse dont chaque volet se décide par l'aval, par la position de l'écran.

Cette réflexion amène à revenir sur des situations qu'on pourrait croire plus élémentaires, telle la reproduction agrandie de franges d'Young par le truchement d'une lentille. Nous verrons, dans l'analyse de contenu présentée dans ce chapitre, que s'interroger sur le cadre d'analyse - géométrique ou ondulatoire - entraîne, outre la nécessité d'une lecture par l'aval, un questionnement sur les notions les plus usuelles mises en jeu en optique telles que « rayon », « source », « objet », « image ».

2.1. Entrée en matière : le « rayon isolé »

Une première approche de cette notion consiste à s'interroger sur la situation de la figure 1.



Question du « rayon isolé » : quel est le statut du rayon dessiné au delà du réseau ?

Figure 1

Il s'agit d'une situation très classique : une onde plane monochromatique est diffractée par un réseau. La question est la suivante :

Que représente le tracé de la figure 1 ? A quel cadre, optique géométrique ou optique ondulatoire, appartient-il ?

Nous proposons la réponse suivante : *Nous ne pouvons pas donner de réponse univoque à la question posée car nous ne sommes pas renseignés sur le **point d'arrivée** de ce tracé, plus précisément sur le point pour lequel ce tracé doit nous permettre de prédire l'état vibratoire.*

Il est encore trop tôt pour expliciter les réponses possibles.

En effet, pour répondre à la question posée, il faut s'interroger sur la façon de définir la nature de la situation proposée et par conséquent le statut des tracés.

Avant de rentrer dans l'analyse de contenu, nous devons souligner quelques points relatifs à sa mise en œuvre.

Il est tout d'abord essentiel de **localiser les sources de lumière** mises en jeu, qu'elles soient « réelles », « physiques » (on parle parfois de sources « primaires ») ou « fictives » (sources « secondaires »). Nous reviendrons plus loin sur les conséquences que peut entraîner la prise en compte de la nature de ces sources.

Ensuite, il est important de retenir qu'un tracé correspond à un **point de départ** et un **point d'arrivée** (au sens défini ci-dessus), ces points pouvant éventuellement être situés à l'infini.

Enfin, il est nécessaire de prendre en compte l'**ensemble des tracés** conduisant au point d'arrivée pour déterminer l'état vibratoire de ce point. Un tracé n'est donc pas, en général, considéré comme « isolé » mais appartient à un **groupement** dont il nous appartiendra de définir le type.

Nous ne ferons pas appel ici à la théorie électromagnétique de Maxwell (voir annexe 1) selon laquelle la lumière est un cas particulier d'onde électromagnétique résultant de l'association de deux champs de vecteurs, un champ électrique \mathbf{E} et un champ magnétique \mathbf{B} . Au niveau d'enseignement où nous nous plaçons, nous nous contentons de représenter la lumière par une quantité scalaire $U(\mathbf{r},t)$. Cette quantité que nous pouvons appeler vibration lumineuse, est fonction du point de d'espace repéré par \mathbf{r} et du temps t . Elle doit être bien sûr solution des équations de Maxwell dans les milieux rencontrés. La forme la plus simple de ces solutions est donnée par une expression du type suivant :

$$U(\vec{r},t) = A(\vec{r}) \cos[2\pi\nu t + \varphi(\vec{r})]$$

où $A(\mathbf{r})$ et l'argument de la fonction harmonique sont respectivement appelés amplitude et phase de la vibration lumineuse, ν étant la fréquence.

2.2. Situations d'optique géométrique

Traditionnellement, une situation appartient au cadre de l'optique géométrique si, pour le niveau d'interprétation requis, la prise en compte de la phase n'est pas nécessaire. Elle semble donc exclure les situations où sont présents les phénomènes d'interférences et/ou de diffraction. Nous verrons que cette catégorisation n'est pas assez fine et qu'il faudra aller au-delà.

Nous rappelons les notions et règles de base de l'optique géométrique.

2.2.1. Le rayon lumineux

C'est la notion centrale sur laquelle s'appuie l'essentiel des développements de l'optique géométrique.

Il ne s'agit pas d'une notion limitée au cadre de l'optique géométrique. Cette notion peut être conservée en optique ondulatoire. Toutefois, sa définition ne fait pas l'objet d'un consensus. Le rayon lumineux est le plus souvent défini dans le cadre d'une approche énergétique, comme ligne de courant de l'énergie électromagnétique, c'est-à-dire comme courbe tangente à la moyenne temporelle du vecteur de Poynting $\vec{P} = \vec{E} \wedge \vec{B} / \mu$ (moyenne temporelle car aucun détecteur ne peut « suivre », dans le domaine visible, les variations instantanées du vecteur de Poynting qui sont de l'ordre de 10^{-11} à 10^{-16} seconde). L'utilisation de cette définition du rayon lumineux suppose une résolution complète des équations de Maxwell, problème dont une solution analytique n'a pu être fournie que dans certains cas idéaux.

L'approximation de l'optique géométrique (voir annexe 1) permet en revanche d'en donner une solution relativement simple. Elle conduit à la détermination du trajet des rayons lumineux, donné par l'équation suivante :

$$\frac{d}{ds} \left[n(\vec{r}) \frac{d\vec{r}}{ds} \right] = \text{grad}n(\vec{r})$$

où s est l'abscisse curviligne.

Le fait essentiel à retenir est que cette équation ne fait aucunement intervenir les paramètres caractéristiques de la nature ondulatoire (pulsation) et électromagnétique (polarisation) de la lumière mais uniquement la géométrie du milieu par l'intermédiaire de l'indice $n(\vec{r})$ et de la géométrie de la source. Cette indépendance a permis le développement précoce de l'optique géométrique basée uniquement sur la détermination des trajets de la lumière.

Par souci de clarté, nous n'emploierons par la suite l'expression rayon lumineux que lorsque le trajet pris en compte correspond effectivement à une ligne de courant de l'énergie électromagnétique, soit à ce que L. Viennot (1996b) appelle un chemin d'énergie. Bien que le champ électromagnétique ne soit pas connu dans la plupart des situations courantes, les chemins d'énergie sont toutefois mis en œuvre du fait de la conjugaison optique introduite par les systèmes optiques : un point objet émet une onde sphérique convergeant en un point image établissant ainsi une correspondance énergétique entre objet et image.

Signalons que ce terme de chemin d'énergie ne doit pas être pris au premier degré : en effet, la mise en évidence de l'énergie nécessite la présence d'un détecteur (l'œil par exemple). Si on déplace le détecteur, on peut reconstituer le « chemin suivi » par l'énergie.

Notons enfin qu'il est difficile de concilier l'extension spatiale théoriquement nulle du rayon lumineux et son contenu énergétique. Une analyse énergétique nécessite la prise en compte non pas de rayon « individualisé » mais d'un faisceau ou pinceau. La conservation de l'énergie s'applique à un « tube de champ » et non à un rayon lumineux (la densité de flux de puissance n'est conservée sur un rayon lumineux que dans le cas d'une onde plane).

2.2.2. Les bases de l'optique géométrique

Si l'on fait l'économie du passage par la théorie électromagnétique de la lumière, quatre formulations peuvent être données pour décrire les phénomènes mis en jeu en optique géométrique :

- les hypothèses de Descartes,
- le principe de Fermat,
- le théorème de Malus,
- le principe d'Huygens.

Nous réservons une place particulière au principe d'Huygens puisqu'il en sera beaucoup fait état dans le cadre de l'optique ondulatoire.

Il convient d'ajouter le principe du retour inverse de la lumière : si la lumière suit un trajet dans un sens donné, elle le suit également dans l'autre sens.

a) Hypothèses de Descartes

Il s'agit de la formulation la plus simple, s'appuyant sur des lois d'ordre phénoménologique :

- le principe de propagation rectiligne de la lumière,
- les lois de Descartes relatives à la réflexion et la réfraction d'un rayon lumineux à la surface de séparation de deux milieux transparents, homogènes et isotropes.

b) Principe de Fermat

Le principe de Fermat s'appuie sur la notion de chemin optique. Le chemin optique L entre deux points A et B est égal au chemin qui serait parcouru par la lumière dans le vide dans le temps qu'elle met pour aller de A à B dans le milieu considéré. Par conséquent, $L = (AB) = c AB/v = nAB$ si v est la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu et n l'indice de réfraction.

Le principe de Fermat s'énonce alors : pour aller d'un point A à un point B, la lumière emprunte un chemin tel que le chemin optique est stationnaire (le plus souvent minimal). S'agissant en particulier de la propagation dans un milieu linéaire, homogène et isotrope, nous retrouvons le principe de propagation rectiligne de la lumière.

Cette formulation s'inscrit complètement dans le cadre de notre analyse puisqu'il est question d'un trajet de lumière entre un point de départ et un point d'arrivée. La stationnarité des chemins optiques a une portée très générale. Nous l'utiliserons fréquemment que ce soit dans le cadre de l'optique géométrique ou de l'optique ondulatoire.

Le principe de Fermat a une portée plus large que les hypothèses de Descartes car il s'applique à des milieux d'indice continûment variable.

c) Théorème de Malus

Le principe de Fermat concerne le trajet d'un rayon lumineux. Le théorème de Malus suppose quant à lui la connaissance préalable des surfaces d'onde générées par une source ponctuelle. Par définition, une surface d'onde est le lieu des points obtenus en portant à partir d'un point source des chemins optiques égaux sur tous les rayons. Une surface d'onde est donc définie en terme d'égalité de chemin optique. C'est une surface d'onde « géométrique » dont la détermination ne fait aucunement appel, en tout cas de manière explicite, au caractère ondulatoire de la lumière.

Le théorème de Malus peut s'énoncer ainsi :

Après des réflexions sur et des réfractions à travers un nombre quelconque de surfaces, les rayons lumineux issus d'une source ponctuelle qui arrivent dans un milieu homogène et isotrope sont normaux aux surfaces d'onde dans ce milieu.

L'orthogonalité des rayons lumineux aux surfaces d'onde permet de retrouver le principe de Fermat.

Retenons deux points importants relativement au théorème de Malus :

- tout d'abord, il permet de jeter un pont entre optique géométrique et ondulatoire en liant rayons lumineux et surfaces d'onde (dans les conditions d'application du théorème, surface d'onde « géométrique » définie en termes d'égalité de chemin optique et surface d'onde définie en termes d'égalité de phase en optique ondulatoire s'identifient).
- ensuite, il faut retenir que ce théorème ne s'applique qu'à des situations pour lesquelles il n'existe qu'une seule source. Le faisceau lumineux est dit isogène. Nous supposons bien sûr que ce faisceau ne traverse aucun dispositif interférentiel entraînant la perte du caractère isogène du faisceau. Ces situations « idéales » font partie de celles qui servent le plus souvent à l'introduction des concepts de base de l'optique géométrique. Les figures S4, S5 et S6 (encadré 1) tirées de manuels d'enseignement sont typiques du mode de présentation utilisé traditionnellement.

Encadré 1 : Quelques figures extraites de manuels (S4 et S5 : Bertin, Faroux et Renault 1986 ; S6 : Annequin et Boutigny 1973) à propos du théorème de Malus

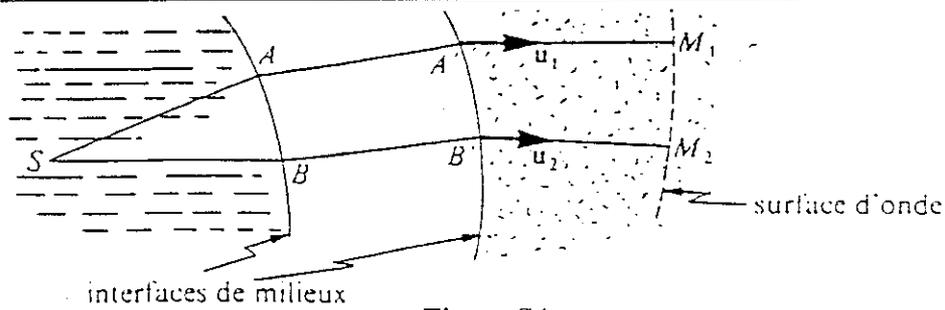


Figure S4

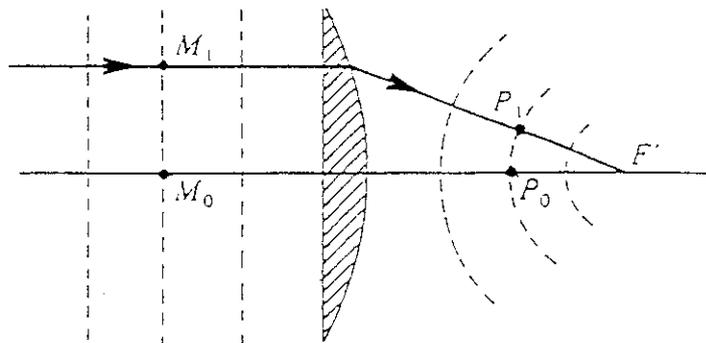


Figure S5

Σ et Σ' sont deux surfaces équiphases, \mathcal{R} et \mathcal{R}' sont deux rayons.

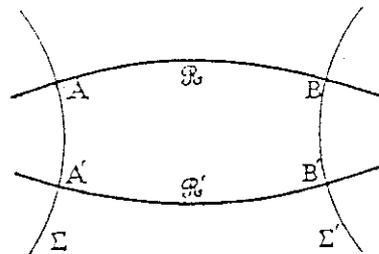


Figure S6

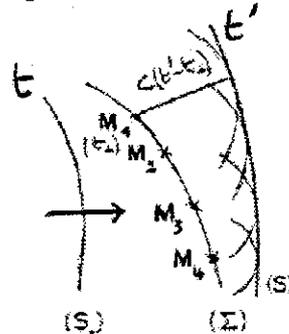
Les tracés représentés sur ces figures sont les trajets de lumière issus d'une source unique de lumière (située au point S pour S4, à l'infini pour S5). Les flèches indiquées sur les tracés de S4 et S5 précisent le sens de parcours de la lumière pris en compte. Suivant le principe du retour inverse de la lumière, ces tracés peuvent être parcourus dans l'autre sens. Par exemple, concernant la figure S5, si une source est placée au point F' , les trajets de la lumière seront identiques à ceux représentés. Sur la figure S6, le sens de parcours de la lumière pris en compte n'a pas été précisé, la lecture pouvant aussi bien s'effectuer de gauche à droite que de droite à gauche.

Les tracés représentés sur ces figures (rayons lumineux, surfaces d'onde) donnent du champ une description relativement complète. La sélection par l'aval n'est ici d'aucune utilité puisque par un point donné de l'espace, hormis le point source et son éventuelle image par un système optique, ne passe qu'un seul tracé, un seul rayon lumineux. Les situations peuvent s'analyser suivant une lecture de gauche à droite que l'on pourrait qualifier de

« déterministe ». Ces situations sont exceptionnelles puisque dans la pratique courante, rares sont les cas où l'on a accès à une connaissance complète du champ en tout point de l'espace.

d) Principe d'Huygens

Le principe d'Huygens peut s'énoncer ainsi : tout point de l'espace atteint par une onde se comporte comme une source d'ondes secondaires sphériques appelées habituellement ondelettes. La connaissance d'une surface d'onde à un instant t permet de construire (c'est la construction d'Huygens) la surface d'onde à un instant t' différent comme surface-enveloppe des ondelettes sphériques émises par les points d'une surface Σ donnée (voir figure 2).



Principe et construction d'Huygens
Figure 2

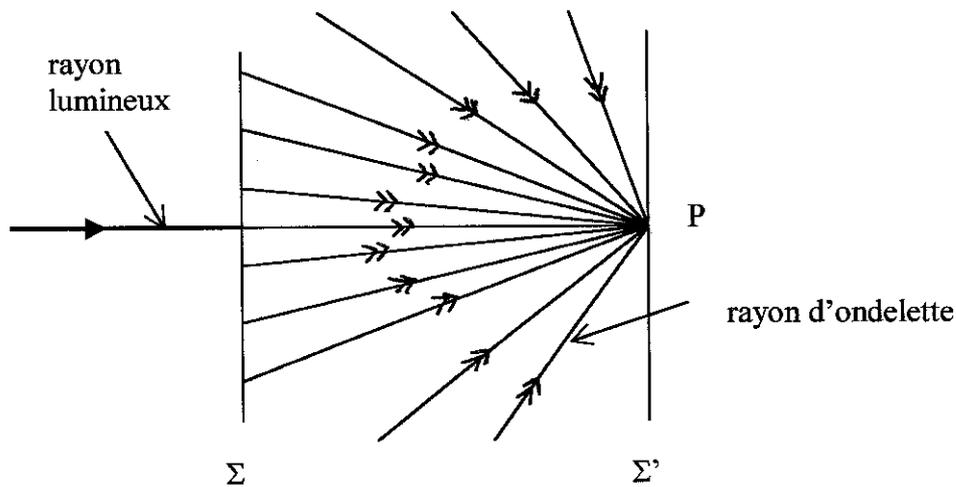
Notons que si le principe d'Huygens, avec quelques améliorations introduisant la notion de phase, est fort utile pour l'interprétation de nombreuses situations (notamment celles mettant en jeu la diffraction), la construction du même nom n'est opérationnelle que dans le cas d'une source ponctuelle unique et d'un milieu de propagation d'étendue infinie. On retrouve bien alors, par exemple, les lois de Descartes pour la réflexion et la réfraction. Si tel n'est pas le cas, en fait exceptionnel, cette construction est fortement sujette à caution (voir l'appendice 1 de l'annexe 2).

Soulignons également que le principe d'Huygens constitue une première approche d'un principe qui sera largement utilisé par la suite : le principe de superposition. L'onde résulte en fait de la superposition des ondelettes émises à partir d'une surface donnée. La surface d'onde est construite, quand cela est possible, à partir de l'ensemble de ces ondelettes et les rayons lumineux que l'on peut déduire de la connaissance des surfaces d'onde (ils sont orthogonaux à celles-ci) ne se déterminent qu'à partir de l'ensemble des rayons d'ondelettes émis par les sources secondaires prises en compte.

Pour illustrer ce point de vue, considérons la propagation d'une onde plane dans le vide. La surface d'onde Σ' est construite à partir des ondelettes émises par chacun des points de la surface d'onde Σ (voir figure 3). Cette construction impose la prise en compte de l'ensemble de ces ondelettes.

L'utilisation du principe d'Huygens entraîne une « rupture » dans l'analyse de la situation : les tracés représentent des rayons lumineux avant le plan d'onde Σ ; après celui-ci, ce sont des rayons d'ondelettes dont le statut sera précisé lors de l'analyse des situations d'optique ondulatoire.

Nous voyons donc que les rayons lumineux obtenus par l'application du principe d'Huygens peuvent apparaître, si l'on oublie leur principe de construction, comme ayant la même individualité que les rayons lumineux de l'optique géométrique classique mais qu'en fait ils la doivent au caractère complet, global de l'onde (Viennot 1996a).



Onde plane et principe d'Huygens : l'amplitude lumineuse en P est la somme des amplitudes correspondant aux trajets du type de ceux indiqués par une double flèche

Figure 3

Dans le cas où l'onde n'est pas d'extension infinie, le traitement est beaucoup plus complexe et nécessite la mise en œuvre du principe d'Huygens-Fresnel qui sera étudié plus en détail lors de l'analyse des situations d'optique ondulatoire en présence du phénomène de diffraction.

2.2.3. Les situations prototypiques d'optique géométrique

L'optique géométrique ne se limite pas à l'étude de la propagation d'un faisceau isogène. Elle porte surtout sur la formation d'une image par un système optique, situation pour laquelle intervient une multitude de sources.

Nous rappelons la définition que nous proposons d'une situation d'optique géométrique : toute situation dont l'analyse ne nécessite pas l'introduction explicite de la phase. Il s'agit donc de s'interroger sur les conditions pour lesquelles la phase peut être oubliée lorsque nous étudions la formation d'une image par un système optique.

Pour cela, il est nécessaire de s'intéresser à la nature des sources mises en jeu, plus précisément à leur cohérence (spatiale et temporelle). Nous ne ferons pas de développement sur la notion de cohérence et nous nous placerons dans les deux cas extrêmes qui font seuls l'objet d'enseignement pour les deux premières années universitaires : la cohérence totale ou l'incohérence totale des sources.

2.2.3.1. Incohérence des sources

Si les sources lumineuses sont des sources ordinaires, elles sont dites incohérentes : il n'existe pas, dans ces conditions, de différence de phase stationnaire entre les ondes émises par chacune d'elles. On parle alors d'indépendance des rayons lumineux : les tracés représentent les « chemins d'énergie » comme si les sources étaient considérées séparément. Par conséquent, à condition que le phénomène de diffraction ne soit pas présent entre point (ou plan) de départ et point (ou plan) d'arrivée, il suffit pour déterminer l'énergie en un point (plus correctement : la densité de flux de puissance) d'ajouter les énergies provenant de chacune des sources.

Pour illustrer notre propos, nous étudions ici le cas de la formation de l'image optique d'un objet par une lentille mince convergente, dépourvue d'aberrations. Nous négligeons la

diffraction due à l'ouverture de la lentille. Nous supposons que l'objet est éclairé de façon incohérente. L'objet peut alors être considéré comme un ensemble de sources lumineuses incohérentes.

La lentille est capable de donner de cet objet une représentation, appelée image, rappelant directement l'apparence de l'objet.

Pour la seule commodité de l'exposé, nous supposerons ici que l'image de l'objet donnée par la lentille est réelle.

L'objet étant pensé comme un ensemble de points sources, on peut construire l'image d'un point source (voir figure 4).

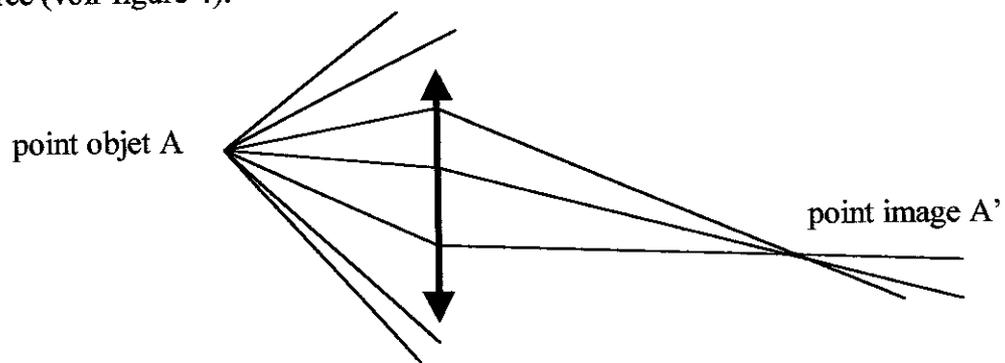


Image d'un objet par une lentille
Figure 4

Nous pouvons tracer les rayons lumineux suivant lesquels se propage l'énergie et les surfaces d'onde associées entre le point source et le point image correspondant. Ces rayons n'ont évidemment rien à voir avec la carte fort complexe voire inextricable des lignes de courant de l'énergie électromagnétique du champ résultant diffracté par l'objet.

La lentille réalise ici, nous verrons plus loin qu'elle possède d'autres propriétés, l'égalité des chemins optiques entre A et A' : tous les tracés issus du point objet A convergent au point image A'. Elle constitue donc un système imageur, transformant l'onde sphérique divergente émise par le point objet en une onde sphérique convergente au point image.

Si l'image est observée sur un écran, l'optique géométrique permet de prévoir à partir des tracés de la figure 4 l'apparence de l'écran si des modifications sont apportées au dispositif. On peut par exemple placer un cache devant la lentille et interpréter le fait que l'on obtienne une image moins lumineuse de l'objet. Ce dispositif a été à maintes reprises mis en œuvre pour mettre en évidence les raisonnements de sens commun utilisés pour analyser la formation d'une image : beaucoup d'apprenants conçoivent la formation d'une image comme le déplacement d'un objet - on parle alors d'« image voyageuse » (Goldberg et McDermott 1987, Fawaz 1985, Kaminski 1989). Ils affirment alors qu'en l'absence de lentille on obtiendrait une image non inversée de l'objet sur l'écran : le rôle de la lentille se réduirait dans ces conditions à un simple retournement de l'image. Suivant le même modèle de transport global, la présence d'un cache devant la lentille viendrait « découper » des parties de l'« image voyageuse » suivant les contours du cache.

Nous ferons également usage de cache pour vérifier si l'éclairement obtenu sur un écran à l'aide d'une lentille procède bien de l'analyse précédemment décrite. Il sera alors possible de décider si la situation proposée appartient ou non au cadre de l'optique géométrique.

2.2.3.2. Cohérence des sources

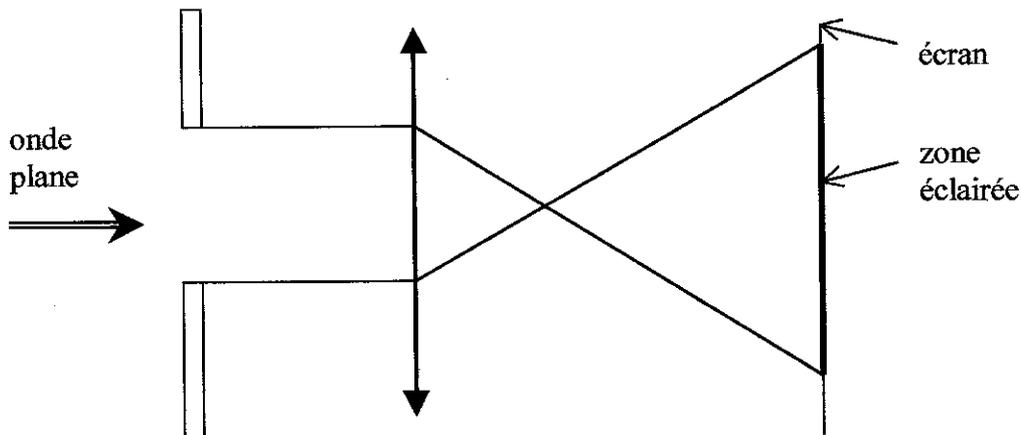
Si les sources sont cohérentes, l'analyse énergétique est dans la majeure partie des cas fort différente : la phase doit être prise en compte pour interpréter le phénomène d'interférences. Toutefois, la conjugaison optique entre les points objet et image assurée par le stigmatisme de la lentille permet « l'arrivée en phase des rayons » issus d'un point objet au point image conjugué. Elle nous autorise à considérer les tracés comme des rayons lumineux, c'est-à-dire des chemins d'énergie. On ne doit toutefois pas oublier que ce traitement n'est valide que dans le plan conjugué du plan de l'objet. La notion de sélection par l'aval est ici pleinement opérationnelle : si l'écran est déplacé, le traitement est complètement différent et relève de l'optique ondulatoire. La nature de la situation se décide à partir de la connaissance de la position de l'écran, donc par l'aval.

Les schémas S10, S11, S12, S13a, S14 (encadré 2) présentés lors des entretiens utilisent ce type de traitement, lequel perdrait toute validité s'il était appliqué hors des plans conjugués, objet-image, présentés, et si la diffraction intervenait entre ces plans (diffraction ici négligée mais en fait présente du fait de l'ouverture finie des lentilles et, pour la situation S10, du diaphragme D). Remarquons que la présence d'un objet diffractant n'entraîne pas systématiquement la non-pertinence, pour cette situation, du cadre de l'optique géométrique.

Nous observons, à propos des schémas présentés en encadré 2, que les sources considérées individuellement se présentent, classiquement, comme l'origine d'ondes quasi sphériques, et qu'à ce titre un cache sur la lentille ne devrait pas affecter l'allure de l'image, et simplement en diminuer la luminosité. De telles sources seront, dans la suite, qualifiées de « classiques », comme le sont les différents points sources incohérents d'un objet ordinaire.

Mais lorsque les sources sont cohérentes, c'est-à-dire avec des relations de phase stables dans le temps, il peut se produire, par suite du principe de superposition des amplitudes, un gommage des propriétés ci-dessus.

L'exemple de la fente large éclairée par une onde plane en témoigne (figure 5) : chaque point de la fente peut bien, à partir d'une analyse du type Huygens-Fresnel, être considéré comme une source d'onde quasi sphérique, si la diffraction par la fente n'est pas prise en compte, c'est, toute superposition effectuée, une onde plane comme découpée au cordeau qui émerge de la fente, et se transforme simplement, en traversant la lentille, en une onde sphérique.



Fente large éclairée par une onde plane

Figure 5

Encadré 2 : Quelques situations mettant en jeu des sources cohérentes (schémas extraits de Pérez 1994 pour S10 et de Hecht 1987 pour S11, S12, S13a ; S14 est un des schémas pouvant servir d'appui lors de la présentation de nos propositions)

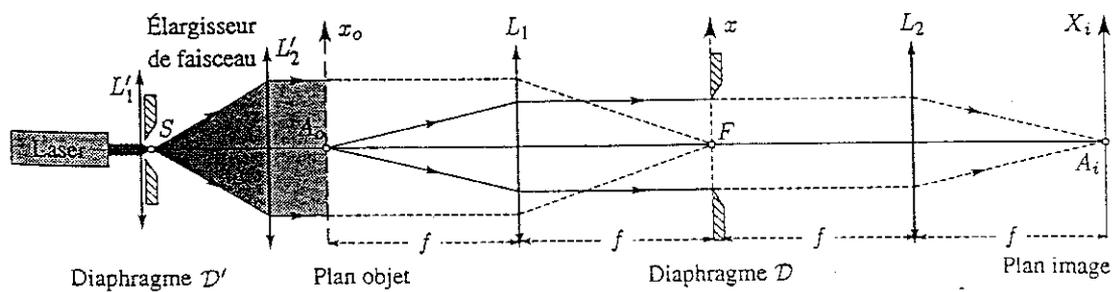


Figure S10

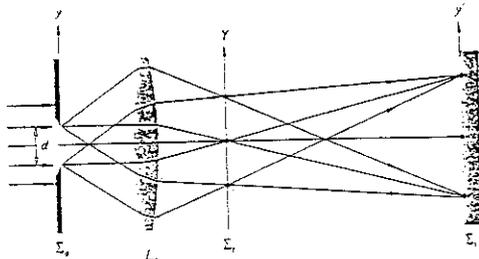
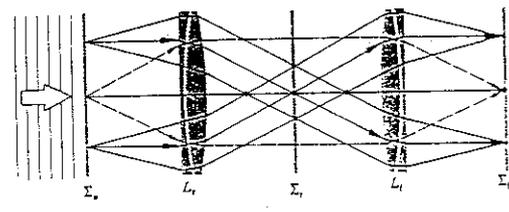
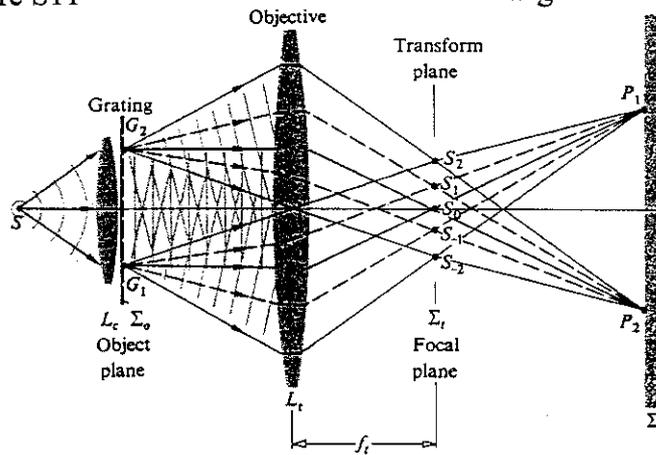


Image d'une fente
Figure S11



Plan objet, plan de Fourier et plan image
Figure S12



Formation d'une image
Figure S13a

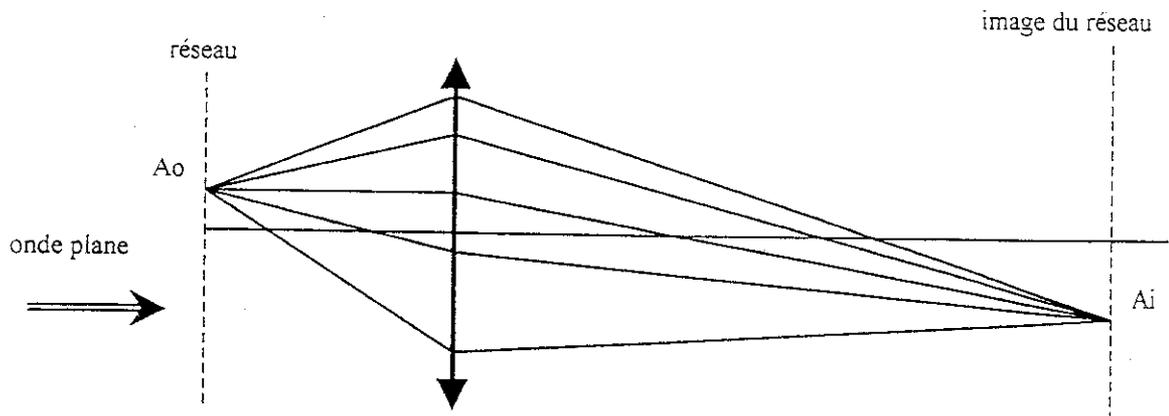
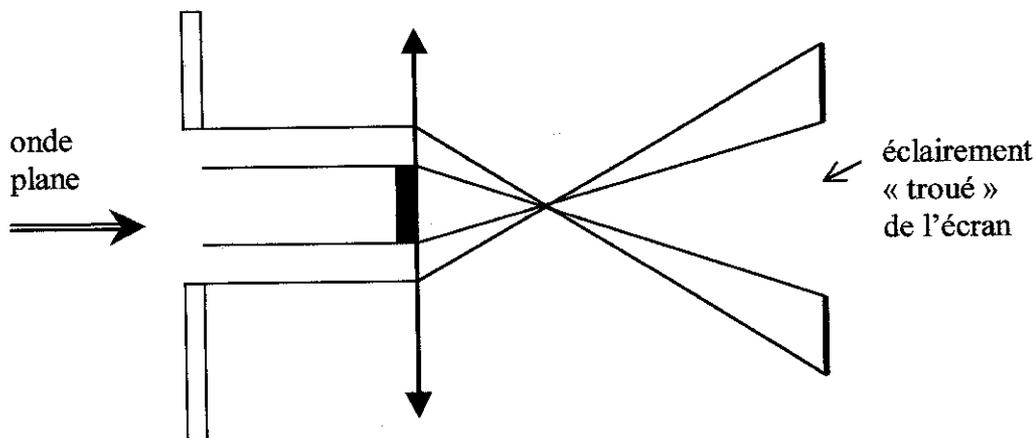


Image d'un réseau
Figure S14

Un cache sur la lentille dans ce cas entraîne bel et bien un trou sombre dans la trace lumineuse que l'on observe sur un écran situé dans le plan conjugué de la fente (figure 6).



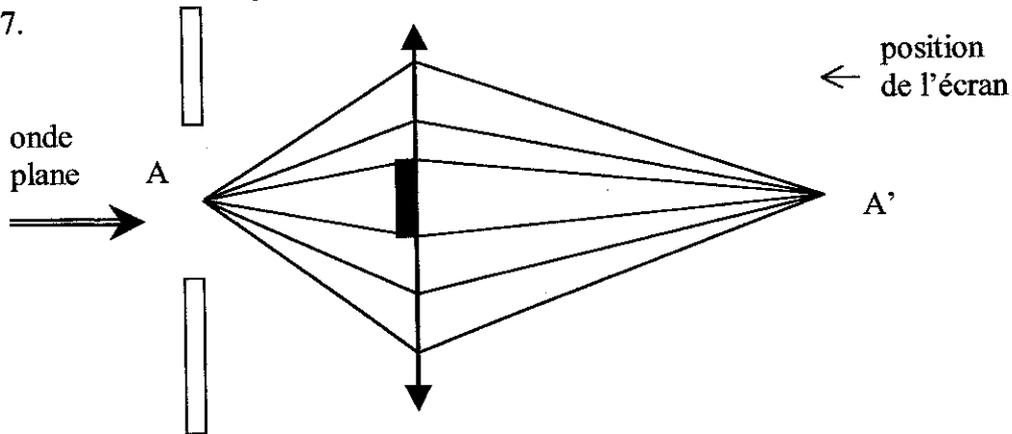
Test du cache et objet « non classique »
Figure 6

La situation ordinaire de conjugaison objet-image n'est plus réalisée, nous cessons de parler, ici, de sources classiques, et d'ailleurs il ne se passe rien de particulier lorsque l'écran est à la position précise de ce que l'on pourrait appeler - improprement selon nous (ce point ne fait pas encore l'objet d'un consensus, voir L. Maurines 1999) - l'image de la fente.

Pour résumer notre réflexion sur la nature des sources, nous conviendrons d'appeler source (ponctuelle) classique une source qui, du point de vue de la conjugaison objet-image, se comporte comme si elle était seule, origine d'une onde sphérique convergeant au point image, un cache placé sur la lentille n'affectant que la luminosité de l'image dans un facteur proportionnel à la surface occultée. Un objet sera dit classique s'il est constitué de telles sources.

C'est le cas des objets ordinaires en éclairage incohérent, c'est encore le cas d'objets diffractants éclairés de manière cohérente avec aussi, dans ce dernier cas, des configurations qui, du fait de la superposition, invalident de fait ce type d'analyse. Il n'y a donc pas, dans le cas de sources cohérentes, une garantie de « classicisme » au sens où nous l'entendons.

Il convient alors d'être vigilant à la lecture des schématisations telles que celle proposée figure 7.



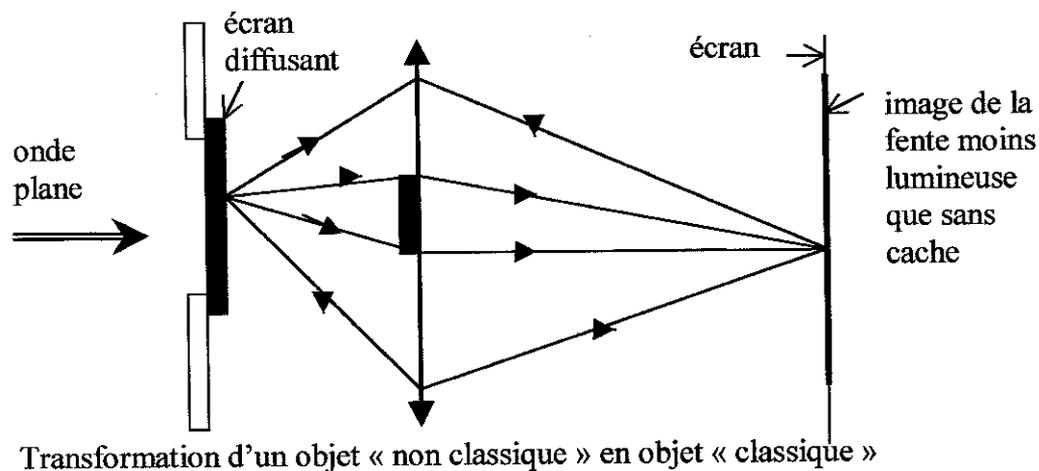
Application du principe d'Huygens : un schéma à considérer avec circonspection
Figure 7

L'utilisation du principe d'Huygens selon lequel tout point de l'espace peut être considéré comme une source sphérique dont l'amplitude est donnée par la valeur du champ en ce point, devra être prudente. En effet, une pratique superficielle de ce raisonnement pourrait conduire à s'interroger sur l'absence d'éclairement de certains points de l'écran alors que des trajets de lumière issus de la fente parviennent en ces mêmes points.

Nous aurons l'occasion de revenir sur l'explication de ce paradoxe apparent lorsque nous aborderons la diffraction par la lentille et le filtrage optique. Nous verrons que la mise en œuvre du principe d'Huygens en présence du cache implique une brisure de la conjugaison optique, masquée ici par la schématisation, et qui oblige à une prise en compte de la phase, donc à se placer résolument dans le cadre de l'optique ondulatoire.

Pour transformer un objet « non classique » en objet « classique », nous pouvons utiliser un objet diffusant ne contenant aucune (ou très peu) d'informations comme un papier calque et le placer dans le plan de l'objet « non classique ».

Si, par exemple, nous plaçons un papier calque devant la fente de la figure 6, nous obtenons l'image optique de la fente sur l'écran ce que le test du cache permet de vérifier (figure 8).



Transformation d'un objet « non classique » en objet « classique »
Figure 8

Remarquons que si la présence du calque permet de rétablir la conjugaison optique, elle détruit la cohérence de l'onde plane incidente et par conséquent modifie la valeur du champ en tout point.

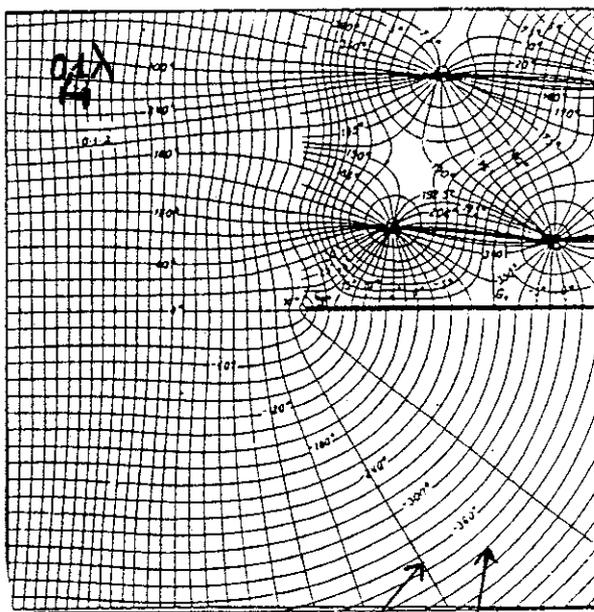
Nous aurons l'occasion lors de l'analyse des situations d'optique ondulatoire d'utiliser ces deux outils : le cache comme « testeur » de la nature des « images » et le calque comme transformateur de « sources » et « d'objet ».

2.3. Limites de l'optique géométrique

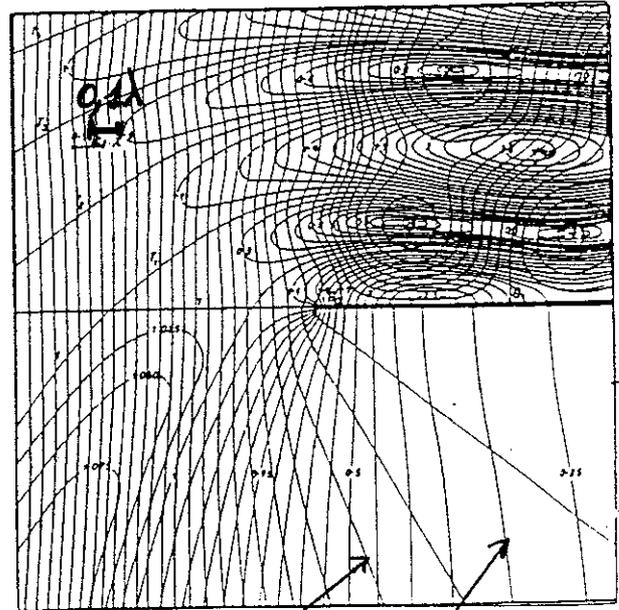
L'optique géométrique n'est qu'une solution approchée des équations de Maxwell (voir annexe 1). Cette approximation s'exprime en termes de distances associées aux variations notables de certaines grandeurs (amplitudes des champs électrique et magnétique, caractéristiques des milieux traversés) comparées à une distance « étalon » fournie par la longueur d'onde de la lumière utilisée, plutôt qu'en termes de dimensions d'obstacles ou d'ouvertures. On comprend peut-être mieux ainsi l'obligation d'abandonner l'approche géométrique pour interpréter les phénomènes de diffraction mis en jeu au voisinage de l'arête d'un écran.

La prise en compte du phénomène de diffraction suppose une résolution plus fine de l'équation de propagation. Les rayons lumineux dont nous rappelons qu'ils sont, dans notre texte, associés à la propagation de l'énergie, ne suivent plus alors les règles de l'optique géométrique : en particulier, la propagation de la lumière n'est plus rectiligne dans un milieu isotrope et homogène.

A titre d'exemple, nous présentons la carte du champ électromagnétique dans le cas de la diffraction d'une onde plane par un demi-plan infiniment conducteur (figures 9a et 9b) (d'après Born et Wolf 1980).



rayon lumineux
surface équiphasse



rayon lumineux
surface isoamplitude

Figure 9a Rayon lumineux et surfaces équiphasse
Figure 9b Rayon lumineux et surfaces isoamplitudes
Diffraction d'une onde plane par un demi-plan infiniment conducteur

Nous retrouvons sur la figure 9a l'orthogonalité des rayons lumineux aux surfaces d'onde. Notons également que cette figure souligne le caractère non passif de l'écran diffractant (voir annexe n°1, p6) : en avant de l'écran l'onde plane incidente se superpose à l'onde émise par l'écran conduisant à une structure très tourmentée du champ résultant. Par contre, au-delà du demi-plan, la structure du champ suggérée par la figure 9a semble relativement simple et masque la complexité de la répartition énergétique. Cette répartition est donnée sur la figure 9b via l'amplitude lumineuse : nous remarquons d'une part que les surfaces d'ondes ne s'identifient pas aux surfaces isoamplitudes et d'autre part que l'amplitude varie de manière très complexe le long d'un rayon lumineux.

Signalons enfin l'échelle des schémas : nous sommes à des distances de l'ordre de la longueur d'onde du demi-plan.

Les contraintes de l'enseignement ne nous permettent pas d'avoir accès à une telle carte du champ dans les situations les plus courantes et nous allons voir de quelle manière l'analyse de celles-ci peut tout de même être menée.

2.4. Situations d'optique ondulatoire

Nous nous plaçons ici dans le cas où les sources sont totalement cohérentes.

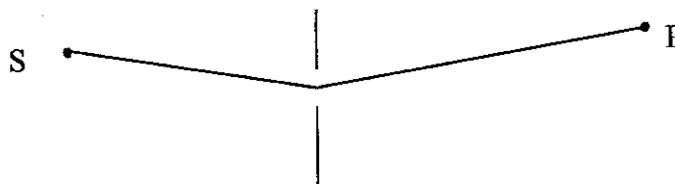
Le calcul complet du champ électromagnétique en tout point de l'espace étant exclu à ce niveau d'enseignement, nous nous contentons ici de déterminer «l'état vibratoire» en un point P. Cette détermination s'appuie sur le principe de superposition : le champ au point P est dû à la somme des contributions de chacune des sources. Cette contribution est calculée comme si chacune des sources agissait seule. Ces sources peuvent être «primaires», deux sources lumineuses ponctuelles par exemple, ou «secondaires» si le point P est situé au delà d'un écran diffractant. Dans ce dernier cas, le calcul s'effectue au prix de certaines approximations relatives à la localisation de ce point et des sources (voir annexe n°1 p7-8).

Nous distinguons les situations de type «superposition simple» de celles de type «superposition combinée».

C'est la possibilité, ou non, d'appliquer le principe de Fermat pour déterminer le trajet de la lumière entre chacune des sources et le point d'observation, qui distingue ces deux types. Cette mise en application impose que la diffraction ne soit pas présente sur ces trajets (elle peut l'être au départ ou au delà du point d'arrivée).

Précisons ce point.

Le tracé de la figure 10 n'obéit pas entre les points S et P au principe de Fermat et n'est donc pas un tracé d'optique géométrique. Il ne correspond pas plus à un rayon lumineux du champ résultant (voir plus haut).



Tracé de type «superposition combinée»

Figure 10

En revanche, les tracés des figures 11a et 11b (au delà de l'ouverture) obéissent au principe de Fermat. En ce sens, ce sont des tracés d'optique géométrique. Ces deux dernières situations correspondent à une superposition de situations géométriques idéales. Toutefois, du fait de cette situation de superposition, les tracés ne représentent pas les « chemins d'énergie » du champ électromagnétique résultant.

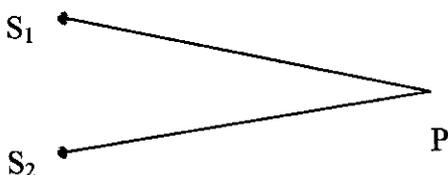


Figure 11a

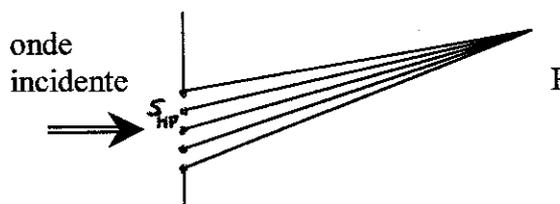


Figure 11b

Tracés d'optique géométrique au sens du principe de Fermat : situations de type « superposition simple »

- 11a : interférences classiques
- 11b : interférences dues aux sources secondaires d'Huygens-Fresnel (H-F)

Dernière nuance :

Pour la figure 11a, il s'agit d'une situation classique d'interférences. Pour la figure 11b, il s'agit également d'une situation d'interférences mais cette fois-ci les sources mises en jeu sont les sources secondaires résultant de l'application du principe d'Huygens-Fresnel au niveau de l'ouverture diffractante (sources H-F).

2.4.1. Situations de type «superposition simple »

La superposition au point d'arrivée impose d'abandonner dans la zone interférentielle le contenu énergétique attribué aux tracés dans les situations d'optique géométrique : les tracés ne sont plus des chemins d'énergie. Ils restent évidemment des chemins de phase permettant d'interpréter les figures d'interférences ou de diffraction obtenues. Nous rappelons que chaque tracé est un chemin stationnaire entre source et point d'arrivée.

Alors que pour les situations d'optique géométrique le groupement des tracés entre point source et point d'observation est associé à une onde, ici il s'agit uniquement de tracés pris en compte pour mettre en application le principe de superposition au point d'arrivée. Ainsi, les trajets parallèles représentés à la suite d'un dispositif interférentiel ou / et diffractant (voir encadré 3 figures S1, S1bis, S2, S2bis, TYp, S3, S7, S8, S9c, S13b, S15, S16, S17 présentées lors des entretiens) ne constituent pas une onde plane, pas plus que les trajets convergeant en un point ou divergeant à partir d'un point, autres que ceux de l'objet et de l'image, ne constituent une onde sphérique convergente ou divergente.

Encadré 3 : Situations de type « superposition simple » (au delà de l'écran diffractant)

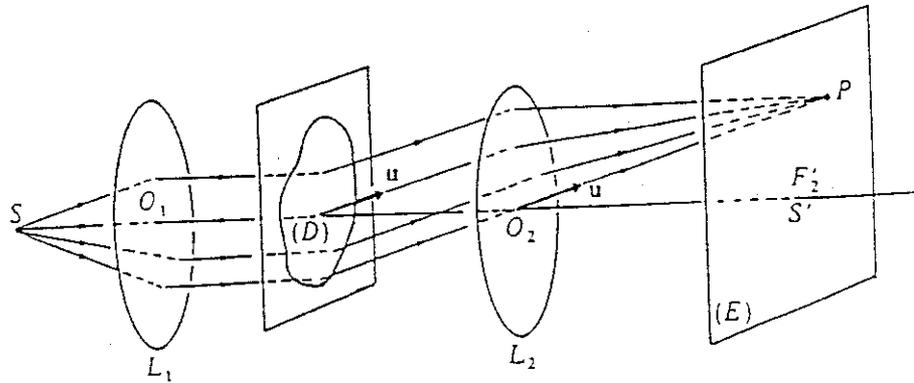


Figure S1 (Bertin, Faroux et Renault 1986)

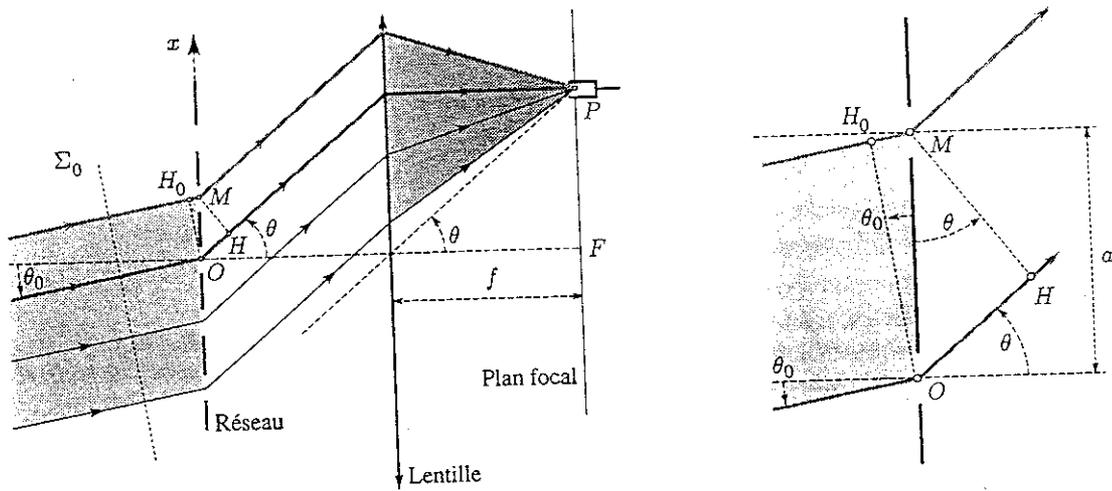


Figure S1bis (Pérez 1994)

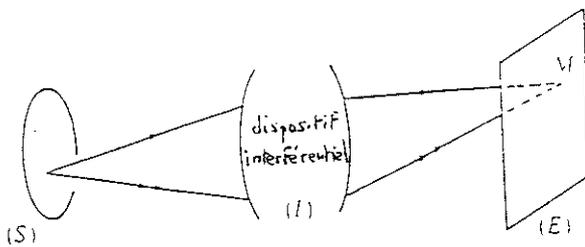


Figure S2 (Bertin, Faroux et Renault 1986)

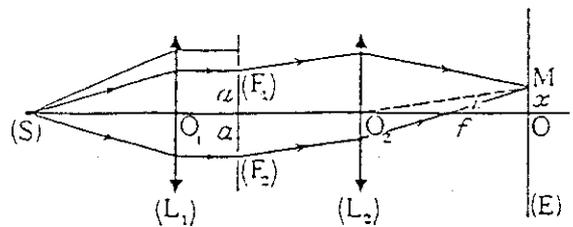


Figure S2bis (Annequin et Boutigny 1974)

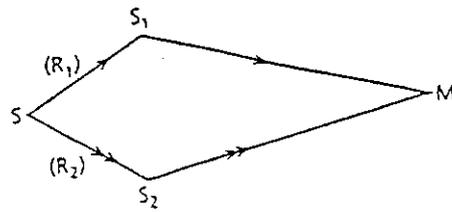


Figure S3 (Dubod et al 1995)

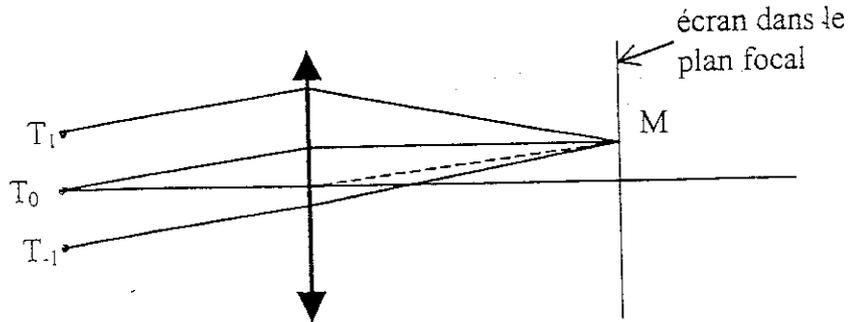


Figure TYp (construction attendue pour les trois trous d'Young)

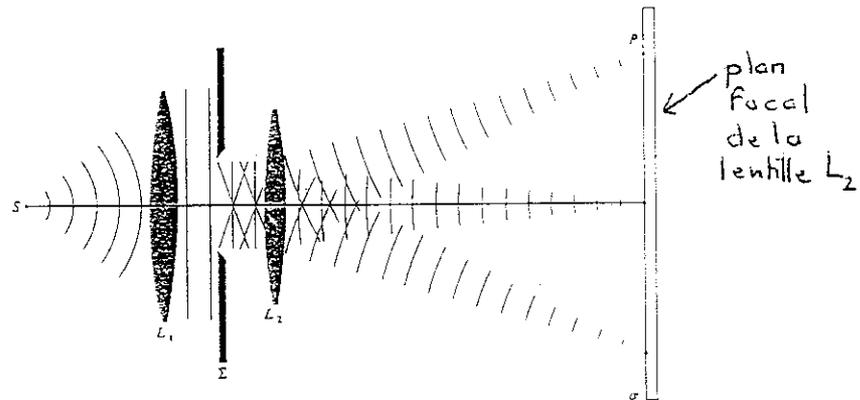
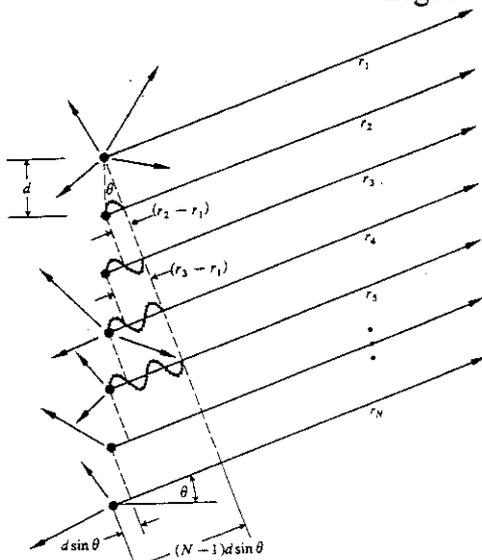


Figure S7 (Hecht 1987)



Ligne de sources cohérentes en phase
Figure S8 (Hecht 1987)

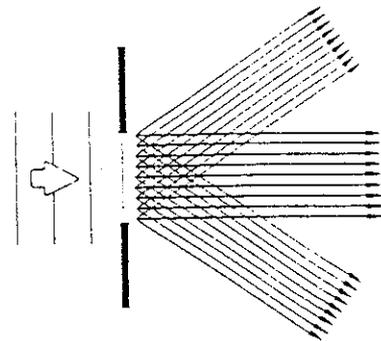


Figure S9c (Hecht 1987)

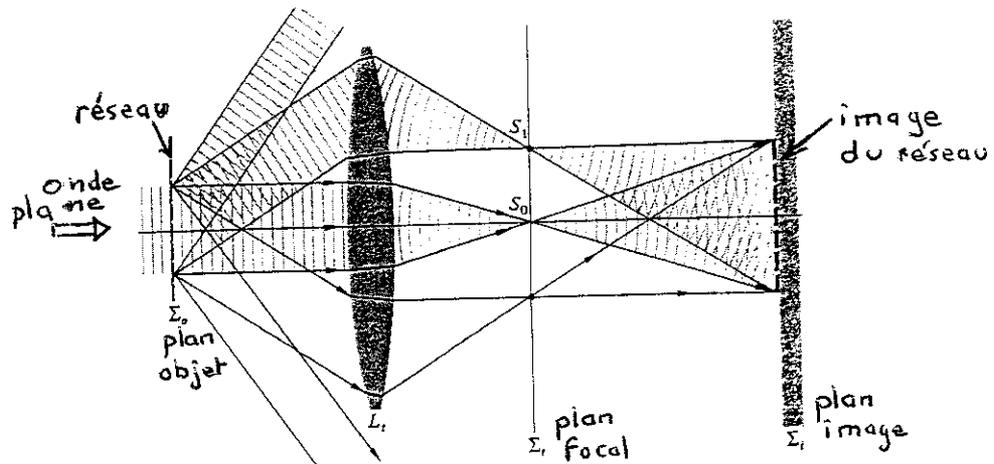


Figure S13b (Hecht 1987)

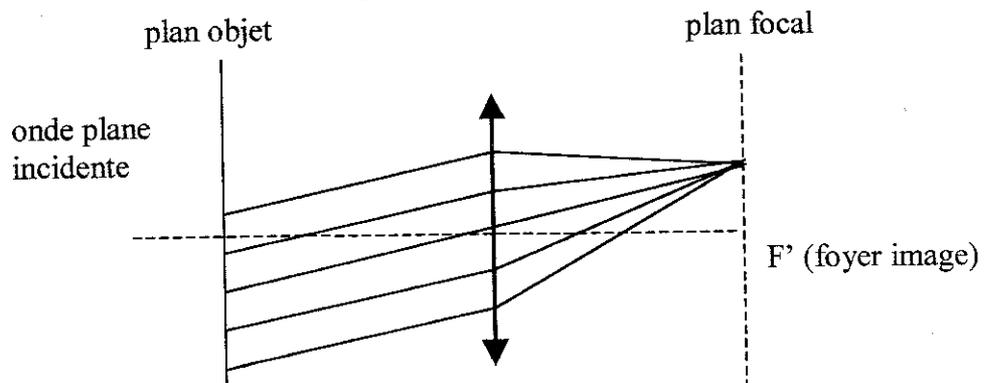


Figure S15 (construction classique)

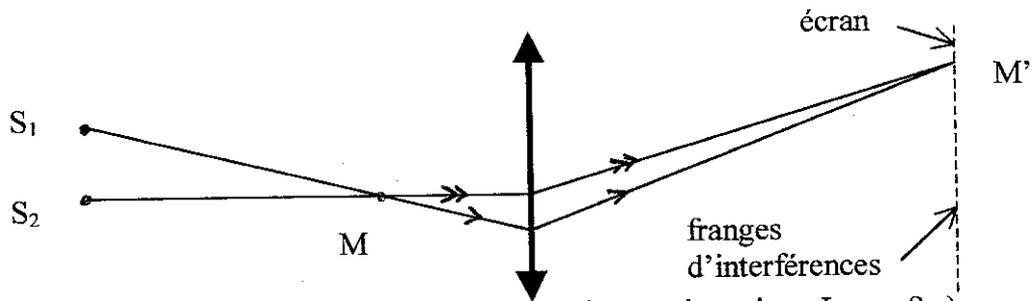


Figure S16 (construction pour le questionnaire « Image ? »)

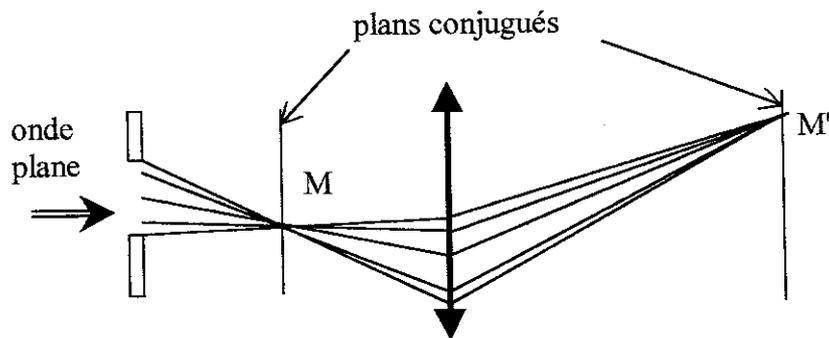
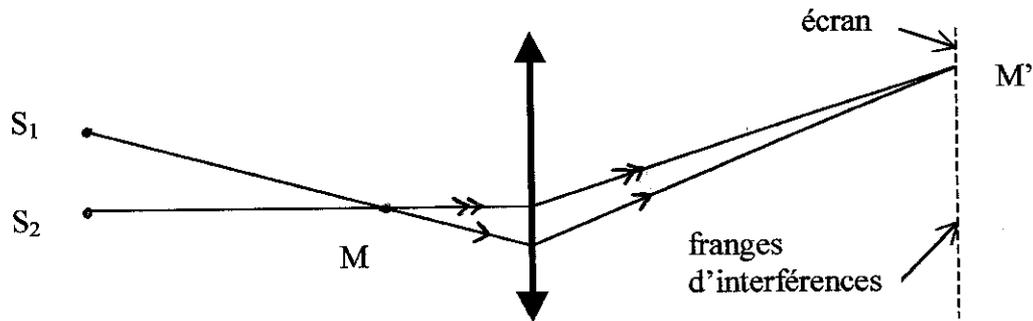


Figure S17 (« Agrandissement » d'une figure de diffraction)

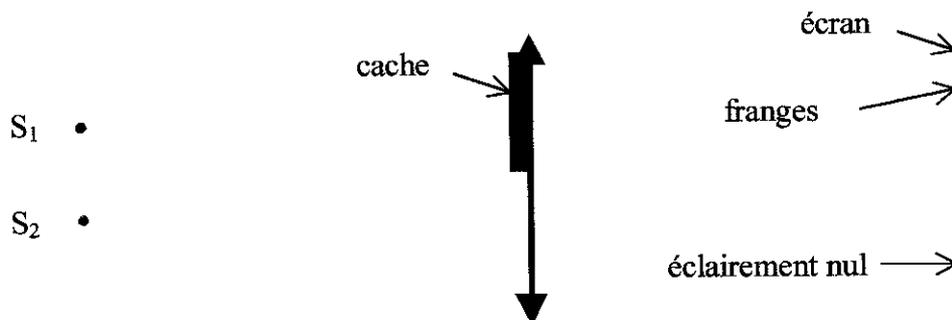
Nous reprenons à ce propos en figure 12 la situation S16 de l'encadré 3 relative au test intitulé « Image? » (voir questionnaire « Image ? » chapitre 1) et revenons sur les notions d'objet et source « non classiques » précédemment introduites.



Construction « Image ? »
Figure 12

La construction permet de déterminer les trajets stationnaires de lumière issus des sources S_1 et S_2 conduisant au point M' de l'écran. Les plans perpendiculaires à l'axe optique et passant par les points M et M' sont optiquement conjugués mais les franges d'interférences présentes dans le plan objet (en fait uniquement présentes au niveau du détecteur, l'œil de l'observateur par exemple) ne constituent pas un objet « classique » tel que nous l'avons défini. En effet, aucun point de ce plan n'émet d'onde sphérique et la lentille n'agit donc plus comme un système imageur. La lentille se contente de fixer les deux trajets stationnaires issus des sources S_1 et S_2 conduisant au point M' .

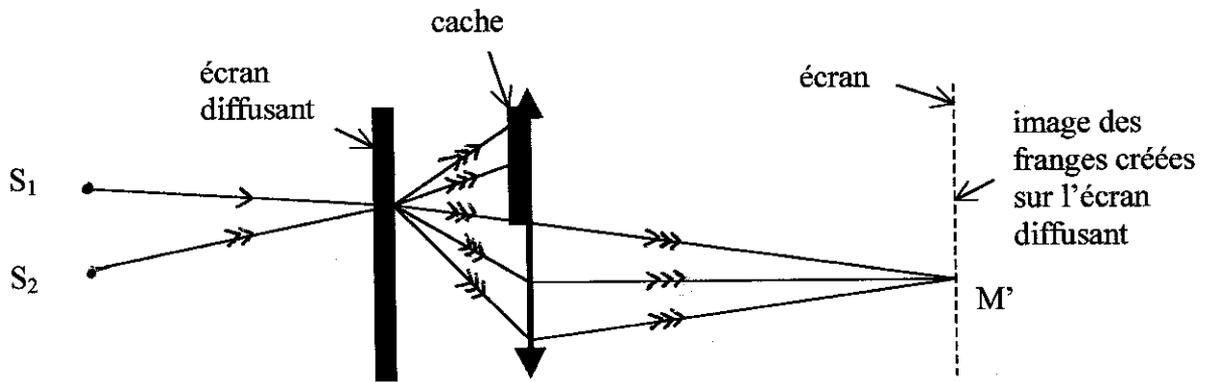
On peut mettre en œuvre le test du cache de la figure 13.



Test du cache et question « Image ? »
Figure 13

Ce que l'on observerait sur l'écran dans une telle situation serait bien différent des franges d'interférences de la figure 12. En effet, nous ne retrouverions plus ces franges sur une partie de l'écran. Remarquons que, pour faciliter la construction, nous avons fortement exagéré la distance séparant les deux sources.

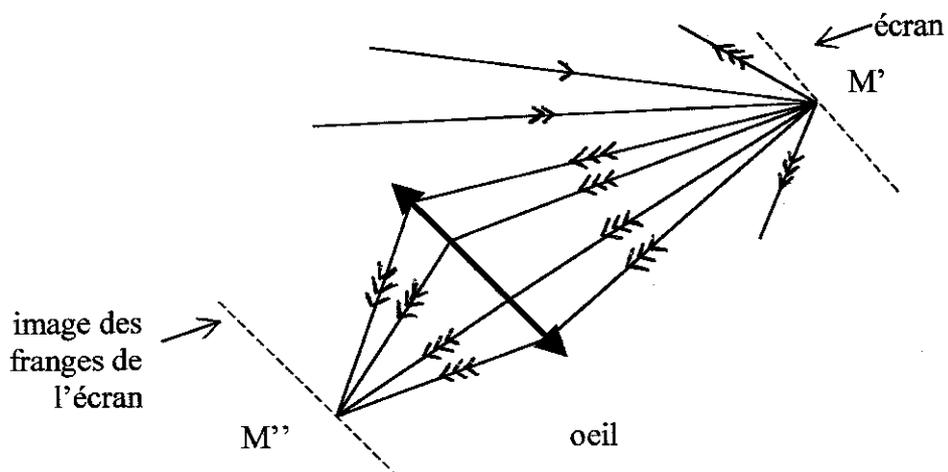
Si nous plaçons un écran diffusant dans le plan objet considéré (voir figure 14), nous retrouvons les franges d'interférences sur l'écran terminal. Deux facteurs les rendent moins lumineuses qu'auparavant : d'une part, la présence du cache empêche la convergence de tous les rayons au point M' ; d'autre part, la présence de l'écran diffusant conduit également à des phénomènes d'absorption.



Situation « Image ? » avec calque et cache
Figure 14

Remarquons que la présence de l'écran diffusant impose un changement de statut des tracés : avant l'écran, il s'agit de tracés d'optique ondulatoire, c'est-à-dire de chemins de phase sans contenu énergétique ; entre l'écran diffusant et l'écran d'observation, ce sont des rayons lumineux d'optique géométrique et par conséquent des chemins d'énergie.

La même remarque s'applique à propos des rôles de l'écran d'observation et du détecteur éventuel (l'œil de l'observateur par exemple) (voir figure 15).



Ecran d'observation et détecteur
Figure 15

En l'absence d'écran diffusant (figure 12) les deux tracés aboutissant au point M' de l'écran d'observation sont des chemins de phase. Après action de l'écran, les tracés sont des chemins d'énergie entre le point M' et son image M'' obtenue sur la rétine de l'œil de l'observateur. En toute rigueur, les franges d'interférences n'ont d'existence physique qu'à ce niveau, c'est-à-dire lorsqu'elles sont détectées par la rétine ou tout autre détecteur.

L'analyse que nous avons menée à partir de la situation S16 de l'encadré 3 peut de façon tout à fait analogue être suivie pour la situation S17 du même encadré relative à l'agrandissement d'une figure de diffraction. Nous y reviendrons en détail plus loin à propos de la polysémie des schémas.

Nous avons souligné à plusieurs reprises le rôle déterminant de l'analyse en termes de groupement de tracés et la nécessaire réflexion sur leur statut. Une telle analyse permet une approche cohérente des différentes situations et des réponses claires concernant notamment la nature de ce qui est observé sur un écran. Différents outils (cache et écran diffusant) ont été présentés permettant une réflexion sur les notions les plus courantes d'optique (source, objet, image). Nous avons également insisté sur le rôle du système optique, en l'occurrence une lentille, suivant qu'il s'agit d'une situation d'optique géométrique ou d'optique ondulatoire. Ces points pourraient être introduits lors d'une séquence d'enseignement, idée sur laquelle nous reviendrons plus loin.

2.4.2. Situations de type « superposition combinée »

Contrairement aux situations de type « superposition simple », les situations de type « superposition combinée » ne peuvent s'analyser comme une superposition de situations géométriques idéales entre chacune des sources et le point d'arrivée.

Nous sommes maintenant contraints de rentrer plus au cœur du phénomène de diffraction. Les programmes d'enseignement post-bac (DEUG, Licence, classes préparatoires) s'appuient, pour aborder la diffraction, sur le principe d'Huygens-Fresnel (voir annexe 1 p5).

Ce principe consiste à remplacer la situation complexe résultant de la superposition entre onde incidente et onde réémise par l'écran diffractant par une situation équivalente plus simple.

Il peut s'énoncer ainsi pour un milieu homogène :

- la vibration lumineuse, en un point P situé après une surface diffractante atteinte par une onde monochromatique incidente est la somme des vibrations lumineuses en P des ondelettes sphériques qui seraient émises par chaque élément de la surface diffractante ;
- l'ondelette fictive due à un élément infinitésimal de surface a une amplitude proportionnelle à l'aire de cette surface élémentaire et à l'amplitude de l'onde incidente sur cette surface.

Quelques précisions doivent être apportées (voir annexe 1, p7 pour les justifications) :

- * même dans un milieu homogène, les ondelettes sphériques émises ne sont pas isotropes : il existe un facteur d'inclinaison qui module l'amplitude des ondelettes suivant l'angle d'émission ;
- * les ondelettes émises sont en quadrature avance par rapport à l'onde incidente.

Dans le cadre de cette approche de la diffraction, la présence des sources secondaires fictives au niveau de l'écran diffractant (sources H-F) crée une rupture sur le trajet conduisant d'un point de départ situé avant l'écran à un point d'arrivée situé au delà de l'écran. La sélection par l'aval peut toujours être mise en application mais elle s'applique alors sur les tracés issus des sources secondaires et non plus directement sur les tracés issus des sources primaires situées avant l'écran diffractant.

2.4.2.1. Diffraction et image optique

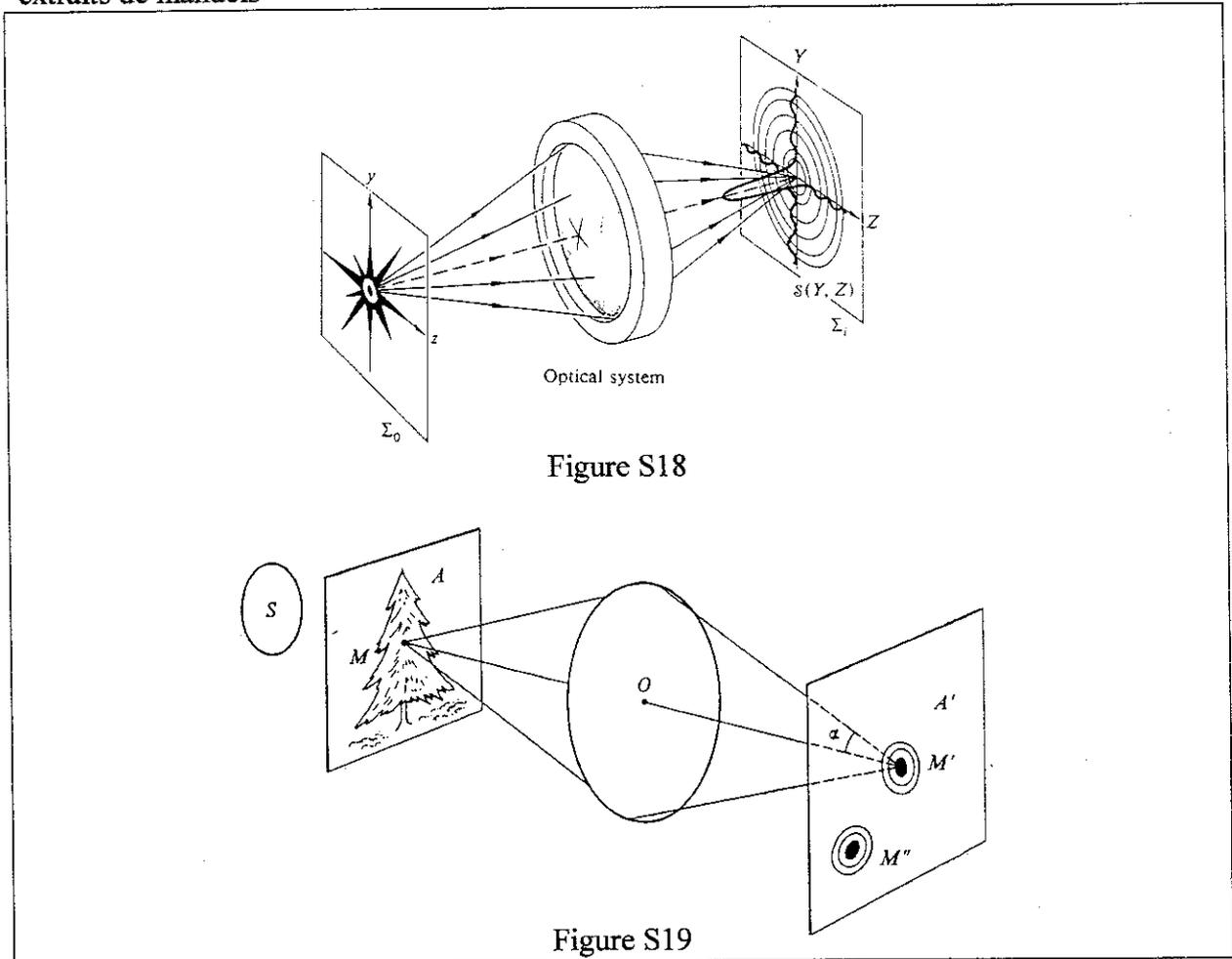
Avant d'analyser les situations de filtrage, nous nous intéressons à la formation de l'image d'un objet par une lentille. Nous supposons à nouveau que la lentille est mince, convergente, dépourvue d'aberrations et, par commodité d'illustration, que l'image obtenue est réelle.

Lors de l'analyse des situations d'optique géométrique nous avons supposé que la lentille était d'extension infinie pour ne pas prendre en compte la diffraction par la monture de la lentille et rester dans le cadre de l'optique géométrique.

La prise en compte de la diffraction par la lentille complique singulièrement la situation. Nous avons précédemment souligné l'importance de la conjugaison optique entre plans objet et image qui permet une correspondance point par point entre ces deux plans. A présent, la prise en compte de la diffraction et par conséquent la présence des sources secondaires n'autorise plus ce type de correspondance.

C'est ce que tentent de mettre en évidence les figures S18 (Hecht 1987) et S19 (Françon 1986) tirées de manuels d'enseignement (voir encadré 4) : à un point objet correspond une image possédant une certaine étendue. Nous voyons donc que les tracés « géométriques » représentés sur ces figures ne nous sont d'aucune utilité pour interpréter l'extension spatiale de l'image d'un point objet. Dans ces conditions, l'optique géométrique ne peut que nous dire où se trouve l'image géométrique d'un point objet, autrement dit traiter une situation différente de celle considérée ici.

Encadré 4 : Situations de type « superposition combinée » : exemples de schématisation extraits de manuels



Comment parvenir à une interprétation relativement simple sans utiliser l'arsenal mathématique de l'optique de Fourier ? Cherchons, dans un premier temps, à construire l'image d'un point objet. Pour ce faire, nous supposerons la lentille diaphragmée par une ouverture de dimension D suivant la figure 16 (ce diaphragme peut d'ailleurs correspondre à la monture même de la lentille).

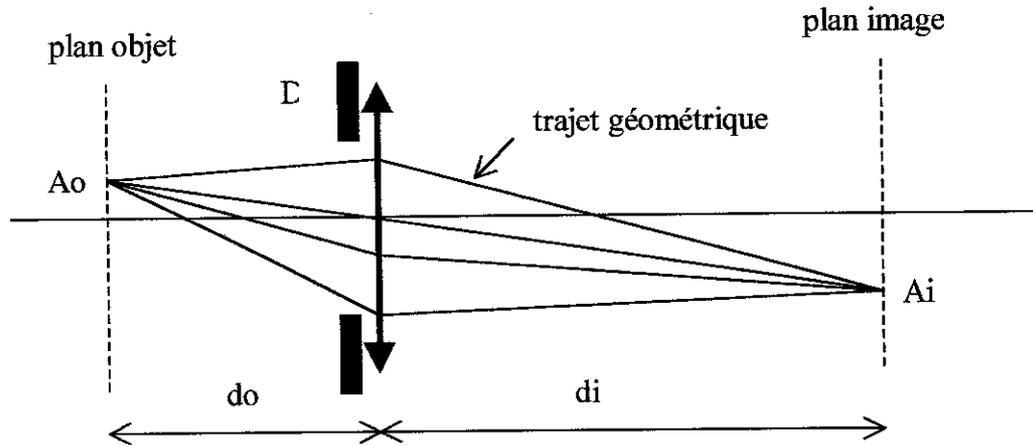
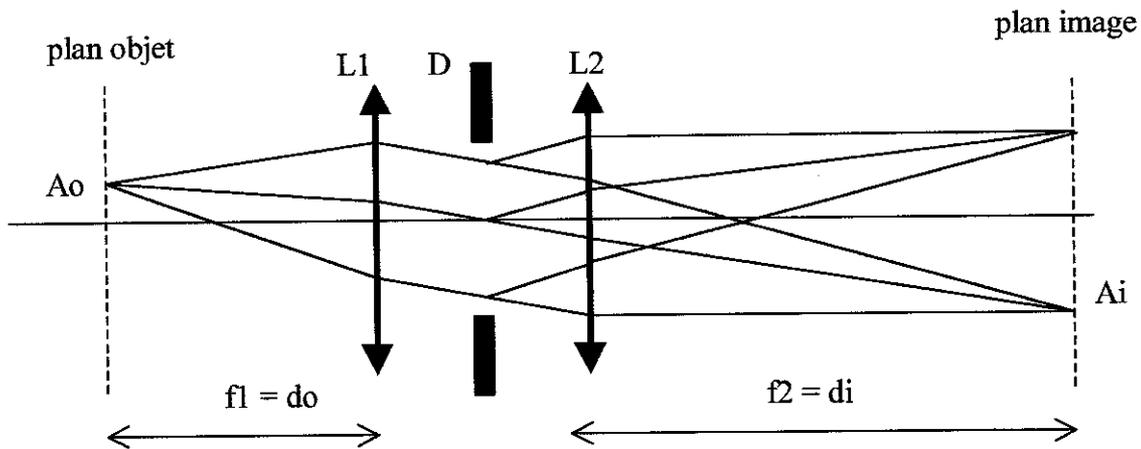


Image d'un point objet
Figure 16

Comme c'était le cas pour les figures S18 et S19, la construction ne permet pas d'interpréter l'étendue de l'image du point objet A_o . Pour y parvenir, une stratégie classique reprend le dispositif de la figure 17.



Dédoublage de la lentille
Figure 17

Nous choisissons les lentilles L_1 et L_2 de façon à ce que le plan objet initialement considéré (celui de L en figure 16) coïncide avec le plan focal objet de L_1 et le plan image avec le plan focal image de L_2 . Le dédoublement de la lentille L nous permet donc de retrouver une situation classique d'optique, à savoir la diffraction de Fraunhofer d'une onde plane par le diaphragme (voir annexe 1, p12).

La figure 17 permet d'expliciter l'étendue de l'image d'un point objet donnée par une lentille et indique que l'image obtenue est la figure de diffraction de Fraunhofer du diaphragme D centrée autour de l'image géométrique du point objet (voir annexe 1, p12).

La présence de la diffraction au niveau du diaphragme impose une brisure de la conjugaison optique : l'onde sphérique issue du point objet A_o n'est pas transformée par la lentille en une onde sphérique convergente au point image géométrique A_i mais en une onde diffractée complexe due à la superposition des ondes sphériques émises au niveau du diaphragme par chacune des sources secondaires.

Le principe d'Huygens-Fresnel entraîne une rupture de la stationnarité des trajets entre point objet et point image, rupture que masquent les figures de l'encadré 4 ou la figure 16 : au

delà du plan de rupture (plan du diaphragme D), un tracé ne représente pas la suite unique de ce qui arrive en son point de départ.

Notons qu'entre le diaphragme et le plan image nous retrouvons une situation de type « superposition simple ».

Nous pouvons utiliser le même type d'analyse pour donner une explicitation de la formation de l'image d'un objet étendu par une lentille d'extension finie (voir figure 18), en considérant par exemple un ensemble de trois sources ponctuelles.

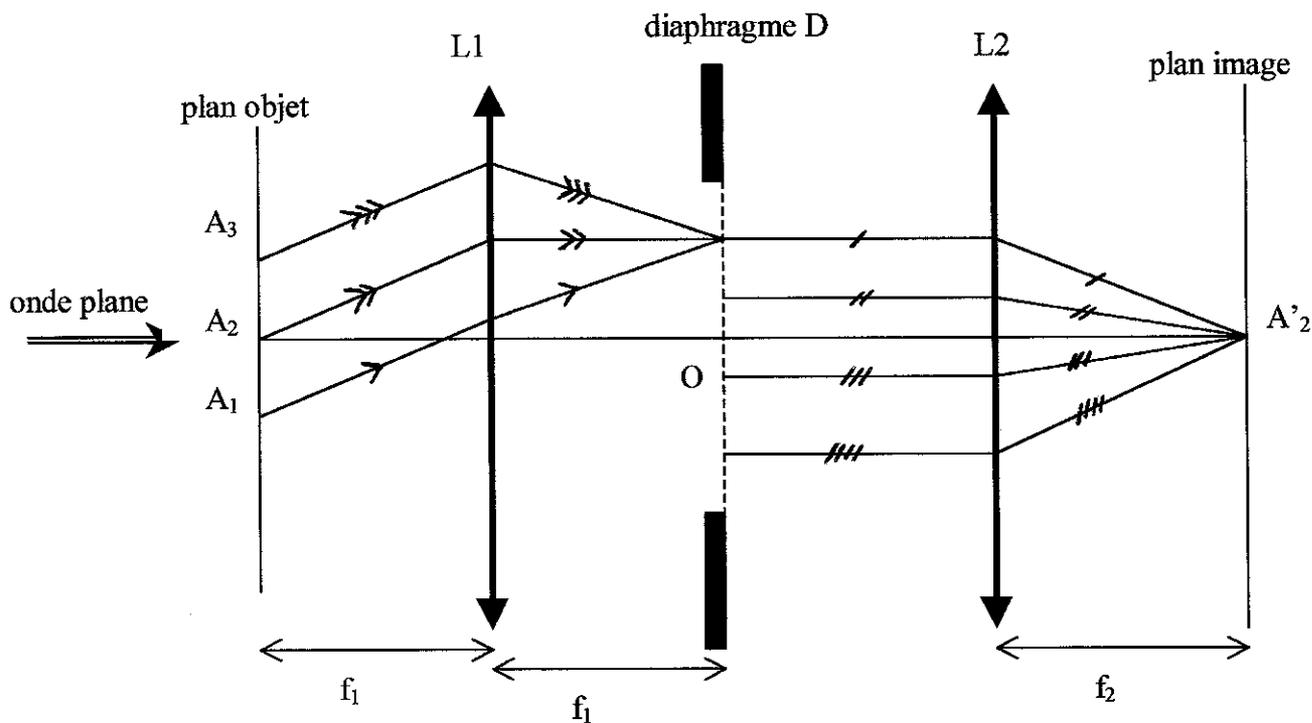


Image optique et diffraction
Figure 18

Cherchons l'ensemble des trajets conduisant au point A'_2 , image géométrique du point objet A_2 et ayant pour origine les points A_1 , A_2 et A_3 de l'objet. Ces trajets sont les chemins de phase stationnaires entre les sources secondaires du diaphragme et le point image A'_2 . Trois ensembles de trajets convergent au point A'_2 :

- l'ensemble correspondant aux rayons « géométriques » issus de A_2 ;
- les ensembles provenant de A_1 et A_3 , correspondant aux rayons d'ondelettes diffractés dans la direction OA'_2 par le diaphragme.

Le champ au point A'_2 résulte donc de la superposition en ce même point de l'ensemble de telles ondelettes. Nous devons en fait prendre en compte tous les points objets pour lesquels l'amplitude diffractée dans la direction OA'_2 n'est pas nulle. L'image géométrique est en quelque sorte « brouillée » du fait de la nécessaire prise en compte des points objets voisins du point objet A_2 . Nous retrouvons donc la brisure de la conjugaison optique qu'entraîne la prise en compte de la diffraction.

Cette brisure a donc été analysée par l'amont, à partir d'un point objet (figure 17) puis par l'aval, à partir d'un point du plan image (figure 18).

Nous avons précédemment relevé lors de l'analyse des situations de type «superposition simple» que l'absence de réflexion sur le statut des tracés pouvait conduire à une lecture erronée de la schématisation : un ensemble de tracés parallèles derrière une ouverture diffractante risque alors d'être compris comme une onde plane censée se transformer en une onde sphérique convergeant en un point du plan focal image d'une lentille.

Nous avons cette fois mis en évidence un deuxième type d'erreur que peut induire une lecture purement géométrique des tracés sur une situation de type «superposition combinée ». Au passage du diaphragme constitué par exemple par la monture d'une lentille, nous avons souligné le changement d'identité des tracés : la continuité des tracés avant et après le diaphragme n'est qu'illusoire masquant la brisure de conjugaison optique imposée par la prise en compte de la diffraction.

Le dédoublement de la lentille permet de mettre en évidence ce changement d'identité et ainsi d'interpréter l'étendue de l'image d'un point objet et la formation d'une image optique à partir de groupements de tracés. La notion de sélection par l'aval est mise en œuvre dans le cadre de deux situations combinées de type «superposition simple » : chaque point du diaphragme sélectionne les tracés issus de chaque point objet ; chaque point image sélectionne les tracés issus de chaque point du diaphragme.

Nous allons voir que l'analyse présentée peut également constituer une approche du filtrage optique. Le filtrage optique s'appuie sur un arsenal mathématique que constituent les transformées de Fourier et plus généralement sur ce que l'on nomme l'optique de Fourier. Avant d'aborder le filtrage optique, il est donc nécessaire de comprendre comment la formation d'une image par une lentille est traitée dans le cadre de l'optique de Fourier.

2.4.2.2. Formation d'une image et optique de Fourier

L'optique de Fourier est une approche initiée par les travaux d'Abbe (1870) portant sur la formation des images en microscopie.

La théorie d'Abbe de la formation des images s'appuie sur deux transformations successives permettant de passer du plan objet au plan image : le plan focal image de la lentille, étape intermédiaire entre plans objet et image, introduit une rupture que nous allons expliciter. Nous devons toutefois garder à l'esprit que la situation appartient globalement entre plans objet et image conjugués, au cadre de l'optique géométrique (nous supposons la lentille d'extension infinie).

Nous savons (voir annexe 1 p16) que la lentille réalise dans son plan focal image une transformation de Fourier de l'onde diffractée par l'objet. La première transformation consiste donc en une analyse de Fourier suivant les fréquences spatiales de l'objet entre plan objet et plan focal image de la lentille.

Chacun des points du plan focal image peut être considéré comme une source d'Huygens. Du fait de la conjugaison optique des plans objet et image, les ondelettes émises par chaque point du plan focal vont interférer constructivement dans le plan image pour donner l'image de l'objet procédant en quelque sorte à une synthèse de Fourier.

Nous considérons un objet permettant des raisonnements relativement simples : un réseau d'amplitude sinusoïdal d'extension infinie. Nous supposons également que ce réseau est éclairé par une onde plane monochromatique.

Dans ce cas, la figure de diffraction n'est constituée que de trois « pics » infiniment fins (voir figure 19).

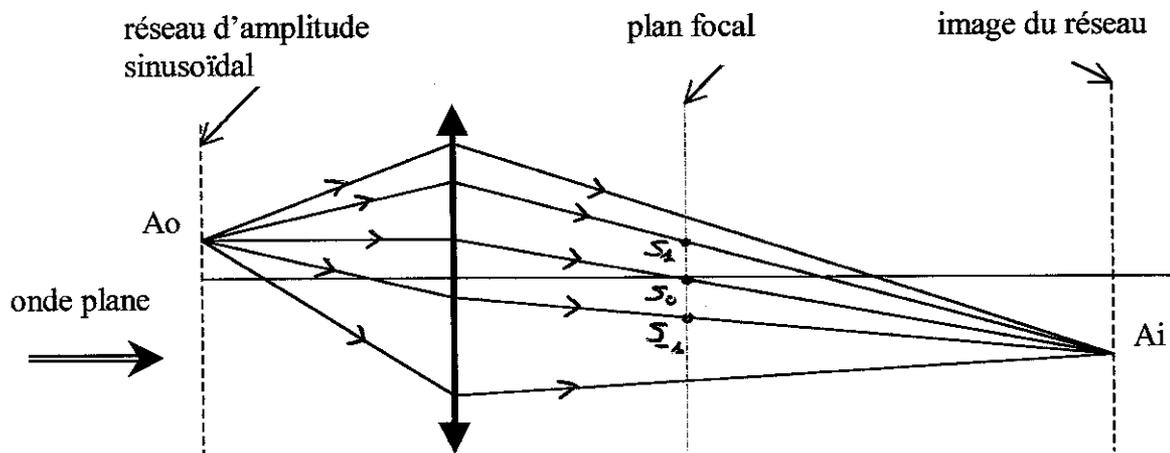
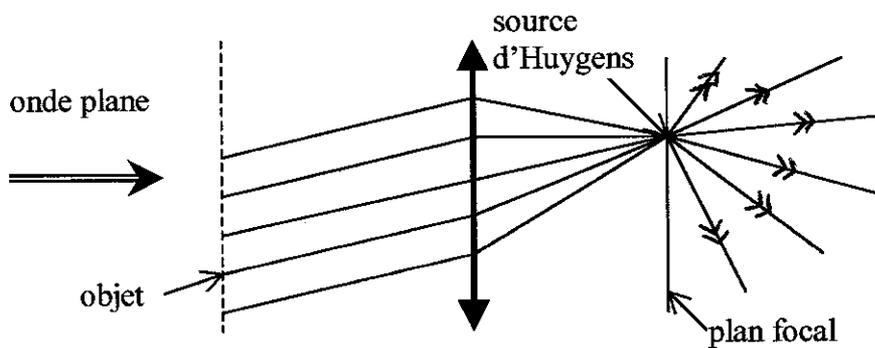


Image d'un réseau d'amplitude sinusoïdal
Figure 19

Remarquons que les points S_1 , S_0 et S_{-1} ne constituent pas des sources « classiques ». En effet, l'ensemble des tracés issus de chacun de ces points n'est pas associé à une onde sphérique comme pourrait le suggérer une lecture rapide de la figure S15 de l'encadré 3. Pour que ces sources soient traitées comme des sources classiques, il faut utiliser le principe d'Huygens dans le plan focal, c'est-à-dire calculer le champ en chacun des trois points (en tout autre point du plan focal, ce champ est nul) et attribuer à chacune des sources d'Huygens créées ainsi de toute pièce la valeur calculée (phase comprise bien entendu, car c'est elle seule qui donne l'information sur la position des plans objet et image). Comme nous l'avons indiqué précédemment, l'application du principe d'Huygens conduit en quelque sorte à une transformation des sources dans le plan focal comme l'écran diffusant conduisait à une transformation d'un objet « non classique » en objet « classique » (voir figures 8 et 14). Par conséquent, après application du principe d'Huygens, un tracé qui repart du plan focal image de la lentille n'est pas la suite unique d'un tracé aboutissant sur ce plan (voir figure 20).



Principe d'Huygens : quel statut pour les sources, les tracés ?
Figure 20

Nous retrouvons ici le même type de difficulté que celui mentionné lors de l'étude de la formation d'une image par une lentille d'extension finie. L'application du principe d'Huygens conduit à nouveau à une brisure de la conjugaison optique. Alors que précédemment cette brisure était due à la prise en compte de la diffraction au passage d'un diaphragme, ici elle résulte en quelque sorte d'une expérience de pensée au passage du plan focal image de la lentille. Nous retrouvons à nouveau deux situations combinées de type « superposition simple », celle qui détermine l'état vibratoire en S_1 , S_0 et S_{-1} et celle qui

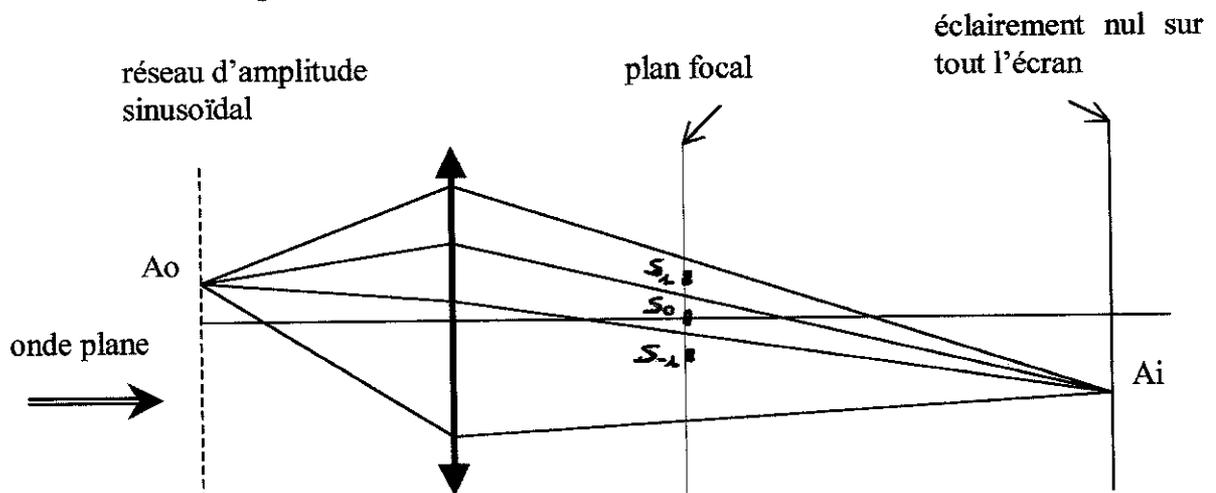
s'ensuit au delà des sources. Toutefois ici, s'agissant d'une simple expérience de pensée, nous obtenons bien sûr sur l'écran toujours l'image du réseau que l'on utilise l'approche ponctuelle de l'optique géométrique ou l'approche globale de l'optique de Fourier. Seule l'analyse de la formation de l'image change.

L'éclairage présenté sur l'optique de Fourier souligne l'attention qui doit être portée au caractère polysémique de la schématisation des situations : le statut des tracés, « sources », « objets » et « images » ainsi que la sélection par l'aval associée constituent le plus souvent les éléments centraux de la réflexion.

2.4.2.3. Filtrage optique

Le filtrage consiste à agir dans le plan focal image de la lentille de façon à modifier l'image de l'objet.

Pour illustrer notre analyse, reprenons l'exemple du réseau sinusoïdal et effectuons un filtrage de son image optique. Nous pouvons par exemple placer dans le plan focal trois caches au niveau des points S_1 , S_0 et S_{-1} (voir figure 21).



Filtrage de l'image du réseau d'amplitude sinusoïdal
Figure 21

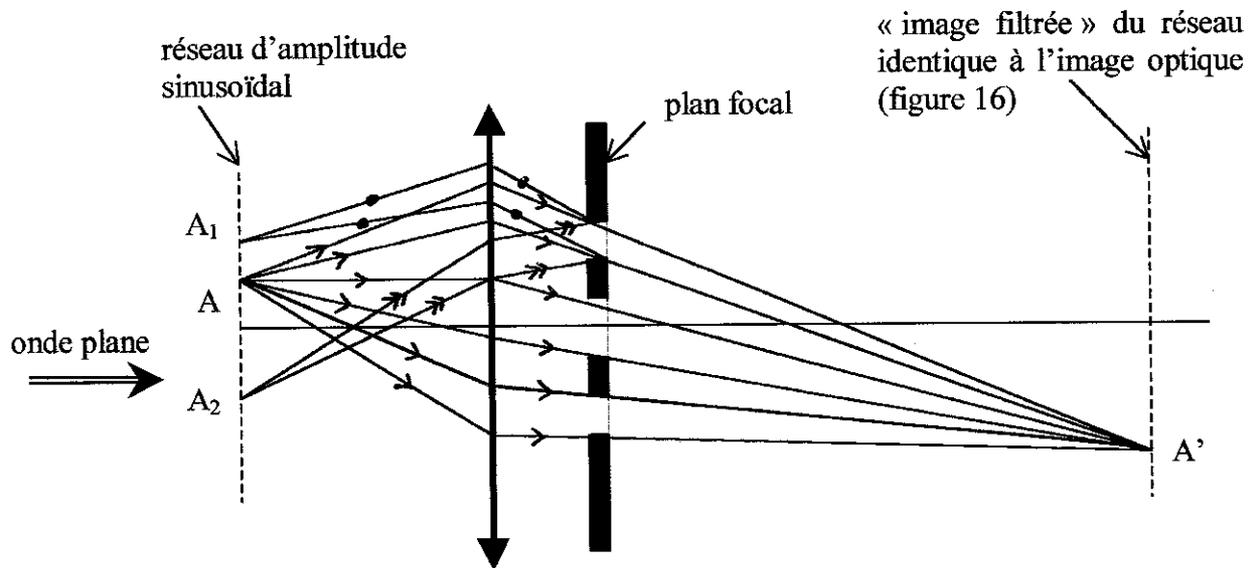
Une lecture superficielle de la figure 21 pourrait conduire au paradoxe suivant : l'interruption de tracés par les caches conduit à l'absence d'éclairage de l'écran alors que tous les autres tracés issus du point objet A_0 parviennent au point image A_i .

La situation d'éclairage nul de l'écran après pose des caches n'est paradoxale que si l'on oublie que les caches dans le plan focal diffractent l'onde et que l'on doit alors mettre en œuvre le principe d'Huygens-Fresnel. Nous avons à nouveau une brisure de la conjugaison optique qui n'est pas évidente au vu de la figure 21. Comme sur la figure 18, l'éclairage au point A_i est dû à la superposition des ondelettes issues de chaque source secondaire du plan focal. Par conséquent, il est affecté par tous les points du réseau, puisque ceux-ci interviennent tous dans le calcul du champ dans le plan focal, et peut fort bien, de ce point de vue, être nul. Nous sommes donc passés de la correspondance ponctuelle entre plans conjugués de l'optique géométrique à une formation globale de « l'image filtrée ».

La situation de filtrage est une situation ondulatoire de type «superposition combinée» analogue à celle présentée lors de l'analyse de la formation d'une image compte tenu de

l'ouverture finie de la lentille. Il ne s'agit donc pas ici de l'image au sens où nous l'avons définie.

Pour mettre ce point en évidence, nous pouvons utiliser l'écran « complémentaire » des trois caches, à savoir un écran percé de trois trous au niveau des points S_1 , S_0 et S_{-1} (voir figure 22). Nous aboutissons à un résultat assez surprenant : ce que l'on observe sur l'écran a exactement la même apparence en présence ou en l'absence de l'écran diffractant et ceci indépendamment du diamètre des trous si l'on néglige la diffraction due à l'extension finie du réseau et de la lentille. La réduction de la taille du « faisceau géométrique » issu du point A du fait de la présence du cache aurait pu conduire à prédire une diminution de l'éclairement de l'« image » du réseau sur l'écran. En fait, l'éclairement du point A' n'est pas modifié car il résulte de l'ensemble des « faisceaux diffractés » issus des autres points du réseau tels que les points A1 et A2 de la figure 22 (communication privée M. Devaud, F. Massias).



Filtrage de l'image du réseau d'amplitude sinusoïdal
(n'ont été représentés que quelques tracés conduisant au point image A')

Figure 22

Nous avons ainsi rencontré un nouvel exemple de difficultés liées à une lecture superficielle du schéma tel celui de la figure 21 qui peut amener à une interprétation erronée de la situation.

2.4.2.4. Conclusion sur l'analyse des situations de type «superposition combinée »

Les situations de type «superposition combinée» présentées ont à plusieurs reprises mis en évidence les pièges que peuvent receler les schématisations. L'analyse par groupement de tracés et le dédoublement de la lentille en permettent une approche cohérente soulignant la nécessaire réflexion sur le statut des tracés combinée à l'utilisation de la notion de sélection par l'aval. La présence de la diffraction impose une brisure de la conjugaison optique : l'éclairement de l'écran n'est plus alors une image optique résultant d'une correspondance point à point entre objet et image. Elle impose également la mise en œuvre de la sélection par l'aval, cette fois suivant deux étapes. Ceci rend l'analyse des situations de type «superposition combinée » plus délicate que celle des situations de type «superposition simple ».

Les situations de filtrage optique conduisent à envisager une nouvelle approche de la formation d'une image : l'optique de Fourier. Le passage de la correspondance ponctuelle de l'optique géométrique à celle plus globale de l'optique de Fourier ne devrait pas se faire sans difficultés. Ces difficultés n'ont pas encore été explorées et nous n'avons fait ici que souligner celles relatives au caractère polysémique de la schématisation.

3. Récapitulation pour l'analyse des situations prototypiques

3.1. Idées fortes pour la caractérisation des situations

Lors de l'entrée en matière, nous avons souligné qu'avant d'explicitier complètement la notion de sélection par l'aval, il était nécessaire de clarifier la nature des situations.

Nous avons distingué les situations d'optique géométrique des situations d'optique ondulatoire en nous appuyant sur la sélection par l'aval : c'est le point d'arrivée (point d'un écran ou d'un détecteur) qui sélectionne les tracés. C'est donc à partir de ce point - nous avons parlé d'analyse à « rebrousse-lumière » - qu'il s'agit de statuer sur la nature de la situation.

La situation appartient au cadre de l'optique géométrique si la prise en compte effective de la phase n'est pas nécessaire à l'interprétation requise de l'éclairement au point d'arrivée. Les tracés sont alors des rayons lumineux que nous avons appelés « chemins d'énergie ».

C'est le cas des situations suivantes :

- source ponctuelle unique sans interposition de dispositif interférentiel ou diffractant sur le trajet des rayons lumineux ;
- plusieurs sources totalement incohérentes : elles sont alors considérées comme agissant indépendamment les unes des autres ;
- formation de l'image optique d'un objet éclairé par une onde plane monochromatique cohérente : le stigmatisme du système optique permet en quelque sorte d'oublier la phase.

Chaque tracé peut être construit de manière individuelle en utilisant par exemple sa stationnarité. Le groupement de tels tracés est associé à une onde plane ou sphérique dans les situations les plus simples.

Si, pour l'analyse d'une situation donnée, la prise en compte de la phase s'avère indispensable, cette situation appartient alors au cadre de l'optique ondulatoire qui permet d'interpréter les phénomènes d'interférences et de diffraction.

Nous avons distingué les situations de type « superposition simple » de celles de type « superposition combinée ».

Pour les premières, chaque tracé est un trajet stationnaire de lumière, ce que nous avons appelé un « chemin de phase ». Les regroupements mis en œuvre conservent le caractère individuel des trajets : en effet, il ne s'agit plus d'ondes mais de simples tris de trajets pour permettre l'application du principe de superposition au point d'arrivée.

Les situations de type « superposition combinée » sont celles pour lesquelles des sources secondaires sont mises en jeu entre le point de départ et le point d'arrivée par application du principe d'Huygens ou du principe d'Huygens-Fresnel en présence de diffraction : nous ne pouvons donc plus utiliser la stationnarité du trajet comme pour les situations de type « superposition simple ».

Nous pouvons toutefois encore mettre en œuvre les résultats précédents en remarquant que l'application du principe de Huygens-Fresnel revient à analyser ces situations comme la

combinaison de deux situations de type «superposition simple» correspondant à une sélection par l'aval «à deux étages» : le premier entre écran diffractant et point d'arrivée, le deuxième au niveau de chaque point de l'écran diffractant. Nous pouvons procéder de la même manière lorsque l'application du principe d'Huygens-Fresnel nous amène à considérer la distribution d'amplitude lumineuse dans un plan comme un objet.

3.2. Catégorisation des situations prototypiques

Le tableau 1 récapitule, conformément à notre analyse, la catégorisation des situations présentées lors des entretiens et introduites dans les figures et encadrés ci-dessus.

Situations d'optique géométrique		Situations d'optique ondulatoire			Situation « inclassable »
cat 1	cat 1'	« superposition simple »		« superposition combinée »	cat 4
		cat 2 Observation à l'infini ou dans le plan focal d'une lentille	cat 2' Observation à distance finie	cat 3	
S4	S10	S1	S2	S18	S13b
S5	S11	S1bis	S3	S19	
S6	S12	S2bis	S16		
	S13a	TYp	S17	10	
5	S14	S7		14	
6		S8	11	15	
	4	S9	12	17	
	8	S15		18	
	19			21	
				22	

Catégorisation des situations
Tableau 1

Les catégories (1) et (4) sont en fait relativement atypiques dans le sens où le traitement des situations impliquées ne relève pas, pour des raisons radicalement différentes pour chacune de ces catégories, d'une sélection par l'aval.

En effet, la catégorie (1) regroupe des situations idéales d'optique géométrique : les tracés figurent les rayons lumineux du champ résultant, une « carte » du champ. Dans ces conditions, par un point de l'espace (hormis les points sources et les points de convergence) ne passe qu'un rayon lumineux et la sélection n'a plus de raison d'être.

Concernant la catégorie (4), le type de représentation choisi, principalement utilisé en optique de Fourier, met en avant la formation globale d'une image, direction par direction, et non plus point par point comme en optique géométrique classique (catégorie (1')). A nouveau, la sélection par l'aval n'est pas mise en œuvre puisque que l'on ne s'intéresse plus à l'ensemble des tracés arrivant en un même point.

Toutes les autres catégories (1'), (2), (2') et (3) rentrent dans le cadre d'un traitement par sélection par l'aval.

Pour la catégorie (1'), l'appartenance des situations à l'optique géométrique n'est due qu'au fait que nous nous plaçons entre plans conjugués où le stigmatisme peut être mis en œuvre.

La catégorie (2) est prototypique des situations d'optique ondulatoire de type «superposition simple» où l'on se place dans le plan focal d'une lentille ou à l'infini (S8 et S9) pour observer une figure de diffraction ou une figure d'interférences.

Pour la catégorie (2'), il s'agit des mêmes phénomènes mais leur observation avec ou sans lentille ne s'effectue plus à l'infini.

Aux situations appartenant aux catégories (2) et (2') s'applique donc le même traitement. L'observation des phénomènes à l'infini ou à distance finie, le caractère discret ou continu des sources, la présence ou non d'une lentille ne viennent en rien changer leur interprétation.

La catégorie (3) regroupe les situations d'optique ondulatoire de type « superposition combinée ». Leur analyse nécessite une double mise en œuvre de la sélection par l'aval de part et d'autre du plan de rupture, qu'il s'agisse d'un véritable plan diffractant ou d'un simple plan où est appliqué le principe d'Huygens.

Les notions les plus courantes d'optique (source, objet, image) ne relèvent pas de l'évidence. Par exemple, quelles réponses donner aux questions suivantes : Qu'observe-t-on sur un écran ? Une image ? Autre chose ? Nous l'avons souligné à plusieurs reprises : le caractère polysémique des schématisations induit des difficultés quant à l'interprétation des situations physiques.

Nous avons proposé quelques pistes pour analyser les différents aspects que recouvrent ces notions. Ainsi :

- Un cache placé devant une lentille peut être utilisé pour tester la nature de ce qui est observé sur un écran. Nous avons souligné à cette occasion que le rôle de la lentille change suivant que celle-ci entre dans une situation d'optique géométrique ou d'optique ondulatoire. Dans le premier cas, il s'agit d'un système imageur alors que dans le deuxième, ce n'est plus qu'un dispositif déterminant les trajets stationnaires conduisant au point d'arrivée.
- Un écran diffusant (papier calque par exemple) peut fonctionner comme un « transformateur » de « sources ». Les sources « fictives » d'Huygens se transforment sur l'écran diffusant en de véritables sources. De la même façon, un objet étant considéré comme un assemblage de sources, les franges d'interférences que nous avons appelées « objet non classique » se voient transformer en un objet classique en présence d'un écran diffusant. Il faut toutefois noter que l'écran diffusant ne conserve pas la cohérence des sources d'Huygens et qu'il n'est intéressant que pour obtenir l'image de l'objet au sens où nous l'avons définie (image optique).

Après cette revue de nos critères de caractérisation, soulignons deux aspects qui s'y révèlent essentiels et constituent en même temps des lignes d'organisation des difficultés prévisibles.

4. Bilan du chapitre : deux aspects critiques pour la compréhension du domaine

Dans les deux cas, il s'agit de déplier en quelque sorte diverses possibilités pour un même donné initial.

Le même dispositif, par exemple de source et d'objet diffractant, va donner lieu à un type d'analyse différent selon la position de l'écran : c'est la sélection par l'aval.

Dans le second cas, c'est un schéma ou un élément de schéma donné qui se révèle susceptible de lectures différentes selon la situation représentée, du fait que la phase est gommée par la simple géométrie du trait : c'est la polysémie de la schématisation.

4.1. Sélection par l'aval : rupture du lien entre dispositif et cadre d'analyse

Nous n'avons jusqu'à présent rencontré qu'un premier stade de la mise en œuvre de la sélection par l'aval : c'est le point d'arrivée qui fixe les trajets que nous devons sélectionner.

La réponse complète à la question posée en entrée en matière lors du test du « rayon isolé » constitue ce que nous appelons le deuxième palier de la sélection par l'aval.

C'est la position de l'écran d'observation qui décide, pour un dispositif donné, de la nature de la situation, géométrique ou ondulatoire, et par conséquent du statut des tracés, chemin d'énergie ou simple chemin de phase. Si l'écran se trouve dans le plan image conjugué de l'objet (figure S14 de l'encadré 2), nous sommes dans une situation d'optique géométrique. Pour toute autre position de l'écran, nous sommes dans une situation d'optique ondulatoire. Celle-ci est de type « superposition simple » (figure S15 de l'encadré 3) si la diffraction par l'ouverture finie de la lentille n'est pas prise en compte. En particulier, si l'écran se trouve dans le plan focal image de la lentille, nous obtenons la figure de diffraction à l'infini de l'objet, en l'occurrence du réseau.

Nous pouvons suivre la même analyse pour le test « Image ? » utilisé dans l'enquête décrite au chapitre 1. Si nous plaçons l'écran dans le plan conjugué des deux sources S_1 et S_2 , nous obtenons l'image S'_1 et S'_2 des deux sources et la situation appartient au cadre de l'optique géométrique. Pour toute autre position de l'écran, la situation est de type ondulatoire et nous obtenons sur l'écran des franges d'interférences.

4.2. Polysémie de la schématisation

Dans le paragraphe précédent, la nature de la situation changeait suivant les positions relatives des éléments du dispositif. Ce changement peut également s'introduire lorsque la schématisation de la situation se prête à plusieurs lectures.

Nous prendrons deux exemples pour illustrer notre propos : l'obtention de la figure de diffraction de Fraunhofer d'un objet (figure TYp, questionnaire 3 du chapitre 1) et l'« agrandissement » d'une figure de diffraction (S17).

4.2.1. Éléments graphiques à considérer prudemment

Ainsi, l'analyse des situations prototypiques nous a permis de souligner les difficultés liées à une lecture erronée de la schématisation.

- Des tracés parallèles ne constituent pas systématiquement une onde plane ; des tracés convergeant en un point ou divergeant à partir d'un point ne sont pas davantage associés obligatoirement à une onde sphérique convergente ou divergente. Une même schématisation peut faire l'objet de plusieurs lectures. Ce caractère polysémique des schémas sera approfondi plus avant dans notre analyse.
- Dans les situations de type «superposition combinée», la continuité d'un tracé ne signifie pas systématiquement la conservation de l'identité de l'entité représentée par ce tracé. La diffraction par la monture d'une lentille rompt cette continuité apparente entre points objet et image conjugués. C'est ce que nous avons appelé la brisure de conjugaison optique. La présence d'un filtre (cache) dans le plan focal image d'une lentille entraîne ce même type de brisure. La simple mise en application du principe d'Huygens dans un plan quelconque amène de la même manière à le considérer comme un plan de rupture.

4.2.2. Les pièges du retour inverse

Un autre abord pour souligner la nécessité et la difficulté de lever la polysémie d'un schéma est lié à la tentation de mettre en œuvre le principe du retour inverse à partir d'un point de convergence des tracés. Dans une démarche, que nous illustrons ci-dessous par deux exemples, il se produit de fait un recalage des phases au point d'arrivée, à l'occasion de sa transformation en point de départ. Expliquons nous.

4.2.2.1. Figure de diffraction de Fraunhofer d'un objet

Nous rappelons sur la figure 23 la situation présentée aux étudiants relative à l'obtention de la figure de diffraction d'un objet dans le plan focal image d'une lentille (questionnaire 3 du chapitre 1). L'objet est dans ce cas très simple puisqu'il est constitué des trois sources ponctuelles T_1 , T_0 et T_{-1} .

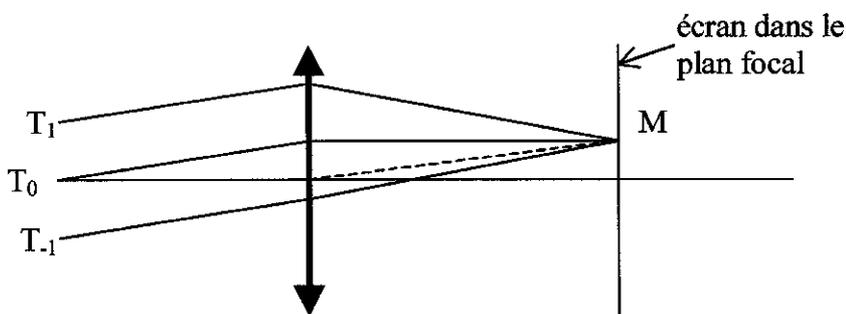


Figure de diffraction de Fraunhofer d'un objet
Figure 23

Il était demandé de calculer l'amplitude lumineuse au point M de l'écran. L'application du principe de superposition au point M nécessite le calcul des différences de marche entre les trois chemins optiques conduisant des sources à ce point.

On peut penser alors, à l'instar de certains étudiants, à utiliser le théorème de Malus, théorème valide uniquement dans le cadre de l'optique géométrique.

Or nous avons montré que la situation est ici du type «superposition simple» : les tracés ne sont que des chemins de phase et leur ensemble ne constitue en aucune façon une onde plane bien que la schématisation, les tracés parallèles, le suggère fortement.

On peut songer à utiliser le principe du retour inverse de la lumière en imaginant une source ponctuelle en M. Si nous plaçons une source lumineuse au point M, nous obtenons les

mêmes tracés que sur la figure 23 mais leur lecture est complètement différente. En effet, nous sommes passés d'une situation d'optique ondulatoire de type «superposition simple» à une situation « idéale » d'optique géométrique. Le statut des tracés, de la « source » au point M et le rôle de la lentille ont changé. Les tracés sont devenus des rayons lumineux, des chemins d'énergie qui appartiennent à l'onde sphérique émise par la source « classique » qu'est devenu le point M. La lentille retrouve son rôle de système imageur, transformant l'onde sphérique en onde plane.

Il est donc important de souligner qu'il ne s'agit pas d'un simple changement de sens de parcours de la lumière suivant des trajets mais bien d'un changement radical de situation physique. Ce changement ne permet d'ailleurs pas de retrouver l'égalité des phases des points T_1 , T_0 et T_{-1} . Il faudrait pour cela inverser totalement la situation, c'est-à-dire tenir compte de tous les trajets conduisant à chacun de ces points. Nous devrions en outre attribuer à chacune des ondes émises par les points de l'écran la phase et l'amplitude convenables pour que leur superposition ne donnent lieu à des interférences constructives qu'à l'emplacement des trous

4.2.2.2. « Agrandissement » d'une figure de diffraction

Nous revenons sur la situation S17 (encadré 3) qui permet d'agrandir une figure de diffraction produite ici par une ouverture.

Lors des entretiens, il était demandé aux enseignants de préciser le statut des tracés et la nature de ce que l'on observe sur l'écran.

Il est encore tentant de vouloir mettre en œuvre le principe du retour inverse de la lumière puisque la lecture de droite à gauche de la situation est alors relativement aisée : le point M est l'image donnée par la lentille du point M' de l'écran. Comme pour la situation précédente, cette lecture d'une même schématisation avec en fait recalage de phase en M' implique un changement complet de la situation physique résumé dans le tableau 2.

	Lecture de la situation de type « interférences » d'optique ondulatoire	Lecture inversée de la situation, avec recalage de phase en M' : situation prototypique d'optique géométrique
Statut des tracés	Chemin de phase stationnaire individualisé	Rayon lumineux, chemin d'énergie
Type de groupement	L'ensemble des tracés n'est pas associé à une onde	Les tracés appartiennent à une onde sphérique convergente ou divergente
Source, objet, image	« non classiques »	« classiques »
Rôle de la lentille	Impose les chemins de phase stationnaires	Transforme l'onde sphérique issue du point M' en une onde sphérique convergente au point M (système imageur)

Polysémie de la schématisation de la situation S17

Tableau 2

Ces deux exemples le montrent bien : le gommage de la phase dans la simple géométrie des trajets semble autoriser, retour inverse à l'appui, des lectures de schéma fort peu compatibles avec la situation physique initialement en cause.

Chapitre 3

Les enseignants et notre analyse

1. Introduction

Au chapitre 1, nous avons analysé les difficultés des étudiants confrontés à la mise en œuvre de deux modèles dans une même situation d'optique. Ce faisant, nous nous sommes placés à un niveau plus conceptuel que calculatoire et avons émis l'hypothèse que certains « éclairages » seraient susceptibles d'aplanir ces difficultés. Au chapitre 2, nous avons présenté notre analyse de contenu de la physique mise en jeu. Celle-ci s'appuie sur une catégorisation des situations d'optique basée sur la notion pivot de sélection par l'aval autour de laquelle peut être menée une réflexion non seulement sur le statut des tracés sélectionnés mais aussi sur celui des points de convergence de ces tracés et celui des éclairements obtenus sur un écran.

L'étape suivante, si nous voulons mettre en place une proposition innovante, devrait estimer la « distance » séparant notre analyse de celle des enseignants. En effet, ceux-ci constituent les relais incontournables entre nos intentions didactiques et leur transmission aux étudiants et nous considérons comme essentiel de faire, préalablement à une construction de séquence, l'étude des points de vue des enseignants.

Dans les procédures de recherche pour la construction de séquences innovantes, il est plus habituel de ne se fonder, une fois déterminer les choix théoriques, que sur deux types d'études préalables : une analyse du contenu à enseigner et une étude des conceptions et modes de raisonnement des étudiants. Evaluations et ajustements interviennent ensuite. Enfin viennent, éventuellement, les préoccupations sur le transfert dans le système éducatif de la séquence mise au point (Kaminski 1991 ; Couchouren et al. 1996 ; Hirn 1995, 1998 ; Hirn et Viennot 1999, STTIS 1999a et b). Les études déjà réalisées sur ce dernier thème laissent entrevoir l'importance déterminante de tendances assez largement partagées par les enseignants lorsqu'ils sont sollicités pour mettre en œuvre une séquence innovante. Ceux-ci sont loin d'être des transducteurs passifs. Ainsi, Hirn (ibid), à propos du programme d'optique de 1993 en France (MEN 1992) observe que des intentions didactiques sont d'autant mieux traduites dans la pratique enseignante effective qu'elles sont associées à un matériel nouveau. A l'inverse, les dispositifs anciens véhiculent avec eux les stratégies d'enseignement classiques et si d'autres sont proposées, on observe au mieux une juxtaposition de l'ancien et du nouveau, ce qui ne va pas sans inflation ni parfois, contradictions. L'inattention au statut des éléments graphiques utilisés dans l'enseignement (Hirn 1998 ; voir aussi annexe 2) est une autre tendance susceptible de conduire les enseignants à transformer, de fait, les intentions des concepteurs d'innovation. De même, dans la conduite des activités expérimentales, l'idée de demander à l'étudiant de faire des prévisions semble hors de la « bande passante » - pour prendre une image physicienne - de beaucoup d'enseignants. Il s'agit là de tendances transversales par rapport aux divers contenus de la physique. Mais l'importance de ces diverses causes de transformation peut se révéler modulée selon la matière traitée. Il se peut aussi que certaines soient très particulières à un contexte donné.

Ceci nous semble à prendre en compte de deux façons. D'une part, comme c'est le cas dans les études menées actuellement dans le cadre du programme européen Science Teacher Training in an Information Society (STTIS 1999a et b), on peut chercher à caractériser, à propos d'innovations déjà lancées, les traits principaux de l'action transformatrice des enseignants c'est-à-dire voir comment ils jouent une partition déjà écrite. Une autre perspective est celle adoptée ici, qui inverse la chronologie classique. Comme on fait usuellement une étude préalable sur les raisonnements communs d'apprenants, l'idée ici est de faire une étude sur l'approche commune d'enseignants avant de construire et proposer une

séquence ou des éléments de séquence, sur un thème donné. Nous n'avons pas trouvé, dans la littérature, d'exemple caractérisé par ce type de démarche. Certes les études sur les enseignants sont légion, y compris en didactique, c'est-à-dire en référence à un contenu particulier. Les idées des enseignants sur la science, en particulier, ont attiré l'intérêt de nombreux chercheurs. Leurs conceptions et raisonnements communs sur un thème donné, par exemple l'optique, ont également été étudiés (Viennot et Kaminski 1991). Mais la perspective n'est pas, usuellement, de tenir compte a priori de tels résultats pour construire une proposition d'intervention didactique innovante à l'intention des élèves, pour en optimiser ou tout au moins en évaluer l'acceptabilité. C'est ce que nous tentons d'amorcer ici.

2. Mode d'investigation

2.1. Méthodes d'analyse

Le contenu physique difficile, nous venons de le voir au chapitre précédent, nécessite une analyse fine de la physique mise en jeu. Nous avons donc été amenés à choisir la technique d'entretien comme mode d'investigation.

Nous avons conduit des entretiens auprès de 10 enseignants de physique volontaires. Deux d'entre eux enseignaient au niveau secondaire mais avaient déjà enseigné à l'université comme moniteurs, 6 autres enseignent à l'université. Enfin, deux enseignants, l'un en IUFM, l'autre au CNRS, ne donnent que des cours spécialisés au niveau DEA. Ce qui rassemble ces personnes, c'est plus leur formation universitaire que leur pratique de l'enseignement, ou que, plus particulièrement, leur expérience de l'enseignement de l'optique et des ondes.

La difficulté de réunir cet effectif ne nous a pas permis de rassembler un échantillon homogène mais nous avons pensé que le facteur déterminant serait celui de la formation reçue. Nous n'avons pas d'éléments, dans nos résultats, qui soit susceptible d'invalider cette hypothèse.

Pour instaurer un climat favorable durant l'entretien, nous n'avons pas présenté nos propositions de façon directe mais avons choisi de placer les enseignants en position de juges, juges devant les documents présentés, extraits de manuels, réponses d'étudiants ou schémas illustrant quelques aspects de nos propositions. Lorsqu'il s'agit de commenter les réponses à une question d'un problème ou d'un questionnaire, les réponses « classiques » sont toujours données (excepté pour la séquence 4 où le climat de confiance s'est le plus souvent déjà mis en place).

Les entretiens, d'une durée de 2 à 3 heures, sont de type semi-directifs. Le caractère semi-directif sera explicité dans le paragraphe détaillant le protocole.

Nous avons procédé à une analyse thématique. Notre analyse de contenu (chapitre 2) nous a conduit à retenir le statut des tracés et la sélection par l'aval comme thèmes centraux. Après un repérage des indices relatifs à chacun des thèmes, une première analyse a ensuite été menée pour accéder à une vision d'ensemble de la position des enseignants et en dégager les grandes lignes.

Nous avons ensuite complété ces premières indications par des extraits d'entretiens in extenso, pour construire une sorte de contre-modèle qui rassemble des vues à la fois opposées à notre analyse et présentes (nous ne disons pas : majoritaires) chez les enseignants consultés.

Enfin, nous rassemblons des éléments de nos propositions qui semblent devoir être assez facilement acceptables par ces mêmes enseignants.

2.2. Protocole

L'entretien est découpé en 5 séquences (voir tableau 1), au cours desquelles nous dévoilons progressivement l'éclairage que nous souhaitons proposer pour les situations présentées. La directivité de l'entretien va donc en s'accroissant au fil de son déroulement. Ainsi, lors de la première séquence, les premières questions sont générales sans aucune mention d'élément permettant d'orienter le discours (« Comment définirais-tu un rayon lumineux ? », « Que mets-tu derrière ce tracé d'optique ondulatoire ? ») ; ce n'est le plus souvent que lors de la dernière séquence que les questions sont beaucoup plus directes en référence à une (ou des) situation (s) bien précise (s) (« Sur ce schéma, ce tracé est-il un chemin d'énergie ? »). Les mots-clés (« énergie », « sélection », « superposition »...) ne sont prononcés par l'enquêteur qu'après avoir été énoncés par l'enseignant ou en fin d'entretien si tel n'est pas le cas.

Le caractère semi-directif de l'entretien autorise une certaine liberté quant à son déroulement, permettant de développer un point important plus précocement avec certains enseignants qu'avec d'autres, si les premiers ont spontanément soulevé ce point. L'ordre de présentation des documents a été fixé (voir tableau 1) mais il peut être modifié de façon à réagir face au discours de l'enseignant, à enchaîner les idées de façon plus naturelle.

Séquence	Sujets	Documents
(1)	Statut des tracés en optique géométrique et ondulatoire (grandeur physique associée)	schémas et commentaires tirés de manuels (S1, S1bis, S2, S2bis, S3)
(2)	Tracés après la traversée d'un écran diffractant (type trous d'Young) (commentaires et schématisations)	réponses typiques d'étudiants - à la question 1 du questionnaire 3 (TYp) (voir chapitre 1 p14) - au questionnaire TY (voir ANNEXE 1 p6)
(3)	Structure de l' « onde diffractée » : surface d'onde et « construction » d'Huygens	- réponses typiques d'étudiants à la question 2 du questionnaire 3 (TYp) - schémas et commentaires tirés des manuels (S1, S4, S5, S6, S7, S8, S9)
(4)	Statut des tracés et de l'éclairage d'un écran lors de l'« agrandissement » de franges d'interférences obtenues avec deux trous d'Young	- réponses typiques d'étudiants au questionnaire 1 : « Image ? » (voir chapitre 1 p6) - réponse pour la construction des tracés du questionnaire « Image ? » (S16)
(5)	Optique de Fourier : statut des tracés et sélection par l'aval	- schémas extraits de manuels (S10, S11, S12, S13) - nos propositions de schémas (S14, S15) - construction des tracés pour l'« agrandissement » d'une figure de diffraction (S17)

Sujets des séquences de l'entretien et références des documents utilisés
(voir ANNEXE 1 p2 pour plus de détail)

Tableau 1

Nous renvoyons au tableau 1 du chapitre précédent pour la catégorisation que nous proposons des situations.

Nous donnons ici une présentation très synthétique du protocole permettant de cerner la façon dont les thèmes sont abordés lors des différentes séquences.

La séquence (1) devrait permettre, avant toute discussion et introduction de biais, de situer la position de l'enseignant relativement au thème du statut des tracés. C'est en quelque sorte un « état des lieux » que nous tentons d'opérer. Lors de cette séquence, il n'y a pas de questionnement direct sur le thème de la sélection par l'aval ; si des indices sont relevés, ils ont été énoncés spontanément par l'enseignant.

Au cours de la séquence (2), la notion de sélection par l'aval n'est pas indispensable pour expliquer les réponses des étudiants à la question 1 du questionnaire 3 (voir chapitre 1 p 14) portant sur le tracé des trajets de lumière issus des trois trous d'Young et convergeant en un point du plan focal d'une lentille. Seule la mention du phénomène de diffraction pourrait suffire. Les difficultés posées par la continuité de la symbolisation sur les schémas pourraient être relevées. Des informations sont également recueillies sur le statut des tracés, complétant « l'état des lieux » obtenu à la séquence (1).

Lors de la séquence (3), nous nous intéressons à un problème plus calculatoire : le calcul de la différence de marche entre les différents trajets issus des trois trous d'Young et conduisant en un point du plan focal de la lentille (voir question 2 du questionnaire 3, chapitre 1 p14). Les deux thèmes conducteurs de l'entretien passent en arrière plan et le questionnement porte essentiellement sur l'application du théorème de Malus, classique en optique géométrique, à une situation d'optique ondulatoire. La justification du calcul devrait toutefois faire mettre en œuvre la notion de sélection par l'aval et, de façon plus précise, le statut attribué aux tracés et « sources » (voir chapitre 1 p15 et chapitre 2 p34) pour donner du calcul des différences de marche une justification cohérente. Cette séquence est donc l'occasion d'estimer la prégnance des différents thèmes chez les enseignants et de vérifier la cohérence de leurs analyses dans différents contextes.

La situation « Image ? » de la séquence (4) est présentée de façon quelque peu ludique pour casser le rythme assez soutenu de l'entretien. Nous rappelons qu'il s'agit de mener une réflexion sur le statut de ce qui est observé sur un écran lorsqu'une lentille est utilisée pour « agrandir » les franges d'interférences produites par des trous d'Young. Même si elle est souvent ressentie comme un intermède, voire une parenthèse, dans le déroulement de l'entretien, cette réflexion n'en est pas moins au cœur du débat. La surprise à la lecture des questions provient du fait que leur formulation est atypique bien qu'elles se rapportent à une situation prototypique d'optique ondulatoire. C'est la seule occasion où la réponse au questionnaire n'est pas donnée à l'enseignant (excepté pour l'enseignant N°1). Notons également que nous proposons non pas notre réponse mais celle couramment présentée comme « correcte » par les enseignants, si bien sûr la réponse fournie par l'enseignant est différente, de façon à analyser sa réaction.

Lors de la séquence (5), nous retournons à un questionnement beaucoup plus direct sur les deux thèmes et essayons de mettre à jour une compréhension plus complète de la sélection par l'aval qui consiste à saisir l'importance de la position du point d'arrivée pour décider du cadre d'analyse du dispositif, optique géométrique ou ondulatoire (voir chapitre 2 p55).

Les deux thèmes du statut des tracés et de la sélection par l'aval sont donc présents tout au long du déroulement des entretiens mais leur mise en avant par l'enquêteur n'est pas systématique afin de juger de leur force dans l'analyse spontanée des enseignants.

3. Entrée en matière

Vu la durée des entretiens, nous ne pouvons donner in extenso l'analyse détaillée de chaque entretien, chacun d'eux ayant sa propre « histoire » (voir les transcripts des entretiens en ANNEXE 1 p16). Par contre, nous avons retenu un long extrait de l'entretien E10 qui illustre de façon symptomatique les difficultés relatives à l'interprétation des situations proposées et permet de mettre en évidence la structure fine du discours que gommara quelque peu notre première analyse thématique.

L'extrait choisi concerne la situation S17 relative à l'obtention sur un écran d'une figure de diffraction donnée par une ouverture en interposant une lentille entre le plan de l'ouverture et l'écran d'observation. Il est demandé de comparer les situations S17 et S14. Cette dernière schématise l'obtention de l'image d'un réseau par une lentille, l'écran d'observation étant situé dans le plan conjugué du réseau.

Ces situations ont été analysées en détail lors de l'analyse du contenu de la physique du chapitre 2. Nous en rappelons les principaux points. La situation S14 relève du cadre de l'optique géométrique : les tracés sont des chemins d'énergie associés à une onde sphérique, le point objet A est une source « classique ». En revanche, la situation S17 appartient au cadre de l'optique ondulatoire : les tracés sont des chemins de phase dont le groupement n'est pas associé à une onde sphérique, le point M n'est pas une source « classique » et la figure de diffraction située dans le plan contenant le point M ne constitue pas un objet « classique ».

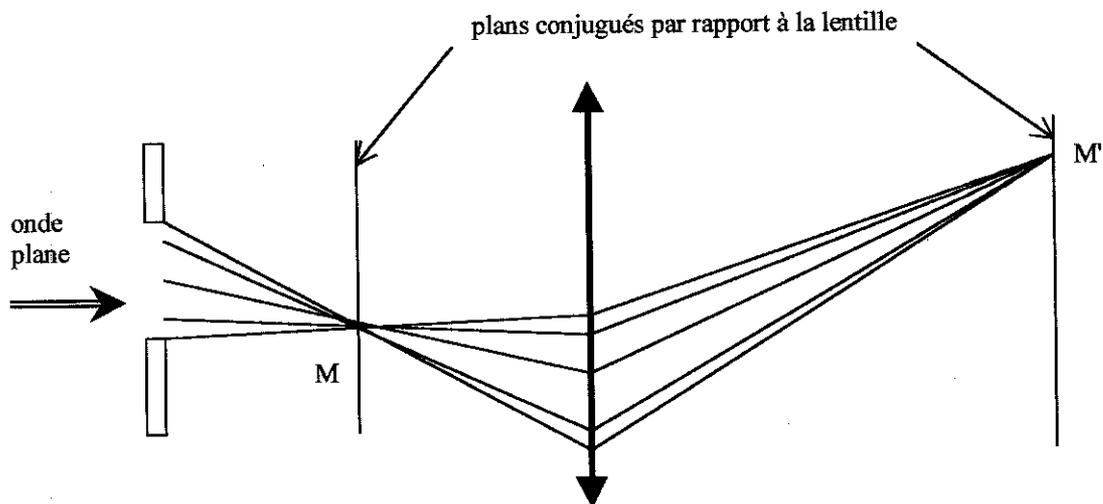


Figure S17

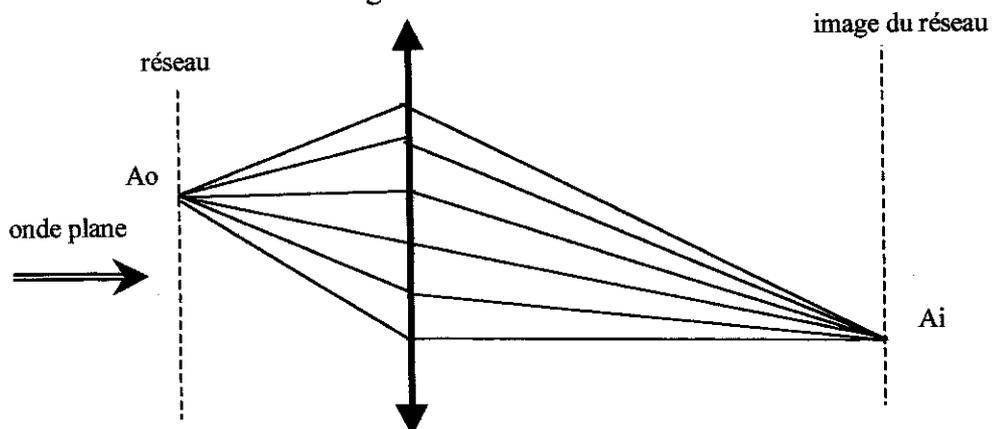


Figure S14

L'extrait a été découpé en quatre parties ponctuées par les moments clés structurant les échanges.

Les questions-réponses commentées figurent dans les tableaux 2, 3, 4 et 5.

1 ^{er} acte : Premières interrogations		
Questions	Réponses	Commentaires
<p>(133) Ici (S14), j'avais dit correspondance point à point (entre A et A'), onde sphérique. Est-ce que je peux reproduire ce raisonnement-là dans cette situation (S17) ? Ou est-ce que c'est différent ?</p> <p>Alors, laquelle ? (...)</p>	<p>(Silence) Tu vois, sans réfléchir, ce qui n'est pas vrai parce que j'ai déjà réfléchi dix secondes, j'aurais envie de dire oui, il y a une différence. Mais alors, justement, est-ce que c'est naïf ?</p> <p>Bon correspondance point à point, oui, quand même. Correspondance point à point, je vois une correspondance point à point. Par contre, onde sphérique, ici, au sens, j'ai une onde plane là qui arrive là, ici j'ai une diffraction, j'ai une onde sphérique qui sort ici donc je vais avoir, entre guillemets, des plans d'onde en phase là, alors est-ce que je dis des blagues ? (Silence) (...) Là, je dis des blagues, c'est que, en fait, c'est la même chose.</p>	<p>La lecture de gauche à droite de la situation ne permet pas à l'enseignant de concilier la correspondance ponctuelle affichée par les tracés et l'assimilation du groupement des tracés à une onde sphérique.</p>
<p>(134) La même chose, c'est-à-dire que tu dirais qu'on a une onde sphérique ici (issue de M), une onde sphérique ici (convergente en M').</p>	<p>C'est la question que je suis en train de me poser. (...). Ben, oui, parce que ça, imaginons que je matérialise ce point (le point M). Là, j'enlève ce qu'il y a là (l'ouverture) et je dis voilà, ce truc-là est une source ponctuelle de lumière.</p>	<p>Pour résoudre le dilemme, l'enseignant propose de substituer la situation présentée par une situation différente qu'il sait analyser en s'appuyant encore sur le même type de lecture « géométrique ».</p> <p>Mais les deux situations sont-elles équivalentes ?</p>
<p>(135) Enfin, bon, je veux dire, ça (l'ouverture), c'est présent, hein. [Oui, bien sûr, je...] C'est présent.</p>	<p>Parfaitement. Mais, maintenant, je remplace ce dispositif par un autre dispositif dans lequel le même point M est une source ponctuelle de lumière. Elle va bien avoir son image en M'.</p>	<p>Mais les deux situations sont-elles équivalentes ?</p>
<p>(136) Mais, est-ce que l'image M' va être la même ?</p>	<p>C'est ça la question. Non, c'est pas sûr du tout, justement. Attends, attends. (?) Ben, euh, même raisonnement si tu inverses le sens des rayons lumineux, ça va bien, euh, reconverger en M. [Oui.] Donc j'aurais envie de dire que oui.</p>	<p>Pour montrer cette équivalence, l'enseignant tente alors une lecture de droite à gauche en s'appuyant sur le principe du retour inverse de la lumière. Il ne prend pas alors en compte le changement de situation introduit concernant notamment le statut des tracés, « sources », « objets » et « images ».</p>
<p>(137) Mais est-ce que ça va bien reformer ce qui se passe au niveau de l'ouverture ? Puisque tu t'arrêtes en M, là, hein.</p>	<p>Ah oui, oui. Attends, attends.</p>	

Tableau 2

2 ^{ème} acte : Entrée en scène de la phase		
Questions	Réponses	Commentaires
(138) (...) <i>Est-ce que les points que tu vas obtenir ici vont être en phase là (au niveau de l'ouverture ?) (...)</i>	Non, mais c'est bien ça mon problème. Mais, pourtant, si je récite ton théorème de Malus de tout à l'heure, uniquement pour cette portion là (entre M' et M), dans laquelle j'ai bien le droit de le faire, vu que là j'ai pas de diffraction, euh, donc, j'aurais envie de dire, j'ai envie de dire quoi ? J'ai envie de dire quoi ? Je suis en train de me planter.	La discussion étant dans l'impasse, l'enquêteur décide d'introduire la notion de phase jusqu'alors non explicitement énoncée.
(139) <i>Non, mais je suis d'accord avec toi, si tu utilises Malus dans ce sens-là (de M' à M), si tu as une source qui émet ici (en M'), ils vont être en phase ici (en M).</i>	Oui. Il n'y a pas de doute. Mais alors, comment ça se raccorde avec ça ? S'ils sont en phase là (en M), ils le sont plus là (au niveau de l'ouverture).	
(140) <i>Ils ne le sont plus là.</i>	C'est évident. Alors que là (S14), c'est le contraire, au point A, ils sont en phase et j'ai un train d'onde.	
(141) <i>Au point A', ils sont en phase, tu peux faire un retour arrière, inverse, ils sont en phase là (en A'), ils seront en phase là (en A).</i>	Donc, en fait, j'ai l'impression que mon point A, c'est celui-ci (point M) et mon point A' (point M') c'est celui là.	Les situations S14 et S17 semblent jugées analogues par l'enseignant entraînant l'assimilation des points A et A' de S14 aux points M et M' de S17 et un retour à une lecture de type « géométrique ».
(142) <i>C'est ce que je voudrais essayer de comparer. Est-ce que ces situations sont équivalentes ?</i>	(silence)	

Tableau 3

3 ^{ème} acte : Changement de sens de parcours et retour inverse		
Questions	Réponses	Commentaires
(143) <i>Parce que tu dis retour inverse de la lumière, justement, tout à l'heure, on disait retour inverse, il faut faire attention parce que ce n'est pas tout à fait du retour inverse.</i>	Non. Ce n'est pas tout à fait du retour inverse.	L'enseignant pressent qu'il y a une difficulté mais n'arrive pas à l'explicitier
(144) <i>Donc, là, tu es en train de faire du retour inverse pur. Tu dis que ta source ponctuelle (en M') émet des rayons en phase, est-ce que c'est bien (...) l'inverse de cette situation là (S17) ?</i>	(silence)	

Tableau 4

Epilogue		
Questions	Réponses	Commentaires
(145) <i>Ou autrement dit, est-ce que les rayons arrivent en phase en M' ?</i>	Non, non (...)	L'enseignant prend conscience des différentes lectures possibles d'une même schématisation qui l'ont amené à « confondre vraiment A' et M' ».
(146) <i>Donc, on est quand même d'accord pour dire qu'on n'a pas une onde sphérique ici (issu de M). (...)</i>	Et je vois maintenant l'erreur que je faisais, c'est que je confondais vraiment A' et M', et après j'avais un problème pour remonter.	

Tableau 5

Cet extrait souligne les interrogations et les changements de position, voire contradictions, que sont susceptibles de revêtir les analyses des enseignants sur des séquences pouvant être relativement courtes (ici 13 questions-réponses). Nous avons mis en évidence la difficulté de proposer une méthode d'analyse fiable s'agissant, par exemple, de définir des indicateurs pour estimer la distance séparant notre analyse du contenu de la physique de celles des enseignants. Nous essaierons de trouver la juste mesure entre une analyse structurelle fine de chaque entretien et une analyse transversale par trop superficielle.

4. Analyse thématique

Nous nous proposons ici de mettre en évidence les grandes lignes dans l'analyse par les enseignants des situations qui leur ont été présentées. Comme nous l'avons dit, vu la faiblesse de la taille de l'échantillon, un traitement statistique n'est pas envisageable. Nous tentons de dégager quelques tendances très présentes dans ce groupe limité, qui pourraient être confirmées et affinées par une enquête sur un échantillon plus large d'enseignants.

Notre analyse s'articule autour des deux thèmes centraux : statut des tracés et sélection par l'aval.

4.1 Statut des tracés

4.1.1. Outils d'analyse

Dans l'analyse de contenu du chapitre 2, nous avons différencié les statuts des tracés suivant qu'ils appartiennent à une situation d'optique géométrique ou d'optique ondulatoire. Une situation relève de l'optique géométrique si elle ne nécessite pas l'introduction de la phase pour accéder à son interprétation et de l'optique ondulatoire dans le cas contraire, c'est-à-dire typiquement si les phénomènes d'interférences doivent être pris en compte.

Dans le premier cas, les tracés sont des rayons lumineux : ce sont des « chemins d'énergie ».

Dans le deuxième cas, ce ne sont plus que des « chemins de phase ».

La mention et l'utilisation du terme « énergie » est donc un indice crucial, noté (En) concernant la prise en compte effective ou non, correcte ou non selon notre analyse, du statut des tracés.

Nous avons aussi relevé la mention du phénomène de superposition (Superp) et sa co-occurrence avec la mention du terme « énergie ».

Nous avons également repéré les comparaisons de statuts explicitement formulées par l'enseignant.

Nous avons enfin utilisé un certain nombre d'indices supplémentaires correspondant à certains points que nous avons jugés importants (voir tableau 6).

Caractérisation des trajets	D : point de départ d'un tracé A : point d'arrivée d'un tracé So : mention d'une source Délect : mention d'un détecteur
Grandeur physique associée	Rlexp : Rayon lumineux dans le cadre expérimental (lié à une notion d'extension spatiale) Ph : mention de la phase
Autres « statuts »	Sconstr : tracé comme support de construction Scalcul : tracé comme support de calcul
Lecture des schémas	gd : lecture de gauche à droite Cont : prise en compte de la « continuité » des tracés
Groupement de tracés	Gr : mention d'un groupement Stigm : stigmatisme

Codage des « autres indices » pour le thème statut des tracés (outre la mention de l'énergie, celle de la superposition et celle de la comparaison des statuts en optique géométrique et optique ondulatoire)

Tableau 6

Les éléments de la grille d'analyse sont donnés ci-après.

questions	réponses	énergie (En)	superposition (Superp)	comparaison des statuts exprimée par l'enseignant	autres indices	commentaires
-----------	----------	--------------	------------------------	---	----------------	--------------

Les grilles correspondant à chaque enseignant, pour chacune des séquences des entretiens, sont données en ANNEXE 2 p1.

4.1.2. Statut du rayon lumineux.

L'ensemble des enseignants interrogés s'accorde pour attribuer au rayon lumineux un contenu énergétique. 8 d'entre eux le formulent explicitement dès le début de l'entretien :

Ce qui donne un effet sur l'œil, sur le détecteur, c'est l'énergie transférée (E4)

C'est un pinceau suffisamment petit pour représenter ce que nous on traite comme un rayon lumineux... Quand les rayons passent effectivement quelque part, ils transportent de l'énergie. (E3)

Le rayon correspond à un trajet d'énergie. (E2)

C'est une notion plutôt abstraite... C'est un modèle... je le définirais finalement comme la limite d'un pinceau lumineux... le rayon lumineux, en tout point, en fait, est tangent au

vecteur de Poynting qui transporte l'énergie... En fait, une des grandeurs que l'on pourrait attacher au rayon lumineux, c'est une sorte d'énergie lumineuse...(E9)

Je leur introduis expérimentalement (le rayon lumineux), c'est-à-dire j'ai pris une source et puis, devant, j'ai mis un petit écran avec trois fentes et donc, ça leur fait des rais de lumière... la direction de propagation de l'énergie...(E7)

E1 n'en donne qu'une formulation implicite :

Du point de vue physique, on les voit (les rayons lumineux) en travaux pratiques. (E1)

Notons que E5 ne mentionne le terme « énergie » pour la première fois que lors de la deuxième séquence à propos de la source primaire des trous d'Young (*C'est plus directement relié à la rigueur à la direction de propagation de l'énergie ...puisque la source est réelle...*) et pour la deuxième fois lors de la séquence (5) à propos de l'onde plane (*Les rayons lumineux qui limitent un faisceau, c'est la différence entre il y a de l'énergie qui est transportée dans cette région de l'espace et il n'y en a pas à côté...On voit le pinceau de lumière...*). Toutefois, un peu plus avant dans l'entretien, après proposition de la définition énergétique du rayon lumineux par l'enquêteur, il répond :

Oui, bien sûr... Y a pas de mystère. Rayon lumineux : direction de propagation de l'énergie...Effectivement, les gens qui essaient de faire un truc un peu propre souvent mettent dans rayon lumineux, la direction de propagation de l'énergie. C'est souvent le support physique de l'existence du rayon lumineux...

Signalons enfin que trois enseignants insistent sur la nécessité de donner au rayon lumineux une certaine « épaisseur » (le terme pinceau est souvent employé) pour pouvoir lui attribuer un contenu énergétique et donc un contenu physique :

Un rayon, c'est un pinceau pour moi et il n'y a pinceau que si sa taille est beaucoup plus grande que la longueur d'onde, sa taille transverse. Sinon, pour moi, c'est des chemins géométriques et puis c'est tout...On tire des traits mais sans aucune conséquence énergétique. (E4)

Dans un rayon de section nulle, en principe, il n'y a pas d'énergie. S'il n'y a pas d'énergie, on ne fait pas beaucoup d'optique...(E3)

J'avais dit que si on commençait à donner une épaisseur au rayon lumineux, ça devenait une entité physique... avec de l'énergie. (E6)

4.1.3. Statut des tracés en optique ondulatoire

Il ne semble pas qu'il y ait eu, de la part des enseignants, de questionnement préalable sur le thème du statut des tracés. La séquence (1) permet de dresser en quelque sorte un état des lieux sur les réponses, pour lequel nous avancerons ensuite une tentative d'explication.

4.1.3.1. Des réponses très partagées

Les réponses sont très diverses, marquant ainsi l'absence de consensus et le caractère non évident de ce point au regard des enseignants.

Trois enseignants se prononcent pour une identité de statut des tracés en optique géométrique et en optique ondulatoire :

On est vraiment dans les directions de propagation, et on parle de vecteurs k... C'est ku quoi. Donc on peut la (la notion de rayon) garder tout à fait. (E5)

Il s'avère finalement que ce qui est gênant, c'est que le rayon ne dit rien sur la phase...(E6)

Je ne sais pas. Dans ma pensée, je crois que je conserve la notion de rayon...(E9)

Deux enseignants « réutilisent » la notion de rayon : les tracés deviennent alors des chemins optiques sans que soit précisée très clairement la différence que peut introduire ce changement lexical quant au statut des tracés :

On dit rayon mais en même temps dans les calculs, c'est différence de chemin... (E5)

On va parler de chemin optique. La vision que j'en ai là vraiment n'est pas en termes de rayons lumineux... ça commence à se mélanger un petit peu. (E10)

Deux enseignants considèrent les tracés comme de la géométrie « pure » sans apparente réflexion sur leur contenu physique éventuel.

Il faut calculer les différences de marche...le rayon, j'en n'ai pas vraiment besoin. (E1)

C'est de la géométrie et puis après on va calculer les différences de phase. (E2)

Enfin, quatre enseignants rejettent de façon plus ou moins catégorique l'emploi de la notion de « rayon » en optique ondulatoire.

Dès qu'on est en ondulatoire, il n'y a pas de rayons....J'ai tendance à dire des chemins, mais à ce moment-là... je dois réserver le mot rayon à l'optique géométrique. (E4)

C'est vraiment un chemin de propagation... Il n'y a plus la notion de rayon...(E5)

C'est aberrant de mélanger ces deux notions (rayons lumineux et interférences). (E7)

A ce stade de l'entretien, il est difficile de discerner avec précision la portée de certaines réponses.

Par exemple concernant la réponse de E4, on peut penser que dans ce cas, le terme « lumineux » a été omis par l'enseignant mais qu'il considère bien en fait le rayon lumineux avec son contenu énergétique.

Le manque de cohérence apparent de certaines réponses pourrait ainsi être le fait d'une ambiguïté d'ordre lexical. Ainsi, lorsque E5 « garde la notion de rayon », le tracé est associé à la direction de propagation d'une onde et lorsque plus loin, il nie la présence de « rayon » dans une situation d'interférences (*Il n'y a plus la notion de rayon*), il s'agit sans doute alors de « rayon lumineux ». Cette polysémie rend souvent l'analyse délicate et masque éventuellement des différences de contenu plus profondes.

La difficile synthèse entre « ondes » et « rayons » est illustrée par les réponses suivantes données par un même enseignant :

C'est aberrant de mélanger ces deux notions (rayons lumineux et interférences).

Il y a un glissement de ce qu'il y a derrière entre l'optique géométrique et puis l'optique ondulatoire. On ne parle plus tout à fait de la même chose en employant le même terme. Mais je me disais quand même que, effectivement, expliquer les interférences et la diffraction, etc, sans avoir ce support qu'est facilement intuitif du rai de lumière qui se propage comme ça, c'était... (E7)

La première proposition marque la volonté de séparer de façon très nette la notion de rayon lumineux de celle d'onde impliquée dans une situation d'interférences. On passe ensuite à un « glissement » de sens pour terminer finalement par utiliser le « rai de lumière » dans des situations ondulatoires.

Nous retiendrons de cet état des lieux, outre la diversité des réponses qui marquent sans doute un non-questionnement préalable de la part des enseignants, le fait que l'énergie n'est pas explicitement associée à la détermination du statut des tracés. Si, concernant le rayon lumineux, outil principal de l'optique géométrique, un consensus existe, ce n'est plus le cas pour le statut des tracés en optique ondulatoire. Les questions semblent surprendre, les réponses fournies ne sont plus assurées, peuvent changer suivant le contexte.

Nous tentons de préciser ces différents aspects avec les séquences suivantes de l'entretien.

4.1.3.2. Diffraction et interférences : analogie ?

Après la séquence (1) que l'on peut qualifier d'exploratoire, nous avons tenté, conformément au protocole, de faire expliciter par les enseignants la signification qu'ils attribuaient aux tracés d'optique ondulatoire.

La lecture des grilles d'analyse des entretiens (voir ANNEXE 2 p1) donne une idée des difficultés posées par cette explicitation et notamment de sa dépendance au contexte et à la formulation du questionnement, directe ou indirecte.

Il est difficile de donner une vue synthétique de l'ensemble des dix entretiens. Nous avons choisi d'axer notre analyse sur la comparaison des traitements effectués par les enseignants sur deux situations classiques d'optique ondulatoire : diffraction à l'infini par une ouverture et interférences. Selon notre analyse (voir chapitre 2 p53), s'agissant de deux situations appartenant au même cadre ondulatoire, le statut des tracés, en particulier relativement à leur contenu énergétique, ne devrait pas varier d'une situation à l'autre. Les enseignants sont-ils tous d'accord sur ce point ?

Le tableau 7 présente leurs analyses relativement à une question qui pourrait être formulée de la façon suivante : « Les tracés figurés sur les schémas sont-ils des chemins d'énergie ? ».

Situation	Oui	Non	?
Interférences avec deux sources ponctuelles	2	5	3
Diffraction à l'infini par une ouverture	6	2	2

Les tracés en optique ondulatoire sont-ils des chemins d'énergie ? :
nombre d'enseignants concernés par chaque réponse

Tableau 7

Nous constatons tout d'abord que ces deux situations ne sont pas jugées analogues du point de vue énergétique par au moins un enseignant sur deux. La situation de diffraction à l'infini semble beaucoup plus l'occasion d'analyse énergétique que ne l'est la situation d'interférences.

Dans le premier cas, il est souvent fait référence aux «directions privilégiées» de diffraction, l'expérience de diffraction par un réseau est alors sans doute fortement présente, qu'elle soit explicitée ou non :

Il (l'auteur du schéma S9) n'en a pas choisi trois (directions) au hasard. C'est trois directions de diffraction. Il n'y a pas de lumière qui est émise entre les deux. Là, il t'a fait la direction principale et puis les deux directions secondaires. (E5)

La lumière s'étale. Là, on passe à une représentation plus énergétique, si on peut dire. On parle de faisceau à ce moment-là. L'énergie se propage dans toute cette zone de l'espace, après diffraction. (E2)

Un point semble écarté de l'analyse des enseignants : les tracés n'ont de sens que relativement à l'application du principe de superposition à l'infini.

Dans le deuxième cas, celui des interférences à deux ondes, c'est sans doute la structure des franges d'interférences, l'alternance de « zones claires et sombres » telle que vue sur une cuve à ondes, qui s'impose et interdit presque de façon évidente le passage de l'énergie suivant un tracé rectiligne au travers du champ d'interférences.

Je ne vois plus de propagation d'énergie, c'est sûr, selon ces rayons-là en tout cas. Il faut analyser le champ résultant...(E4)

On peut considérer ça comme un transport d'énergie qui peut être nul par moment et nul à la fin. Ce n'est pas un trajet d'énergie. Ce n'est pas un canal dans lequel l'énergie..., il n'y a pas de conservation le long de ces trajets. Alors que sur une onde plane ou sur une onde sphérique, on peut faire des calculs d'énergie. (E6)

Rappelons au passage que la stricte conservation de l'énergie n'est pas un argument valide car la rectitude des lignes d'énergie n'implique en aucune façon la constance de la densité de flux de puissance suivant ces lignes (voir chapitre 2 p36).

Le traitement différent souvent accordé aux phénomènes d'interférences et de diffraction n'autorisera pas, ou en tout cas ne facilitera pas, l'établissement de « passerelles » permettant une approche plus synthétique des situations d'optique ondulatoire.

La réponse suivante illustre clairement ce point.

Je crois qu'en fait, je ne parlerais pas des mêmes rayons selon que l'on parle d'énergie ou de phase... Il y aurait des rayons pour les interférences, quoi, et puis des rayons pour le phénomène de diffraction. (E9)

Un seul exemple de mise en parallèle de situations analogues a été repéré. Il est commenté dans le tableau 8. Ce dialogue intervient lors de la dernière séquence de l'entretien 10. L'extrait débute par une question sur le statut des tracés de la situation (S15) relative à l'obtention de la figure de diffraction d'un réseau au plan focal d'une lentille. Pour donner une réponse claire, l'enseignant s'appuie sur le dispositif des trous d'Young, situation qu'il juge, comme nous, analogue à la situation (S15) si l'on s'intéresse au statut des tracés.

Questions	Réponses	Commentaires
<i>Sur les (tracés) rouges (S15), est-ce que tu mets de l'énergie?</i>	Oh oui.	Réponse catégorique
<i>C'est-à-dire, est-ce que pour toi, l'énergie se propage suivant cette direction ?</i>	Ah, alors, attends, attends. Ah oui, oui, il faut un petit peu se méfier parce que l'énergie, c'est une quantité scalaire, ça s'additionne.(...)Si je raisonne trop naïvement, j'aurais envie de dire, ben oui, j'ai de l'énergie sur tous ces rayons-là. Donc, je vais avoir de l'énergie partout et les franges sombres, j'aurais l'impression qu'il leur arrive quand même de l'énergie. C'est-à-dire que justement, il ne faut pas que j'additionne des énergies, il faut que j'additionne des amplitudes.	Doute sur « l'addition des énergies » au point d'arrivée, en particulier sur les « franges sombres ». Application du principe de superposition.
<i>Donc, (...) dans un premier jet, tu dirais de l'énergie et dans un deuxième, tu dirais plutôt non, alors.</i>	Là, j'ai l'impression qu'il y a aussi un piège. Non ? (...) Si j'ai deux fentes d'Young, que je trace deux rayons entre guillemets et que je tombe à un point d'une frange sombre, j'aurais envie de dire comment se fait-il que je somme des rayons qui (...) tous les deux transportent de l'énergie, et puis, c'est sombre. Alors comment je réconcilie ces deux choses-là ? Je suis embêté.	Le doute persiste tout de même. Utilisation d'une situation ondulatoire analogue « plus simple » pour essayer de trancher.
<i>Oui. Si tu as deux sources ponctuelles, S1 et S2, et tu t'intéresses à l'éclairement au point M (...) Ce sont des sources cohérentes (...)</i>	Oui, alors là je suis embêté pour dire, pour tracer mes rayons lumineux, pour dire que j'ai de l'énergie transportée parce que je risque d'arriver en un point sombre.	Simplification de la situation en supprimant la diffraction par les fentes.
<i>Oui. Donc, l'énergie, là, tu..., point d'interrogation (...) Plutôt point d'interrogation ou non ?</i>	Oh, ben, je dirais non. Parce que sinon, je suis dans le paradoxe tout de suite, j'ai l'impression.	Réponse négative. On peut supposer qu'elle l'est aussi pour la situation de départ (S15) bien que cela n'ait pas été explicitement formulé.

Mise en parallèle de situations analogues
Tableau 8

A ce niveau d'analyse, nous soulignons deux points :

- pour une majorité des enseignants consultés, le critère énergétique n'est pas considéré comme décisif quant à la différenciation du statut des tracés ;
- le repérage et par conséquent l'utilisation de situations analogues restent relativement rares et ne constituent donc pas, pour les enseignants, une incitation à une mise en parallèle de jugements portant sur ces situations.

4.1.4. Comparaison des statuts en optique géométrique et en optique ondulatoire

Nous rappelons notre analyse des situations (S14) et (S15) sur lesquelles se centre les échanges sur le thème du statut des tracés lors de la dernière séquence des entretiens.

La situation (S14) concerne la formation de l'image d'un réseau par une lentille. Le cadre d'analyse est celui de l'optique géométrique et les tracés entre points conjugués représentent des chemins d'énergie. Par contre, dans la situation (S15) relative à l'obtention de la figure de diffraction du réseau au plan focal de la lentille, nous sommes passés dans le cadre de l'optique ondulatoire et les tracés ne sont plus que des chemins de phase. Le déplacement du plan d'observation entraîne seul le passage d'un cadre d'analyse à un autre et ainsi le changement de statut des tracés.

Nous avons souligné au paragraphe précédent que, pour ce qui est de juger du statut d'un tracé, le critère énergétique n'est pas opérant dans le sens de notre analyse, pour la majorité des enseignants car, pour eux, les tracés conservent leur contenu énergétique dans une situation de diffraction à l'infini par une ouverture. D'autre part, deux enseignants (E7 et E10) qui s'accordent avec nous pour ne pas considérer les tracés de la figure (S15) comme des chemins d'énergie, ne nous suivent plus lorsque nous passons à la situation (S14) qui illustre la formation de l'image d'un réseau par une lentille.

Ouh là ! La répartition spatiale de l'énergie, là ? Non (pas d'énergie sur les tracés) (...) je suis dans un problème d'optique ondulatoire. (...) J'ai un réseau, donc c'est un problème de diffraction. (E7)

Non (pas d'énergie sur les tracés). Sauf si on cache tout l'objet à l'exception du point A. (E10)

Pour le premier, c'est la diffraction de l'onde incidente par le réseau qui dicte le modèle et interdit de considérer les tracés comme des chemins d'énergie. Un dispositif, un modèle, tel semble être la doctrine sous-jacente. Pour le deuxième, c'est plutôt la superposition due à la présence des autres points sources du réseau. Dans les deux cas, la sélection par le point image A' des tracés ne semble pas être prise en compte. Nous reviendrons plus en détail sur cet aspect à propos du thème de la sélection par l'aval.

Pour différencier le statut des tracés dans les deux situations en cause, le critère énergétique n'est mis en œuvre que par un seul enseignant :

Oui (les tracés de S14 sont des chemins d'énergie), c'est vrai, tu peux imaginer un diaphragme ici (au point A), un pinceau, etc... et du coup ce pinceau-là qui arrive ici (au point A')... pour moi, rayon, c'est un pinceau, c'est matérialisable, c'est isolable du reste et je distingue rayon en ce sens-là et chemin qui me sert à faire des calculs de différence de phase. Dans ce cas (S14), je dis rayon et dans ce cas-là (S15), je dis chemin. Et pour moi, rayon, c'est de l'énergie... (E4)

Bien qu'elle ne s'appuie pas sur notre critère énergétique, la majorité des enseignants consultés s'accorde tout de même pour différencier le statut des tracés selon les situations. Celui-ci est plus fréquemment décrit en termes d'utilisation qu'en termes de contenu de physique. Par exemple, en optique ondulatoire, les tracés ne sont pas décrits comme des chemins de phase mais plutôt comme des tracés permettant de calculer des différences de phase ou de marche. De même, en optique géométrique, un tracé est le plus souvent décrit comme permettant d'effectuer une construction que comme représentant un chemin d'énergie :

Ils n'ont pas le même contenu quand même. Attention. Encore une fois : là (S15), ça va te permettre de faire ton calcul d'optique ondulatoire, de figure de diffraction. Là (S14), tu as juste dit où était le point image de celui-là. (E5)

Pour se prononcer sur le statut des tracés, il convient selon nous de décider de l'appartenance de la situation au cadre de l'optique ondulatoire ou de l'optique géométrique : c'est en fait toute la problématique qui sera reprise lors de l'analyse du thème de la sélection par l'aval.

Or nous rencontrons, avec ces entretiens, deux types de difficultés directement rattachés au statut des tracés.

- Une situation dont les tracés respectent les règles de l'optique géométrique, n'appartient pas obligatoirement au cadre de l'optique géométrique : c'est le cas, par exemple, de la situation (S15) si l'on se limite aux tracés entre plan du réseau et plan focal de la lentille. La réponse suivante illustre ce type de difficulté :

A partir du moment où tu les traces (les tracés de S15), tu leur donnes le statut d'optique géométrique. (E5)

- Dans le même ordre d'idée, la présence d'un phénomène typiquement ondulatoire (diffraction ou interférences), n'interdit pas de mettre en œuvre un traitement d'optique géométrique. Nous avons développé cette idée en début de paragraphe à propos de la situation (S14), formation de l'image d'un réseau par une lentille.

4.1.5. Bilan

Statut des tracés :

Le questionnement sur le statut des tracés en optique est plutôt ressenti par les enseignants consultés comme hors du champ des questions classiques de l'enseignement de l'optique. Ils tentent d'y répondre mais s'appuient, pour la plupart d'entre eux, sur des critères qui ne sont pas associés à un contenu physique. On observe l'association d'un cadre d'analyse à un dispositif, géométrique pour la lentille, ondulatoire pour le réseau, ainsi qu'une prédominance de préoccupations opérationnelles - construction, calcul - sur le souci d'analyse.

La comparaison du statut des tracés dans diverses situations rend incontournable la mise en relation du statut des tracés et de la sélection par l'aval (voir chapitre 2 p55). Pourtant les analyses des enseignants ne jettent pas de ponts entre ces deux thèmes et par conséquent ne mettent pas en œuvre de façon complète la sélection par l'aval.

4.2. Sélection par l'aval

Dans une première partie, nous présentons les résultats fournis par une analyse fréquentielle donnant une idée très grossière de la prise en compte de la sélection par l'aval par les analyses des enseignants.

Puis, dans une deuxième partie, nous nous appuyons sur une analyse plus fine qui prend plus particulièrement en compte deux aspects du protocole de l'entretien : le moment où la réponse repérée est fournie et la situation (et le questionnement) donnant lieu à cette réponse.

4.2.1. Analyse pour le thème de la sélection par l'aval : plus de détail

Nous rappelons selon nous que le traitement d'une situation d'optique ne peut se déterminer qu'à partir d'une lecture « à rebours ». C'est la position du point d'arrivée (le plus souvent, de l'écran dont il s'agit en général d'interpréter l'éclairement) qui est en quelque sorte « le point de départ » du raisonnement. Elle détermine les tracés qu'il faudra prendre en compte et le type de traitement qu'il faudra leur appliquer : c'est ce que recouvre l'expression de « sélection par l'aval ».

Pour estimer de façon suffisamment fine la « distance » séparant notre analyse de celle des enseignants, nous avons distingué, concernant les réponses des enseignants, quatre niveaux que nous allons préciser.

Niveau 1

La nécessité d'une sélection des tracés est liée en général au phénomène de diffraction par une ouverture du fait de l'éventail des directions à envisager pour la lumière, mais le point d'arrivée n'est pas pris en compte explicitement : il ne s'agit donc pas d'une véritable sélection par l'aval au sens où nous l'avons définie.

Niveau 2

Pour une situation donnée (par exemple, obtention d'une figure de diffraction dans le plan focal d'une lentille), la sélection au point d'arrivée se résume à un tri de tracés parmi un ensemble.

Niveau 3

Pour un même dispositif (objet et lentille par exemple), le changement de position du point d'arrivée (en fait, de façon plus pragmatique, de la position de l'écran d'observation) affecte le mode de tri des tracés sans qu'il soit clairement fait état de la nature des groupements.

Niveau 4

Par rapport au niveau 3, vient s'ajouter une explicitation de la nature du cadre d'analyse associé à la sélection. Suivant la position du point d'arrivée (ou de l'écran), la sélection s'opère dans le cadre de l'optique géométrique ou dans celui de l'optique ondulatoire avec toutes les conséquences inhérentes à ce passage quant au statut des tracés, « sources » et autres « objets » ou « images ». Nous sommes donc bien au-delà d'un simple changement de mode de tri mais bien dans le cadre de deux traitements radicalement différents en termes de contenu physique. Pour décider du type de traitement, il convient d'examiner la situation à partir du point d'arrivée (écran ou détecteur) et donc de fonctionner à « rebrousse-rayons ».

Pour caractériser le niveau atteint par les réponses des enseignants relativement au thème de la sélection, nous avons utilisé les indices suivants :

- mention d'une sélection (niveau ≥ 1) : Stri
- mention de la sélection au point d'arrivée (niveau ≥ 2) : StriA
- mention de la superposition au point d'arrivée (niveau ≥ 2) : SSup
- mention des tris différents suivant le point d'arrivée (niveau ≥ 3) : Stri \neq .

Enfin, nous avons relevé toutes les réponses marquant une prise en compte de la superposition.

Chaque indice peut être affecté d'un codage relatif à sa direction (+ : direction positive ; ? : direction ambiguë ; - : direction négative).

Les rubriques de la grille d'analyse sont données ci-dessous.

questions	sélection	indices sélection (Stri, StriA, Stri \neq , SSup)	superposition	commentaires
-----------	-----------	--	---------------	--------------

Les grilles d'analyse de chacune des séquences des entretiens sont données en ANNEXE 2 p59.

Nous pouvons émettre quelques réserves quant au codage utilisé. Le codage binaire des indices gomme tous les dégradés possibles de la formulation des réponses quant à leur portée (force, intensité,...) et à leur caractère explicite ou implicite.

Comme indiqué lors de l'entrée en matière, nous avons tenté de trouver un niveau d'analyse permettant un compromis entre une collection d'études de cas et une analyse transversale par trop superficielle.

Nous présentons ici quelques exemples de réponses suivies de leurs analyses pour mettre l'accent sur la difficulté du codage. De nombreuses autres réponses seront commentées dans la partie relative à notre tentative d'interprétation.

Réponse 1

(à propos de l'extrait de manuel (S1) : diffraction d'une onde plane par une ouverture observée en un point P du plan focal d'une lentille) *J'ai l'impression que ça part de la fin, en définitive. On s'intéresse à un point P et, en fait, on reconstruit à partir de la fin ce que l'on veut, et **uniquement** ce que l'on veut.* (E10)

Réponse 2

(A propos du rayon lumineux)... *on ne s'intéresse pas à **tout** ce qui est émis par la source, tout le champ électromagnétique mais plutôt **juste** à ce qui va être reçu par le détecteur, par l'œil... la notion vraiment opérationnelle c'est plutôt la pupille d'entrée de l'œil et puis du cône lumineux qui va être reçu par l'œil...* (E4)

Les trois réponses suivantes concernent l'obtention de la figure de diffraction des trois trous d'Young au plan focal d'une lentille, situation faisant l'objet du questionnaire 3 soumis aux étudiants (voir chapitre 1 p16).

Réponse 3

*Il en part (des rayons) dans toutes les directions de l'espace et la réponse au 1 a) (du questionnaire 3) **sélectionne** ceux issus des fentes qui finissent **en M**, qui contribuent au signal électromagnétique **en M**. (E8)*

Réponse 4

*Moi, j'insiste sur le fait qu'à partir d'un trou, ça part dans toutes les directions. (...) C'est une **sélection** de certains rayons qui sont émis, eux dans toutes les directions à partir de chacun des trous. Et si à partir de chacun des trous, je prends **entre autres** des rayons parallèles, ça permet de construire une image. (E3)*

Réponse 5

*Il ne **sort** pas une onde plane (des trous T_1, T_0, T_{-1}), a priori. (E9)*

Réponse 6

*(à propos de la construction S16 relative à l' « agrandissement » de franges d'interférences à l'aide d'une lentille) Tu **pars** de S, tu **vas** en S_1 , tu **arrives** en un point B ici que tu situes à 25 cm devant la lentille, de S_2 , tu **reviens** sur le même point B et tu vas te retrouver avec ton image qui est là (sur l'écran). (E7)*

Aux trois premières réponses nous avons attribué le même codage (StriA+) puisque nous avons jugé que pour chacune d'elles la notion de sélection par l'aval était présente.

Pourtant ces réponses n'ont sans doute pas la même force.

La formulation de la réponse 2 est beaucoup moins explicite que celle des réponses 1 et 3 car seule la présence des termes « juste » et « tout » (en gras dans notre transcription de la réponse) nous a conduit à retenir cette réponse comme indice de la sélection par l'aval. D'autre part, cette réponse n'est émise que dans le cadre de l'optique géométrique : elle engage donc moins que les réponses 1 et 3 appliquées au cadre plus large de l'optique ondulatoire.

Nous pourrions également distinguer la qualité des réponses 1 et 3 : la réponse 1 exprime très clairement une lecture de droite à gauche de la situation ce que n'explique pas la réponse 3 ; par contre la superposition au point d'arrivée, « la contribution des rayons » au signal, est plus présente dans la réponse 3 que dans la réponse 1.

La réponse 4 a été codée (StriA?). La sélection est annoncée mais il n'est pas fait référence au point d'arrivée : autrement dit, la sélection par l'aval est-elle vraiment prise en compte ? Un autre doute subsiste quant à l'utilisation du mot image : la figure de diffraction ne constituant pas une image au sens où nous l'avons définie, s'agit-il d'un simple lapsus ou d'un problème plus profond ?

Les réponses 5 et 6 ont été codées (StriA-) car nous les avons jugées incompatibles avec la mise en œuvre de la notion de sélection par l'aval. Là encore, les formulations ne sont sans doute pas équivalentes mais elles présentent toutes les deux un mode de lecture de gauche à droite très marqué n'autorisant pas une sélection par l'aval. Pour la réponse 5, la lecture de gauche à droite se traduit par un détournement de la question qui devient « une onde plane est-elle émise ? » en lieu et place de « les tracés sélectionnés constituent-ils une onde plane ? ». Pour la réponse 6, la lecture de gauche à droite n'est possible que si l'on se donne le plan conjugué du plan d'observation c'est-à-dire après une première lecture de droite à gauche, point que ne semble pas prendre en compte l'analyse de l'enseignant.

Ces exemples soulignent les limites du codage utilisé et servent de mise en garde contre une exploitation abusive d'analyses qui se veulent quantitatives là où une analyse qualitative fine reste indispensable.

4.2.2. Première approche

Le simple comptage des interventions (StriA, Stri≠, SSup) codées suivant la qualité de leur direction (+ ou -) pour StriA et Stri≠, constitue un premier indicateur de la distance séparant notre analyse en termes de sélection par l'aval de celles des enseignants.

Le tableau 9 présente les comptages obtenus pour chaque enseignant.

codage	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
StriA+	2	3	6	7	4	11	1 ?	11	1	9
SSup	1	0	1 ?	3	0	2	0	4	0	1
StriA-	6	4	6	6	6	3	11	1 ou 2	10	5
Stri≠+	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0

Tableau 9

Sélection par l'aval : analyse fréquentielle pour les différentes modalités

Rappel sur le codage : - StriA+ : mention de la sélection au point d'arrivée (niveau ≥ 2)

- StriA- : réponse s'opposant à la sélection par l'aval

- Ssup : mention de la superposition au point d'arrivée (niveau ≥ 2)

- Stri≠ : mention de tris différents suivant le point d'arrivée (niveau ≥ 3)

En observant le tableau 9, nous pouvons déjà retenir les points suivants :

- une grande hétérogénéité des analyses des enseignants au regard de la sélection par l'aval ; le niveau 3 de la sélection n'est qu'exceptionnellement atteint (4 mentions Stri≠ sur plus de 20 heures d'entretien).
- la sélection avec mention de la superposition au point d'arrivée est très peu présente (12 mentions SSup sur l'ensemble des entretiens) voire absente pour près de la moitié des analyses.
- le manque de stabilité de l'utilisation de la notion de sélection par l'aval pour un enseignant donné.

Nous commentons chacun de ces points.

4.2.2.1. Hétérogénéité des analyses

L'hétérogénéité des analyses est manifeste si nous comparons par exemple les comptages pour les enseignants E8 et E9. Pour ce dernier, la sélection par l'aval n'a été repérée qu'une seule fois mais surtout, à maintes reprises (10 fois), son discours va à l'encontre de cette notion (voir ANNEXE 2 p93).

Nous avons catégorisé les analyses des enseignants suivant le niveau de sélection que nous estimons atteint au moins une fois au cours de l'entretien (voir tableau 10).

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
10	7	2 ?	0

Atteinte estimée des niveaux de sélection : nombre d'enseignants concernés
Tableau 10

Lors de l'analyse à propos du statut des tracés, nous avons signalé que le niveau 4 ne pouvait être atteint puisque les analyses du statut des tracés le plus souvent fournies par les enseignants non différenciées du point de vue de l'énergie n'y donnaient pas accès.

Concernant le niveau 3, nous disposons de trop peu d'indices pour nous permettre de porter un jugement sur les 4 réponses positives fournies. Nous ne pouvons guère que constater la rareté significative de telles réponses.

C'est entre les niveaux 1 et 2 que le caractère hétérogène des analyses est le plus marqué. En effet, alors que la totalité des analyses conduisent au niveau 1, seules 6 ou 7 d'entre elles parviennent au niveau 2. Nous rappelons que le niveau 1 ne correspond pas en fait à une réelle sélection par l'aval mais à une sélection plutôt implicite, associée à la présence du phénomène de diffraction qui « donnerait naissance à de multiples rayons »(E9).

4.2.2.2. Sélection et superposition au point d'arrivée

La rareté, voire l'absence pour la moitié des analyses, de cette conjonction d'aspects est plutôt surprenante puisque l'essentiel de l'entretien porte sur des situations typiques d'optique ondulatoire (deux ou trois trous d'Young, diffraction par un réseau ou une ouverture). L'analyse fréquentielle proposée est évidemment trop pauvre en informations pour qu'on puisse en expliquer les raisons.

4.2.2.3. Manque de stabilité de la mise en œuvre de la notion de sélection par l'aval

Alors que l'idée de sélection par l'aval est présente dans pratiquement toutes les analyses des enseignants, on y observe également, avec la même unanimité, la négation de cette idée (StriA-).

Les variables contextuelles (situation présentée, type de questionnement, déroulement de l'entretien) n'étant pas encore prises en compte, il ne s'agit ici que d'un simple constat. Pour aller au-delà, nous devons affiner notre analyse en introduisant le découpage en séquences des entretiens, afin de tenter de savoir si certains moments, certaines situations, favorisent l'intervention dans le débat de tel ou tel aspect.

4.2.3. Les moments où interviennent sélection par l'aval et superposition

Nous essayons dans cette partie de répondre aux questions suivantes :

- Quand la notion de sélection est-elle mentionnée ? Quand est-elle rejetée ou « oubliée » ? Plus précisément, pour quelle situation et quel type de questionnement ?
- Quand la superposition est-elle prise en compte ?

Nous nous limitons ici au repérage des éléments de réponses et tenterons une interprétation dans la dernière partie de notre analyse.

Pour pouvoir disposer d'une lecture synthétique de chaque entretien, nous proposons la grille présentée tableau 11, avec un exemple de codage d'entretien.

Sélection	-	X						
	0		X	X				
	+			X				
Superposition			X					
Situation		S1	S2	S3				
« temps »		(9)	(21)	(22) (24)				(123)
Séquence		(1)			(2)	(3)	(4)	(5)

Grille et exemple de codage pour les interventions de la sélection par l'aval et de la superposition
Tableau 11

Les trois premières lignes indiquent la qualité des réponses relatives à la sélection (+ ou -) ou leur absence (0).

La quatrième ligne est relative à la prise en compte de la notion de superposition.

La sixième ligne donne en quelque sorte une « mesure » du temps puisqu'y figure la numérotation des questions-réponses utilisée dans le transcript de l'entretien.

Les cinquième et septième lignes indiquent respectivement les situations présentées et les séquences correspondantes de l'entretien.

Les grilles de chaque entretien sont données en ANNEXE 2 p103.

De leur examen, nous dégageons les points suivants :

- la notion de sélection par l'aval n'est pas spontanément formulée : seules deux analyses, à des degrés fort différents d'ailleurs, en font part lors de la séquence (1) ;
- la notion de sélection par l'aval n'est pas présente de manière stable chez un enseignant donné puisque sa mise en œuvre dépend fortement du contexte : nous en donnerons quelques exemples.
- concernant la mise en relation des notions de superposition et de sélection, l'analyse séquentielle présentée n'est pas plus riche en informations que la simple analyse fréquentielle de la première approche : elle n'indique pas de situation préférentielle pour la mise en place simultanée d'arguments sur ces deux points.

Nous développons les deux premiers points.

4.2.3.1. Caractère « non spontané » de la mise en œuvre de la sélection par l'aval

Seules deux analyses (celles des enseignants E4 et E10) font référence dès la séquence (1) à la notion de sélection par l'aval. Nous rappelons que lors de cette première séquence, aucune direction particulière n'est imposée si ce n'est bien sûr le thème précisé au début de l'entretien : le rayon lumineux et les tracés en optique ondulatoire.

La réponse suivante est très explicite relativement à la notion de sélection de l'aval :

(A propos de S1 : figure extraite d'un manuel relative à l'observation en un point P du plan focal d'une lentille de la diffraction d'une onde plane par une ouverture) *Mais, j'ai l'impression que ça part de la fin, en définitive. On s'intéresse à un point P, euh, et, en fait, on reconstruit à partir de la fin ce que l'on veut, et uniquement ce que l'on veut... Si on regardait, au contraire, depuis la source S, il n'y aurait aucune raison que, depuis la fente, la lumière soit émise dans cette direction-là. Elle serait émise dans toutes (les directions)...*(E10)

A ce moment du déroulement de l'entretien, la réponse suivante, tirée du même entretien (E10), est la seule à exprimer des réserves quant à la schématisation « traditionnelle » utilisée par exemple pour S1 :

(...) tous les rayons, ensuite, sont parallèles sortant de la fente, bon, parce qu'ils veulent aller voir le point P, ici (sur l'écran (E)),...j'aurais tendance à être prudent avec ce genre de représentation parce que si je fais ça, c'est pas déterministe. Pourquoi est-ce que mon rayon issu de L1, il suivrait le chemin diffracté là. Ça donne l'impression qu'ils sont tous parallèles, enfin, quand ils passent à travers la fente, ils ressortent tous avec un angle donné...j'ai une source secondaire qui émet dans toutes les directions, j'ai bien le droit d'en regarder une (direction).(E10)

Pour presque tous les enseignants, les schémas présentés et leurs commentaires tirés de manuels d'enseignement ne sont donc pas, lors de cette première séquence, l'objet d'un questionnement, comme l'illustrent les réponses suivantes :

(A propos de S1) *On dit ça classiquement, effectivement, le rayon diffracté. Bon. Un peu gênant mais c'est très classique comme présentation. Tu lis ça partout.*

(A propos de S2 et S3 : interférences à deux ondes) *C'est tellement le formalisme qui est utilisé que... Le problème c'est de savoir ce qu'on comprend derrière. Ce que les gens comprennent derrière. C'est ça le problème. On dit rayon mais en même temps dans les calculs, c'est différence de chemin optique.*(E5)

Après avoir mis en évidence le caractère « non spontané » de la mise en œuvre de la sélection par l'aval, nous nous intéressons à la stabilité de celle-ci pour un enseignant donné.

4.2.3.2. Caractère non « stable » de la mise en œuvre de la sélection par l'aval

La multiplicité des situations présentées et, pour certaines d'entre elles, la diversité du questionnement nous permettent une estimation de la stabilité de la mise en œuvre, dans l'argumentation, de la sélection par l'aval. Nous en présentons trois aspects :

- importance du type de questionnement,
- variabilité du traitement pour des situations de même type,
- variation du traitement autour d'une même situation.

- L'importance du type de questionnement a pu être mis en évidence puisque, concernant la situation des trois trous d'Young (questionnaire 3 du chapitre 1 p16), deux types de questionnement ont été élaborés : le premier (question 1) portant sur la « déviation » des « rayons », le deuxième (question 2) sur « l'onde plane » issue des trois trous de l'écran diffractant. Rappelons que la question 1 ne nécessite pas obligatoirement la prise en compte

de la sélection par l'aval pour expliciter les difficultés des étudiants, une lecture peu attentive des tracés peut amener certains étudiants à oublier que chacun des trous diffracte la lumière dans un large éventail de directions ; en revanche, concernant la question 2, la notion de sélection par l'aval, même utilisée de façon approximative, semble incontournable pour expliquer les erreurs commises (utilisation incorrecte du théorème de Malus, assimilation des trois tracés sélectionnés à une onde plane entre les trous et la lentille). C'est en cela que nous parlons de deux types différents de questionnement.

Nous rassemblons dans le tableau 12 les analyses des enseignants pour les questions 1 et 2 et du point de vue de la sélection par l'aval.

	E7	E9	E1	E2	E3	E4	E5	E10	E8	E6
question 1					+ ?	+	+	+	+	+
	-	-	?	-						
question 2					+ ++					+
	-	-	-	?	- -	-	-	-	?	

Prise en compte de la sélection par l'aval et type de questionnement
à propos des trois trous d'Young (TYp)
Tableau 12

Nous nous intéressons ici plus particulièrement à la partie droite du tableau 12 qui concerne les enseignants (E4, E5, E10, E8, E6) pour lesquels la sélection par l'aval a été clairement explicitée pour la question 1.

Nous constatons que sur ces 5 enseignants, un seul (E6) met encore en œuvre l'idée de sélection par l'aval pour la question 2 et que, par contre, pour trois d'entre eux (E4, E5, E10), ont été relevées des réponses allant à l'encontre de la mise en œuvre de la notion de sélection par l'aval.

Nous voyons que cette notion est présente pour la question 1 alors que non indispensable, mais absente pour la question 2 (à l'exception de E6) alors qu'essentielle.

Nous tenterons lors de la dernière partie de ce chapitre d'interpréter cette grande différence de traitement.

- En matière de variabilité du traitement pour des situations de même type, un examen rapide des grilles d'analyse permet de constater que les situations jugées par nous analogues (voir catégorisation des situations chapitre 2 p53) au regard de la sélection par l'aval, ne sont pas toujours considérées comme telles par les enseignants.

Il semble difficile de dresser une liste des situations les plus problématiques tant les analyses proposées par les enseignants et leurs réactions peuvent être diverses. Toutefois, on remarque que les situations S9 (diffraction d'une onde plane par une ouverture observée à l'infini) et, dans une moindre mesure, S8 (observation à l'infini du champ produit par une ligne de sources discrètes cohérentes) paraissent tout spécialement poser problème (7 enseignants concernés pour la situation S9, 5 pour la situation S8). Nous y reviendrons lors de la partie suivante de notre analyse (§5).

- Enfin, la variation du traitement autour d'une même situation se manifeste à plusieurs reprises dans les entretiens. La lecture des grilles permet de mettre en évidence, pour un même enseignant, la variabilité de l'analyse fournie pour une situation donnée lors d'une

même séquence. Nous en relevons trois exemples : question 2 du questionnaire 3 relatif aux trois trous d'Young (grille E3, ANNEXE 2 p104), situation S7 relative à la diffraction d'une onde plane par une ouverture observée dans le plan focal d'une lentille (grille E8, ANNEXE 2 p 106) et situations S14/S15 relatives à l'obtention de l'image d'un réseau et de sa figure de diffraction à l'infini (grille E10, ANNEXE 2 p107). Ces exemples seront discutés plus loin.

4.2.4. Bilan sur l'utilisation de la sélection par l'aval

Notre première approche a révélé les points suivants :

- une grande hétérogénéité des analyses des enseignants au regard de la mise en œuvre de la sélection par l'aval, dans sa forme la plus rudimentaire (niveaux 1 et 2);
- le niveau 3 qui consiste à spécifier, pour un dispositif donné, le changement du mode de tri suivant la position du point d'arrivée, n'est que très rarement atteint spontanément ;
- la faible occurrence conjointe, c'est-à-dire chez le même enseignant, des notions de sélection et de superposition.

L'analyse fine du déroulement des entretiens fait apparaître, en outre, les caractères « non spontané » et « non stable » de la notion de sélection par l'aval.

Dans la plupart des entretiens, cette notion n'est pas mise en œuvre lors de la première présentation des extraits de manuels d'enseignement. Elle est même quasiment absente du discours de certains enseignants.

Lorsqu'elle a été une première fois utilisée, le changement de questionnement ou le passage d'une situation à une situation jugée par nous analogue peut la faire oublier des enseignants. A l'inverse, alors que la notion de sélection par l'aval n'était pas présente initialement, un changement de contexte peut entraîner sa prise en compte par les enseignants.

A ce niveau d'analyse, nous pouvons déjà conclure que la notion de sélection par l'aval ne fait pas partie de la boîte à outils de la plupart des enseignants. Son introduction dans une séquence d'enseignement devra donc se faire en recherchant les convergences possibles avec les points de vues des enseignants consultés.

4.3. Récapitulation sur l'analyse thématique des entretiens

Notre première analyse des entretiens est articulée autour des deux thèmes centraux que nous avons dégagés lors de notre analyse de contenu : le statut des tracés et la sélection par l'aval.

Nous avons souligné que ces deux thèmes sont en étroite liaison, la nature géométrique ou ondulatoire d'une situation allant de pair avec une réflexion sur le statut des tracés servant à la représenter.

Le statut des tracés en termes de contenu physique semble hors du champ du questionnement de la plupart des enseignants lorsqu'il s'agit d'analyser une situation d'optique. Par conséquent, le critère énergétique que nous proposons pour statuer sur la nature géométrique ou ondulatoire d'une situation n'est que très rarement mis en œuvre. Il l'est d'autant plus difficilement que certaines analyses d'enseignants ne permettent pas de considérer la prise en compte de l'énergie comme critère de catégorisation des situations. En particulier, les tracés représentés derrière une ouverture diffractante sont souvent assimilés à des chemins d'énergie ; à l'autre extrême, certains enseignants s'interdisent de considérer les chemins stationnaires entre points conjugués comme des chemins d'énergie.

S'il n'y a pas accord sur les critères permettant de statuer sur la nature géométrique ou ondulatoire de la situation, il est bien évident que ne pourra être atteint le stade ultime (niveau 4) de la compréhension de la sélection par l'aval, c'est-à-dire l'explicitation de la nature des tracés déterminée par la sélection.

Ce que nous avons appelé le niveau 3 de la sélection par l'aval n'est que très rarement explicité (quatre interventions sur l'ensemble des entretiens). Rappelons que ce niveau consiste à remarquer que pour une situation donnée (objet et lentille par exemple), le changement de position du point d'observation (en fait, de l'écran dont on observe l'éclaircissement) affecte le mode de tri, ceci sans qu'il soit clairement fait état de la nature des groupements de tracés sélectionnés.

Nous n'avons donc pu affiner notre analyse qu'à propos de ce que nous avons appelé le niveau 2 de la sélection par l'aval : pour une situation donnée, tous les éléments du dispositif gardant leurs positions respectives, la sélection au point d'arrivée (en général, un point de l'écran d'observation) se résume à un tri de tracés parmi un ensemble sans autre considération.

Nous avons, concernant ce niveau, mis en évidence la grande hétérogénéité des analyses des enseignants. Nous avons relevé tous les niveaux de formulation, des plus explicites aux plus ambiguës, jusqu'à des formulations en opposition par certains aspects avec notre mode d'analyse.

Nous avons également mis en évidence la faible « prégnance » de la notion de sélection par l'aval chez les enseignants : sa mise en œuvre est fortement fluctuante suivant le contexte. Un changement de situation, de type de questionnement, de type de représentation, peut faire oublier ou, au contraire, apparaître la prise en compte de cette notion.

Ces résultats nous portent à conclure globalement que l'analyse que nous proposons est relativement éloignée de celles spontanément proposées par les enseignants consultés, s'agissant en particulier de la reconnaissance de diverses sélections possibles pour un même dispositif (niveau 3).

Notre analyse des entretiens s'est jusqu'à maintenant limitée à un simple constat. Mais si nous souhaitons introduire la notion de sélection par l'aval et les thèmes connexes dans le cadre d'une proposition innovante, il s'avère nécessaire d'essayer de comprendre pourquoi notre mode d'analyse semble si différent de ceux mis en œuvre par certains des enseignants consultés. Nous tentons dans la partie suivante de donner des éléments permettant de situer certains aspects des réponses des enseignants dans un contexte - hypothétique - susceptible sinon de les expliquer, du moins de leur donner une cohérence.

5. Une grille de lecture pour situer les blocages

Nous avons déjà souligné la difficulté que nous avons éprouvée à allier analyse thématique et singularité des entretiens. Il nous fallait rentrer davantage dans le détail de nos dialogues avec les enseignants, si nous voulions éviter que la maille assez grossière de notre première analyse thématique ne laisse échapper trop de substance. Mais comment structurer cette entrée dans la matière brute de chaque entretien, en évitant de servir un catalogue d'extraits certes saillants, pour le lecteur averti, mais aussi obscurcis par les détours et revirements si souvent observés ?

Nous avons fait le choix de définir, pour orienter la sélection des extraits présentés, un modèle de référence distinct de celui que nous proposons dans notre analyse des situations présentées au chapitre 2. Non seulement distinct du notre, ce « contre-modèle » lui est, pour dire vite, opposé.

5.1. Présentation du « contre-modèle »

Avant de présenter ce « contre-modèle », nous devons avertir qu'il ne s'agit nullement ici de décrire « le modèle des enseignants » au sens de tendances majoritaires.

Nous avons précédemment souligné l'hétérogénéité des analyses des enseignants : il est donc vain de rechercher un modèle unique englobant toutes les analyses présentées. Ensuite, nous avons également repéré le manque de stabilité de ces analyses et leur forte dépendance au contexte. Il s'avère donc très difficile de catégoriser chaque entretien globalement. Enfin, le long extrait présenté en entrée en matière indique que lors de l'interprétation d'une même situation, l'enseignant peut changer de mode d'analyse suivant le questionnement qu'il s'impose et les réponses qu'il y apporte.

Plutôt que descripteur d'un point de vue probable chez le type d'enseignant en cause dans notre enquête, c'est un rassemblement d'éléments d'argumentation qui sont apparus à un moment ou à un autre, assez largement développés. Ce rassemblement se distingue d'un catalogue par la relative cohérence qu'on peut y voir.

Le « contre-modèle » que nous établissons est relativement proche de celui présenté dans le cadre de l'enseignement « traditionnel » de l'optique géométrique. Il comporte les caractères suivants :

- a) Les tracés représentent des rayons lumineux. Ils « transportent » de l'énergie si on leur attribue une certaine « épaisseur ».
- b) Le point de convergence de plusieurs tracés est une source, et donc émet des « rayons » dont l'ensemble constitue « une onde sphérique » (voire hémisphérique).
- c) Un ensemble de tracés parallèles, respectivement concentriques, constitue une « onde plane », respectivement « sphérique ».
- d) Un dispositif optique n'a qu'un seul rôle : la lentille, par exemple, est considérée uniquement comme un système imageur.
- e) Les schémas décrivant la situation « type » sont lus et analysés de gauche à droite.

Ces caractères n'ont pas tous la même valeur de notre point de vue : nous accordons sûrement le poids le plus fort au mode de lecture des situations de gauche à droite puisqu'il conditionne en grande partie l'analyse fournie. En particulier, ce mode de lecture contribue, nous semble-t-il, à évacuer le rôle crucial de la place du récepteur et à renforcer celui des éléments « actifs » que sont lentilles et objets diffractants.

5.2. Points communs entre certains aspects des analyses des enseignants et le « contre-modèle » décrit plus haut

Nous étayons notre comparaison en nous appuyant, pour chacun des caractères du contre-modèle défini plus haut, sur des extraits « saillants » tirés des entretiens.

5.2.1. Les « rayons » de l'optique ondulatoire Contre-modèle :

- a) Les tracés représentent des rayons lumineux. Ils « transportent » de l'énergie si on leur attribue une certaine « épaisseur ».

Certains enseignants conservent aux tracés d'optique ondulatoire leur contenu énergétique, et pour cela donnent aux « rayons » une certaine « épaisseur ».

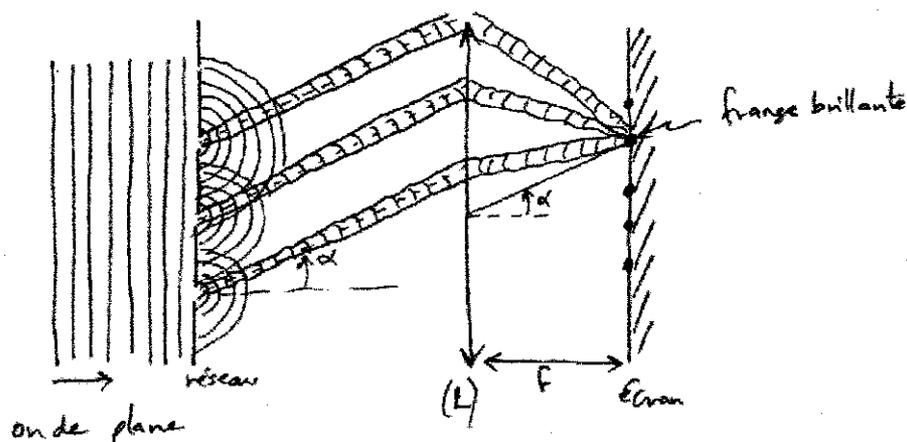
Voici un exemple de réponse concernant la propagation de l'énergie suivant les tracés du schéma S15 relatif à l'obtention de la figure de diffraction d'un réseau à l'aide d'une lentille :

Oui. Enfin, bon, il faut donner (aux « rayons ») une certaine extension spatiale. (E8)

La réponse fournie est explicitée par une correspondance reçue deux jours après l'entretien dont nous reprenons un extrait :

Chaque fente du réseau rayonne une onde cylindrique. Avant (L), la portion du champ lumineux qui converge vers la frange brillante repérée par α est formée des secteurs de direction α issus de chaque fente.

Le schéma suivant a été fourni par l'enseignant pour appuyer son analyse.



Nous soulignons le terme « secteur », marquant le souci de la part de l'enseignant de donner une « épaisseur » aux « rayons ». On peut se demander quel type de réponse et de schéma serait fourni si le point choisi sur l'écran correspondait à une « frange sombre ».

Un deuxième exemple est donné au travers des questions-réponses du tableau 13 .

L'analyse produite par l'enseignant se rapproche d'une analyse de type « géométrique ». Il s'agit de remplacer un tracé considéré comme non « physique », le « chemin » issu du trou T_1 et menant au point M (voir (71)), par un ensemble de « rayons » (voir (73), (74), (75), (76)), un « faisceau » convergeant au point M suivant lequel un transfert d'énergie semble possible et donc auquel peut être attribué un contenu physique.

La réponse donnée en guise de conclusion du même entretien, marque bien cette volonté de retirer aux « chemins » du schéma S15 tout contenu physique :

Les chemins, c'est de la géométrie, c'est du papier.

Question	Réponse
(71) <i>On s'intéresse à un point M particulier, donné, un point de l'écran. (...) on cherche ce qui se passe au point M.</i>	Oui, alors, si M est donné, je me demande quels sont de tous les rayons émis par cette source ponctuelle, cette demi source, ceux qui arrivent (en M). Je vais arriver à faire ma construction, bon c'est la construction de l' image , j'ai un objet ici (écran diffractant)... Il faut que j'arrive à tracer les rayons qui passe par ce point-là (T ₁) et ce point-là (M).
(72) <i>On est au foyer, tu traces celui qui passe par le centre optique, qui n'est pas dévié (...) C'est la construction de l'optique géométrique.</i>	Alors voilà, un rayon de l'optique géométrique qui arrive là. Et puis alors les autres que font-ils eux ? Parce que...
(73) <i>Ah ben les autres, ils vont ailleurs.</i>	Ben non, mais un point (un rayon ?), ça ne suffit pas, il faut que j'ai...
(74) (...) <i>Tu veux un faisceau.</i>	(...) Je sais pas quelle forme il (le faisceau) va avoir ici, s'il va être convergent ou divergent. (...)
(76) <i>La source (la source secondaire : le trou) est supposée ponctuelle.</i>	C'est pour ça que j'ai représenté toutes sortes de rayons. Et je me demande quels sont ceux qui arrivent dans la région de M. Alors c'est quelque chose comme ça, là j'ai tracé un faisceau et tous ceux-là ont effectivement la même phase en arrivant dans la région de M.

Où sont les « rayons » en optique ondulatoire ?

Tableau 13

5.2.2. « Sources » et « objets »

Contre-modèle :

- b) Le point de convergence de plusieurs tracés est une source, et donc émet des « rayons » dont l'ensemble constitue « une onde sphérique » (voire hémisphérique).

Nous rappelons l'acception que nous donnons à l'expression « source classique ». Il s'agit d'un point de l'espace où converge ou d'où diverge une onde sphérique (ou partie d'onde sphérique). La simple convergence de tracés en un point n'est pas suffisante selon nous pour que ce point puisse être qualifié de source. Un objet pouvant être considéré comme un assemblage de sources, nous faisons la même distinction entre objet dont chaque point émet une onde sphérique et « objet » constitué de « sources » non « classiques ».

Nous donnons successivement deux exemples relatifs à la nature des sources, puis deux concernant la nature de l'objet.

A propos du dispositif interférentiel schématisé sur la figure S2, voici les réponses d'un enseignant (E9) :

(11) *C'est un point (de la source (S)), bon, c'est une source ponctuelle.*

C'est un point lumineux donc c'est une onde sphérique qui part.

(12) *Mais à la sortie (après le dispositif interférentiel) aussi ?*

A la sortie, ben, oui. C'est pareil. Enfin, on peut le reprendre dans l'autre sens. On peut dire que ça aussi (le point M), c'est une **source qui émet**, donc elle émet des ondes.

Le point M du champ d'interférences est traité comme une source « classique ». L'application du principe de retour inverse de la lumière permet d'ailleurs, selon l'analyse de l'enseignant, de le vérifier. Nous savons que cet argument n'est pas valide (voir chapitre 2

p56) puisque l'enseignant procède à une inversion du sens de parcours de la lumière suivant les mêmes trajets sans réaliser que, par la mise en phase implicitement effectuée au point M, il décide en fait un changement radical de situation physique.

Le deuxième exemple se situe à la fin de l'entretien 6 et porte sur la notion de filtrage appliqué à un réseau sinusoïdal d'amplitude, supposé d'extension infinie. La figure de diffraction de Fraunhofer est alors très simple puisqu'elle ne comporte que trois « pics », trois « points lumineux ». Ceux-ci ne sont en rien des sources « classiques » : les tracés issus de chacun de ces points ne constituent pas une onde sphérique (voir analyse de contenu).

Voici, la réaction de l'enseignant lorsque le phénomène de diffraction est mis en avant comme étant à la base du filtrage :

Pourquoi vous dites qu'il y a diffraction ici ? Vous avez trois sources, vous en supprimez deux. (...) Parce que là, ce n'est plus une onde plane qui arrive là, c'est une onde sphérique de toute façon. Chaque point est une source qui émet dans toutes les directions. (...)

Les « sources » sont vraiment traitées par l'enseignant comme des sources « classiques » sans qu'il soit fait mention d'une quelconque utilisation du principe d'Huygens dans le plan focal pouvant conduire à un changement de leur statut (voir chapitre 2 p49).

Les deux extraits suivants portent sur la séquence (4) : les franges d'interférences obtenues sur l'écran derrière une lentille sont-elles l'image de quelque chose ? La question porte donc indirectement sur le statut de « l'objet » dans le plan conjugué de l'écran.

Si, par exemple, on mettait un papier calque dans le plan qui correspondrait à AB, ils (les étudiants) verraient les franges et ils comprendraient à ce moment-là qu'il y a un objet à cet endroit-là et que, comme dans le cas au dessus (schéma 1 du questionnaire 1 relatif à un objet « classique », chapitre 1 p5), c'est cet objet qui est conjugué avec la lentille. (...) Là, ils voient l'image, et ils comprennent que cette lumière, elle repart et elle va former l'image, quoi. (E9)

L'idée, au demeurant excellente, de placer un papier calque dans le plan conjugué de l'écran n'a pas entraîné dans son sillage la compréhension du changement de situation et, par conséquent, du changement de statut de « l'objet » qu'entraîne la présence de ce papier calque (voir chapitre 2 p35).

Le dernier extrait indique, dans un premier temps, un doute dans l'esprit de l'enseignant :

Si je ne t'ai pas dit, c'est l'image de ce qu'il y a dans ce plan-là (plan objet), c'est parce que (...) le rayon lumineux, il ne part pas d'ici (du plan objet). (E10)

Mais, ensuite, « l'objet » semble retrouver son statut « classique » sans que soit précisé une quelconque référence au principe d'Huygens :

Or je peux très bien dire le rayon lumineux, en fait, il part d'ici, regarder ce qu'il y a ici et prendre l'image là.

Il semble que le statut des « sources » et « objets » ne soit pas l'objet d'un questionnement pour une majorité d'enseignants : ce statut serait systématiquement assimilé à celui que nous avons attribué aux sources et objets « classiques ».

Comme nous l'avons vu plus haut (voir chapitre 2 p56), il est bien tentant d'attribuer toujours la même signification à un élément graphique, ici au croisement de deux lignes. Nous reprendrons plus en détail ce point par la suite.

5.2.3. Les « ondes »

Contre-modèle :

- c) Un ensemble de tracés parallèles, respectivement concentriques, constitue une « onde plane », respectivement « sphérique ».

Un autre aspect des argumentations recueillies est peut-être plus directement relié à un problème de schématisation et à des réflexes de lecture : associer tracés parallèles et onde plane, tracés convergents ou divergents et onde sphérique.

Ce type de confusion, mis en évidence notamment à propos de la question 2 relative aux tracés issus des trois trous de l'écran diffractant et conduisant, après passage dans une lentille, au point M de l'écran, est relativement fréquent puisque seuls deux enseignants sur les dix consultés refusent spontanément d'assimiler le groupement des trois tracés sélectionnés à une onde. Après une discussion portant sur le calcul des différences de marche ou de phase, les enseignants conviennent de leur erreur. Notons que seul un enseignant propose une argumentation s'appuyant sur la notion de sélection de tracés et non pas uniquement sur des considérations de calcul de chemin optique ou de phase.

L'extrait suivant illustre le type de réponse spontanément formulée.

*Moi, j'accepterais de considérer que la perpendiculaire à des rayons parallèles entre eux, même si ce sont des rayons pris comme ça dans la masse d'un tas de rayons divergents, je pourrais associer à tous ces rayons parallèles entre eux une sorte de **plan d'onde**, qui deviendra une **surface d'onde** qui convergerait ici (en M) (...). Donc les différents rayons arrivent à différents endroits et là il y a une différence de marche, parce que la lentille n'a pas la même épaisseur partout. Et aussi parce qu'il y a l'indice et c'est ce qui permet de transformer ça en une **onde sphérique**. (E3)*

Notons que la sélection n'est pas absente : les tracés sont « des rayons pris dans la masse d'un tas de rayons ». Mais elle ne semble pas s'effectuer par l'aval, la lecture de la situation étant essentiellement de type gauche-droite, comme si elle suivait le parcours d'un objet identifié : une onde.

5.2.4. La lentille comme système imageur

Contre modèle :

- d) Un dispositif optique n'a qu'un seul rôle : la lentille, par exemple, est considérée uniquement comme un système imageur.

Nous rappelons les deux rôles que nous assignons à une lentille (voir chapitre 2 p42).

Dans une situation d'optique géométrique, la lentille est un système imageur. Chaque point de l'objet est la source d'une onde sphérique. Le stigmatisme de la lentille entre plans

conjugués assure que tous les rayons issus de ce point objet et, rien que ceux-là, iront converger au point image.

Dans une situation d'optique ondulatoire, le stigmatisme ne peut plus être utilisé. Le principe de superposition et la sélection par l'aval redonnent leur individualité aux tracés. C'est le caractère stationnaire des trajets empruntés par la lumière entre deux points qui préside à leur détermination. La lentille traite de façon individuelle chaque trajet stationnaire, tout en autorisant des conclusions simples sur les valeurs de déphasages associées à des ensembles de tels trajets.

Nous donnons ici trois extraits soulignant la difficulté à admettre cette distinction.

Le premier extrait tiré de l'entretien 4 (voir tableau 14) marque une position assez tranchée : la lentille n'est utilisée que comme système imageur même dans les situations d'optique ondulatoire où elle ne peut plus tenir ce rôle. La situation est celle relative à l'obtention de la figure de diffraction des trois trous d'Young (voir questionnaire 3, chapitre 1 p13)

Question	Réponse
Discussion sur le statut du groupement des tracés convergeant au point M de l'écran.	Bon, en tout cas, c'est clair que la surface équiphasé, c'est celle-là (au niveau des trous) et que justement tout le rôle de la lentille c'est d'arriver à rectifier les chemins optiques de façon à être en phase ici (en M). (...) Ils (les chemins) suivent les règles de l'optique géométrique. Non : je cherche des chemins possibles pour la lumière et je me demande si oui ou non ils sont de même durée. C'est ça mon critère pour avoir de la lumière ici (en M), qu'ils soient tous de la même durée et alors effectivement, ils sont de même durée. (...)
(62) <i>Ils n'arrivent pas en phase là (en M) quand même.</i>	Ah ben, si il y a de la lumière, si.
(63) <i>Ils ne sont pas en phase, là (en M).</i>	Si, si, si. Le rôle de la lentille...(...)
(65) <i>Ils sont en phase sur l'ouverture [oui, oui, absolument] donc ils n'arrivent pas en phase en M, c'est pour ça qu'on a une figure de diffraction.</i>	(Silence) Euh, oui, ben, évidemment, je répondais à une autre question. Moi, je me demandais est-ce que c'est un chemin possible pour la lumière, c'est à dire est-ce que la lumière peut arriver en M ? [Oui] Et alors je dis oui si tous ces chemins-là ont la même durée.
(66) <i>Ils n'ont pas la même durée, on est d'accord, hein, ils sont déphasés tous, justement.</i>	Ah ben, pas forcément, je te dis, si j'ai mis une lentille ici qui est plus épaisse dans cette partie-là que dans cette partie-là.

La lentille, système imageur d'une situation d'optique ondulatoire ?

Tableau 14

L'analyse de la situation par l'enseignant est entièrement centrée sur l'obtention de lumière au point M. Celle-ci n'est jugée possible que par la mise en application du stigmatisme entre un point de l'écran diffractant et le point M de l'écran d'observation. Malgré plusieurs rappels sur le déphasage existant entre les trajets menant au point M, le point de vue de l'enseignant à la fin de cet extrait reste inchangé.

Les deux extraits suivants concernent la séquence (4) relative à l'usage d'une lentille pour agrandir des franges d'interférences. Ils montrent que le questionnement provoque une certaine déstabilisation des enseignants, en tout cas un doute quant au rôle de la lentille.

Le tableau 15 regroupe les questions-réponses commentées tirées de l'entretien 7.

Question	Réponse	Commentaire
(62) Image des franges d'interférences sur l'écran ?	Non. (...) Je peux mettre une lentille puis l'écran, mais enfin, c'est peut-être juste pour avoir une image plus grande, un certain grandissement. A la limite, moi, j'enlève la lentille, j'ai quand même l' image sur l'écran . Elle, elle sert à... Oui.	La réponse est ambiguë puisque la présence de l'image des franges est niée dans un premier temps, puis affirmée (il s'agit d'un agrandissement des franges). Toutefois, il reste une interrogation sur la signification du terme «image» puisque l'obtention d'une image sur l'écran n'est pas liée à la présence de la lentille.
(63) <i>D'un côté, tu me dis non, il n'y a pas d'image et d'un autre côté, tu fais comme s'il y en avait une. Tu me parles d'agrandissement de quelque chose.</i>	Très juste. A quoi elle peut servir cette lentille ?	Le rôle attribué à la lentille est perçu comme problématique.
(64) <i>Est-ce qu'elle sert à former les franges d'interférences ?</i>	Non, non. Elle ne sert pas à ça.	La lentille se voit donc refuser toute contribution quant à la formation des franges d'interférences sur l'écran.

« Agrandissement » des franges : quel rôle pour la lentille ? (exemple 1)

Tableau 15

La dernière réponse (64) marque bien le refus d'attribuer à la lentille tout rôle quant à la formation des franges d'interférences sur l'écran. La lentille serait un dispositif dont la fonction ne pourrait varier d'une situation d'optique géométrique à une situation d'optique ondulatoire.

Le deuxième extrait (voir tableau 16) souligne le même point. La déstabilisation est attribuée par l'enseignant (E6) à la formulation de la question.

Question	Réponse	Commentaire
(61) <i>Vous émettez des réserves sur la formulation de la question ?</i>	Moi, la première impression que j'ai eue spontanément, c'est, quand même, qu'on se demandait si les étudiants pensaient que la figure d'interférences avait à voir avec le passage dans la lentille. Enfin, je ne sais pas	Apparemment, l'ambiguïté porte sur la localisation des franges. De quelle figure d'interférences parle l'enseignant ? S'il s'agit de celle présente sur l'écran, le passage des trajets dans la lentille est bien sûr à prendre en compte contrairement à ce que semble penser l'enseignant.
(63) <i>C'est formulé comme ça, en fait : « La lentille (L) est utilisée pour faire apparaître sur l'écran (E) des franges d'interférences. »</i>	Ben, oui. Sans lentille, on n'aurait pas de figure d'interférences. (...) J'étais en train de me dire, pédagogiquement, il vaut mieux faire des montages sans lentille, finalement.	La présence de la lentille amène la formation sur l'écran d'une figure d'interférence différente de celle obtenue sans lentille.

« Agrandissement » des franges : quel rôle pour la lentille ? (exemple 2)

Tableau 16

L'extrait se termine en quelque sorte par une « démission » en proposant l'élimination de la lentille.

Comme lors de l'étude des difficultés des étudiants (chapitre 1), nous constatons que le rôle attribué à la lentille, dispositif dédié traditionnellement à l'optique géométrique, reste problématique lorsque celle-ci est placée dans une situation d'optique ondulatoire et que l'on ne peut plus lui prêter son rôle de système imageur.

5.2.5. Lecture gauche-droite

Contre-modèle :

- e) Les schémas décrivant la situation « type » sont lus et analysés de gauche à droite.

Nous développons un peu plus longuement cet aspect car il pourrait être à l'origine de la majeure partie des difficultés rencontrées lors de l'analyse des situations par les enseignants.

Ce type de lecture, de gauche à droite, est évidemment à l'opposé de celui que nous proposons lorsque nous mettons en application la notion de sélection par l'aval.

Nous commençons par donner quelques exemples frappants de réponses d'enseignants puis nous analysons les conséquences de ce type de lecture sur trois points : le contenu énergétique des tracés, l'interprétation du calcul de la différence de marche entre trajets et le traitement du phénomène d'interférences.

5.2.5.1. Lecture gauche-droite des situations : quelques exemples

Les deux extraits suivants concernant le groupement des tracés issus des trois trous d'Young et convergeant en un point du plan focal d'une lentille (situation du questionnaire 3, chapitre 1 p15) illustrent ce type de lecture :

Si ces trois points-là émettent des ondes sphériques, je présume que la distance entre les trous et la lentille n'est pas énorme, je ne vois pas comment je pourrais avoir une onde plane d'un seul coup (...).(E7)

Il ne sort pas une onde plane (des trous T_1, T_0, T_{-1}), a priori. (E9)

La situation n'est analysée qu'à partir de l'écran diffractant. La sélection par l'aval est totalement absente si bien que les enseignants transforment la question posée (« L'ensemble des tracés dans une direction donnée constitue-t-il une onde plane ? ») en une tout autre question (« L'onde issue de l'écran diffractant est-elle plane ? »).

Certains enseignants cernent avec difficulté les présupposés des constructions présentées.

En voici deux exemples.

Le premier concerne la construction des tracés relatifs à l'« agrandissement » de franges d'interférences (figure S16) :

Tu pars de S , tu vas en S_1 , tu arrives en un point B ici que tu situes à 25 cm devant la lentille, de S_2 , tu reviens sur le même point B et tu vas te retrouver avec ton image qui est là (sur l'écran). (E7)

La construction est effectuée de gauche à droite mais elle suppose la connaissance de la position du plan objet conjugué de l'écran. Cette connaissance s'obtient en fait à partir d'une analyse par l'aval, point qui n'apparaît pas dans le commentaire.

Le deuxième exemple tiré de l'entretien 7 (voir tableau 17) concerne la situation S14 relative à l'obtention de l'image d'un réseau par une lentille et S15 où il s'agit de la figure de diffraction au plan focal de la lentille.

Question	Réponse
(98) <i>Si tu avais un commentaire à faire sur ces deux approches (relatives à S14 et S15)?</i>	Là (S14), je dirais que c'est plus une approche ponctuelle. Je prends un point de mon objet qui m'intéresse et puis je vais construire son image... ça me fait plus penser à de l'optique géométrique (...)
(99) <i>Pourquoi à l'optique géométrique pour S14 ?</i>	(silence)
(101) <i>Je déplace mon écran. J'ai quelque chose sur mon écran.</i>	Oui, tu as quelque chose, tu as un truc flou ... les lois que je ferais intervenir pour passer du point A au point A' seront celles de l'optique géométrique. Même si A' n'est pas sur l'écran.

Qu'y a-t-il sur l'écran ?

Tableau 17

La lecture gauche-droite est ici possible du fait de la conjugaison optique entre les plans objet (le réseau) et image (l'écran). Lorsque la question (99) est posée, aucune réponse n'est donnée, ce qui laisse un doute sur la prise en compte de cet aspect par l'enseignant. Ce doute est confirmé par la réponse (101) où la construction reste inchangée quand on déplace l'écran. Comment dans ces conditions interpréter l'éclairement d'un point de l'écran ?

La schématisation des situations est également source de difficultés si la sélection par l'aval n'est pas présente dans l'analyse. C'est ce que souligne la réaction d'un enseignant à propos de la construction S16 relative à l'« agrandissement » de franges d'interférences :

Les deux seuls rayons qui arrivent en M, ce sont ceux que j'ai représentés.

Ah! Il n'y en a pas d'autres... Et pourquoi la lumière elle ne part que dans cette seule direction? (E2)

L'analyse gauche-droite mise en jeu et la représentation des seuls tracés sélectionnés par le point M de l'écran amènent à une interrogation marquée de la part de l'enseignant.

Notre analyse de contenu a souligné l'importance d'une analyse de droite à gauche des situations, nous avons parlé d'analyses à « rebrousse-lumière ». Les difficultés qu'entraîne ce type de lecture ont été mises en évidence dans l'analyse des difficultés des étudiants (chapitre 1). Nous les retrouvons ici de manière assez forte chez certains enseignants.

5.2.5.2. Lecture gauche-droite et énergie

Nous nous sommes déjà penchés sur le contenu énergétique des tracés dans la partie consacrée au statut des tracés.

Nous avons souligné qu'une analyse énergétique était plus souvent associée au phénomène de diffraction qu'au phénomène d'interférences, fait qui rejoint peut-être certaines difficultés des étudiants.

Nous présentons ici un extrait où la lecture gauche-droite est manifeste et associée à une considération de l'énergie. La question concerne le contenu énergétique des tracés dans le champ d'interférences de deux sources ponctuelles. Après que notre analyse de la situation a été donnée, voici la réaction de l'enseignant qui se livre en quelque sorte à une introspection :

*Pour moi, en tête, en fait, je pensais aux sources et je voyais les rayons qui **partaient** de la source. Je me disais, si les rayons, ils **partent** de la source, ils transportent bien de l'énergie. Donc, ces rayons, je les voyais exister. Et, en fait, pour moi, c'était les mêmes, quoi, après, qui arriveraient jusqu'à M. Par contre, c'est vrai que, à partir du moment où il y a superposition des deux, là on ne peut plus le faire. (E9)*

Comme souligné lors de la première analyse thématique des entretiens, la sélection et la superposition au point d'arrivée sont rarement utilisées conjointement par les enseignants sans doute à cause d'une prédominance de la lecture gauche-droite. En fait, la fin de cette réponse le montre bien : on doit commencer par s'intéresser à ce qui se produit au point d'arrivée, c'est-à-dire ici un phénomène d'interférences, pour décider du contenu énergétique des tracés.

5.2.5.3. Lecture gauche-droite et différence de marche entre trajets

Il semble que le calcul de la différence de marche entre trajets devrait faire intervenir obligatoirement le point d'arrivée des trajets et par conséquent être associé, dans une certaine mesure, à la notion de sélection par l'aval.

Les deux extraits suivants montrent que les analyses gauche-droite des enseignants peuvent les amener à « oublier » le point d'arrivée des trajets.

Le premier extrait concerne l'obtention de la figure de diffraction des trois trous d'Young au plan focal d'une lentille (voir questionnaire 3, chapitre 1 p16).

Toute la différence de phase, en fait, elle se joue ici, elle ne se joue pas là. C'est ça qu'il faut avoir en tête.

(44) ... tout se joue géométriquement ici, parce que les raisonnements amènent à ces petits dessins-là mais en fait tout se joue le long du trajet...

Euh, ben à la limite non. .. il n'y a pas de déphasage supplémentaire, donc rien ne se joue ici (après le plan P) contrairement à ce que tu dis (...) Rien ne se joue non plus pour moi près de la lentille et rien ne se joue là (après la lentille). Tout se joue ici. (...) Alors d'ou vient ce déphasage ? Et bien il provient des distances, dans l'air, là il n'y a pas de problème d'indice, des distances dans l'air différentes à partir des trois orifices. (E3)

Comme le souligne le commentaire (44), le calcul du déphasage suppose implicitement que l'on sache ce qu'il va advenir des différents trajets et donc, de façon incontournable, une lecture par l'aval. Ce point de vue n'est pas partagé par l'enseignant qui marque sa volonté de « localiser » le déphasage au départ de l'écran diffractant en attribuant la différence de marche aux « distances dans l'air différentes à partir des trois orifices ». Le point d'arrivée a complètement disparu du discours.

De même, le commentaire suivant donné à propos de la situation S8 relative à l'observation à l'infini du champ produit par une ligne de sources discrètes cohérentes n'est peut-être pas qu'un simple lapsus :

Tu as toujours ce déphasage qui se propage. (E1)

5.2.5.4. Lecture gauche-droite et superposition

Nous revenons ici sur l'utilisation non conjointe des notions de sélection par l'aval et de superposition au point d'arrivée.

Cette association semble difficilement mise en œuvre car la sélection opérée à partir d'un point s'opposerait à la superposition qui elle, serait envisagée de manière globale. En témoignent les extraits suivants qui portent sur l'obtention de la figure de diffraction des trois trous d'Young au plan focal d'une lentille (voir questionnaire 3, chapitre 1 p16) :

*Alors, attends. (...) ondes sphériques qui vont se recouvrir dans une certaine zone. (silence)
Non, non, pas de plan d'onde. (E7)*

Je n'ai plus une onde plane là, dans cette partie-là. (...) Ce machin (un trou de l'écran diffractant) te fabrique une onde sphérique, ce machin te fabrique une onde sphérique, ce machin te fabrique une onde sphérique, ... puis là, en fait, dans ce que tu as appelé la zone interférentielle, ... il n'y a plus de rayons en fait. (E4)

Comme souligné précédemment, les réponses éludent le problème de la sélection en se contentant d'affirmer que l'onde issue des trois trous n'est évidemment pas plane. La superposition des trois ondes sphériques est envisagée globalement, « dans une certaine zone », mais elle ne semble pas être pensée comme s'appliquant particulièrement au point M.

Certaines analyses d'enseignants tentent en outre de mettre en œuvre l'analogie entre phénomènes optiques et ceux observés sur une cuve à ondes. Voici un exemple de commentaire concernant les tracés de la situation S15 :

Non. De fait, ce n'est pas une onde. (silence) Si on se demande ce que c'est, (rire) il faut regarder dans une cuve à eau quelle allure ont les ondes après diffraction par plusieurs petits trous. (...) Ce que je verrais ici (après l'écran diffractant), ça ne serait certainement plus une onde plane mais une figure d'interférences. (E6)

De même que pour les deux extraits précédents, il y a amalgame entre onde résultante issue de l'écran diffractant et ensemble des tracés sélectionnés. La cuve à ondes n'est d'aucune utilité pour « visualiser » ces tracés à la sortie de l'écran.

Cette impossibilité à mettre en évidence la sélection opérée est soulignée un peu plus tard par l'enseignant :

En termes d'onde, je peux imaginer par analogie que j'ai effectivement une onde c'est-à-dire des vagues qui arrivent bien parallèlement à l'objet jusqu'ici, mais je n'aurai pas des vagues qui vont repartir comme ça. Ça n'existera pas. D'ailleurs, je n'observerai pas non plus cette onde sphérique ici (issue du point A de S14), elle sera mélangée à d'autres. (E6)

Toutefois, l'idée de l'analogie est fortement présente puisqu'elle est reprise à la fin de l'entretien à propos de la situation S8 relative à l'observation à l'infini du champ produit par une ligne de sources discrètes cohérentes:

(108) ... par analogie avec les ondes à la surface de l'eau, on a l'impression que l'on pourrait voir ça (front d'onde dans une direction donnée). Alors que là (sur S15, obtention au plan focal d'une lentille de la figure de diffraction d'un réseau), ben là aussi d'ailleurs. On a l'impression qu'on pourrait avoir les rayons. (E6)

Ce dernier extrait nous amène à rappeler le commentaire déjà mentionné sur la construction relative à la situation S8 : il ne s'agit pas d'une construction d'Huygens puisque les points du « front d'onde » ne sont pas en phase (voir appendice 2 de l'annexe 2). Pourtant, associée implicitement sans doute à la vision globale de la propagation des ondes dans une cuve à eau, certaines analyses d'enseignants tombent dans le piège :

Pour les réseaux, ça me semble vrai (l'ensemble des tracés constitue une onde plane) parce que je vois la construction d'Huygens sous les yeux, qui est certainement juste, je ne discute pas. (E8)

Cette réponse étant en contradiction avec la réponse fournie pour la situation S7 (diffraction par une ouverture), voici la justification proposée :

Si on prend la fente enfin ce n'est plus vrai... La seule différence que j'y vois c'est que les sources secondaires ont une distribution continue. (E8)

Selon notre analyse, le caractère continu ou discret des sources ne devrait influencer en rien la conclusion relative aux tracés sélectionnés ; même si la construction d'Huygens avec d'ailleurs tous les problèmes relevés plus haut se rapporte plutôt, dans la tradition, à une distribution continue de sources qu'à une distribution discrète.

Nous terminons ce paragraphe par un extrait soulignant encore la difficulté à allier propagation de l'onde associée à la superposition et tracés résultant de la sélection par l'aval.

Cet extrait concerne la situation S7, diffraction d'une onde plane par une ouverture, observée dans le plan focal d'une lentille :

(64) *Oui alors donc, le même faisceau, le même système de surfaces d'onde ici (avant l'ouverture) donne lieu à trois surfaces d'onde complètement distinctes après.*

(65) A trois !

Trois, enfin, autant qu'on veut. [autant qu'on veut] C'est quand même étrange, effectivement, puisque l'état de vibration il est un, à la sortie, là.(...) Or en un point ici, à un instant donné, l'état de vibration il est quelque chose. (...) A un instant donné, si on essaie de relier tous les points qui ont le même déphasage, on devrait pouvoir le faire, ça existe même si ça a une forme patatoïdale, ça existe de proche en proche. (E3)

La première réaction (64) souligne toute la difficulté de lecture des schémas. Mais deux aspects cruciaux quant à l'analyse de la situation ne semblent pas être pris en compte :

- les tracés aboutissant à un point de l'écran sont utilisés pour la mise en application du principe de superposition en ce même point ; leur ensemble ne représente pas la propagation d'une onde entre l'écran diffractant et le point de l'écran ;
- ces tracés ne représentent pas la totalité de l'onde émise par l'ouverture.

La première réaction de l'enseignant est corrigée relativement à ce dernier point après l'intervention (65) de l'enquêteur. Mais la situation reste problématique car le premier point n'a pas été élucidé puisque la sélection des tracés par un point de l'écran semble absente de l'analyse de l'enseignant. En effet, à toutes les étapes de ce dialogue, c'est une vision globale du phénomène qui sous-tend l'analyse proposée par l'enseignant.

6. Indications d'acceptabilité pour nos propositions

Nous nous sommes plus attachés jusqu'alors à mettre en évidence les obstacles qui s'opposeraient à la mise en œuvre de nos propositions. La plupart de ces obstacles ont été rassemblés dans un contre-modèle que nous avons présenté.

Nous cherchons à présent les convergences entre les commentaires des enseignants consultés et nos propositions, afin d'estimer celles qui semblent, à priori, le plus à même d'être facilement acceptées. Nous nous intéressons ici non seulement aux analyses spontanées des enseignants avant la présentation de notre analyse mais également à leurs réactions face à nos propositions.

Avant d'aborder le détail de cette discussion, il faut souligner qu'aucun enseignant consulté n'est resté indifférent aux problèmes soulevés. Que cette prise de conscience intervienne dès le début ou vers le milieu de l'entretien, tous conviennent que les questions soulevées sont réelles et semblent avoir été très intéressés par l'entretien. On peut donc penser que, même si les points abordés se révèlent parfois ardu, le terrain est propice à une avancée de la réflexion.

Plus particulièrement, revenons aux convergences observées entre les points de vue des enseignants consultés et notre analyse.

Le premier point de convergence se rapporte aux difficultés liées à la schématisation qui peuvent constituer une première entrée sur une réflexion sur le statut des tracés. Les enseignants consultés nous rejoignent quant à un usage prudent de la schématisation. Concernant la situation des trois trous d'Young mise en œuvre au chapitre 1 pour mettre en évidence les difficultés des étudiants, les enseignants consultés sont quasiment unanimes : le terme de « déviation » utilisé par certains étudiants est à proscrire. Les commentaires suivants relatifs aux réponses proposées d'étudiants illustrent la similitude entre l'analyse des enseignants et la nôtre :

- *Il y a continuité du rayon avant et après (...) On a l'impression que c'est un phénomène de réfraction.* (E2)
- *C'est un même rayon qui tourne* (E5).

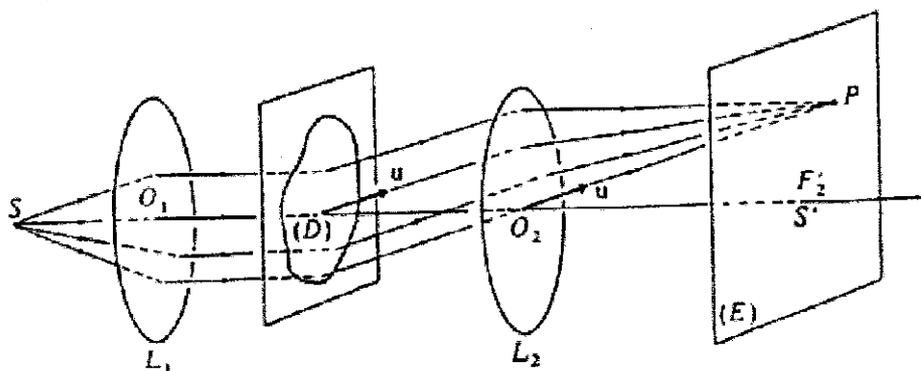
Même s'il n'y a pas le plus souvent de questionnement sur le statut des tracés et si le problème se situe pour les enseignants au niveau de la conservation de l'entité avant et après diffraction, les difficultés que peut soulever la schématisation sont relevées.

Pour éviter les difficultés qu'entraîne la seule représentation des tracés utiles pour la détermination de l'état vibratoire au point d'arrivée, une majorité d'enseignants proposent explicitement, comme nous le recommandons, l'utilisation du « plumeau » comme sur le schéma suivant.



Le "plumeau" : schématisation proposée par un enseignant

A l'exception d'un enseignant (E10), les difficultés que peut entraîner la continuité de la symbolisation des tracés avant et après diffraction, ne sont pas explicitement relevées lors de la séquence 1 de l'entretien relative aux extraits de manuels tels que le schéma suivant (Bertin, Faroux et Renault 1986).



Diffraction par une ouverture

Par contre, 6 enseignants la relèvent pour la situation d'interférences des trous d'Young et 3 conviennent après explicitation par l'enquêteur que cette similarité de symbolisation puisse poser problème aux étudiants.

Même si le statut des tracés ne rentre pas dans le cadre d'analyse des enseignants consultés, leurs analyses des réponses des étudiants concernant les trois trous d'Young soulignent bien la prise en compte de difficultés qui rejoignent certains aspects de notre analyse. La schématisation utilisée dans certains manuels, représentation des seuls tracés utiles au calcul et continuité de la symbolisation avant et après diffraction, même si elle n'est pas l'objet d'un questionnement préalable, peut le devenir si les enseignants sont confrontés à certaines réponses typiques d'étudiants et si l'on s'attache à analyser la physique mise en jeu au delà du simple caractère quasi-automatique de certaines constructions et de l'aspect purement calculatoire relatifs aux situations prototypiques d'optique.

Pour obtenir des indices d'acceptabilité de nos propositions, nous pouvons également utiliser les réactions des enseignants consultés à propos des réponses des étudiants concernant le calcul de l'amplitude lumineuse en un point situé dans le plan focal image d'une lentille placée après trois trous d'Young (voir chapitre 1 p16).

Concernant la nature du groupement des tracés, c'est-à-dire leur non assimilation à une onde, l'accord n'est pas immédiat (voir chapitre 3 p89), ce qui témoigne du caractère non trivial du questionnement. Après une réflexion essentiellement en termes de différence de marche (ou de phase) accompagnée d'une prise de distance par rapport à la schématisation, notre analyse en termes de groupement de tracés est acceptée par pratiquement l'ensemble des enseignants consultés.

L'analyse en termes de phase qui jette un pont entre surface équiphasé et surface d'onde, apparaît donc comme le recours naturel des enseignants contre les pièges d'une lecture superficielle des schémas. C'est sans doute à elle qu'il convient d'associer un questionnement sur le type de groupement de tracés mis en œuvre, si l'on veut qu'un tel questionnement devienne acceptable.

La sélection par l'aval ayant été mentionnée par la majorité des enseignants consultés pour la situation des trois trous d'Young (voir chapitre 3 p82), il serait judicieux de choisir des sources discrètes ponctuelles pour introduire une réflexion sur la nature du groupement des tracés associée à la notion de sélection par l'aval dans ce type de situation.

Cette idée de groupement différent illustrée par les situations S14 et S15 (relatives pour la première à l'obtention par une lentille de l'image d'un réseau et pour la seconde à celle de la figure de diffraction du réseau au plan focal image de la lentille) est partagée par la grande majorité des enseignants consultés. Tous considèrent que les trajets issus d'un point du réseau constituent une onde, même si la condition de convergence au point image correspondant n'est pas toujours clairement énoncée et si, par conséquent, la notion de sélection par l'aval n'est pas totalement mise en œuvre. Le mode de groupement des tracés pour ces deux situations est différent pour la moitié des enseignants consultés puisque, pour la situation S15, ceux-ci ne considèrent plus le groupement des tracés convergeant en un point du plan focal comme une onde. Quatre d'entre eux rejoignent certains points de la catégorisation des situations d'optique présentée au chapitre 2 en soulignant l'analogie existant entre les situations des trois trous d'Young (longuement commentées lors des séquences 2 et 3 des entretiens) et la situation S15 relative à l'obtention de la figure de diffraction d'un réseau. *C'est l'histoire de l'onde plane* relève un des enseignants.

Même si le passage d'un type de situation à un autre par déplacement de l'écran d'observation, et par conséquent le changement du mode de groupement des tracés, sont très peu évoqués, il faut plus attribuer ce résultat au caractère tout à fait inhabituel de la question

qu'à un rejet a priori de notre analyse car, une fois proposée par l'enquêteur, celle-ci n'est absolument pas discutée par les enseignants consultés.

Nous constatons donc que malgré le caractère relativement déroutant de notre analyse, certains aspects semblent relativement acceptés par une majorité des enseignants consultés. La schématisation doit faire l'objet d'une grande attention pour diminuer les risques de mauvaise lecture. L'idée d'analyse de situation en termes de groupement de tracés s'appuyant sur des considérations relatives au calcul classique de différence de marche ou de phase suivant ces tracés semble relativement bien acceptée.

7. Conclusion sur l'analyse des entretiens

Notre analyse des difficultés d'étudiants menée en étroite relation avec un retour sur les bases de l'optique géométrique et de l'optique ondulatoire nous a conduit à souligner l'importance décisive de plusieurs notions pour mener à un usage cohérent de ces modèles à propos de situations impliquant la diffraction et les lentilles. Au premier rang de ces notions, la sélection par l'aval, déterminante pour le statut des tracés utilisés. L'opacité des schémas a été par-là même relevée, puisqu'un trait ne signale pas la grandeur physique - énergie, phase - qui est censée s'y propager, et plus largement puisque plusieurs lectures peuvent s'appuyer sur un dessin donné.

Le but de nos échanges avec dix enseignants volontaires était une première évaluation de la distance entre notre analyse et les leurs, et donc des éventuelles difficultés à prévoir s'il s'agissait de promouvoir, à titre de proposition pour l'enseignement, cette notion pivot de sélection par l'aval et celles qui précisent les statuts des tracés correspondants, chemin d'énergie et / ou de phase, superposition, ainsi que celui des sources et des formes discernables sur les écrans.

Une première analyse thématique a été menée sur la base de grilles orientées par nos thèmes principaux : statut des tracés et sélection par l'aval.

Instabilité et diversité caractérisent, globalement, les réactions de nos interlocuteurs. C'est un terrain non stabilisé que nous avons tenté d'explorer. Ce qui domine sur le statut des tracés, c'est l'absence d'interrogation spontanée. Peu soucieux d'établir des distinctions, les enseignants concernés mettent peu en jeu le critère de la propagation de l'énergie pour décider du statut d'un tracé, et donc le situer dans un cadre d'analyse : optique géométrique ou ondulatoire.

Nulle surprise, donc, que la mise en œuvre d'un tri des tracés à partir du point d'arrivée - la sélection par l'aval - ne s'accompagne jamais, dans les argumentations recueillies, d'une considération associée du statut des tracés. Si les enseignants interrogés s'accordent, après discussion avec l'enquêteur, à mettre en œuvre deux sélections différentes de tracés pour un même dispositif, selon la position de l'écran, aucun d'entre eux ne va jusqu'à admettre qu'un même tracé peut changer de statut avec le groupement que constitue chaque sélection.

Un aspect plus spécifique apparaît dans cette analyse : il s'agit du très faible nombre d'enseignants qui mentionnent de manière imbriquée la superposition des amplitudes lumineuses associée aux phénomènes de diffraction et d'interférences, et la sélection déterminée par la considération locale du point d'observation. Plusieurs aspects concourent probablement à cette faible prise en considération simultanée. La lecture de gauche à droite, c'est-à-dire en fait historique, dans le sens de la lumière, amène à suivre l'évolution d'un donné, l'onde incidente. C'est ensuite globalement que cette évolution est analysée, avec le

support visuel des images de cuves à ondes ou encore de construction d'Huygens. Et si même on choisit de ne s'intéresser qu'à une direction émergente, c'est plus comme à une partie constituée de ce flux lumineux que comme à un élément d'analyse d'une superposition locale, à l'aide de tracés sélectionnés.

Le détail des commentaires de nos interlocuteurs a été mis en relief par comparaison avec un « contre-modèle » construit par nous et qui constitue, pour dire vite, un rassemblement organisé de prises de position opposées aux nôtres. Etant donné l'instabilité et l'hétérogénéité des analyses proposées par nos interlocuteurs, nous ne considérons en aucun cas ce « contre-modèle » comme représentant un modèle interprétatif de la moyenne des positions des enseignants. Il s'agirait plutôt d'une sorte de borne à l'opposé de celle que pose notre analyse, qui est heurtée périodiquement, et même fréquemment, dans les dialogues truffés d'interrogations que nous cherchons à décrypter. Notre analyse et ce « contre-modèle » déterminent donc, pour la mise en œuvre de l'optique géométrique et d'une théorie ondulatoire élémentaire dans les situations impliquant diffraction et lentilles, deux « modes d'emploi » typés qui, au moins, peuvent baliser la réflexion.

Plus positivement, nous avons également cherché les convergences entre les commentaires des enseignants consultés et nos propositions.

Nous avons montré que les enseignants rejoignent notre analyse des difficultés potentielles liées à la schématisation : représentation des seuls tracés « utiles » et continuité de la symbolisation avant et après diffraction. Certains d'entre eux préconisent spontanément l'une de nos propositions à savoir de représenter des « plumeaux » après un écran diffractant.

L'idée de sélection par l'aval, en se limitant à un questionnement sur le mode de groupement des tracés (ces tracés constituent-ils une onde ? ou sont-ils une simple collection de trajets permettant d'appliquer le principe de superposition au point d'arrivée ?) est, bien que très peu relevée spontanément, acceptée par la presque totalité des enseignants consultés. Ceux-ci s'appuient alors sur une argumentation classique dans l'enseignement traditionnel basée sur les calculs de chemin optique.

Ces convergences nous conduiront dans la conclusion générale à un premier format de présentation relativement acceptable pour une majorité des enseignants consultés.

Pour éviter trop de redites, nous orientons le lecteur vers la conclusion générale pour une récapitulation des caractères principaux des deux façons - notre analyse et le contre-modèle - de concilier les analyses « géométrique » et « ondulatoire » pour des situations au demeurant fort banales dans l'enseignement supérieur. Ce sera le lieu de revenir sur les propositions faites à l'occasion de notre analyse de contenu (chapitre 2). Tenant compte à la fois des éléments de blocages - le contre-modèle - et des indices d'acceptabilité recueillis, nous présenterons nos propositions dans divers formats, en fonction de leurs chances, estimées, d'être adoptées par des enseignants de même culture que ceux que nous avons consultés.

Relevons enfin, pour terminer sur un élément tout à fait positif, l'intérêt unanime des enseignants pour l'ensemble des questions que nous avons soulevées - en témoigne la durée des entretiens - ce qui augure favorablement d'une réflexion didactique partagée, sur ce domaine de l'optique géométrique et ondulatoire.

Conclusion générale et propositions

Comme c'est souvent le cas en didactique, cette étude a été initiée par l'analyse des difficultés que rencontrent les élèves (ici des étudiants de 2^{ème} et 3^{ème} années universitaires) lorsqu'ils doivent résoudre des problèmes, en l'occurrence d'optique. Même si la formulation de certaines questions sort un peu du questionnement traditionnellement utilisé, les situations proposées sont très classiques, on peut les retrouver dans tous les manuels d'enseignement : elles ne constituent donc pas de purs produits de la didactique destinés à mettre en évidence telle ou telle conception. Il s'agit plus de souligner, dans une situation classique d'enseignement, les problèmes que peut poser la mise en œuvre conjointe de deux modèles, le modèle du rayon lumineux de l'optique géométrique et le modèle ondulatoire. Les étudiants parviennent-ils à concilier ces deux modèles pour aboutir à une vision cohérente des phénomènes optiques ? Parviennent-ils à catégoriser les situations suivant qu'elles appartiennent à l'optique géométrique ou à l'optique ondulatoire ? Si cette catégorisation est mise en œuvre, suivant quels critères est-ce le cas ?

Les réponses à ces questions sont d'autant plus délicates que l'analyse d'une situation d'optique débute le plus souvent par la lecture d'un schéma après sa construction éventuelle par l'étudiant. Or, en général, sur ce schéma, la simple considération des tracés (traits fléchés le plus souvent) ne permet pas de décider de l'appartenance de la situation à tel domaine de l'optique, c'est-à-dire de la mise en œuvre d'un modèle donné. Au contraire, la schématisation traditionnellement utilisée - en témoignent les extraits de manuels présentés dans cette étude - pourrait conduire au résultat inverse. Deux aspects ont été développés. Le premier que l'on pourrait qualifier d'hypersélectivité consiste à ne représenter sur les schémas que les tracés conduisant au point où le phénomène est observé. Comment s'étonner dans ces conditions que de nombreux étudiants en viennent à oublier qu'à partir de chaque trou d'un dispositif d'Young, la lumière est émise suivant tout un éventail de directions. Le deuxième aspect porte sur la symbolisation des tracés et vient renforcer l'hypersélectivité précédemment relevée. Il consiste à utiliser la même symbolisation - le plus souvent, un fléchage identique des tracés - sur deux trajets de lumière placés bout à bout alors que ces deux tracés n'ont pas du tout la même signification. A titre d'exemple, représenter par une même symbolisation un rayon lumineux d'une onde plane arrivant sur une ouverture diffractante et le trajet de la lumière issue de cette ouverture dans une direction donnée peut conduire à des difficultés, la continuité de la symbolisation pouvant aller de paire avec l'attribution d'une conservation de l'entité représentée par ces tracés. Hypersélectivité quant à la représentation des tracés et continuité de la symbolisation conduisent certains étudiants à penser l'action des trous d'Young sur la lumière incidente plus comme une réfraction de type géométrique - ces étudiants parlent de « déviation des rayons lumineux » au passage des trous d'Young - que comme une diffraction, phénomène typiquement ondulatoire.

Nous avons montré au chapitre 1 que, dans les situations très classiques présentées, un grand nombre d'étudiants ne parvient pas à une synthèse cohérente des deux modèles. L'« agrandissement » de franges d'interférences par une lentille n'appelle communément qu'un seul modèle sans que l'étudiant parvienne à une explicitation complète du phénomène. De même, dans un contexte impliquant nécessairement un modèle ondulatoire, à savoir un problème centré sur l'obtention de figures de diffraction, beaucoup d'étudiants ne parviennent pas à mettre en œuvre la conjugaison optique pour déterminer la position de l'image d'un objet diffractant donnée par une lentille : un dispositif comportant objet diffractant et lentille semble conduire à un seul cadre d'analyse, de type ondulatoire. Autre exemple, l'obtention au plan focal d'une lentille de la figure de diffraction d'un objet, situation pourtant typique d'optique ondulatoire, peut conduire à un traitement de type géométrique : les tracés, du fait qu'ils suivent les lois de l'optique géométrique, sont assimilés à des rayons lumineux porteurs

d'énergie et, plus problématique encore, des tracés parallèles sont considérés comme une onde plane. C'est comme si un élément du dispositif, objet diffractant ou lentille, le premier considéré comme « actif » sur le parcours de la lumière, dictait l'unique modèle à utiliser.

Il ressort donc de l'étude préliminaire des difficultés des étudiants au niveau universitaire que ceux-ci ont le plus grand mal dans des situations impliquant à la fois diffraction et lentilles, à situer l'un par rapport à l'autre le modèle ondulatoire et le modèle géométrique de l'optique.

Il apparaît même que ces problèmes interviennent avec, en toile de fond, une absence de questionnement sur ce point et donc, en particulier, sur le statut des tracés utilisés et sur la signification de concepts tels que source, objet, onde plane ou sphérique, superposition.

Ces difficultés nous ont amenés à présenter une analyse de contenu que nous avons précisée au chapitre 2.

Notre analyse s'appuie sur une catégorisation des situations d'optique. Notre réflexion se porte donc sur l'appartenance d'une situation au cadre de l'optique géométrique ou de l'optique ondulatoire et par conséquent, sur la mise en œuvre du seul modèle du rayon lumineux ou du modèle ondulatoire. Pour guider notre questionnement, nous nous appuyons sur une notion pivot que nous avons appelée sélection par l'aval.

Explicitons chacun des termes.

Par l'aval, car l'analyse et la compréhension d'une situation d'optique procèdent d'une lecture que nous avons appelée à « rebrousse lumière » : il s'agit le plus souvent de déterminer ce qui se passe en un point qui sera en quelque sorte le point d'arrivée. Cette analyse impose d'abandonner une simple lecture de gauche à droite de la situation dans le sens de propagation de la lumière, telle qu'elle est enseignée à un niveau élémentaire en optique géométrique, pour passer à une lecture plus globale de la situation : il s'agit de déterminer les trajets de lumière parvenant en un point donné. Ceci constitue, pour chaque point d'arrivée sélectionné, un groupement de tracés. Nous nous interrogeons sur la nature du groupement opéré et, par conséquent, sur le statut des tracés. L'attention doit se centrer sur la position du point d'arrivée car c'est elle seule qui détermine les tracés à prendre en compte - c'est l'idée de sélection - et la nature de leur groupement. La présence dans le dispositif d'un élément particulier - lentille ou objet diffractant, par exemple - ne permet pas de donner une réponse quant au modèle à mettre en œuvre.

Certes on pourrait croire que les situations, du moins celles étudiées dans un contexte d'apprentissage universitaire, conduisent à ne s'intéresser qu'à un seul point, ou plutôt, plan d'arrivée. Ainsi le plan de l'image en optique géométrique - sous entendu avec un objet lui-même bien localisé - ou bien l'« *infimi* » dans l'étude de la diffraction.

Nous avons noté pourtant, que, même dans un cadre très classique géométrique, cette unicité du plan d'arrivée n'est pas toujours de mise. Par exemple, dans le domaine de la photographie, c'est déjà la position de la pellicule qui détermine quel arbre sera le plus net dans un paysage. De même, dans un dispositif de filtrage de couleur utilisant un prisme suivi d'une lentille, c'est la position de l'écran d'observation qui décide du mode de groupement des rayons à mettre en œuvre et, par conséquent, de l'interprétation de l'éclairement obtenu sur l'écran - spectre de la lumière incidente dans le plan focal image et image de la face d'entrée du prisme dans le plan image conjugué -. La compréhension du filtrage nécessite de façon incontournable une analyse dans ces deux différents plans. La notion de sélection par l'aval associée à un mode de groupement des tracés peut donc entrer en scène à un niveau très élémentaire de l'enseignement de l'optique.

A un niveau plus élevé, par exemple en licence, les situations couramment utilisées dans l'enseignement de l'optique remettent également en question, de manière cruciale, cette unicité du point d'arrivée à considérer. Ainsi, celles que l'on vient d'évoquer à propos des difficultés d'étudiants : des franges d'interférences dues à des fentes d'Young, visibles sur un écran banalement situé dans le champ d'interférences, peuvent être « reprises » - comme on le dit souvent - par une lentille pour être observées agrandies sur un écran situé plus loin, tributaires en cela des propriétés d'un objet typique de l'optique géométrique. Ou encore, un réseau peut donner lieu à une figure de diffraction, dans le plan focal d'une lentille convergente, aussi bien qu'à une image à la position géométriquement conjuguée de la sienne par rapport à la dite lentille.

Ces exemples le montrent bien : opérant une sélection par l'aval des tracés, le point d'arrivée choisi détermine la nature même de l'analyse - géométrique ou ondulatoire - qui doit être menée. Nous avons distingué les situations d'optique géométrique qui se basent sur le stigmatisme entre points objet et image conjugués et les situations d'optique ondulatoire qui conduisent à appliquer le principe de superposition au point d'arrivée.

Précisons les deux natures de groupements attachées à chacun des deux types de situations.

Pour les situations d'optique géométrique, les points objets sont des sources que nous avons appelées « classiques » : chacun de ces points constitue l'origine d'une onde - ou portion d'onde - sphérique. Le stigmatisme du dispositif permet à chaque point image de sélectionner l'ensemble des tracés issus du point objet conjugué et rien que ceux-là - nous ne prenons pas encore en compte la diffraction due à l'ouverture finie du système optique -. Le groupement des tracés sélectionnés par un point image n'est donc pas un ensemble dénué de signification physique : il s'agit bien d'une onde. Nous pouvons donc y associer surface d'onde et transport d'énergie : chaque tracé entre points objet et image conjugués représente un rayon lumineux, c'est-à-dire un chemin d'énergie.

L'analyse est tout autre pour les situations d'optique ondulatoire. En effet, alors que, pour les situations d'optique géométrique, le stigmatisme du dispositif autorisait à oublier la phase et donc à ignorer tout phénomène interférentiel - même dans le cas où l'éclairage de l'objet est cohérent -, les situations d'optique ondulatoire n'autorisent pas cette simplification. Pour ces dernières, nous devons superposer au point d'arrivée toutes les ondes issues des différentes sources mises en jeu - sources dont nous supposons la cohérence totale -. Le groupement des tracés sélectionnés est alors de nature fort différente de celle présentée dans les situations d'optique géométrique. Il ne s'agit plus alors de groupement de tracés dont chacun d'eux constitue un représentant d'une même onde mais d'une collection de tracés dont chacun est associé à une onde différente et figure le chemin de phase de cette onde conduisant au point d'arrivée. Une lecture superficielle des schémas pourrait d'ailleurs faire oublier que l'application du principe de superposition au point d'arrivée est une opération non triviale qui suppose que, dans un premier temps, l'on fasse agir chacune des sources isolément pour déterminer leur chemin de phase. Il est donc inutile d'essayer de vouloir donner au groupement des tracés une signification physique qu'il ne possède pas : ainsi, les chemins de phase issus d'une ouverture diffractante dans une direction donnée - on parle de diffraction « à l'infini » - ne sont pas associés à une onde plane bien que le parallélisme des tracés puisse le laisser penser.

A ce stade de l'analyse, nous nous sommes interrogés sur le statut des tracés et sur les difficultés liées à leur schématisation. De même que des tracés parallèles ne sont pas systématiquement associés à l'existence d'une onde plane, des tracés divergeant à partir d'un point ou convergeant en un point ne doivent pas l'être à une onde sphérique divergente ou convergente. Le questionnement sur le statut des tracés - chemin d'énergie associé à la propagation d'une onde ou simple chemin de phase - nous a conduits à un questionnement sur

le statut des points de croisement des tracés. Plus précisément, tout point situé dans l'espace objet d'une lentille peut-il être considéré comme un point objet, c'est-à-dire comme une source « classique » origine d'une onde sphérique ? De même, tout point situé dans un plan image de cette lentille peut-il être considéré comme un point image, point de convergence de l'onde sphérique émise par le point objet conjugué ? C'est l'ensemble des notions les plus courantes d'optique - source, objet, image - qui sont ici l'objet d'un questionnement.

Pour présenter notre réflexion, nous nous sommes appuyés sur une situation très classique d'optique qui fait, en général, partie des manipulations proposées aux étudiants lorsqu'ils abordent les phénomènes d'interférences : il s'agit d'« agrandir » des franges d'interférences produites, par exemple, par un dispositif d'Young, à l'aide d'une lentille convergente. L'éclairement observé sur un écran placé au delà de la lentille s'identifie bien à des franges d'interférences. Pour autant, peut-on dire qu'il s'agit de l'image des franges d'interférences situées dans le plan objet conjugué de l'écran ? Pour cela, il faudrait que ces dernières puissent être considérées comme un objet, au sens de l'optique géométrique, c'est-à-dire un ensemble de sources origines d'ondes sphériques. Or, ce n'est pas du tout le cas puisque aucun point du plan objet n'émet d'onde sphérique : aucune source n'est présente au delà de l'écran diffractant que constitue le dispositif d'Young. La présence d'une lentille ne change pas la nature de la situation : il s'agit toujours d'une situation d'optique ondulatoire, la lentille venant simplement modifier les deux chemins de phase issus de chacun des trous - on peut supposer dans une première approche que chaque ouverture diffractante est assimilable à une source ponctuelle - conduisant à un point de l'écran d'observation. Comme en l'absence de lentille, nous devons donc connaître la façon dont se propage chacune des ondes sphériques pour atteindre un point de l'écran. La construction de ces deux tracés s'appuie sur la conjugaison optique introduite par la lentille mais il ne s'agit ici que d'une construction et rien de particulier ne se passe dans le plan objet conjugué de l'écran. En toute rigueur, les franges d'interférences ne sont d'ailleurs présentes qu'au niveau du détecteur, c'est-à-dire ici au niveau de l'œil de l'observateur.

Nous voyons donc que c'est tout un ensemble de notions d'optique sur lesquelles il convient de se pencher si l'on souhaite mener une analyse fine des situations en évitant les pièges tendus par la schématisation, pièges qu'une lecture superficielle ne pourrait déceler facilement.

Nous avons commencé par interroger l'éclairement observé sur un écran en prenant appui sur les nombreuses études menées sur les conceptions des élèves à propos de la formation d'une image, le plus souvent par une lentille. Un cache placé devant la lentille a souvent été utilisé, dans ces recherches, pour mettre en évidence la conception holistique de la formation d'une image chez les étudiants : l'image se « déplacerait » en bloc - c'est ce que l'on a appelé l'image « voyageuse » - de l'objet jusqu'à l'écran. Un obstacle - le cache - placé sur la route de l'image viendrait alors en découpant une partie. S'agissant ici de déterminer la nature - image « classique » ou non - de ce qui est observé sur un écran, nous avons pensé utiliser le cache pour tester la nature de ce qui est observé sur un écran. Ainsi, l'interposition d'un cache devant la lentille « reprenant » des franges d'interférences entraîne une profonde modification de l'éclairement de l'écran et non pas simplement une diminution de luminosité comme on aurait pu le supposer si les franges se comportaient comme un objet « classique » : certaines franges ne sont plus présentes sur l'écran et il ne peut donc s'agir de la formation d'une image d'optique géométrique.

Une fois mis en évidence le statut de l'éclairement observé, on peut revenir en amont au niveau du plan objet et s'interroger sur la possibilité de changer le statut des franges d'interférences que l'on souhaite agrandir. A cette fin, nous avons évoqué le placement d'un écran diffusant - papier calque ou verre dépoli - dans le plan objet conjugué de l'écran d'observation. Cet écran diffusant ne sert qu'à transformer les points du plan objet en de

véritables sources émettrices d'ondes sphériques et, par conséquent, l'éclairement de l'écran d'observation en véritable image telle que définie en optique géométrique. Remarquons que l'écran diffusant est supposé ne contenir aucune information susceptible de venir modifier la figure d'interférences observée. La présence de cet écran conduit d'ailleurs plutôt à une perte d'informations puisqu'il détruit la cohérence spatiale des points du plan objet, ceci sans conséquence pourvu que l'on se contente d'observer l'image des franges d'interférences dans le plan conjugué de l'écran diffusant : en effet, la conjugaison optique entre écran diffusant et écran d'observation permet de ne mettre en jeu, cette fois-ci, aucun phénomène interférentiel. A nouveau, l'utilisation du cache devant la lentille permet de s'assurer du statut de l'éclairement observé : en présence du cache et de l'écran diffusant, seule la luminosité des franges diminue.

Jusqu'à présent, nous n'avons pas fait mention, dans cette conclusion générale, de distinctions concernant les situations d'optique ondulatoire et nous avons supposé que chaque tracé entre source et point d'arrivée figurait un chemin de phase stationnaire qui peut être construit à partir des lois de l'optique géométrique. Ceci ne vaut que pour les situations que nous avons appelées de « superposition simple » : c'est le cas, par exemple, entre les trous d'Young - sources secondaires - et les franges d'interférences observées ou, plus généralement, entre un objet diffractant - chaque point de cet objet constitue alors une source secondaire - et la figure de diffraction observée. Mais la situation peut être plus complexe à analyser si elle doit l'être depuis les sources primaires. Considérons par exemple la diffraction par une fente d'une onde sphérique émise par une source ponctuelle. S'il s'agit de déterminer l'état vibratoire en un point d'arrivée situé au delà de la fente, le plan de celle-ci constitue un « plan de rupture ». C'est le terme que nous avons choisi pour indiquer que la prise en compte de la diffraction de l'onde incidente par la fente nécessite l'introduction de nouvelles sources - les sources d'Huygens-Fresnel - : chaque point de la fente - plus précisément, chaque élément de surface - est considéré comme une source. Nous avons donc une première sélection par l'aval entre la source origine de l'onde sphérique incidente et le plan de la fente, puis une deuxième entre plan de la fente et point d'arrivée. Les tracés obtenus entre source et point d'arrivée ne correspondent pas à un chemin de phase obéissant aux lois de l'optique géométrique car l'interprétation du phénomène de diffraction se situe hors du cadre de l'optique géométrique. Ces situations d'optique ondulatoire conduisent à ce que nous avons appelé une brisure de conjugaison optique. Nous avons choisi deux exemples très classiques pour illustrer notre propos :

- la formation de l'image d'un objet par une lentille compte tenu de la diffraction due à l'ouverture finie de la lentille ou à la présence d'un diaphragme devant celle-ci,
- le filtrage optique de l'image d'un objet, le filtre étant situé dans le plan focal image d'une lentille convergente.

Pour ces deux situations, nous travaillons entre plans conjugués, plan de l'objet et plan de l'écran d'observation. Nous avons souligné les difficultés posées par la schématisation de ces situations si l'on souhaite faire apparaître la brisure de conjugaison optique. En effet, entre points conjugués par rapport à une lentille, les seuls tracés possibles sont ceux de l'optique géométrique. Pour aller au-delà, il est d'usage d'utiliser un artifice qui consiste à dédoubler la lentille : la lentille est en quelque sorte remplacée par un montage équivalent de deux lentilles entre lesquelles nous pouvons faire figurer une ouverture qui représente la monture de la lentille ou le diaphragme placé devant celle-ci. C'est cette ouverture qui joue le rôle de plan de rupture : chacun de ses points est impliqué dans la formation du point image conjugué d'un point objet. La conjugaison optique entre points objet et image est donc rompue dans ces conditions. Dans le cas du filtrage, c'est évidemment le plan du filtre - souvent de simples caches ou ouvertures ménagées dans un écran - qui constitue le plan de rupture. Une lecture superficielle des schémas le plus souvent proposés dans les manuels peut conduire à oublier la

brisure de conjugaison optique mise en jeu au niveau du filtre et être à l'origine de quelques situations apparemment paradoxales. Ainsi, pourquoi le fait de placer trois petits caches sur chacun des trois « points lumineux » de la figure de diffraction d'un réseau d'amplitude sinusoïdal éclairé par une onde plane, conduit-il à l'absence d'éclairement dans le plan conjugué du réseau ? La conjugaison optique telle que définie en optique géométrique ne devrait-elle pas nous conduire à prévoir que l'on pourrait reconnaître l'image du réseau dans un tel plan ?

Dans les séquences traditionnelles d'enseignement, le filtrage optique est introduit après une présentation de la formation de l'image d'un objet par une lentille dans le cadre de l'optique de Fourier. Dans cette perspective, la formation de l'image résulte de deux transformations successives :

- la première entre plan de l'objet et plan focal image de la lentille,
- la deuxième entre plan focal image de la lentille et plan image conjugué.

A ce propos, nous avons présenté un autre mode de brisure de conjugaison optique : celui-ci entre en scène non pas lors de l'introduction bien réelle d'un plan de rupture - un filtre par exemple - mais lors de la mise en œuvre, opération purement intellectuelle, du principe d'Huygens.

Nous avons déjà indiqué que les points du plan focal image de la lentille ne constituent pas des sources « classiques » origines d'ondes sphériques comme pourraient le suggérer certaines schématisations. Pour qu'ils le deviennent, nous devons appliquer le principe d'Huygens en chacun de ces points mais nous introduisons alors une rupture entre points conjugués : un tracé qui repart du plan de rupture n'est pas la suite unique d'un tracé aboutissant sur ce plan. Selon notre analyse, l'optique de Fourier correspond à deux situations successives de « superposition simple » : la première détermine l'état vibratoire des points du plan focal image de la lentille - c'est la figure de diffraction de l'objet -, la deuxième, après application du principe d'Huygens en chacun de ces points, l'état vibratoire d'un point image.

Dans le prolongement de cette expérience de pensée que constitue l'application du principe d'Huygens, nous avons également souligné les difficultés que pose l'utilisation du principe du retour inverse de la lumière. Celui-ci est fréquemment mis en œuvre par exemple pour déterminer les différences de chemin optique des trajets de la lumière entre les trous d'Young et un point du plan focal image d'une lentille. Mais les implications de cette mise en œuvre sont-elles vraiment prises en compte ? Ou s'agit-il simplement de changer le sens de parcours de la lumière sur ces tracés ? La schématisation ne figure aucune indication sur la phase et, par conséquent, aucun indice sur la polysémie des tracés. L'application du principe du retour inverse, tel qu'il est pratiqué dans cette situation, conduit à un « recalage » des phases au point considéré du plan focal. Cette opération doit alors s'accompagner d'un changement complet du cadre d'analyse : nous passons d'une situation de « superposition simple » d'optique ondulatoire à une situation idéale d'optique géométrique avec toutes les implications concernant le statut des tracés. Le retournement complet de la situation, conduisant à reconstruire les trous d'Young à partir de la figure de diffraction est beaucoup plus complexe puisque l'on doit attribuer à chaque point du plan focal amplitude et phase convenables pour trouver une superposition constructive uniquement à l'emplacement des trous d'Young. C'est d'ailleurs seulement la connaissance de la phase en chaque point du plan focal qui permet, d'une part, de situer la position de l'objet et, d'autre part, de retrouver les interférences constructives donnant lieu à la formation de l'image de l'objet. Cette reconstruction est à rapprocher de celle mise en œuvre par les « miroirs acoustiques » constitués d'une famille de transducteurs : pour pouvoir concentrer une onde pratiquement en temps réel sur une cible située à l'intérieur d'un milieu non homogène - la boîte crânienne par exemple - l'onde « sonde » réfléchi par la cible permet d'ajuster les phases des différents points sources, ajustement qui s'effectue donc, en quelque sorte, par l'aval. Dans une

schématisation qui gommerait la phase ou dans une explication qui ne soulignerait pas son rôle crucial (voir, par exemple, l'article de H. Morin dans le monde du 27 février 1998 sur les travaux de M. Fink) on pourrait s'étonner de la concentration de l'énergie sur la cible uniquement.

Notre analyse de contenu basée sur la notion pivot de sélection par l'aval a souligné l'attention qui doit être portée au caractère polysémique de la schématisation des situations, polysémie consécutive en particulier au gommage de la phase. Le statut des tracés, « sources », « objets » et « images » n'est pas un simple jeu d'école mais doit permettre d'aborder une réflexion approfondie des situations d'optique pour viser à la cohérence des notions introduites en optique géométrique et en optique ondulatoire, aussi bien qu'à la compréhension de dispositifs aussi effectifs que celui que l'on vient d'évoquer.

A l'issue de cette analyse de contenu, nous aurions pu proposer une séquence d'enseignement en quelque sorte « modèle » permettant de présenter notre approche. Nous avons préféré mener une enquête en amont, c'est-à-dire au niveau des enseignants, pour juger de la distance séparant notre analyse des leurs et ainsi se donner la possibilité de présenter différents formats pour nos propositions en classant ceux-ci suivant une échelle d'acceptabilité. En effet, et bien que ce point de vue ait été, jusqu'à présent, fort peu mis en œuvre dans l'élaboration de séquences relevant d'une recherche didactique, il nous a semblé qu'il fallait minimiser autant que possible - c'est-à-dire sans renier les principes fondateurs de la séquence - la distance entre celle-ci et les points de vue communément partagés par les enseignants. Il faut bien prendre en compte ce que vingt ans de recherche didactique nous ont appris : de même que la séquence la plus élégamment construite peut se révéler inefficace si elle ne tient pas compte des conceptions initiales des apprenants, de même l'enseignement le mieux pensé d'un point de vue didactique - relativement aux apprenants - peut se heurter à la transformation consciente ou inconsciente des acteurs décisifs que sont les enseignants.

Même si notre échantillon d'enseignants est très réduit, nous l'estimons représentatif d'une certaine culture universitaire. Une étude plus large pourra être menée pour valider les résultats obtenus.

Une première étude thématique des entretiens réalisés est articulée autour des deux notions centrales de notre analyse, statut des tracés et sélection par l'aval. Même si ces deux notions occupent le centre de notre réflexion, nous n'avons pas souhaité en faire état dès le début des entretiens. On passe donc d'un questionnement très ouvert à propos d'extraits de manuels d'enseignement - il s'agit plus alors d'établir un premier constat sur les réactions des enseignants à la lecture des extraits proposés - à un questionnement beaucoup plus direct très proches de nos directions d'analyse, à propos de schémas que nous avons construits pour être les supports de notre séquence innovante. Entre ces deux extrêmes, une grande marge de manœuvre a été laissée aux enseignants, l'enquêteur se contentant de rebondir sur certains commentaires qui donnaient une orientation intéressante à la discussion. Nous avons également choisi de présenter aux enseignants de nombreuses réponses d'étudiants afin d'instaurer le climat de confiance nécessaire au bon déroulement des entretiens.

Tout d'abord, l'analyse des entretiens nous amène à un premier constat.

S'agissant de discuter des réponses des étudiants en termes de contenu, terrain toujours délicat quant à leurs interprétation et reformulation, nous aurions pu recueillir de la part des enseignants consultés une fin de non recevoir du style : « vous voulez couper des cheveux en quatre ; les étudiants ont compris l'essentiel. ». Or, ce ne fut pas le cas et les difficultés ont bien été ressenties comme telles par nos interlocuteurs. Si un étudiant, à propos de la diffraction par des trous d'Young, emploie l'expression de « déviation des rayons

lumineux », les enseignants sont d'accord avec nous pour souligner qu'il ne s'agit pas d'un simple glissement d'ordre lexical mais, sans doute, d'un problème de fond pouvant aller jusqu'à oublier la nature ondulatoire du phénomène observé. Nous sommes donc bien sur un terrain propice à l'ouverture d'une réflexion d'ordre didactique : Comment analyser les difficultés des étudiants ? Que peut-il être proposé pour les pallier ?

C'est à ce niveau que les points de vue des enseignants et notre analyse peuvent différer. Cette première étude thématique a clairement indiqué que les notions que nous considérons comme centrales ne constituent pas les lignes directrices des analyses des enseignants consultés. En particulier, le statut des tracés, chemin d'énergie dans le cadre de l'optique géométrique ou simple chemin de phase dans les situations ondulatoires, est loin d'être au centre de leurs préoccupations. Les analyses des enseignants se sont révélées à la fois très dispersées - il n'existe pas de consensus sur les réponses à donner à toutes les questions soulevées - et très instables - pour un même enseignant, parfois lors d'une même séquence de l'entretien, des incohérences, voire des contradictions, ont pu être relevées -. En fait, il n'est pas certain que les enseignants consultés attribuent de l'importance à la spécification du cadre d'analyse, géométrique ou ondulatoire, d'une situation. Il faudrait notamment pour cela qu'ils soient conscients du caractère polysémique de la schématisation des situations d'optique et des difficultés auxquelles cette polysémie peut conduire. Le manque de vigilance observé, sur ce point, chez les étudiants pourrait bien, dès lors, n'être que le reflet de l'attitude de leur professeur.

Nous avons également relevé la faible co-occurrence des notions de sélection et de superposition : il semble que le caractère local de la sélection soit bien compris mais que le phénomène de superposition ne fasse pas l'objet du même type de traitement et soit mis en relation avec un phénomène de propagation plus global. La prise en compte de la sélection se résume donc le plus souvent, du moins avant discussion avec l'enquêteur, à un simple tri de tracés sans qu'il soit fait état de la nature de ce tri et du statut des tracés sélectionnés.

L'analyse plus détaillée des entretiens nous a permis de construire un « contre-modèle » qui est à l'opposé de la démarche que nous préconisons dans notre analyse de contenu. Retenons que ce « contre-modèle » ne constitue en aucun cas le modèle « moyen » des enseignants consultés mais qu'il regroupe les caractères qui s'opposent à notre analyse, rencontrés à plusieurs reprises lors des entretiens. Ce « contre-modèle » constitue en quelque sorte une grille de lecture des éventuels blocages.

Son principal caractère repose sur une unicité de lecture des situations d'optique. Cette lecture s'effectue suivant le sens de propagation de la lumière, c'est-à-dire, dans la plupart des situations, de gauche à droite. Cette unicité de lecture est renforcée par les insuffisances de la schématisation - en particulier, la phase n'est pas représentée -, voire les ambiguïtés dénoncées au chapitre 1 lors de l'étude des difficultés des étudiants.

La lecture des situations attachée à ce contre-modèle s'organise autour des points suivants :

- tous les tracés sont des rayons lumineux suivant lesquels l'énergie est transportée - une « épaisseur » est alors donnée aux « rayons » - ;
- le point de convergence de tracés est associé systématiquement à une onde sphérique : ce point est donc considéré comme une source au sens de l'optique géométrique ;
- un ensemble de tracés parallèles constitue une onde plane ;
- un élément du dispositif - souvent le premier rencontré considéré comme « actif » - dicte le cadre d'analyse : par exemple, une lentille est considérée uniquement comme un système imageur ou un écran diffractant ne peut rentrer que dans un cadre ondulatoire.

La mise en œuvre même partielle de ce contre-modèle est en complète opposition avec notre analyse puisque celle-ci s'appuie sur une lecture à « rebrousse-lumière » et conduit à donner à un même tracé un statut différent suivant le regroupement auquel il participe. Dans cette perspective, une lentille peut n'être à l'origine d'aucune image. Un objet diffractant placé devant une lentille peut conduire à l'obtention d'une image, l'ensemble du dispositif s'inscrivant alors dans le cadre de l'optique géométrique.

Nous avons montré que, même si le contre-modèle n'est pas systématiquement utilisé, - son apparition est très fluctuante suivant le contexte et l'enseignant interrogé - il est très fréquemment rencontré. Il peut donc permettre de baliser une réflexion sur les aspects les plus problématiques de l'introduction des points clefs de notre analyse dans une séquence d'enseignement.

Nous avons également, sur la base des entretiens, dressé un bilan des convergences entre les commentaires recueillis et notre analyse de contenu.

La durée et la teneur des entretiens constituent déjà une première indication : les problèmes soulevés sont bien réels - en témoignent les difficultés des étudiants relevées par les enseignants - et dignes d'intérêt - les enseignants consultés n'ont semblé manifester aucun signe de lassitude durant les deux ou trois heures d'entretien -.

Reprenons, de façon plus précise, ces points de convergence.

Les enseignants consultés se sont accordés avec nous pour relever les difficultés des étudiants liées à la schématisation : hypersélectivité quant à la représentation des tracés et continuité de la symbolisation à la traversée d'un écran diffractant sont dénoncées, même si ce n'est pas le fait d'une réaction spontanée à la lecture des schémas que nous avons extraits de manuels d'enseignement. Cette prise en compte des difficultés des étudiants peut être considérée comme une amorce de discussion pour nos propositions. Concernant le deuxième point relatif à la similarité de symbolisation à la traversée d'un écran diffractant, nous avons noté que celle-ci est relevée plus facilement pour les situations d'interférences à deux ondes - même si le dispositif est du type « trous » d'Young - que pour des situations où une distribution continue de sources - une fente par exemple - est mise en œuvre. Le caractère discret des sources semble être plus propice à l'introduction de l'idée de sélection : parmi les enseignants consultés, une majorité font référence spontanément à l'idée de sélection pour expliciter les difficultés des étudiants concernant le dispositif des trois trous d'Young. A cette occasion, l'idée de représenter un « plumeau » à la sortie des trous d'Young est non seulement acceptée mais spontanément proposée par certains enseignants. Concernant la nature du groupement des tracés, même si l'accord n'est pas immédiat, il est unanimement trouvé pour souligner que ce groupement ne constitue pas une onde, ceci après discussion portant sur les différences de marche calculées suivant les tracés.

Si l'on restreint notre analyse à une réflexion sur la nature du groupement des tracés sélectionnés, les analyses des enseignants consultés nous rejoignent sur ce terrain : suivant qu'il s'agisse d'une situation d'optique géométrique - formation de l'image d'un réseau par une lentille - ou d'une situation d'optique ondulatoire - obtention d'une figure de diffraction - les groupements de tracés sont de nature différente. Nous avons même remarqué que près de la moitié de nos interlocuteurs procède par analogie : pour analyser l'obtention de la figure de diffraction d'un réseau dans le plan focal d'une lentille, ces enseignants s'appuient sur l'analyse menée peu avant à propos de l'obtention de la figure de diffraction des trois trous d'Young, rejoignant ainsi certains aspects de la catégorisation des situations d'optique que nous avons proposée. De même, pour la formation de l'image d'un réseau par une lentille, l'ensemble des enseignants consultés considère que d'un point du réseau est émise une onde

sphérique, sans toutefois qu'un consensus ne soit trouvé à propos de l'analyse en termes énergétiques de cette situation.

Même si le statut des tracés n'est pas l'objet d'un questionnement préalable des enseignants consultés, il le devient le plus souvent si une réflexion est demandée sur la signification des tracés représentés dans un champ d'interférences : si, lors d'une interférence à deux ondes, deux tracés conduisant en un point du champ d'interférences sont des chemins d'énergie, comment peut-on expliquer l'existence d'une frange sombre en ce point ?

Une réflexion sur le statut des tracés s'avère sans doute difficile mais n'est donc pas hors d'atteinte si l'on aborde le problème en s'appuyant sur des situations très classiques d'interférences à deux ondes et si l'on prépare la mise en place de l'analogie - déjà utilisée par certains enseignants lors de l'entretien - entre situation d'interférences entre deux ou trois sources discrètes et situation d'interférences en présence d'une distribution continue de sources.

En bref, lors de cette mise en évidence de convergences, nous avons constaté que, d'une manière générale, nos lignes d'analyse ne font pas l'objet d'un rejet global mais plutôt de résistances plus ou moins fortes suivant les aspects mis en lumière.

Cette relative ouverture et ces obstacles variés justifient a posteriori notre intention initiale de présenter plusieurs formats pour nos propositions et de les classer en termes d'acceptabilité. Dans tous les cas, nous proposons seulement de grandes lignes susceptibles d'orienter la construction d'une séquence d'enseignement, et non des suggestions détaillées pour une complète mise en œuvre. Chaque format ajoute au précédent un ou plusieurs aspects. Décrivons ces propositions par ordre de facilité d'introduction - estimée - décroissante.

Un premier aspect est présent dans tous les formats de présentation. Il consiste en une introduction de la sélection par l'aval, notion clef en facteur commun dans l'ensemble de nos propositions

Dans le premier format, on s'attache à décider si le groupement des tracés peut être associé à une onde sans se pencher plus avant sur le statut des tracés, c'est-à-dire sur leur association éventuelle à un transport d'énergie. Dans le cas d'une situation d'optique ondulatoire, c'est-à-dire de groupement de tracés liés à une superposition, ce groupement n'est pas associé à une onde. Cette idée pourrait reposer uniquement sur un calcul classique de chemin optique ou de phase le long des trajets en soulignant l'attention particulière qui doit être portée à la justification du calcul.

Cette présentation ne concerne que les situations d'optique géométrique ou celles que nous avons appelées de « superposition simple » c'est-à-dire sans intervention intermédiaire de la diffraction. Dans toutes ces situations, les tracés sont tous des trajets stationnaires au sens de Fermat : ils suivent donc les lois de l'optique géométrique. Dans ce format pourraient être exploitées les situations prototypiques maintes fois reprises dans notre étude : obtention de la figure de diffraction d'un objet diffractant - les trois « trous d'Young » ou un réseau par exemple - au plan focal d'une lentille et la formation de l'image de cet objet par la même lentille dans le plan image conjugué.

Un deuxième format de présentation, sans doute plus difficile à promouvoir, pourrait venir compléter le précédent en s'attachant à la fois au statut des tracés - chemin d'énergie ou non - et à ce qu'impose la superposition d'ondes : une considération de trajets qui n'ont de sens que relativement au point d'arrivée. Nous rappelons que, pour une situation de

« superposition simple », les tracés sélectionnés ne représentent en rien la propagation d'une onde entre sources et point d'arrivée mais bien l'ensemble des chemins de phase stationnaires associés à la propagation de chacune des ondes venant se superposer au point d'arrivée.

Pour activer cette réflexion, nous pouvons nous appuyer, dans un premier temps, sur la situation présentant l'« agrandissement » de franges d'interférences à l'aide d'une lentille. En effet, nous avons relevé que la plupart des enseignants consultés sont plus favorables à remettre en cause le statut des tracés en termes de propagation d'énergie dans ce type de situation - interférences à deux ondes - que dans celles touchant au phénomène de diffraction. D'autre part, cette situation permet aussi de restituer aux tracés considérés un statut de rayon lumineux chemin d'énergie. Il suffit pour cela de considérer l'obtention de l'image des deux trous d'Young dans le plan conjugué de l'écran diffractant par rapport à la lentille, situation prototypique d'optique géométrique. Ceci ne devrait pas faire l'objet de difficultés particulières car la formation de l'image d'un point objet - ici un trou - par la lentille est associée à la propagation d'une onde sphérique entre points conjugués, cette onde étant, facilement dans ce cas, mise en relation avec un transport d'énergie suivant des rayons lumineux.

L'analogie pourrait alors être présentée entre les situations de deux et trois trous d'Young et une situation mettant en jeu une distribution continue de sources modélisant un objet diffractant - un réseau par exemple -. Nous rappelons ici que les enseignants consultés interrogés sur le transport d'énergie entre le réseau et son image par une lentille sont souvent très perplexes quant à la réponse à donner : en effet, la sélection opérée dans le plan image du réseau est souvent oubliée, l'attention se reportant sur la répartition énergétique au delà du réseau associée sans doute à la propagation d'un champ résultant, c'est-à-dire à une lecture de gauche à droite de la situation.

Le troisième format que nous proposons apporte une réflexion supplémentaire sur le statut des « sources » et de l'éclairement observé sur un écran. Il s'agit là de dépasser la lecture superficielle de schémas, selon laquelle par exemple tout point de convergence ou de divergence de tracés s'identifie à un point critique - « image » ou « source » - associé à une onde sphérique. Nos entretiens ne nous donnent, pour nos propositions, que très peu d'indications sur leur acceptabilité par les enseignants consultés. En effet, cette question se révèle vite délicate et s'est en fait vue repoussée après celle du statut des tracés eux-mêmes. Lors des entretiens, nous nous étions proposés de cerner ces difficultés à propos de l'« agrandissement » de franges d'interférences. Pour éclairer cette réflexion, nous pourrions utiliser à propos de cette situation les outils décrits au chapitre 2. Le premier, un cache placé devant la lentille, permet de tester la nature de ce qui est observé sur un écran : si l'éclairement obtenu constitue une image au sens de l'optique géométrique, l'introduction du cache ne devrait entraîner qu'une diminution de la luminosité des franges observées ; or ce n'est pas ce que l'on observe puisque certaines franges en viennent tout simplement à disparaître. Le deuxième outil, un écran diffusant - papier calque ou verre dépoli -, permet de transformer un point lieu de superposition en une source d'onde sphérique : ainsi un papier calque placé dans le plan conjugué de l'écran d'observation par rapport à la lentille met en place une conjugaison optique typique des situations d'optique géométrique. Ce type de dispositif - trous d'Young et lentille - peut donc être l'occasion de mettre en œuvre les notions clefs de notre analyse. Par simple déplacement de l'écran d'observation, nous passons d'une situation typique d'optique géométrique - images des trous d'Young - à une situation d'optique ondulatoire - « agrandissement » des franges d'interférences -. En faisant usage de cache et d'écran diffusant comme indiqué précédemment, prévisions sur l'éclairement de l'écran et interprétation des éclaircissements observés peuvent être menées. Ces situations permettent également de conduire à une réflexion sur le rôle de la lentille suivant la nature de

la situation : système imageur pour les situations d'optique géométrique et simple objet de phase permettant la construction des trajets stationnaires pour les situations ondulatoires.

A ce stade, l'analogie entre situations d'interférences et de diffraction pourrait à nouveau être introduite en présentant la situation d'« agrandissement » d'une figure de diffraction et en soulignant que pour les deux situations, les termes d'analyse sont identiques.

Etant donné la conjonction d'intérêt et de difficultés soulevés par les thèmes proposés aux enseignants consultés, qui a conduit les entretiens à se prolonger jusqu'à des durées de deux à trois heures, il n'a pas été possible d'introduire dans la discussion les situations où intervient ce que nous avons appelé une brisure de conjugaison optique entre un objet et son image formée par une lentille.

Cette brisure concerne principalement les deux situations présentées lors de notre analyse de contenu. La première concerne la formation de l'image d'un objet compte tenu de la diffraction due à l'ouverture finie de la lentille ou à la présence d'un diaphragme devant celle-ci. Cette situation serait l'occasion d'insister sur le changement de cadre d'analyse qu'impose la prise en compte de la diffraction par la lentille : la simple conjugaison de l'optique géométrique se voit remplacer par une opération beaucoup plus complexe conduisant à associer un point objet à une figure de diffraction centrée sur le point image géométrique. De même, si l'on procède par l'aval, l'éclairement en un point du plan image n'est pas dû uniquement à l'onde issue du point objet conjugué. Pour faire clairement apparaître cette brisure de conjugaison optique, la seule représentation des plans conjugués et de la lentille n'est pas suffisante : comment figurer sur un tel schéma la diffraction imposée par l'ouverture finie de la lentille ? Le dédoublement de la lentille - procédé fréquemment utilisé dans l'enseignement - permet de mettre en avant plan de rupture et mode de sélection des tracés par un point quelconque du plan image.

Après cette première étape permettant d'introduire ou de souligner les notions de brisure de conjugaison optique et de plan de rupture, une réflexion pourrait porter sur le filtrage optique de l'image d'un objet par introduction d'un filtre dans le plan focal image d'une lentille. Nous avons souligné, dans notre analyse de contenu, les paradoxes apparents qui peuvent apparaître à l'issue d'une lecture trop superficielle des schématisations classiquement présentées. La levée de ces paradoxes devrait amener à s'interroger plus particulièrement sur le statut des tracés en relation avec la brisure de conjugaison optique.

Un autre type de brisure de conjugaison optique pourrait également faire l'objet de discussion. Il s'agit de celle se rapportant au principe d'Huygens que l'on applique en chaque point du plan focal de la lentille lorsque l'on s'appuie sur l'optique de Fourier pour interpréter la formation d'une image. La réflexion porte ici essentiellement sur le statut à donner aux points du plan focal qui constituent le spectre des fréquences spatiales de l'objet - par exemple, les trois « points lumineux » du spectre d'un réseau sinusoïdal d'amplitude -. On peut, à cette occasion, vérifier que les outils de l'analyse proposée précédemment - troisième format - sont bien mis en œuvre. En effet, si l'on veut tester la nature de ces « sources », on peut ajouter au dispositif une deuxième lentille et un écran d'observation dans le plan conjugué du plan focal image de la première lentille. Il s'agit en fait encore ici de reproduire la figure de diffraction du réseau - en l'occurrence, les trois « points lumineux » constituant le spectre du réseau -, situation analogue à l'« agrandissement » des franges d'interférences maintes fois rencontrée. La mise en place d'un cache devant la deuxième lentille ne permet pas de retrouver les trois points lumineux sur l'écran. Ceci devrait donc conduire, si un tel questionnement n'est pas déjà installé, à une remise en cause complète du cadre d'analyse en y incorporant statut des tracés, des « sources » et des « images », toutes notions centrées autour de la notion pivot de sélection par l'aval.

La suite naturelle de cette étude est la construction de séquences certes acceptables par les enseignants concernés - moyennant une formation -, mais surtout adaptées aux étudiants à qui on les destine, et ceci dans une perspective d'éducation à la cohérence, celle qui sous-tend notre étude.

Pour l'éclairer, il reste à construire précisément des séquences correspondant à chacun des formats en s'adaptant au public particulier visé. Ici nous avons précisé des lignes directrices et, dans un relatif détail, des situations physiques assorties de questionnement supposé adapté au but visé. Mais on peut, autour de telles propositions, adapter, modifier, préciser les choses. Aussi la sélection par l'aval pourrait-elle être introduite uniquement en optique géométrique et le seul filtrage évoqué pourrait-il être celui des couleurs avec un prisme. Contexte institutionnel et conditions imposées (durée, programme) peuvent évidemment contribuer à modeler une séquence particulière.

En terme de stratégie, il faut trouver le moyen de développer cette mise en cohérence de concepts dont la recherche fonde nos propositions, comme celles d'ailleurs d'autres chercheurs au niveau de l'optique élémentaire (Kaminski 1991, Chauvet 1994). Ici aussi, cette mise en cohérence pourrait être le fruit de débats menés en classe prenant appui sur des situations d'optique, en l'occurrence décrites au chapitre 2. Ces situations devraient donner lieu à des activités de formulation d'hypothèses et de vérification expérimentale permettant une construction et un usage raisonné des concepts par les étudiants.

Il faut rappeler ici que l'intérêt de telles activités - débats autour d'une situation expérimentale - ne se limite pas aux étudiants. Elles permettent aussi parfois, comme l'ont souligné Hirn (1998) et Couchouren (1996), de véhiculer auprès des enseignants de nouveaux objectifs et/ou stratégies d'enseignement : c'est par un dispositif nouveau que s'introduisent le plus facilement de nouvelles questions sur l'enseignement d'un domaine. Le revers de la médaille, selon Hirn, est que les dispositifs classiques tirent aussi avec eux les pratiques routinières : d'où nos propositions de les modifier, si peu que ce soit, par calques et caches.

Question : la gradation de nos formats de propositions rejoint-elle ce qui serait, pour les étudiants, un parcours favorable de construction conceptuelle ? Que sait-on de ce point de vue ? Les études sur leurs difficultés ou leurs raisonnements « spontanés » situent le chemin à parcourir, compte tenu notamment de la faible mise en œuvre de l'idée de superposition d'ondes (Maurines 1997, 1999; Ambrose et al 1999). Mais ces études disent bien peu de choses sur les stratégies à adopter. On ne voit d'ailleurs pas, dans ces études, de traces d'un questionnement des auteurs sur la pertinence d'une centration sur la sélection par l'aval, facteur crucial selon nous. La tendance générale (voir chapitre 1 et Colin Viennot 1999) à une lecture des situations en terme d'histoire d'un objet s'y manifeste fortement (Maurines 1997, 1999) mais il faut bien voir qu'interroger sur le devenir d'une onde sans avoir fixé le point d'observation est déjà un pas dans ce sens.

Comment les étudiants s'adapteraient-ils et mettraient-ils à profit les approches suggérées ici reste donc une question ouverte.

En terminant ce travail, nous pensons certes avoir œuvré pour mieux connaître les modalités d'une interaction fructueuse entre la compétence propre des enseignants et une proposition d'innovation dans la ligne de notre analyse.

Mais on peut aussi s'interroger sur l'utilisation de notre travail en formation d'enseignants, ceci sans visée immédiate, identifiée, d'introduction de séquence innovante. Encore une fois l'intérêt manifesté par nos interlocuteurs pour les questions soulevées témoigne d'un besoin qui ne devait rien à l'urgence particulière d'une introduction de séquence, et suggère l'opportunité d'une formation.

Se pose donc pour les enseignants la même question que pour les étudiants : la gradation d'acceptabilité de nos propositions constitue-t-elle un parcours de formation adapté ? Une réponse positive à cette question est relativement peu risquée puisqu'il s'agit bien dans les deux cas du même public enseignant, dont les réactions sont par là même prises en compte. On peut discuter de la généralité de nos résultats, de caractères éventuellement spécifiques à des enseignants du supérieur, du secondaire. Mais si l'on admet que beaucoup des réactions observées est le reflet de la formation initiale suivie, celle-ci est la même pour les deux catégories d'enseignants, et donc, dans les deux cas, nos résultats constituent sans doute au moins un point de départ utile.

Il est plus difficile de se prononcer sur ce qui serait le plus adapté à une formation d'étudiants par exemple de licence, et de savoir s'il faudrait suivre le parcours indiqué par nos « formats » successifs de propositions. Il arrive en effet que ceux qui apprennent soient moins gênés par des routines précédemment installées que leur professeur. Hirn observait ainsi, en classe de quatrième, des enfants qui suivaient plus naturellement les intentions des concepteurs du programme que leur maître. Concernant des étudiants de licence, un tel effet est moins probable, puisque déjà ils ont participé de la culture ambiante sur le sujet. Néanmoins, ce bilan précis et délicat d'influences scolaires antérieures et d'aspects de raisonnement plus profondément enracinés - telle probablement la lecture « historique » des situations, dans le sens de la lumière - reste à faire, ainsi que celui des réactions estudiantines à une séquence qui serait construite sur la base de notre analyse.

Références bibliographiques

de recherche

- Ambrose, B.S., Shaffer, P.S., Steinberg, R.N., Mac Dermott, L.C. (1999) An investigation of single-slit diffraction and double-slit interference. *American Journal of Physics*, 67 (2), pp. 146-155.
- Colin, P. et Viennot, L. (1999) Les difficultés d'étudiants post-bac pour une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'image optique, *Didaskalia* (accepté en 1998, à paraître).
- Colin, P. (1998), Two models for a physical situation: the case of optics. Students' difficulties, teachers' viewpoints and guidelines for a didactical structure. In *4th European Science Education Summerschool*, M. Méheut and G. Rebmann (eds.), Université Denis Diderot Paris 7, pp. 134-137 et édition électronique: <http://na-serv.did.gu.se/GR.html>.
- Colin, P (1999). Two models for a physical situation: the case of optics. Students' difficulties, teachers' viewpoints and guidelines for a « didactical structure », In *Proceedings of the Second International Conference of the European Science Education Research Association (ESERA)*, Research in Science Education. Past, Present and Future. M. Komorek, H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber, A. Kross (Eds.), Kiel, Vol 1, 143-145.
- Couchouron, M., Viennot, L. et Courdille, J.M. (1996). Les habitudes des enseignants et les intentions didactiques des nouveaux programmes d'électricité en classe de quatrième. *Didaskalia*, n°8, pp 81-96.
- Chauvet, F. (1994) *Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception : principes d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement*. Thèse (LDPES), Université Paris 7.
- Dreyer, Y. (1996). Rapport de stage de didactique (C.I.E.S. Paris Centre) (disponible au LDSP).
- Fawaz, A. (1985) *Image optique et vision : étude exploratoire sur les difficultés des élèves de première au Liban*. Thèse (LDPES), Université Paris 7.
- Fawaz, A., & Viennot, L. (1986). Image optique et vision, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°686, 1125-1146.
- Galili, Y. (1996). Students' conceptual change in geometrical optics, *International Journal of Science Education*, 18 (7), 847-868.
- Goldberg, F. & McDermott, L. (1987). An investigation of students' understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. *American Journal of Physics*, 55 (2), 108-119.
- Hirn, C., (1995). Comment les enseignants de sciences physiques lisent-ils les intentions didactiques des nouveaux programmes d'optique de classe de quatrième? *Didaskalia* n°6, 39-

- Hirn C. (1998). *Transformations d'intentions didactiques par les enseignants: le cas de l'optique élémentaire en classe de Quatrième*. Thèse (LDPES), Université Paris 7.
- Hirn C. & Viennot L. (1999). Transformation of didactic intentions by teachers: the case of geometrical optics in grade 8 in France. , in Symposium (voir STTIS 1999a): Teachers' use of innovative Sequences, In *Proceedings of the Second International Conference of the European Science Education Research Association (ESERA)*, Research in Science Education. Past, Present and Future. M. Komorek, H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber, A. Kross (Eds.), Kiel, Vol 2, 447-450.
- Kaminski, W., (1989). Conceptions des enfants et des autres sur la lumière. *Bulletin de l'Union des Physiciens* , n°716, 973-991.
- Kaminski, W. (1991) *Optique élémentaire en classe de quatrième : raisons et impact sur les maîtres d'une maquette d'enseignement*, Thèse (LDPES), Université Paris 7.
- Linder, C.J. (1993) University physics students' conceptualization of factors affecting the speed of sound propagation. *International Journal of Science Education*. 15, 6, pp. 655-662.
- Maurines, L. (1986). *Premières notions sur la propagation des signaux mécaniques : étude des difficultés des étudiants*. Thèse. Université Paris 7.
- Maurines, L. (1993). Mécanique spontanée du son. *Trema*. IUFM de Montpellier, pp. 77-91.
- Maurines, L. (1995). Les étudiants et la phase propagative : résultats d'une enquête exploratoire, *Actes du cinquième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques, Université de Reims-Champagne-Ardennes I.U.F.M. de Reims*.
- Maurines, L. (1997). Raisonnement spontané sur la diffraction, *Actes du cinquième séminaire national de la recherche en didactique de la physique, de la chimie et de la technologie*, Gréa (Ed.), Université de Lyon 1, pp. 77-95.
- Maurines, L. (1999). Le raisonnement géométrico-corporel dans les domaines de la diffraction et de la formation des images en éclairage cohérent, *Didaskalia* (à paraître)
- Ministère de l'Éducation Nationale (1992). Programme des classes de quatrième et de quatrième technologique. *Bulletin Officiel*, n° 31, Paris, 2086-2112.
- Pfundt, H. & Duit, R. (1994). *Student's Alternative Framework and Science Education*, IPN Kiel (Germany).
- STTIS consortium (" Science Teacher Training in an Information Society ", coord. R. Pinto) (1999a), Symposium: Teachers' use of innovative Sequences, In *Proceedings of the Second International Conference of the European Science Education Research Association (ESERA)*, Research in Science Education. Past, Present and Future. M. Komorek, H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber, A. Kross (Eds.), Kiel, Vol 2, 447-450.
- STTIS consortium (" Science Teacher Training in an Information Society ", coord. R. Pinto) (1999b), Symposium: The innovative use of symbolic representations and informatic tools, In

Proceedings of the Second International Conference of the European Science Education Research Association (ESERA), Research in Science Education. Past, Present and Future. M. Komorek, H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber, A. Kross (Eds.), Kiel, Vol 2, 626-629.

Tiberghien, A., Jossem, E.-L. & Barojas, J. (Eds) (1998). *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education* (section C Student's knowledge and learning) www.physics.ohio-state.edu/jossem/ICPE/BOOKS.html.

Viennot, L. and Kaminski, W. (1991). Participation des maîtres aux modes de raisonnement de leurs élèves. *Ensenanza de las Ciencias*, 9, (1), 3-9.

Viennot, L. (1996a). *Raisonnement en physique. La part du sens commun*. Louvain-La-Neuve, De Boeck-Wesmael.

Viennot, L. (1996b). *Le rayon lumineux en optique géométrique et en optique ondulatoire*, rapport interne LD PES, Université Paris 7.

Wittmann, M.C. (1999) *Making sense of how students come to an understanding of physics : an example from mechanical waves*, PhD, Department of Physics, University of Maryland.

des manuels d'enseignement

Annequin, R., Boutigny, J. (1973) *Optique, mathématiques supérieures, Cours de Sciences physiques*, 2^{ème} édition, Vuibert, Paris ;

Annequin, R., Boutigny, J. (1974) *Optique 2, mathématiques spéciales, Cours de Sciences physiques*, 2^{ème} édition, Vuibert, Paris ;

Bertin, M., Faroux, J.P., Renault, J. (1986) *Optique et physique ondulatoire. Optique géométrique et optique physique. Phénomènes de propagation*, Cours de physique, 3^{ème} édition, Marketing, Paris.

Born, M. & Wolf, E. (1980). *Principles of Optics. Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, Sixth Edition, Pergamon Press, Oxford.

Dubod, C., Dulac, Y., Fromont, J.C., Garay, B., Nordmann, J. (1995) *Physique Terminale S*, Collection D. Secrétan, Didier, Paris.

Françon, M. (1986) *L'optique moderne et ses développements depuis l'apparition du laser*. Collection Liaisons scientifiques, Hachette CNRS, Paris.

Goodman, J. W. (1972). *Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie*, Masson & Cie, Paris.

Hecht, E. (1987) *Optics*, 2^{ème} édition, Addison-Wesley.

Pérez, J.P. (1994) *Optique géométrique et ondulatoire*, Collection Enseignement de la physique, 4^{ème} édition, Masson, Paris.

Annexe 1

Analyse de contenu : aspects techniques

Sommaire

1. Une base commune : les équations de Maxwell	p 1
2. Les concepts clés de l'optique géométrique	p 3
2.1. Le rayon lumineux	p 3
2.2. Notion de surface d'onde	p 4
3. Diffraction	p 5
3.1. Tentative de définition	p 5
3.2. Première approche : le principe d'Huygens-Fresnel	p 5
3.2.1. Introduction du principe d'Huygens-Fresnel	p 6
3.2.2. Énoncé du principe d'Huygens-Fresnel	p 6
3.2.3. Limites de validité du principe d'Huygens-Fresnel	p 6
3.2.4. Le principe d'Huygens-Fresnel : un artifice de calcul	p 7
3.3. Les bases théoriques du principe d'Huygens-Fresnel	p 7
3.4. Autres approches de la diffraction	p 9
3.5. Diffraction de Fraunhofer	p 10
4. Formation de l'image d'un objet	p 11
4.1. L'objet comme assemblage de points sources	p 12
4.1.1. Réponse impulsionnelle de la lentille	p 12
4.1.2. Relation entre l'objet et l'image	p 13
4.2. Formation d'une image et optique de Fourier	p 15
4.2.1. Transmittance d'un objet	p 15
4.2.2. Transformation de Fourier et diffraction de Fraunhofer	p 16
4.2.3. Formation de l'image d'un objet comme double transformation de Fourier	p 17
4.3. Equivalence mathématique des deux approches : correspondance « point à point » et double transformation de Fourier	p 17
4.4. Conclusion sur la formation de l'image d'un objet	p.18
Références	p.19

Annexe 1 Analyse de contenu : aspects techniques

Dans cette annexe ont été regroupés certains aspects techniques portant sur l'approche électromagnétique de l'optique, sur le phénomène de diffraction et sur les différentes approches concernant la formation d'une image.

1. Une base commune : les équations de Maxwell

Nous nous limiterons ici au domaine de l'optique visible, sachant, toutefois, qu'une partie des résultats pourraient être étendue à d'autres domaines de longueur d'onde.

La lumière est une onde électromagnétique dont la propagation est régie par les équations de Maxwell.

Dans le vide, sans sources de champ c'est-à-dire sans charges ni courants libres, elles s'écrivent :

$$\text{Div} \vec{E} = 0 \quad \text{Div} \vec{B} = 0$$

$$\text{Rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Rot} \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

où \vec{E} et \vec{B} sont les champs électrique et magnétique associés à l'onde et c la vitesse de l'onde électromagnétique.

Nous serons amenés à étudier la propagation de la lumière à travers différents milieux (air, lentille, matériau constitutif d'un objet,...).

Nous ne considérerons que des milieux diélectriques non magnétiques, pour lesquels l'aimantation est nulle.

Il convient donc, dans une première étape, d'écrire ces équations dans un milieu matériel. Nous n'écrirons ces équations que pour une composante spectrale de pulsation ω , sachant qu'en utilisant l'analyse de Fourier, une onde peut être décomposée, dans le domaine fréquentiel, suivant son spectre.

Ces équations, décrivant les variations spatiales des champs, s'écrivent :

$$\text{Div} \vec{D} = 0 \quad \text{Div} \vec{H} = 0$$

$$\text{Rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Elles ont la même forme que dans le vide mais cette ressemblance n'est due qu'à l'introduction de deux nouveaux champs \vec{D} , déplacement électrique, et \vec{H} , excitation magnétique.

\vec{D} et \vec{H} sont donnés par les relations suivantes :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

où \vec{P} est la polarisation du milieu.

Pour résoudre le système, il faut connaître la relation entre \vec{E} et \vec{P} . Dans le cas général, cette relation n'a rien d'évident, mais elle peut se simplifier lorsque les milieux matériels traversés présentent certaines propriétés.

Nous nous placerons dans des milieux linéaires (\vec{P} ne dépend que de \vec{E} et le développement est limité au premier ordre), isotropes (le milieu réagit de la même façon pour

toutes les directions de \vec{E}) et locaux (la polarisation \vec{P} en un point ne dépend que de la valeur du champ électrique \vec{E} en ce même point). Dans ce cas, une simple relation de proportionnalité relie \vec{E} et \vec{P} :

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e(\vec{r}) \vec{E}$$

où le scalaire χ_e est la susceptibilité diélectrique du milieu qui dépend de la position du point considéré si le milieu n'est pas homogène.

\vec{D} s'écrit alors :

$$\vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon \vec{E}$$

avec ϵ_r et ϵ , respectivement, permittivité diélectrique relative et absolue du milieu.

Nous supposons, d'autre part, que les milieux sont transparents et que par conséquent la permittivité ϵ est un réel. L'indice de réfraction est alors défini par $n = \sqrt{\epsilon}$.

A partir des équations de Maxwell, on peut écrire l'équation de propagation du champ électrique (une équation analogue peut également être donnée pour \vec{H}) dans le milieu considéré :

$$\Delta \vec{E} + n^2 \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E} + \text{grad}(\text{grad}(\vec{r} \cdot \vec{E})) = 0$$

Cette équation reste insoluble dans le cas général étant donné la dépendance spatiale des caractéristiques du milieu (ϵ_r, n).

Une première approche consiste alors à proposer une expression de la solution du type $\vec{E} = \vec{E}_0(\vec{r}, \omega) e^{i k_0 S(\vec{r}, \omega)}$ où \vec{E}_0 et $k_0 S(\vec{r}, \omega)$ correspondraient respectivement à l'amplitude et la phase du champ électrique. Cette façon de poser le problème ne garantit d'ailleurs pas, à ce stade de la résolution, l'unicité du couple solution (\vec{E}_0, S).

L'équation de propagation peut alors se réécrire en ordonnant les différents facteurs suivant les puissances de k_0 :

$$k_0^2 [n^2 - (\text{grad} S)^2] + i k_0 [2(\text{grad} S \cdot \text{grad}) \vec{E}_0 + \Delta S \vec{E}_0 + \text{grad}(Ln \epsilon_r \cdot \vec{E}_0) \text{grad} S] + [\Delta \vec{E}_0 + \text{grad}(\text{grad} Ln \epsilon_r \cdot \vec{E}_0)] = 0$$

λ_0 étant très faibles pour les radiations visibles (c'est-à-dire k_0 très grand), on peut penser qu'une approximation correcte de la solution pourra s'obtenir en annulant le premier terme en k_0^2 .

L'approximation de l'optique géométrique consiste en fait à considérer que les variations des amplitudes \vec{E}_0 et \vec{H}_0 ainsi que des constantes $\epsilon_r(\vec{r}, \omega)$ sont très petites à l'échelle de λ_0 .

L'annulation du premier terme de l'équation de propagation conduit à l'équation de l'éikonale de l'optique géométrique, qui en constitue le fondement :

$$\text{grad} S(\vec{r}) = n(\vec{r}) \vec{u}(\vec{r})$$

Le retour aux équations de Maxwell permet de montrer que l'onde a localement une structure d'onde plane progressive de vecteur d'onde $\vec{k} = n(\vec{r}) k_0 \vec{u}(\vec{r})$.

Il est, nous semble-t-il, important de souligner que les deux approches géométrique et ondulatoire de l'optique ont une base commune à savoir les équations de Maxwell et qu'elles ne se distinguent fondamentalement que par les approximations que l'on est contraint de faire pour permettre la résolution de ces équations.

Par conséquent, lorsque l'on se limite à l'optique géométrique, il convient tout de même de garder à l'esprit que ce dont on parle concerne toujours la propagation d'une onde électromagnétique obéissant aux équations de Maxwell.

2. Les concepts-clefs de l'optique géométrique

2.1. Le rayon lumineux

C'est la notion centrale sur laquelle s'appuie l'essentiel des développements de l'optique géométrique.

L'équation de l'eikonale conduit à l'équation des rayons lumineux suivante :

$$\frac{d}{ds} \left[n(\vec{r}) \frac{d\vec{r}}{ds} \right] = \text{grad}n(\vec{r})$$

où s est l'abscisse curviligne.

Une définition plus large peut être donnée du rayon lumineux : dans le cadre d'une approche énergétique, il s'identifie à une ligne de courant de l'énergie électromagnétique, c'est-à-dire comme courbe tangente à la moyenne temporelle du vecteur de Poynting $\vec{P} = \vec{E} \wedge \vec{H}$.

La détermination des rayons lumineux suppose donc la connaissance du vecteur de Poynting, et donc du champ électromagnétique en tout point de l'espace, ou tout au moins dans une région "suffisamment étendue" pour permettre le tracé des rayons. Ceci s'avère difficile même dans des situations relativement simples.

Considérons par exemple l'interférence de deux ondes planes uniformes monochromatiques, de même fréquence, de même polarisation, d'égale amplitude et de vecteurs d'onde \vec{k}_1 et \vec{k}_2 .

La structure de chacune des ondes planes composantes en termes de surfaces d'onde et de rayons lumineux est bien sûr élémentaire. Elle peut d'ailleurs être fournie par une description purement géométrique.

Nous pouvons calculer le champ résultant en un point comme résultat de la superposition des deux champs composants :

$$E(\vec{r}, t) = E_1 + E_2 = E_0 \cos(\alpha\vec{x} - \vec{k}_1 \cdot \vec{r}) + E_0 \cos(\alpha\vec{x} - \vec{k}_2 \cdot \vec{r})$$

Soit

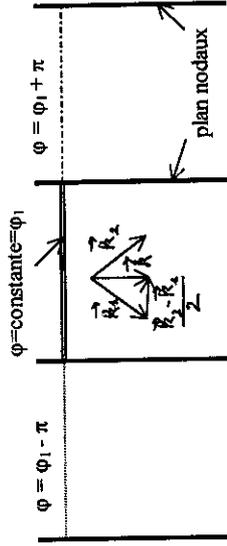
$$E(\vec{r}, t) = 2E_0 \cos \left(\frac{\vec{k}_2 - \vec{k}_1}{2} \cdot \vec{r} \right) \cos \left(\alpha\vec{x} - \frac{\vec{k}_1 + \vec{k}_2}{2} \cdot \vec{r} \right)$$

Nous pouvons réécrire cette expression sous la forme :

$$E(\vec{r}, t) = \pm A(\vec{r}) \cos(\alpha\vec{x} - \vec{k} \cdot \vec{r})$$

$$\text{avec } A(\vec{r}) = 2E_0 \left| \cos \left(\frac{\vec{k}_2 - \vec{k}_1}{2} \cdot \vec{r} \right) \right| \text{ et } \vec{k} = \frac{\vec{k}_1 + \vec{k}_2}{2}.$$

L'onde résultante apparaît comme une onde progressive non uniforme de vecteur d'onde \vec{k} (voir figure 1). L'énergie se propage donc suivant la direction définie par \vec{k} et l'on pourrait tracer les rayons lumineux correspondants. Mais nous voyons qu'elle se propage en quelque sorte sous forme de "tranches" limitées par les plans nodaux sur lesquels le champ électrique et donc le vecteur de Poynting s'annulent. Signalons également le déphasage de π qui s'introduit à la traversée d'un plan nodal.



Structure du champ d'interférences de deux ondes

Figure 1

Dans le cadre de la situation idéale présentée, la structure de l'onde est donc déjà relativement complexe et bien différente de celle de chacune des ondes composantes. Les rayons propres à chacune des composantes et représentés simultanément sur un schéma dans le but de mettre en application le principe de superposition en un point, n'ont pas d'existence physique réelle dans le champ d'interférences. Notons que ce point est peu abordé dans les manuels puisque l'on s'intéresse plus au calcul du champ et de l'intensité lumineuse en un point qu'à la structure globale et à la propagation de l'onde résultante.

Retenons que la définition « énergétique » des rayons lumineux à partir du vecteur de Poynting permet d'en élargir sa portée mais n'en facilite pas pour autant son utilisation effective dans les situations les plus courantes.

2.2. Notion de surface d'onde

La notion de surface d'onde, bien que sa dénomination semble la faire relever du domaine de l'optique ondulatoire, est également utilisée en optique géométrique. En effet, une surface d'onde est ici définie comme surface iso-eikonale ($S(\vec{r}) = C \text{ste}$). C'est en quelque sorte une surface d'onde « géométrique ». Comme la définition non énergétique des rayons lumineux, celle-ci ne fait pas intervenir de façon explicite un quelconque paramètre relevant de la nature ondulatoire de la lumière.

Notons que cette définition repose sur la connaissance univoque de l'eikonale S ce qui suppose une géométrie des sources bien particulières, à savoir une source ponctuelle unique c'est-à-dire un faisceau isogène.

Cette notion s'applique donc, en quelque sorte, à un cas très particulier, permettant toutefois d'illustrer un certain nombre de situations « idéales ».

Pour toute autre situation, on devra prendre garde à la signification à donner aux tracés représentant des surfaces d'onde qui n'auront alors le plus souvent qu'un caractère local, limité à une région de l'espace, et/ou partiel, résultant d'une quelconque décomposition du champ électromagnétique global.

3. Diffraction

Nous rappelons ici l'approximation fondamentale de l'optique géométrique : les variations des amplitudes \vec{E}_0 et \vec{H}_0 ainsi que des constantes $\epsilon_r(\epsilon\mu_r)$ sont très petites à l'échelle de λ_0 .

Ne peuvent donc pas être traités les phénomènes qui n'obéissent pas à cette approximation. Nous nous limiterons ici au phénomène de diffraction, laissant de côté d'autres phénomènes comme l'anomalie de phase, puisque c'est le phénomène mis en avant dans les programmes d'enseignement, au moins jusqu'au niveau licence, pour mettre en évidence les limites de l'optique géométrique.

3.1. Tentative de définition

Nous prenons comme point de départ la définition qu'en donne Sommerfeld (1967): la diffraction est toute déviation des rayons lumineux de leur trajectoire rectiligne qui ne peut s'expliquer ni par une réflexion, ni par une réfraction.

Nous notons, comme Dettwiler (1990), que la notion de rayon lumineux n'est pas détruite par le phénomène de diffraction (...) mais ces rayons ne suivent plus les lois fondamentales de l'optique géométrique.

Remarquons également que l'extension spatiale de la zone où l'optique géométrique ne s'applique plus est souvent réduite à quelques longueurs d'onde et qu'en dehors de cette zone (par exemple à quelques longueurs d'onde du bord d'un écran diffractant), les rayons lumineux suivent à nouveau les lois de l'optique géométrique.

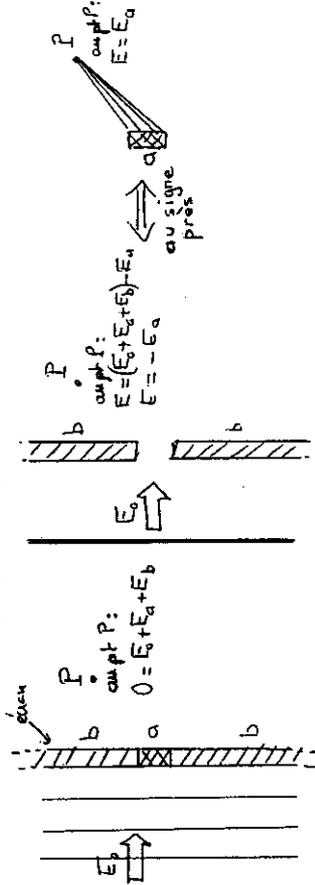
Il s'agit maintenant de savoir dans quelle mesure on peut résoudre l'équation de propagation. Cette résolution reste en effet très difficile car la solution doit être valable dans tout l'espace y compris sur les obstacles rencontrés et doit satisfaire aux équations de continuité. Très peu de situations ont reçu une solution exacte. Des approximations dont on devra alors retenir la portée, sont alors nécessaires pour donner une solution approchée des situations les plus courantes.

3.2. Première approche du problème : le principe d'Huygens-Fresnel

Les programmes d'enseignement post-bac (DEUG, Licence, classes préparatoires) s'appuient, pour aborder la diffraction, sur le principe d'Huygens-Fresnel. Nous limiterons l'essentiel de notre analyse à cette approche et ne ferons que citer au paragraphe 3.4., à titre d'information, d'autres approches possibles.

3.2.1. Introduction du principe d'Huygens-Fresnel

Avant même d'énoncer et de commenter ce principe, nous commencerons par en donner une approche, peu utilisée dans les manuels, mais qui permet de mieux en apprécier l'origine et de préciser la nature des sources secondaires dont ce principe fait état. Considérons un écran opaque sur lequel arrive une onde électromagnétique. Le champ, nul derrière l'écran, peut être considéré comme résultant de la superposition du champ incident et du champ produit par les oscillations des électrons présents dans l'écran (voir figure 2). Si un trou est percé dans l'écran, nous pouvons dire, qu'au signe près, le champ résultant derrière l'écran est identique à celui que produirait seule la partie de l'écran enlevée correspondant au trou. Nous voyons donc que pour bien comprendre l'essence du principe d'Huygens-Fresnel, il est nécessaire de faire une analyse globale du problème.



Une approche du principe d'Huygens-Fresnel

Figure 2

3.2.2. Enoncé du principe d'Huygens-Fresnel

Le principe d'Huygens-Fresnel consiste donc, comme précisé en introduction, à remplacer la situation complexe résultante de la superposition entre onde incidente et ondes réémises par l'écran par des sources localisées au niveau de l'ouverture.

C'est sous cette forme qu'a été formulé ce principe au chapitre 2. Nous en rappelons ici l'énoncé :

Tout élément de surface dS entourant un point M de l'ouverture émet de manière non isotrope une ondelette sphérique, de même fréquence que l'onde incidente, d'amplitude proportionnelle à dS et dont la phase est en quadrature avancée par rapport à l'onde incidente au point M.

3.2.3. Limites de validité du principe d'Huygens-Fresnel

En réperant l'approche du paragraphe 3.2.1., nous pouvons, de façon très intuitive, faire la remarque suivante : nous avons implicitement supposé que les interactions entre les électrons de l'écran étaient négligeables, chacun oscillant de façon indépendante. Dans ces conditions, le retrait d'une partie de l'écran, ne vient en rien modifier ce qui se passe ailleurs. Ceci n'est en fait qu'une approximation qui ne vaut pas en particulier lorsque l'on se trouve près des bords de l'ouverture. L'ouverture doit donc avoir des dimensions très grandes par rapport à la longueur d'onde (de l'ordre de 1000 fois la longueur d'onde) pour pouvoir

utiliser le principe d'Huygens-Fresnel. D'autre part, ce principe donne des résultats très satisfaisants pour des angles d'émission relativement faibles et pour des points suffisamment éloignés de l'ouverture. Il n'est en particulier d'aucune utilité pour connaître le champ sur l'ouverture elle-même.

3.2.4. Le principe d'Huygens-Fresnel : un artifice de calcul

Nous avons insisté précédemment sur le caractère fictif des sources secondaires présentes sur l'ouverture pour calculer l'amplitude en un point situé derrière l'écran diffractant. Ces sources n'ont pas d'existence réelle.

De même, les rayons d'ondelettes associés ne correspondent pas à des rayons lumineux suivant lesquels se propagerait l'énergie. Ce ne sont que ce que Laurence Viennot (1996) appelle des chemins de phase propagative d'ondelette. On se doit donc de bien différencier les rayons lumineux incidents avant l'écran diffractant et ces rayons d'ondelettes.

La détermination des rayons lumineux après l'écran diffractant suppose la détermination des champs en tout point de l'espace, problème insoluble dans la plupart des situations courantes. Le principe de Huygens-Fresnel ne permet donc pas de connaître complètement la structure du champ, ni la façon dont l'énergie se propage entre l'écran diffractant et le point d'observation. Nous évoquerons à nouveau cet aspect lors de l'étude de la diffraction de Fraunhofer.

3.3. Les bases théoriques du principe d'Huygens-Fresnel

Le principe de Huygens-Fresnel a été présenté de façon intuitive, dans le style de celle proposée par Fresnel, et ses bases paraissent bien fragiles. Nous allons de façon très succincte rappeler comment ce principe peut être établi à partir de bases théoriques solides à savoir les équations de Maxwell.

Les développements qui suivent s'appuient sur une théorie scalaire de la diffraction. La lumière est considérée comme une grandeur scalaire et on néglige par conséquent le couplage entre les différentes composantes des champs électrique et magnétique.

- Pour qu'une telle théorie soit valide, deux conditions doivent être réalisées :
- l'ouverture diffractante doit être grande devant la longueur d'onde ;
- les champs diffractés ne doivent pas être observés trop près de l'ouverture.

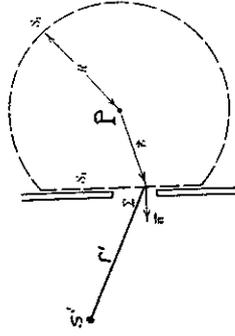
Dans ces conditions, il s'agit en fait de résoudre l'équation d'Helmholtz qui constitue l'équation scalaire de propagation, obtenue à partir des équations de Maxwell :

$$\Delta^2 U + k^2 U = 0 \quad \text{avec } k = 2\pi/\lambda$$

Cette équation est transformée de la façon suivante en utilisant la formule de Green :

$$\iint_V (\nabla \text{grad} U - U \text{grad}^2) \cdot d\vec{S} = 0 \quad \text{ou} \quad \iint_V \left(\nabla U \cdot \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} - U \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial t^2} \right) dS = 0$$

Le champ cherché est représenté par la fonction U . La fonction V est appelée fonction de Green et peut être choisie de façon arbitraire du moment qu'elle vérifie l'équation de propagation scalaire. On peut choisir pour fonction V celle qui correspondrait à une onde sphérique produite par une source ponctuelle située en un point P . En remplaçant la fonction par sa valeur dans l'équation précédente, on obtient la valeur de la fonction U au point P , donc le champ au point P , comme une intégrale, appelée intégrale de Kirchhoff. Le calcul du champ en un point se ramène donc à la connaissance de la fonction U et de sa dérivée normale sur une surface entourant ce point, pour permettre de calculer l'intégrale. Le rôle dédié aux sources de surface semble secondaire par rapport à une approche qui consisterait à calculer la fonction U comme superposition des champs produits au point P par chacune d'entre elles. Toutefois, la connaissance du champ produit par ces sources sur la surface choisie est indispensable. La poursuite du calcul suppose maintenant le choix de la surface d'intégration. Considérant le champ en P comme résultant de la diffraction d'une onde sphérique émise par une source ponctuelle S placée en avant d'un écran, nous pouvons choisir comme surface d'intégration celle figurée en pointillé sur la figure 3.



Choix de la surface permettant le calcul de l'intégrale de Kirchhoff
Figure 3

Etant donné la fonction de Green choisie, l'annulation de l'intégrale sur la surface S_2 est satisfaite à condition de prendre R suffisamment grand et de choisir une fonction de Green convenable (communication privée M. Devaud).

Kirchhoff adopte alors des conditions aux limites sur S_1 et S_2 qui permettent de simplifier le calcul. D'une part, le champ et sa dérivée normale sur l'ouverture Σ sont supposés être les mêmes qu'en l'absence d'écran. D'autre part, ils sont supposés être nuls en dehors de Σ , c'est-à-dire sur S_1 . Ces conditions sont en fait du même ordre que celles posées pour introduire le principe d'Huygens-Fresnel et nous pouvons émettre les mêmes réserves quant à leur validité. La présence de l'écran perturbe forcément, dans une certaine mesure les champs répartis sur Σ ; en effet sur le pourtour de l'ouverture, certaines conditions aux limites doivent être satisfaites, ce qui ne serait pas le cas en l'absence d'écran. De plus l'ombre portée par l'écran n'est jamais parfaite car ces champs s'étendent toujours derrière l'écran sur une distance de plusieurs longueurs d'onde. Cependant, si les dimensions de l'ouverture sont grandes devant la longueur d'onde, ces effets de bord peuvent être négligés.

L'intégrale de Kirchhoff peut encore se simplifier en supposant que le point source S et le point d'observation P sont à des distances de l'ouverture grandes devant la longueur d'onde, conditions facilement remplies vu la faiblesse des longueurs d'onde des radiations visibles. On obtient alors la formule de diffraction de Fresnel-Kirchhoff :

$$U(P) = \frac{A}{i\lambda} \iint_{\Sigma} \frac{e^{ik(r+r')}}{r r'} \left[\frac{\cos(\vec{n}, \vec{r}') - \cos(\vec{n}, \vec{r})}{2} \right] ds$$

Cette formule peut être réécrite de la façon suivante :

$$U(P) = \iint_{\Sigma} U'(P_1) \frac{e^{ikr}}{r'} ds$$

avec

$$U'(P_1) = \frac{1}{i\lambda} \left[\frac{e^{ikr}}{r} \right] \left[\frac{\cos(\vec{n}, \vec{r}') - \cos(\vec{n}, \vec{r})}{2} \right]$$

Cette dernière expression peut être interprétée comme celle d'une ondelette sphérique émise de manière non isotrope au point P₁ de l'ouverture.

Nous retrouvons donc le principe d'Huygens-Fresnel. Les propriétés des sources secondaires fictives de l'ouverture, posées de façon intuitive par Fresnel, résultent donc d'une analyse globale de la propagation de la lumière.

En fait, les conditions aux limites de Kirchhoff ne sont en toute rigueur pas recevables car l'annulation du champ et de sa dérivée normale sur S₁ entraîne l'annulation du champ en tout point derrière l'ouverture. Pour surmonter cette incohérence, Rayleigh et Sommerfeld ont utilisé une fonction de Green différente pour aboutir à la formule de diffraction de Rayleigh-Sommerfeld, qui ne se distingue de celle de Fresnel-Kirchoff que par l'expression du facteur d'obliquité. Dans les conditions habituelles d'utilisation de ces formules, le facteur d'obliquité est pris le plus souvent égal à l'unité puisque que l'on s'intéresse au champ en des points angulairement peu éloignés de la direction de l'onde incidente, si bien que les deux formulations donnent des résultats identiques.

Nous terminons ces quelques rappels théoriques en insistant sur le caractère fictif des sources secondaires de l'ouverture diffractante. Lors de l'introduction du principe d'Huygens-Fresnel, nous avons montré comment, de façon relativement intuitive, nous étions passés de la situation complexe de superposition entre onde incidente et ondes réémises par l'écran diffractant à la situation simplifiée correspondant aux sources secondaires. Dans le cadre des développements mathématiques précédents, c'est plutôt la forme des résultats obtenus qui permet de comprendre le phénomène de diffraction comme engendré par des sources secondaires au niveau de l'ouverture.

3.4. Autres approches de la diffraction

Le caractère fictif des sources secondaires a entraîné la recherche d'approches plus physiques de la diffraction en s'appuyant sur les phénomènes apparaissant sur les bords de l'ouverture. Young (1802) avait déjà pensé expliquer la diffraction par les interférences entre l'onde transmise « géométriquement » et une onde diffusée par les bords de l'obstacle. Différents chercheurs (Maggi 1888, Maey 1893, Sommerfeld, Rubinowicz 1917, Kottler : théorie de Young-Maggi-Rubinowicz 1923, Miyamoto et Wolf 1962) ont poursuivi l'idée de Young et lui ont donné des assises théoriques plus solides, en montrant qu'elle pouvait

correspondre à une formulation différente de la théorie de Kirchhoff : l'intégrale de surface portant sur la surface de l'ouverture est remplacée par une intégrale de contour portant sur le contour de l'ouverture (Ganci 1997). Il existe également une théorie géométrique de la diffraction proposée par Keller (1962) qui suppose l'existence de « rayons diffractés » issus de certains points de l'obstacle-même et qui sont régis par des lois analogues à celles de l'optique géométrique. Cette théorie permet de traiter des cas trop complexes pour d'autres approches.

Selon Dettwiller (1990), les rayons diffractés de la théorie géométrique de Keller et ceux de la théorie de Maggi-Rubinowicz n'ont pas plus d'existence réelle que les rayons d'ondelettes du principe d'Huygens-Fresnel.

Une autre approche repose sur la possibilité de considérer le champ comme résultant d'une superposition d'ondes planes se propageant dans différentes directions. Il est alors question du "spectre angulaire d'ondes planes" (Born et Wolf 1980, Goodman 1972)

Ces approches ne font pas partie des programmes d'enseignement, du moins jusqu'au niveau de la licence. Il semble qu'elles n'éclairaient pas de façon convaincante la notion de rayon lumineux. La dernière d'entre elles conduit d'autre part à des difficultés d'interprétation si l'on veut jeter des ponts entre le spectre angulaire d'onde planes et le principe d'Huygens-Fresnel.

3.5. Diffraction de Fraunhofer

La diffraction de Fraunhofer ne constitue qu'une approximation de la formule de Kirchhoff-Fresnel dans un cas particulier. Il convient toutefois de s'y attarder car de nombreuses situations pratiques peuvent s'y rattacher, notamment celles se rapportant à la formation des images optiques.

En supposant, ce qui est le cas de la plupart des expériences d'optique, que la source et le point d'observation sont suffisamment éloignés de l'ouverture, la formule de Kirchhoff-Fresnel peut s'écrire :

$$U_P = A \iint_{\Sigma} e^{ik(r+r')} d\sigma$$

où A est une constante, Σ la surface de l'ouverture, r et r' respectivement la distance entre le point d'observation (la source ponctuelle) et l'ouverture, $k = 2\pi/\lambda$.

Il s'agit donc d'estimer le terme de phase $k(r+r')$ en fonction de la position (x,y) du point courant sur l'ouverture et des positions du point source et du point d'observation.

Si les points source et d'observation se trouvent très éloignés de l'ouverture (à la limite à l'infini), le terme de phase se réduit alors à une fonction affine de x et y.

Plus précisément, il s'écrit, à une constante multiplicative près :

$$k(r+r') \cong k[(\alpha_s - \alpha_p)x + (\beta_s - \beta_p)y]$$

(α_p, β_p) étant les cosinus directeur de la direction OP, (α_s, β_s) ceux de la direction OS, et O le centre de l'ouverture.

Pour pouvoir négliger les termes quadratiques dans l'expression de la phase, on peut formuler des conditions sur r et r' de façon plus précise en faisant intervenir la longueur de référence à savoir la longueur d'onde.

En supposant la source à l'infini, le terme de phase quadratique peut être négligé si r devient très supérieur à $\frac{\pi r^2}{\lambda}$, a étant la dimension de l'ouverture.

Si nous voulons que cette condition soit réalisée à mieux que 1% près, nous obtenons les valeurs suivantes de r en prenant $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$:
 $r = 6 \text{ m}$ pour $a = 0,1 \text{ mm}$ (dimension possible d'une ouverture diffractante)
 $r = 1600 \text{ km}$ pour $a = 5 \text{ cm}$ (dimension possible de la monture d'une lentille).

Les conditions sur r sont donc très fortes et l'observation doit se faire pratiquement à l'infini.

La diffraction de Fraunhofer repose donc sur l'application du principe d'Huygens-Fresnel à l'infini (ou dans le plan focal d'une lentille). Nous verrons plus loin qu'elle est toutefois fondamentale lors de la formation des images optiques.

Le calcul du champ (de l'amplitude lumineuse) en un point résulte de la superposition des ondes sphériques émises par les sources secondaires, d'étendue ds , de l'ouverture. Observées à l'infini, ces ondes peuvent être considérées comme planes (négliger les termes quadratiques dans l'expression de la phase, revient à négliger la courbure des surfaces d'ondes au point considéré). Il s'agit donc de superposer des ondes planes se propageant dans la même direction. Le calcul de l'amplitude résultante peut conduire, dans le cas d'une ouverture de géométrie relativement simple, une fente par exemple, à une expression de la forme suivante :

$$U = \frac{AF(\theta)}{R} \sin(\alpha R - kR)$$

A étant une constante, R la distance entre le centre de l'ouverture et le point d'observation, F une fonction de l'angle d'émission θ .

Au point d'observation, l'onde diffractée apparaît comme sphérique, modulée en amplitude en fonction de l'angle d'émission.

On doit toutefois garder en mémoire que l'on interprète ici un résultat obtenu en un point donné situé à l'infini. L'onde est en quelque sorte observée d'un point particulier avec une perspective qui peut être trompeuse : cela ne nous dit rien sur la propagation de l'onde diffractée entre l'ouverture et ce point.

En particulier, dans une direction donnée, on ne doit pas en conclure qu'une onde plane est émise par les sources d'Huygens au niveau de l'ouverture pour parvenir au point d'observation (voir annexe 2 p.25). On devra en particulier prendre garde à la schématisation consistant à représenter « l'onde diffractée » dans une direction donnée par un seul "rayon" issu du centre de l'ouverture (voir appendice 3 de l'annexe 2).

4. Formation de l'image d'un objet.

Nous nous plaçons ici dans le cas où le système optique est constitué par une lentille mince convergente dépourvue d'aberrations. Nous supposons également que l'éclairage est monochromatique.

La lentille est capable de donner d'un objet, considéré comme un ensemble de points lumineux, une représentation, appelée image, rappelant directement l'apparence de l'objet.

Nous supposons ici que l'image de l'objet donnée par la lentille est réelle.

Au regard des limites imposées par le phénomène de diffraction, dans quelles mesures l'optique géométrique peut-elle nous aider à comprendre les phénomènes mis en jeu lors de la formation de l'image d'un objet ?

Nous essaierons dans cette partie de rappeler quelques éléments de réponses.

Nous présentons, dans cette partie, deux approches permettant d'introduire la diffraction dans le processus de formation des images.

La première approche (Duffieux 1970) considère l'objet comme un ensemble de points sources et s'attache à trouver une correspondance du type "point à point" entre plan objet et plan image. Mise à part la prise en compte de la diffraction, cette approche est relativement proche du type de démarche utilisée en optique géométrique.

La deuxième approche considère de façon globale l'interaction entre l'onde incidente et l'objet : la formation d'une image est traitée comme un processus d'analyse et de synthèse successives. Vu la prise en compte globale de l'objet, cette approche est fort différente de celle de l'optique géométrique.

4.1. L'objet comme assemblage de points sources

Nous cherchons le champ U_i en un point de coordonnées (x_i, y_i) du plan image.

Le champ $U_j(x_j, y_j)$ est déterminé, en s'appuyant sur la linéarité de l'équation de propagation des ondes, par l'intégrale de superposition suivante :

$$U_i(x_i, y_i) = \iint_{\Sigma} h(x_o, y_o; x_i, y_i) U_o(x_o, y_o) dx_o dy_o$$

Dans cette expression, $U_o(x_o, y_o)$ est le champ immédiatement derrière l'objet au point de coordonnées (x_o, y_o) et $h(x_o, y_o; x_i, y_i)$, réponse impulsionnelle de la lentille convergente, est l'amplitude du champ produit au point (x_i, y_i) par un point source d'amplitude unité situé au point de coordonnées (x_o, y_o) du plan objet.

4.1.1. Réponse impulsionnelle de la lentille

La détermination de la réponse impulsionnelle de la lentille dans un plan quelconque est un problème complexe puisqu'il s'agit alors de décrire le comportement de l'onde sphérique émise au point source (x_o, y_o) et se propageant jusqu'au point d'observation. Cette onde sera à la fois transformée du fait de son passage à travers la lentille et diffractée du fait de l'extension finie de la lentille.

Le fait de se placer dans le plan image conjugué amène à une expression de la réponse impulsionnelle simple se prêtant à une interprétation physique relativement aisée.

La conjugaison entre les plans objet et image, amène à se placer dans le plan où converge l'onde sphérique quittant la lentille. Autour de ce point de convergence, image géométrique du point objet émettant l'onde sphérique, la distribution de l'amplitude lumineuse s'identifie à la figure de diffraction de Fraunhofer de l'ouverture de la lentille. Nous réalisons en quelque sorte une diffraction de Fraunhofer à distance finie. D'où l'importance de la diffraction de Fraunhofer dans l'analyse de la formation des images.

Dans le cadre de l'optique géométrique, la réponse impulsionnelle se réduirait à un « pic » de Dirac centré sur le point objet géométrique. Il existe alors une correspondance point à point rigoureuse entre les points objet et image conjugués : la formation du point image n'est due qu'à la convergence en ce point de l'onde sphérique émise par le point objet.

La prise en compte de la diffraction conduit à attribuer à la réponse impulsionnelle une étendue non nulle, correspondant à celle de la figure de diffraction de Fraunhofer de l'ouverture de la lentille. Pour obtenir le champ U_i en un point (x_i, y_i) du plan image, nous devons donc maintenant sommer les différentes contributions des points objets pour lesquels la réponse impulsionnelle n'est pas nulle.

4.1.2. Relation entre l'objet et l'image

Nous avons jusqu'ici limité notre étude à la réponse impulsionnelle de la lentille. Nous cherchons maintenant une relation plus générale liant les champs de l'objet et de l'image.

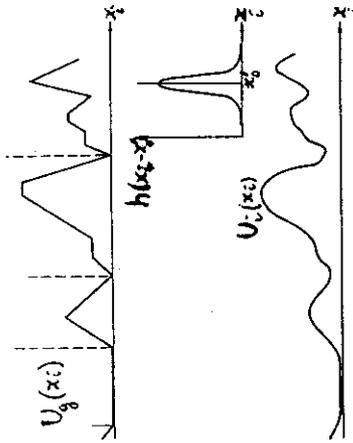
La réponse impulsionnelle de la lentille peut s'exprimer uniquement en fonction des différences $x_i - x'_0$ et $y_i - y'_0$ entre les coordonnées (x_i, y_i) dans le plan image et les coordonnées $x'_0 = Mx_0$ et $y'_0 = My_0$ de l'image géométrique du point objet (x_0, y_0) . M étant le grandissement transversal de la lentille. Le système optique, constitué ici par la lentille, est dit spatialement invariant. Cette propriété conduit à une relation simple entre l'objet et son image.

En effet, le champ $U_i(x_i, y_i)$ peut alors se mettre sous la forme :

$$U_i(x_i, y_i) = A \iint_{\Sigma} h(x_i - x'_0, y_i - y'_0) \left[-\frac{1}{M} U_0 \left(-\frac{x_i}{M}, -\frac{y_i}{M} \right) \right] dx_0 dy_0$$

Le deuxième terme sous l'intégrale s'identifie à l'image de l'objet au sens de l'optique géométrique que nous notons $U_g(x_i, y_i)$.

Le champ $U_i(x_i, y_i)$ apparaît alors comme la convolution de la réponse impulsionnelle h et de l'image au sens de l'optique géométrique (voir figure 4).



Champ dans le plan image comme résultat de la convolution de la réponse impulsionnelle de la lentille et de l'image géométrique

Figure 4

Dans le cadre de l'optique géométrique, l'image obtenue à l'aide de la lentille est une réplique exacte de l'objet, homothétique dans le plan image. Par suite des effets de la diffraction, l'image obtenue est une version « dissée » de l'objet, pouvant fortement affecter les détails les plus fins de l'objet.

Remarque 1

Nous nous ne sommes penchés jusqu'ici que sur le cas d'une lentille mince convergente. On peut étendre les résultats présentés à des systèmes optiques plus complexes pourvu qu'ils possèdent les propriétés de linéarité et d'invariance spatiale.

A l'étendue finie de la lentille, source de la diffraction dans l'approche précédente, se substitue dans le cas général l'étendue finie de la pupille d'entrée ou de la pupille de sortie, conjuguée de la première. La pupille d'entrée définit l'ouverture du faisceau incident, la pupille de sortie celle du faisceau émergent.

Nous pouvons reprendre les résultats obtenus dans le cas où le système est constitué d'une seule lentille mince :

- la réponse impulsionnelle du système représente la figure de diffraction de Fraunhofer de la pupille de sortie centrée au point image géométrique ;

- l'image résulte de la convolution de l'image prévue par l'optique géométrique et de la réponse impulsionnelle du système.

Le traitement proposé de la formation des images repose ici sur une correspondance (rigoureuse, autant que le stigmatisme du système optique le permette, dans le cas de l'optique géométrique, "approchée" lorsque la diffraction est prise en compte) entre points conjugués objet et image. L'objet est pensé comme un ensemble de points sources d'amplitude et de phase variable $U_0(x_0, y_0)$. Chacun de ces points sources engendre, d'après la propriété de linéarité, sa propre image. Cette image n'est plus ponctuelle mais représente la figure de diffraction de Fraunhofer de la pupille de sortie du système centrée sur le point image géométrique. L'image de l'objet peut alors être pensée comme une superposition des figures de diffraction de chacun des points objets sources. Chaque figure d'un point objet est centrée sur le point image conjugué au sens de l'optique géométrique et "modulée en amplitude" par la valeur du champ objet en ce point.

Notons qu'il n'est à aucun moment fait mention de l'interaction entre le faisceau incident et l'objet. Aucune hypothèse n'est faite sur la nature de l'objet (objet diffractant ou non, objet d'amplitude, de phase). Nous nous donnons uniquement l'expression $U_0(x_0, y_0)$ du champ juste derrière l'objet, la prise en compte explicite de la diffraction n'intervenant que du fait de l'extension finie de l'ouverture du système optique.

La deuxième approche présentée ci-après aborde différemment la formation de l'image d'un objet en considérant de façon globale l'interaction de l'onde incidente et de l'objet.

Remarque 2

Nous n'avons pas utilisé jusqu'ici les manipulations relatives à l'optique de Fourier. La mise en évidence de la relation de convolution donnant l'image d'un objet invite à les faire intervenir. En effet, la convolution de la réponse impulsionnelle du système et de l'image géométrique est une opération complexe alors que dans l'espace de Fourier, elle se réduit à la multiplication des transformées de Fourier de chacun des termes :

$$T.F.(U_i) = T.F.(h) \times T.F.(U_g)$$

L'introduction des transformées de Fourier permet donc des traitements mathématiques plus simples et en particulier l'introduction de la fonction de transfert comme transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle du système.

Remarque 3

Si l'éclairage est incohérent, la relation entre l'objet et l'image ne porte plus sur les champs mais sur les intensités lumineuses. La convolution sur les champs en éclairage cohérent est remplacée par une convolution sur les intensités en éclairage incohérent.

4.2. Formation d'une image et optique de Fourier

Cette approche a été principalement initiée par les travaux d'Abbe (1870) portant sur la formation des images en microscopie. Elle prend en compte la structure spatiale de l'objet pour lui appliquer les traitements de l'analyse de Fourier.

4.2.1. Transmittance d'un objet

La structure spatiale de l'objet est donnée par sa transmittance qui caractérise la façon dont l'objet affecte la lumière incidente. Elle s'exprime par une fonction complexe $t(x, y)$.

Dans de nombreux cas, l'objet est éclairé par une onde plane de lumière monochromatique (laser par exemple), en incidence normale. Nous nous plaçons donc dans cette situation.

Suivant les variations de $t(x, y)$, l'objet peut être diffractant (on parle également d'objet diffusant) ou non. Si la fonction $t(x, y)$ varie de manière appréciable sur une distance devant laquelle la longueur d'onde de la lumière n'est pas négligeable, l'approximation de l'optique géométrique n'est plus valide et la diffraction par l'objet de l'onde incidente doit être prise en compte.

En suivant l'analyse de Fourier, une fonction $g(t)$, dépendant de la variable temporelle t , peut être décomposée en une somme (finie ou infinie suivant le caractère périodique ou non de la fonction g) de fonctions complexes dépendant d'une variable fréquentielle f , pondérée par la composante spectrale $G(f)$.

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{-j2\pi ft} df$$

De même, la transmittance $t(x, y)$ de l'objet peut être décomposée en une somme de fonctions complexes dépendant des fréquences spatiales f_x, f_y , pondérées par la composante spectrale $T(f_x, f_y)$.

Soit

$$t(x, y) = \iint_{\infty} T(f_x, f_y) e^{-j2\pi(f_x x + f_y y)} df_x df_y$$

Nous pouvons également écrire

$$T(f_x, f_y) = \iint_{\infty} t(x, y) e^{j2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy$$

$T(f_x, f_y)$ est définie comme la transformée de Fourier de $t(x, y)$. De même, $t(x, y)$ est la transformée de Fourier inverse de $T(f_x, f_y)$.

Cette formulation constitue la base de développements mathématiques sur lesquels s'appuie l'optique de Fourier.

4.2.2. Transformation de Fourier et diffraction de Fraunhofer

Revenons à l'expression donnant la diffraction de Fraunhofer par une ouverture en un point P défini par les coefficients directeurs α_P et β_P . Si l'onde incidente est monochromatique, plane et d'incidence normale, elle s'écrit à une constante multiplicative près:

$$U(P) = \iint_{\Sigma} e^{jk(\alpha_P x + \beta_P y)} dx dy$$

Soit

$$t(t, P) = \iint_{\Sigma} e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy \text{ avec } k_x = k \alpha_P \text{ et } k_y = k \beta_P$$

Si nous plaçons au niveau de l'ouverture un objet de transmittance $t(x, y)$, celui-ci affecte le faisceau incident et la valeur du champ au point P est alors donnée par :

$$U(P) = \iint_{\Sigma} t(x, y) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy$$

(on peut étendre l'intégration à l'infini puisque $t(x, y)$ est nulle en dehors de l'ouverture)

Nous constatons que le champ au point P est la transformée de Fourier de la transmittance de l'objet. A chaque point P, situé à l'infini, est associée une direction définie par les cosinus directeurs $\alpha = \mathcal{A}_x$ et $\beta = \mathcal{A}_y$. Autrement dit, à chaque point P, sont associées les fréquences spatiales f_x et f_y . En se plaçant dans le plan focal d'une lentille (dont on suppose l'extension infinie), à chaque point $P(x, y, z)$ du plan focal correspondent les fréquences spatiales f_x et f_y , avec $f_x = x'/\mathcal{A}_x, f_y = y'/\mathcal{A}_y$ et f distance focale de la lentille.

La diffraction par la lentille peut s'analyser ici en termes de fréquences spatiales. Les détails fins de l'objet conduisent à des valeurs non négligeables de l'amplitude lumineuse correspondant à des fréquences spatiales élevées, c'est-à-dire à des points $P(x, y, z)$ éloignés de l'axe du système. On comprend alors que les dimensions finies de la lentille ne permettant pas de construire les points P trop excentrés, la lentille constitue en quelque sorte un filtre passif entraînant une perte des détails les plus fins de l'objet au niveau de l'image.

Rappelons qu'en aucun cas le principe d'Huygens-Fresnel ne permet de dire que l'ensemble des ondelettes émises par l'objet dans une direction donnée, constitue une onde plane se propageant de l'objet au point d'observation.

De même, il faut prendre garde à l'interprétation de la transmittance de l'objet donnée à partir d'une transformée de Fourier inverse :

$$t(x, y) = \iint_{\infty} T(f_x, f_y) e^{j2\pi(f_x x + f_y y)} df_x df_y$$

La décomposition de Fourier de la transmittance dans le plan $z = 0$ en une somme de fonctions complexes dépendant des fréquences spatiales f_x, f_y , pondérées par la composante spectrale $T(f_x, f_y)$ ne pose pas de problème ; il ne s'agit ici que de mettre en oeuvre un traitement mathématique.

Par contre, l'identification du terme exponentiel complexe à une onde plane se propageant dans la direction de cosinus directeurs $\mathcal{A}_x, \mathcal{A}_y$, est fortement sujette à caution si elle s'appuie sur le principe d'Huygens-Fresnel. En effet, l'identification de la composante

spectrale $T(f_x, f_y)$ à l'amplitude lumineuse au point $P(x, y)$ suppose l'utilisation du principe d'Huygens-Fresnel dans les conditions de la diffraction de Fraunhofer. Cette identification n'est donc valide qu'à l'infini ou dans le plan focal image de la lentille. La connaissance du champ dans les plans objet et focal image de la lentille ne permet pas, dans ces conditions, de conclure quant à sa propagation entre ces plans.

4.2.3. Formation de l'image d'un objet comme double transformation de Fourier

La théorie d'Abbe de la formation des images s'appuie sur deux transformations successives : une analyse de Fourier dans le plan focal image de la lentille, puis une synthèse de Fourier dans le plan image.

Nous savons que la lentille permet d'obtenir dans son plan focal image la transformée de Fourier de la transmittance de l'objet. Il s'agit donc d'une analyse de Fourier suivant les fréquences spatiales de l'objet.

Chacun des points du plan focal image peut être considéré comme une source d'Huygens. Du fait de la conjugaison optique des plans objet et image, les ondelettes émises vont interférer constructivement dans le plan image pour donner l'image de l'objet procédant en quelque sorte à une synthèse de Fourier.

Le développement de l'optique de Fourier est dû essentiellement aux facilités de calcul qu'apporte l'utilisation des transformées de Fourier et aux nombreuses applications du traitement des images tel le filtrage optique dans le plan de Fourier.

4.3. Equivalence mathématique des deux approches : correspondance « point à point » et double transformation de Fourier

Les deux approches présentées donnent heureusement le même résultat, à savoir que l'on obtient bien dans les deux cas la "bonne" image de l'objet.

Nous montrons ici de façon très concise l'équivalence mathématique des deux approches.

La théorie d'Abbe de la formation des images étant présentée en éclairage cohérent, nous nous placerons uniquement ici dans ce cas.

Selon la première approche, l'image est obtenue comme la convolution du champ dans le plan objet par l'intermédiaire de la transmittance de l'objet (à une homothétie près, c'est aussi le champ de l'image géométrique de l'objet) et de la réponse impulsionnelle h de la lentille. Cette dernière représente la figure de diffraction de Fraunhofer de l'ouverture P de la lentille, soit la transformée de Fourier de celle-ci.

Nous pouvons donc écrire :

$$image = objet \otimes h$$

Soit :

$$image = objet \otimes T.F.(P)$$

où \otimes symbolise le produit de convolution et $T.F.$ la transformation de Fourier.

Selon la deuxième approche, nous obtenons dans le plan de Fourier, plan focal image de la lentille, la figure de diffraction de Fraunhofer de l'objet, soit la transformée de Fourier de l'objet, limitée par l'ouverture P de la lentille.

Soit :

$$T.F.(objet) \times P$$

Pour obtenir ensuite l'image de l'objet, nous devons opérer une nouvelle transformation de Fourier.

Nous pouvons donc écrire :

$$image = T.F.[T.F.(objet) \times P]$$

Soit, en utilisant le théorème de convolution :

$$image = T.F.[T.F.(objet) \otimes T.F.(P)]$$

Soit, enfin :

$$image = objet \otimes h$$

Les deux formulations sont donc mathématiquement équivalentes.

4.4. Conclusion sur la formation de l'image d'un objet

L'imagerie est un domaine très riche puisque, outre l'importance des applications pratiques, elle réunit une grande partie des problèmes soulevés par l'utilisation conjointe des deux modèles géométrique et ondulatoire.

A quelques exceptions près (pour la plupart, sans doute, des cas d'école) le phénomène de diffraction est omniprésent lors de la formation d'une image optique, du fait du caractère diffractant lié à la structure de l'objet et / ou à cause de l'ouverture finie du système optique.

Nous avons alors souligné l'importance de la conjugaison optique entre plans objet et image. Le stigmatisme du système optique permet en effet de se replacer, de façon quelque peu détournée, dans le cadre d'application de l'optique géométrique. Nous avons montré, dans ces conditions, l'intérêt d'analyser la situation en termes de regroupements de tracés. Si l'objet est considéré comme un ensemble de points sources, la correspondance point à point entre plans objet et image permet de penser chaque rayon issu d'un point de l'objet comme appartenant à l'onde sphérique émise de ce point et d'utiliser les résultats de l'optique géométrique. Le regroupement de tracés suivant une direction donnée, regroupement typique de l'optique de Fourier, ne repose plus sur cette correspondance et ne constitue pas en quelque sorte une onde. L'optique géométrique ne permet alors que de déterminer la marche de chacun de ces rayons individuellement. Ce sont sur ces points que se fonde l'analyse que nous avons proposée dans ce travail.

Références

- Born, M. et Wolf, E. (1980) *Principles of Optics. Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, Sixth Edition, Pergamon Press, Oxford.
- Dettwiller, L. (1990) *Qu'est-ce que l'optique géométrique ? Fondements et applications*, Collection Dunod Université, Bordas, Paris.
- Duffieux, P.M. (1970) *L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique*, Masson, Paris.
- Ganci, S. (1997) Boundary diffraction wave theory for recilinear apertures, *European Journal of Physics*, 18, pp. 229-236.
- Goodman, J.W. (1972) *Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie*, Masson, Paris.
- Keller, J.J. (1962) Geometrical theory of diffraction, *J. Opt. Soc. Am.*, 52, pp. 116-30.
- Sommerfeld, A. (1967) *Optics. Lecture on theoretical physics*, Vol IV, Academic Press, New-York, London.
- Young, T. (1802) On the theory of light and colours, *Phys. Trans. R. Soc.*, 20, pp 12-48.

Annexe 2 Analyse de manuels

(Ce travail, encadré par L. Viennot, a été présenté en février 1997 dans le cadre d'un tutorat intitulé *Passage de l'optique géométrique à l'optique ondulatoire : l'idée de sélection par l'aval de l'information lumineuse*, pour l'obtention du D.E.A. de Didactique des disciplines de l'université Paris 7).

Sommaire

Introduction

- I. Problématique
- II. Méthodologie
- III. Plan d'étude

p. 1
p. 2
p. 4

A. Transition entre les modèles géométrique et ondulatoire

I. Introduction du modèle du rayon lumineux

- 1. Niveau secondaire
 - a. Le modèle du rayon lumineux
 - b. Grandeur physique associée au rayon lumineux
 - c. Limites du modèle du rayon lumineux
- 2. Niveau universitaire
 - a. Les différentes approches
 - b. Notion de surface d'onde
 - c. Définition du rayon lumineux
 - d. Grandeur physique associée au rayon lumineux
 - e. Limites du modèle du rayon lumineux
 - f. Conclusion
- 3. Comparaison entre les niveaux secondaire et universitaire

p. 5
p. 5
p. 5
p. 6
p. 6
p. 6
p. 7
p. 9
p. 9
p. 10
p. 11
p. 11

II. Liens établis entre les modèles géométrique et ondulatoire

- 1. Niveau secondaire
- 2. Niveau universitaire
- 3. Conclusion

p. 11
p. 12
p. 13

III. Statut du rayon en optique ondulatoire

- 1. Mise au point
- 2. Préliminaire concernant la symbolisation en optique géométrique
- 3. Rayon et optique ondulatoire
 - a. Niveau secondaire
 - 1. Diffraction
 - 2. Interférences

p. 13
p. 14
p. 15
p. 15
p. 15
p. 16

- 3. Réseau
- 4. Conclusion
- b. Niveau universitaire
 - 1. Interférences
 - 2. Diffraction par une ouverture
 - 3. Dispositifs d'Young
 - 4. Réseau
 - 5. Conclusion

p. 19
p. 20
p. 20
p. 20
p. 23
p. 26
p. 28
p. 29

IV. Déviation et optique ondulatoire

- 1. Niveau secondaire
- 2. Niveau universitaire
 - a. Places relatives des spectromètres à prisme et à réseau
 - b. Etude théorique des réseaux
 - c. Etude des spectromètres
 - d. Conclusion

p. 29
p. 30
p. 31
p. 31
p. 31
p. 32
p. 34

B. Sélection des rayons. Sélection par l'aval.

I. Niveau secondaire

II. Niveau universitaire

- 1. Sélection des rayons
- 2. Sélection par l'aval
 - a. Situations de type géométrique
 - b. Situations de type ondulatoire
- 3. Conclusion

p. 35
p. 36
p. 36
p. 37
p. 37
p. 39
p. 41

C. Conclusions et perspectives

Bibliographie

Appendices

p. 42
p. 44

Introduction

Ce tutorat, proposé par L. Viennot, a été initié par des enquêtes préliminaires effectuées auprès d'étudiants engagés dans différents cycles d'étude (licence, B.T.S. d'optique, I.U.F.M., classe de Mathématiques Spéciales Technologiques) et prend appui sur le document interne rédigé par L. Viennot (voir appendice 1) *Le rayon lumineux en optique géométrique et en optique ondulatoire*.

I. Problématique

Le cadre général de cette étude porte sur l'analyse des difficultés dans le passage d'un modèle à un autre et l'accès à une vision unifiée d'un champ disciplinaire. Les domaines envisagés ici sont ceux de l'optique géométrique et de l'optique ondulatoire (souvent qualifiée également de physique ondulatoire ou d'optique physique) : les modèles géométrique et ondulatoire permettent, dans chacun de ces domaines, d'interpréter les phénomènes optiques (hormis ceux relevant d'un modèle corpusculaire). Le modèle géométrique s'appuie sur le concept de rayon lumineux ; le modèle ondulatoire sur celui d'onde. Laurence Viennot définit dans l'appendice 1 le cadre de référence, adaptation au niveau des élèves et étudiants d'une théorie complexe, sur lequel s'appuie l'étude présentée.

Bien qu'initée par des difficultés de compréhension des étudiants, l'étude ne porte pas ici sur leur analyse mais se limite à celle de manuels. Elle s'articule autour de deux questions centrales.

La première se réfère au cadre général énoncé plus haut : **les manuels sont-ils explicites sur les points communs et les différences entre les deux modèles ?** Cette question recouvre à la fois le problème de la transition d'un modèle à un autre (concepts communs, limites de validité d'un concept, nouvelle acception d'un concept, concepts nouveaux) et de la vision unifiée d'un domaine (articulation et cohérence des deux modèles).

La deuxième porte sur un sujet plus spécifique, subordonné à la première question : **les manuels favorisent-ils l'idée de sélection, par le récepteur, de l'information lumineuse, en d'autres termes l'idée de sélection d'un sous-ensemble de rayons parmi un ensemble ?** Plus précisément, l'idée de sélection amène à résoudre le problème suivant : déterminer parmi l'ensemble des rayons d'ondelette (ou des rayons lumineux s'il s'agit d'une situation purement géométrique) issus d'un objet, ceux qui convergent au point d'observation considéré. Suivant celui-ci (ou le plan d'observation, si les phénomènes sont du même ordre dans ce plan), les regroupements des rayons sont très différents (image géométrique de l'objet ou figure de diffraction par exemple). C'est donc la position du plan d'observation qui décide du type de phénomènes à prendre en compte, phénomènes relevant par "tradition" de l'optique géométrique ou de l'optique ondulatoire : il s'agit d'une sélection par l'aval des rayons qui convergent en un point donné.

Ce thème nous dictait d'aborder la première question, plus large. En effet, la sélection qu'effectue le récepteur, c'est aussi, au niveau de l'analyse, l'indication d'utiliser un modèle géométrique ou ondulatoire - plutôt que l'autre. Or, on ne peut atteindre une certaine "mobilité" dans cet usage de modèles qu'en maîtrisant les limites de chacun et les passerelles qui les joignent.

Les recherches en didactique touchant au domaine de l'optique portent essentiellement sur les conceptions de la lumière dans le cadre de l'optique géométrique, à un niveau le plus souvent élémentaire^{1,2,3,4,5,6,7,8}. Nous relevons également les travaux portant sur les raisonnements concernant la propagation des signaux mécaniques^{9,10,11,12}. A noter l'article¹³ portant sur les difficultés des élèves à comprendre la notion de phase d'une onde progressive et notamment la notion de surface d'onde. Toutes ces études se situent au niveau de l'analyse des conceptions ou raisonnements des apprenants. Ces aspects ne seront pas envisagés dans la présente étude, celle-ci s'appuyant essentiellement sur une analyse de contenu des manuels d'enseignement.

Peu de références bibliographiques ont été trouvées concernant les aspects didactiques de l'enseignement de l'optique envisagé d'un point de vue global, incluant les modèles géométrique et ondulatoire. Certains auteurs^{14,15} constatent le manque de passerelles entre les modèles géométrique et ondulatoire enseignés à un niveau élémentaire et, par conséquent, la transition difficile entre eux-ci. D'autres^{16,17,18,19} proposent des analyses plus fines basées principalement sur la notion de transfert d'information qu'ils appliquent en particulier à la formation d'image (codage de l'information par la phase de l'onde^{16,17}). Celle-ci est alors analysée en termes ondulatoires (diffraction et interférence). Ce traitement permet de réunir au sein d'un même dispositif des aspects liés aux deux domaines de l'optique (image d'un objet et figure de diffraction par exemple). L'insistance des auteurs à vouloir montrer l'utilisation conjointe des modèles introduits en optique se reporte souvent sur l'analyse des fonctions assurées par une lentille¹⁸ (déviation des rayons dans le cadre du modèle géométrique, transformation de phase de l'onde dans le cadre du modèle ondulatoire) ou sur l'application de formules d'optique géométrique¹⁹ (déviation par un prisme, formule de conjugaison d'une lentille) dans des situations typiquement ondulatoires (optique de Fourier).

La transition de l'optique géométrique à l'optique ondulatoire n'a donc pas fait l'objet d'étude didactique approfondie et les auteurs se limitent le plus souvent à un constat qui souligne le manque de cohérence des modèles proposés. Les études sur les modèles ont principalement porté sur l'épistémologie des modèles, leurs fonctions didactiques et les difficultés liées à leur construction progressive par les apprenants^{20,21,22}, aspects que n'abordons pas directement dans le cadre très limité de ce travail. Quant à l'idée de sélection par l'aval de l'information lumineuse, bien que présente implicitement dans les références citées relatives à l'optique, elle n'est jamais clairement énoncée.

II Méthodologie

Cette étude s'appuie sur une analyse de contenu des manuels suivants :

- niveau secondaire (enseignement obligatoire de Terminale S)
Dubod, C., Dulac, Y., Fromont, J.C., Garay, B., Nordmann, J. 1995. *Physique Terminale S*, Collection D. Secrétan, Didier. (1s)*
- Le cardonnel, J.P., Bouland, A., Cauwet, J., Mercier, B., Lagullier, J.M., Paul, J.C. 1995. *Physique Terminale S*, Collection Galileo, Bordas. (2s)
- Durandau, J.P., Bramand, P., Faye, Ph., Martegouttes, R., Sahun, R., Thomassier, G. 1995. *Physique Terminale S*, Collection Durandau, Hachette Livre. (3s)
- Grossetête, C., Bouyrie, G., Déjous, C., Marsan, D. 1995. *Physique Terminale S*, Belin. (4s)

Tomasino, A., Fauris, M., Parent, C., Patigeon, F., Simon, C. 1995. *Physique Terminale S enseignement obligatoire*, Nathan. (5s)

- niveau premier cycle universitaire

Annequin, R., Boutigny, J. 1973 *Optique mathématiques supérieures, Cours de Sciences Physiques*, 2ème édition, Vuibert, Paris. (1u)

Annequin, R., Boutigny, J., 1974. *Optique 2, Cours de Sciences Physiques*, Vuibert, Paris. (1u)

Berth, M., Faroux, J.P., Renault, J. 1986. *Optique et physique ondulatoire optique géométrique et optique physique phénomènes de propagation*, Cours de physique, 3ème édition, Bordas, Paris. (2u)

Levy, J.-C., S., Lazzarini, S., Numa, E. 1993. *Optique géométrique et physique. Ondes*, Edition Marketing, Paris. (3u)

Gouzerh, J., Perreau, M. 1996. *Optique géométrique*, Collection Pavages, Diderot Editeur, Arts et sciences, Paris. (4u)

Gouzerh, J., Perreau, M. 1996. *Optique ondulatoire*, Collection Pavages, Diderot Editeur, Arts et sciences, Paris. (4u)

Quaranta, L. 1996. *Optique*, Collection Amph Sciences, Masson, Paris. (5u)

Pérez, J.P. 1994. *Optique géométrique et ondulatoire*, Collection Enseignement de la physique, 4ème édition, Masson, Paris. (6u)

* : référence, dans le texte, du manuel ou des auteurs, "s" pour secondaire, "u" pour universitaire

Les manuels du secondaire choisis sont conformes aux programmes officiels de terminale S de 1995 et regroupent les principales maisons d'édition. Il n'a été retenu que des manuels de niveau Terminale puisque le modèle ondulatoire n'est introduit de façon relativement précise qu'à ce niveau.

Les manuels choisis au niveau du premier cycle universitaire (licence pour 6u) sont de deux types :

- des "classiques" réédités depuis de nombreuses années (1u, 1'u, 2u, 6u),
- des ouvrages récents (3u, 4u, 4'u, 5u).

Les premiers figurent dans les bibliothèques ouvertes aux étudiants (notamment à la bibliothèque Physique-Enseignement de l'Université Paris 7) et sont donc régulièrement consultés.

Le temps accordé à cette analyse n'a pas permis de montrer la pertinence d'outils menant à une analyse lexicale quantitative fine. L'analyse reste donc purement qualitative et à caractère thématique.

Le document de L. Viennot (appendice 1) a permis, dans un premier temps, de dégager des thèmes d'étude, en s'appuyant sur un cadre de référence, et une première lecture "flottante" de relever les éléments (textes et / ou schémas) pertinents. Nous avons procédé ensuite à un affinement des thèmes pour construire le plan d'étude et à un repérage de certains éléments liés au lexique (emploi du mot "rayon") et à la symbolisation (utilisation des tracés rectilignes fléchés sur les schémas).

III. Plan d'étude

Cette étude comporte trois parties A, B et C.

La partie A porte sur la transition entre les modèles optique et ondulatoire, première question centrale de la problématique.

Elle s'articule autour de quatre axes :

- introduction du modèle du rayon lumineux (A.I.),
- liens établis entre modèle géométrique et modèle ondulatoire (A.II.),
- statut du "rayon" en optique ondulatoire (A.III.),
- "déviation" et optique ondulatoire (A.IV.).

La partie B traite de la "sélection par l'aval", deuxième question centrale de la problématique. Cette idée, non transparente dans les manuels analysés, touche un grand nombre de situations "classiques" de l'optique que celles-ci soient de nature purement géométrique ou typiquement ondulatoire. Ce sera d'ailleurs l'occasion de montrer qu'une telle catégorisation n'est pas toujours fondée et, par là-même, de conduire à une vision plus unifiée de l'optique.

Les thèmes d'étude sont traités pour les deux niveaux, secondaire et universitaire. On s'attachera à comparer les traitements mis en oeuvre à chacun des deux niveaux pour en tirer quelques conclusions relatives à la continuité de l'enseignement.

La partie C conclue cette étude quant au contenu des manuels relativement à la problématique posée, en s'efforçant de lancer quelques pistes de réflexion didactique dans le prolongement de ce travail.

A. Transition entre les modèles géométrique et ondulatoire

La transition entre les deux modèles est conditionnée par la façon dont est introduit le modèle du rayon géométrique. Nous commencerons donc par analyser l'introduction de ce modèle.

I. Introduction du modèle du rayon lumineux

Cette introduction se fait de manière totalement différente aux niveaux secondaire et universitaire puisque les enseignements ne peuvent s'appuyer ni sur les mêmes bases conceptuelles, ni sur le même formalisme mathématique (l'optique géométrique est introduite en classe de seconde).

1. Niveau secondaire

Le programme obligatoire de Terminale S porte sur les modèles ondulatoire et corpusculaire de la lumière. Il n'est donc fait qu'un rappel de l'optique géométrique enseignée en classe de seconde, pour en donner les limites et introduire l'optique ondulatoire.

a. Le modèle du rayon lumineux

Dans l'ensemble des manuels analysés, le rayon lumineux est défini, de manière implicite, à partir du "principe fondamental" de la propagation rectiligne de la lumière dans un milieu homogène (5s). Dans ces définitions, on retrouve donc les termes de trajet ou trajectoire, de propagation et de lumière :

"Généralement, la lumière se propage rectilignement. Les sources lumineuses émettent des faisceaux lumineux assez larges. On peut obtenir des pinceaux lumineux en réduisant les dimensions transversales des faisceaux, à l'aide de diaphragmes." (1s)

"La lumière se propage suivant des trajectoires déterminées que l'on nomme rayons lumineux." (2s)

"En classe de seconde, nous avons assimilé le faisceau parallèle et très étroit d'un laser à un rayon lumineux. En outre, nous avons utilisé le principe de propagation rectiligne de la lumière [...]. Dans un tel milieu, les rayons lumineux sont rectilignes." (3s)

"La lumière se propage en ligne droite dans le vide comme dans un milieu transparent homogène. Un rayon lumineux matérialise sa direction de propagation" (4s)

Seul (2s) mentionne un trajet non rectiligne via une expérience photographiée, sans aucun autre commentaire que la non homogénéité du milieu.

L'idée de modèle se manifeste plus ou moins clairement. Elle est plutôt simplement énoncée dans (2s) et (3s) : *"Les limites du modèle du rayon lumineux"*. Elle transparaît au travers de certaines expressions :

"L'idée vient donc d'associer à un pinceau de lumière de très faible section, une courbe mathématique sans "épaisseur", le rayon lumineux." (1s)

"Le rayon lumineux est l'outil fondamental de l'optique géométrique." (5s)

b. Grandeur physique associée au rayon lumineux

Le rayon lumineux n'est pratiquement jamais associé à une grandeur physique, la "lumière" ne pouvant être considérée comme telle.

Seul (4s) associe rayon lumineux et énergie lumineuse : *"Un rayon lumineux matérialise la direction de l'énergie lumineuse"*. Cette association se fait en s'appuyant sur les ondes à la surface d'un liquide : *"Une vague transporte de l'énergie avec une célérité c finie mais ne transporte pas de matière. Nous admettrions que ces propriétés sont communes à tout phénomène ondulatoire. (...) Un rayon est la direction de propagation de l'énergie transportée par une onde depuis la source S, supposée ponctuelle, jusqu'à un point M d'observation."*

Le problème du "partage" du rayon lumineux à la surface de séparation de deux milieux (lois de Descartes) ne soulève aucun commentaire. Comment un rayon lumineux unique peut-il se "partager" en deux rayons ?

Seul (1s) insiste sur le principe d'indépendance des rayons lumineux, surtout mis en oeuvre pour la construction des images, en le traitant comme une loi fondamentale de l'optique géométrique, sans donner plus de précision sur ce que recouvre ce terme d'indépendance (non "interférence entre rayons" , isolabilité des rayons).

c. Limites du modèle du rayon lumineux

Dans tous les manuels, les expériences de diffraction sont utilisées pour mettre en évidence les limites du modèle. Le problème posé réside dans la possibilité pratique d'isoler un rayon lumineux en réduisant les dimensions d'une ouverture. Dans ce cadre, le mot d'indépendance des rayons lumineux n'est jamais employé.

Les auteurs (1s), (2s), (3s), (4s) s'accordent pour dire que, outre le problème de l'isolabilité d'un rayon lumineux, les expériences de diffraction mettent en défaut le principe de propagation rectiligne de la lumière sur lequel repose le modèle présenté du rayon lumineux. (5s) formule ce point différemment : *"la propagation est rectiligne avant, puis après le trou"*. Cet énoncé ne dit rien sur la nature de l'"objet" qui se propage et s'il s'agit du même objet avant et après le trou. D'autre part, le modèle du rayon lumineux ne permet évidemment pas d'interpréter la figure de diffraction comme le souligne (3s) : *"L'optique géométrique ne permet d'expliquer ni l'élargissement de la tache lumineuse, ni la formation d'anneaux et de franges."*

2. Niveau universitaire

Après une lecture rapide des manuels d'optique à la disposition des étudiants à la bibliothèque physique-enseignement de l'université Denis Diderot Paris VII, nous avons constaté la diversité des approches du concept de rayon lumineux adoptées dans ces manuels. Nous avons retrouvé ces différentes approches dans les manuels analysés.

a. Les différentes approches

Trois approches différentes (voir tableau 1) ont été repérées :

- une approche ondulatoire (a) de type formelle dans laquelle le rayon lumineux est introduit à partir d'un concept d'onde associée à une expression mathématique,

- une approche pseudo-ondulatoire (b) utilisant comme base le principe de Huygens (voir appendice 2),
- une approche géométrique (c) se basant sur le principe de Fermat (voir appendice 2).

approche (a)	approche (b)	approche (c)
(1u) (2u)	(2u) (3u) (6u)	(2u) (4u) (5u)

Tableau 1

Les deux premières approches utilisent de façon plus ou moins forte le concept d'onde à l'inverse de la dernière qui se base presque uniquement sur le concept de rayon lumineux. Ces différentes approches ne sont pas exclusives et l'on peut les retrouver au sein d'un même manuel (ici (2u)).

b. Notion de surfaces d'onde

Cette notion est centrale, d'une part puisqu'en découle la définition explicite du rayon lumineux pour l'approche (a), et puis, d'autre part, elle constitue un lien entre les concepts d'onde et de rayon lumineux dans les trois approches.

Pour l'approche (a), c'est l'expression mathématique de l'onde qui définit les surfaces d'onde comme étant "l'ensemble des points tels que les vibrations y sont égales à un instant donné" (1u). Les ondes prises en compte sont planes ou quasi-planes (en tout point d'une surface équiphasse, existent un plan tangent et son vecteur normal \vec{n} défini par : $\vec{n} = \text{grad}\phi$). Les surfaces d'onde sont alors des surfaces équiphasse, en supposant l'amplitude constante sur un certain domaine (précision donnée par les auteurs).

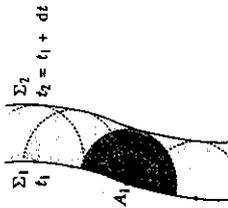


Figure 1

Pour l'approche (b), une surface d'onde est définie comme étant "l'ensemble des points d'égalité de perturbation lumineuse", sans précision supplémentaire, et construite comme surface-enveloppe des ondelettes sphériques émises par les sources secondaires dans un milieu isotrope (principe d'Huygens). (6u) précise la construction pour une onde quelconque sans en préciser la ou les source(s) de cette onde (figure 1).

Ces différentes formulations de la définition d'une surface d'onde ne sont pas claires quant à l'équivalence, jugée ici correcte, entre surface d'onde et surface équiphasse. Si une surface est définie par la constance de la phase de l'onde en chacun de ses points, elle ne correspond pas obligatoirement à une surface isoamplitude comme les auteurs (1) et (2) semblent le supposer. Par conséquent, l'égalité des "vibrations" ou des "perturbations lumineuses" ne permet pas de définir, d'une manière générale, une surface d'onde.

Pour l'approche (c), les surfaces d'onde sont définies en terme d'égalité de chemins optiques (théorème de Malus), pour une source ponctuelle isolée soit à distance finie, soit à

l'infini, c'est-à-dire pour des ondes sphériques ou planes. Par exemple, dans (2u) : "Etant donné une source lumineuse ponctuelle S, on appelle surface d'onde le lieu des points M tels que le chemin optique (SM) soit constant, ce chemin optique étant compté le long d'un rayon lumineux."

La nature de la source (ou des sources) générant les surfaces d'onde n'est souvent pas précisée comme le montrent les figures 1 et 2.

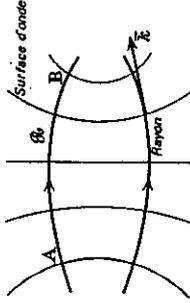


Figure 2

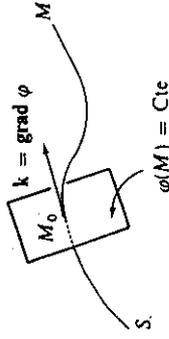


Figure 3

Si, dans la suite des développements, les sources apparaissent, seuls les cas de source ponctuelle isolée à distance finie (correspondant à une onde sphérique dans un milieu homogène : figure 5a, à une onde "quelconque" dans un milieu inhomogène : figures 3 et 4) ou rejetée à l'infini (correspondant à une onde plane ou quasi-plane : figures 3 et 5b) sont donnés.

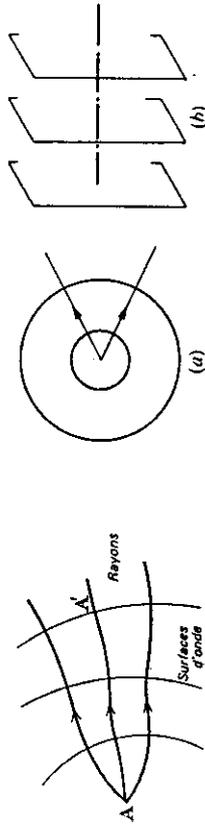


Figure 4

Figure 5

En particulier, on utilise la construction de Huygens pour retrouver les lois de Descartes, lorsque l'onde incidente est plane, dans les manuels (4u), (5u) et (6u) (le principe de Fermat dans le cadre de l'optique géométrique est évidemment suffisant pour établir ces relations).

La construction de Huygens n'a rien d'évident dès que la source n'est plus ponctuelle comme le montre l'exemple de la bougie tiré du Traité de la lumière que l'on trouve dans (2u) (comment construire une surface enveloppe passant par un point donné? Quelle peut être la structure de l'onde résultante?).

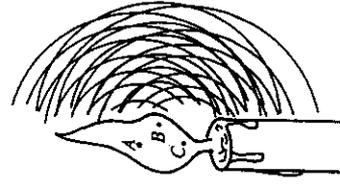


Figure 6

c. Définition du rayon lumineux

Pour l'approche (a), les surfaces d'onde étant données, les rayons lumineux sont définis comme étant les trajectoires orthogonales à ces surfaces.

Nous trouvons donc les définitions suivantes pour des ondes planes ou quasi-planes :

"Nous définissons les rayons lumineux comme les trajectoires orthogonales aux surfaces d'onde : les vecteurs d'onde leur sont tangents en chacun de leurs points. Ils représentent les directions de propagation des ondes, leur sens est celui de \vec{k} ." (1u)

"C'est donc un type assez général d'onde (onde quasi-plane) que l'on peut assimiler localement à une onde plane et finalement à un rayon lumineux dans le cadre de l'optique géométrique. Un rayon lumineux est donc une "ligne de champ" du champ de vecteurs \vec{k} , ligne orthogonale en tout point aux surfaces d'onde et qui doit être, si l'approximation est valable, une ligne de propagation de l'énergie." (2u)

A partir de ces définitions, sont développés la notion de chemin optique et le principe de Fermat.

Pour les approches (b) et (c), le rayon lumineux est défini antérieurement aux surfaces d'onde, soit de façon explicite (4u) comme *"la trajectoire de l'énergie lumineuse"*, soit de façon implicite (2u), (3u), (5u) et (6u) comme le trajet de la lumière. A ce rayon sont appliqués la notion de chemin optique et le principe de Fermat. L'application du principe de Fermat aux rayons se propageant entre deux surfaces d'onde, elles-mêmes définies en terme d'enveloppe ou d'égalité de chemins optiques, implique l'orthogonalité des rayons lumineux à ces surfaces (théorème de Malus).

Remarque : l'établissement des lois de Descartes relatives au comportement d'un rayon lumineux sur la surface de séparation de deux milieux ne suscite aucune remarque ou précision alors que seule une résolution du problème en termes d'ondes réfléchie et transmise permet d'en saisir l'aspect énergétique.

d. Grandeur physique associée au rayon lumineux

Tous les auteurs associent, plus ou moins tôt, de façon plus ou moins nette, formalisée ou non, au rayon lumineux la notion d'énergie lumineuse.

"Les rayons lumineux ont été définis comme les trajectoires orthogonales des surfaces d'onde; la théorie électromagnétique de la lumière montre que cette définition coïncide avec celle, plus générale, qui fait des rayons lumineux les lignes de propagation de l'énergie." (1u)

"Un rayon lumineux est donc une "ligne de champ" du champ de vecteurs \vec{k} , ligne orthogonale en tout point aux surfaces d'onde et qui doit être, si l'approximation est valable, une ligne de propagation de l'énergie" (2u)

"L'explication physique de la minimisation tient à la superposition des ondes et à la concentration de l'énergie sur la trajectoire qui donne lieu à une interférence maximale" (3u)

"dans un milieu isotrope, le rayon lumineux est défini par la droite idéale normale à l'onde suivant laquelle l'énergie lumineuse se propage lorsqu'on néglige la diffraction." (6u)

"Nous appellerons rayons lumineux, les trajectoires de l'énergie lumineuse." (4u)

Si le rayon lumineux est introduit par le concept d'onde, il est alors lié par des considérations géométriques, orthogonalité aux surfaces d'onde (voir A.II.2.b.), à la propagation de l'onde.

(6u) attribue au rayon lumineux un caractère plus spécifique qui est celui de véhicule des ondes lumineuses comme le soulignent les passages suivants :

"...état interférentiel constructif entre toutes les ondes véhiculées par les rayons diffractés qui se rencontrent au point P. Pour cela, il suffit d'égaliser à un nombre entier de longueurs d'onde λ (dans le vide) la différence de chemin optique entre les ondes véhiculées par deux rayons successifs." (6u)

"Dans la direction émergente qui fait l'angle θ avec la normale au réseau, l'amplitude complexe de l'onde résultante est la somme des amplitudes complexes des ondes véhiculées par les rayons inclinés du même angle θ par rapport à la normale au réseau." (6u)

e. Limites du modèle du rayon lumineux

Dans tous les manuels (hormis (1u)), l'optique géométrique (ou le modèle du rayon lumineux présenté dans ce cadre) est déclarée valide tant que les obstacles rencontrés par la lumière sont de dimensions très supérieures à la longueur d'onde.

Certains auteurs ((5u), (6u)) désignent l'optique géométrique comme limite de l'optique ondulatoire pour les très faibles longueurs d'onde.

En fait, les ondes manipulées sont souvent sphériques ou planes et illimitées transversalement, c'est-à-dire celles qui, isolées, se traitent parfaitement par l'optique géométrique.

Un seul auteur (2u) s'interroge sur la signification physique à accorder à ces ondes, qui correspondrait à un transport d'énergie infini et qui reste *"incompatible avec toute condition aux limites réaliste"*. Ce même auteur souligne toutefois que *"d'une part, toute onde (réelle) est mathématiquement décomposable en une superposition d'ondes planes et pour cette superposition, l'énergie transportée reste finie ; d'autre part, dans certaines conditions, une onde réelle peut être valablement représenté localement par une onde plane. C'est cette dernière circonstance qui intervient plus particulièrement en optique géométrique."*

Aucune mise en garde n'est faite concernant l'aspect énergétique du rayon lumineux : même pour des dispositifs interférentiels où l'on peut négliger le phénomène de diffraction, on ne peut plus conserver intégralement, avec son contenu énergétique, la notion de rayon lumineux dans le champ d'interférences (voir appendice 2). Cet aspect sera abordé en détail dans l'analyse thématique relative au statut du "rayon" en optique ondulatoire.

Seuls (2u) et (6u) s'interrogent, pour aborder le phénomène de diffraction, sur la possibilité d'isoler "pratiquement" un rayon lumineux en limitant les dimensions de l'ouverture.

Seul (2u) pose le problème de l'indépendance des rayons lumineux qu'il admet à titre d'hypothèse fondamentale : *"Il existe donc des circonstances particulières (qui constituent le domaine de l'optique physique) où, au lieu d'être indépendants, les rayons lumineux peuvent interférer entre eux."*

f. Conclusion

En résumé, nous retenons les points suivants :

- diverses approches sont utilisées pour introduire le rayon lumineux
- une approche ondulatoire basée sur les notions et le formalisme de l'électromagnétisme,
- une approche pseudo-ondulatoire basée sur le principe d'Huygens,
- une approche géométrique à partir du principe de Fermat ;
- la notion de surface d'onde est centrale ; elle est souvent présentée dans le cadre de situations physiques très générales mais elle n'est réellement utilisée que pour des géométries élémentaires (source ponctuelle isolée) ;
- le rayon lumineux est associée à la notion d'énergie lumineuse ;
- seul le phénomène de diffraction limite la validité du modèle du rayon lumineux présent en optique géométrique; en particulier, sa validité n'est pas mise en cause dans un champ d'interférence.

3. Comparaison entre les niveaux secondaire et universitaire

Mises à part les différences évidentes portant sur les bases conceptuelles et la formalisation mathématique, deux aspects peuvent être soulignés.

Alors qu'au niveau universitaire la notion d'énergie est associée au rayon lumineux, elle ne l'est pratiquement pas (un manuel sur cinq) au niveau secondaire, bien qu'elle soit fondamentale notamment pour aborder le problème du "partage" du rayon lumineux à la surface de séparation de deux milieux.

Enfin, le problème d'isolabilité "pratique" d'un rayon lumineux est le point de départ des expériences de diffraction au niveau du secondaire, alors qu'il n'est pratiquement pas évoqué au niveau universitaire. Cela traduirait peut-être, au niveau secondaire, une préoccupation majeure qui est la visualisation des "trajets des rayons lumineux" dans les dispositifs expérimentaux.

II. Liens établis entre les modèles géométrique et ondulatoire

1. Niveau secondaire

Le modèle ondulatoire est introduit après avoir exposé les limites du modèle du rayon lumineux mises en évidence dans les phénomènes de diffraction. Il permet ensuite d'interpréter également les phénomènes d'interférences.

Seul (1s) lie de façon explicite, dans le cours, le rayon lumineux à l'onde lumineuse en le définissant comme orthogonal aux surfaces d'onde, dans les cas d'une source ponctuelle et d'une source à l'infini (figures 7 et 8).

Une surface d'onde est définie par (1s) comme "l'ensemble des points atteints à une date donnée par l'onde".

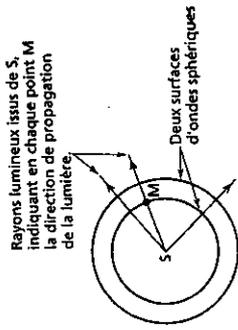


Figure 7

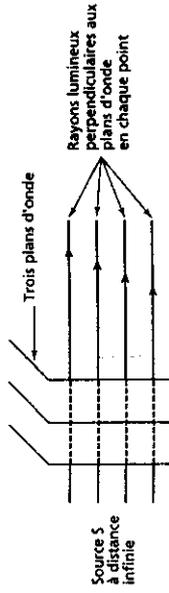


Figure 8

Dans (3s), est présenté, à titre documentaire, un extrait du Traité de la lumière de Huygens où il est précisé que les rayons lumineux sont perpendiculaires aux surfaces d'ondes, dans le cas d'une source ponctuelle (schémas identiques à ceux trouvés dans (2u) ; les remarques faites alors sont encore valables). La construction de Huygens est également utilisée en exercice pour établir les lois de Descartes.

(1s) mis à part, les liens entre les modèles géométrique et ondulatoire n'apparaissent pas explicitement bien que des "rayons" (tracés rectilignes fléchés, notés TRF dans la suite du document) figurent sur de nombreux schémas et que le mot "rayon" soit employé dans les développements de cours.

Ces liens sont plutôt donnés, sauf pour (1s), en termes d'abandon d'un modèle pour un modèle plus performant plutôt qu'en termes de coexistence éventuelle. Les raisons de cet abandon ne sont pas entièrement précisées. Toutefois, sans aucune mise en garde quant à leur statut, les "rayons lumineux" réapparaissent dans des situations typiques d'optique ondulatoire (voir partie A.III.3 a.). Des problèmes de cohérence risquent donc de se poser pour les apprenants.

2. Niveau universitaire

Pour (1u) et (2u), le modèle du rayon lumineux ayant été introduit à partir du modèle ondulatoire (voir A.I.2.a.), la transition a été faite à cette occasion.

Tous les auteurs indiquent les limites de l'optique géométrique et la nécessité d'utiliser le modèle ondulatoire pour interpréter les phénomènes de diffraction. La transition entre les modèles est souvent effectuée à cette occasion.

Le lien entre ces deux modèles, lorsqu'ils sont tous les deux valides, réside dans la notion de chemin optique puisque celui-ci est calculé sur un "rayon" et peut servir à définir des surfaces d'onde qui sont équivalentes aux surfaces équiphasées définies pour les ondes. C'est ce que montrent les extraits suivants :

"La correspondance entre optique géométrique (optique du rayon) et optique physique ou ondulatoire (optique de surface d'onde) est bien établie et impose la notion de durée du trajet optique". (3u)

"Les chemins optiques évalués sur les portions de rayons lumineux comprises entre deux surfaces d'onde (ou équiphasés) sont égaux." (1u)

"Le fondement ondulatoire du principe de Fermat est donc, dans un milieu isotrope, l'orthogonalité des rayons lumineux aux surfaces d'onde." (5u)

"En optique physique, ces surfaces d'onde (définies en terme d'égalité de chemins optiques) jouent un rôle fondamental car elles correspondent aux surfaces équiphasés. [...] Cette notion (surface d'onde) joue un rôle de tout premier plan dans la théorie de propagation des vibrations. Ceci montre l'importance du théorème de Malus qui relie directement cette notion caractéristique de l'optique ondulatoire, à la notion de rayon lumineux qui est fondamentale en optique géométrique." (2u)

Les figures 9, 10 et 11 font état de cette correspondance.

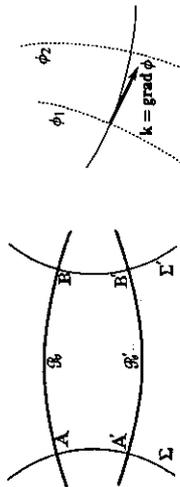


Figure 9

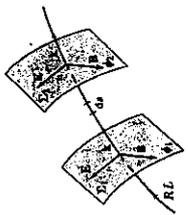


Figure 10

Figure 11

Toutefois, tous les auteurs ne mentionnent pas ce lien de façon explicite.

Pour (4u), en particulier, aucune transition n'est faite entre les deux modèles qui semblent alors sans relation.

Comme le note (5u), les deux modèles ne sont pas exclusifs. Les auteurs ne se privent d'ailleurs pas pour utiliser des "rayons" au sein de démonstrations ou d'employer ce terme en légende de schémas, sans compter les nombreux TRF (tracés rectilignes fléchés) évocateurs de rayons, dans le cadre de situations typiques d'optique physique (diffraction et interférences). Mais peu de mises en garde sont données concernant la signification physique de ces "rayons". Ces aspects seront développés au paragraphe A.III.

3. Conclusion

L'interprétation des phénomènes de diffraction et d'interférences nécessite l'introduction du modèle ondulatoire. Bien que tous les auteurs s'accordent pour insister sur le fait que le modèle du rayon lumineux ne permet pas d'interpréter les phénomènes observés, ils en conservent certains aspects, au niveau du lexique et de la symbolisation des schémas, sans en préciser clairement les conditions d'emploi.

III. Statut du rayon en optique ondulatoire

1. Mise au point

Nous rappelons, en guise d'introduction, les significations que nous considérons acceptables du mot "rayon" en optique physique (voir appendice 1).

Pour une onde progressive monochromatique plane ou sphérique (OPMPS), le "rayon d'onde" perpendiculaire aux surfaces d'onde est un chemin de phase et d'énergie. Le champ en un point est la somme des champs associés à toutes les ondelettes émises antérieurement. Le "rayon d'onde" dépend de l'ensemble des rayons d'ondelettes qui eux, ne sont que des chemins de phase et sont obligatoirement associés à une étendue émettrice.

Si les phénomènes de diffraction et d'interférences sont absents ou négligeables, les lois de l'optique géométrique (propagation rectiligne si milieu homogène, réflexion, réfraction) s'appliquent au "rayon d'onde" et aux rayons d'ondelettes.

Remarque : pour un milieu anisotrope, le "rayon d'onde" est un chemin d'énergie mais n'est plus perpendiculaire aux surfaces d'ondes.

Dans le cas où plusieurs OPMPS cohérentes interviennent (interférences, diffraction), les rayons d'ondelette émises par chacune de leurs surfaces d'onde demeurent des chemins de phase. Par contre la connaissance des surfaces d'onde, donc de la structure de l'onde résultante et du "rayon d'onde" en un point donné, devient difficile. La construction d'Huygens s'avère alors de peu d'utilité. Le "rayon d'onde" en un point peut se définir comme tangent au vecteur de Poynting résultant, passant par ce point : le "rayon d'onde" s'identifie donc à une ligne de courant de l'énergie électromagnétique.

2. Préliminaire concernant la symbolisation en optique géométrique

Les rayons lumineux sont en général représentés par une flèche sur leurs trajets indiquant le sens de propagation de la lumière. Les rayons représentés sont en général ceux que l'on peut qualifier d'"utiles", nécessaires, par exemple, à la délimitation de faisceaux ou à une construction d'image. (figures 12, 13 et 14).

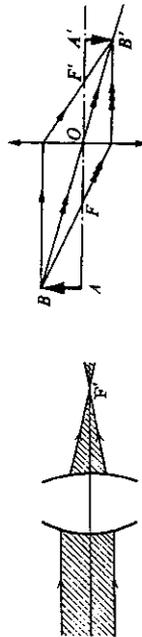


Figure 12

Figure 13

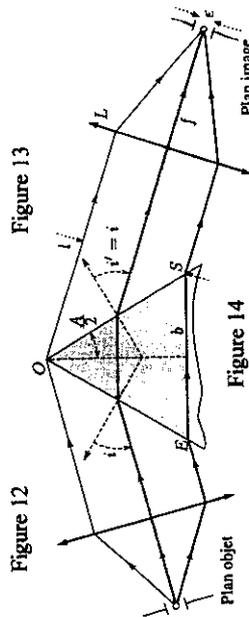


Figure 14

On s'intéresse en général aux rayons émergents d'un système optique. La symbolisation utilisée indique les trajets pris en compte et suggère, en quelque sorte, une certaine "continuité des rayons".

L'existence, dans la plupart des systèmes optiques, de surfaces dioptriques, entraîne le "partage" des rayons lumineux incidents et l'on constate, comme annoncé plus haut, que la symbolisation des rayons dépend des trajets pris en compte et donc des phénomènes auxquels on s'intéresse (figures 15, 16 et 17). Sur la figure 15, seul le phénomène de réflexion est étudié : les rayons incident et réfléchi sont donc symbolisés de la même manière. Au contraire, sur la figure 16, on s'intéresse aux rayons émergents réfléchis par la lame dans une direction donnée : la symbolisation adoptée est alors relative au calcul de la différence de marche entre les deux rayons émergents (elle est donc la même, cette fois-ci, pour le rayon incident et le rayon réfléchi). Enfin, la figure 17 illustre le comportement d'un rayon lumineux sur une surface de séparation : la symbolisation est soit identique pour les trois rayons, soit différente pour chacun d'eux.

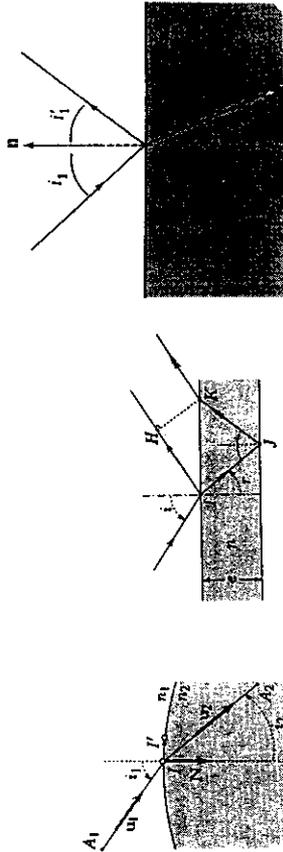


Figure 15

étude de la transmission du rayon incident (phénomène de réflexion)

Figure 16

étude des anneaux d'interférences à l'infini

Figure 17

schémas globaux du comportement d'un rayon lumineux sur une surface de séparation

La continuité de la symbolisation a été soulignée ici pour certaines situations d'optique géométrique. Nous la retrouverons dans les schémas relatifs à des situations d'optique ondulatoire. Dans les deux cas, elle est discutable si aucune mise en garde n'est faite. Comment les apprenants interprètent-ils les différents aspects de cette symbolisation?

3. Rayon et optique ondulatoire

a. Niveau secondaire

Comme précisé au A.I.1., l'optique ondulatoire est introduite devant les limites de l'optique géométrique à interpréter les phénomènes de diffraction, et notamment la mise en défaut de la propagation rectiligne de la lumière.

1. Diffraction

L'étude quantitative de la diffraction ne peut être engagée à ce niveau et l'on se cantonne à une description qualitative des expériences de diffraction pour lesquelles il n'est pas

fait mention de l'interférence entre les ondelettes émises par l'ouverture. Les rayons, pas plus que les ondes d'ailerons, ne figurent donc à ce niveau de description très sommaire où seule la "lumière" est diffractée.

Voici quelques éléments de description relevés dans les manuels :

"La pupille circulaire diffracte la lumière. On peut observer la tache de diffraction sur un écran éloigné : c'est le disque d'Airy." (1s)

"Nous observons, sur l'écran E, des anneaux concentriques autour d'un disque central[...]Lorsque la lumière traverse de petites ouvertures, elle ne se propage pas en ligne droite au voisinage de celle-ci. C'est le phénomène de diffraction." (2s)

Toutefois, sur certains schémas (figures 18, 19 et 20), figurent toujours des TRF en général comme limite de la tache d'Airy (pour une ouverture circulaire).

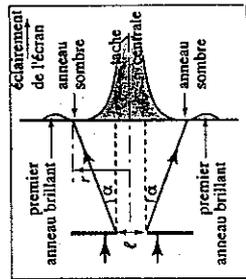


Figure 18

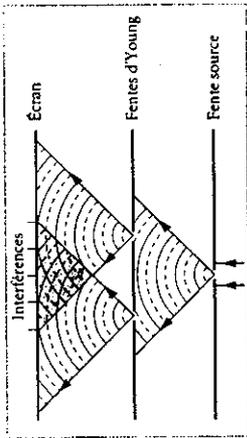


Figure 19

Sur le schéma (19), quelle est la justification du découpage des surfaces d'onde, pour une source secondaire apparemment supposée ponctuelle?

Le schéma (20) est le seul à figurer des TRF illustrant l'émission, dans différentes directions, des sources secondaires.

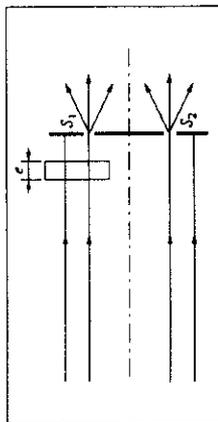


Figure 20

2. Interférences

A ce niveau, les interférences lumineuses sont présentées dans tous les manuels analysés (sauf (2s)) en utilisant les dispositifs d'Young (trous ou fentes) auxquels s'ajoutent souvent les miroirs de Fresnel. Elles sont introduites, sauf pour (5s), en présentant des expériences d'interférences sonores ou ultrasonores et à la surface d'une cuve à ondes.

Contrairement aux phénomènes de diffraction pour lesquels aucune formalisation n'est mise en place pour leur interprétation, les démonstrations concernant les phénomènes d'interférences s'appuient toutes sur le principe de superposition de deux vibrations et sur la notion de différence de marche entre vibrations. (1s) et (4s) utilisent la notion de phase d'une

onde et calculent effectivement la différence de marche. Par contre, (2s), (3s) et (5s) se contentent de donner les conditions d'interférences constructives et destructives.

La notion de rayon lumineux apparaît dans ces développements de cours, par exemple dans les extraits suivants tirés de (1s) :

"Cette vibration se propage de la source S jusqu'en un point M. En empruntant le rayon lumineux (R). [...] Δt_{SM} mesure le temps que met la vibration pour se propager de la source S jusqu'à M, le long du rayon (R). [...] Considérons la situation expérimentale où deux rayons lumineux issus d'une même source ponctuelle primaire S, suivent deux voies différentes pour se recouper en M. [...] Les deux trous S_1 et S_2 jouent le rôle de sources secondaires. Ils diffractent la lumière et réémettent des rayons lumineux dans toutes les directions. Deux ondes diffractées démarrent à partir de S_1 et S_2 . Il existe donc deux rayons lumineux, issus primitivement de S et aboutissant en M, à savoir les rayons $(R_1) = SS_1M$ et $(R_2) = SS_2M$. Ils sont rectilignes par morceaux."

(1s) interprète donc la diffraction comme une réémission de "rayons lumineux" dans toutes les directions. Le choix d'un rayon lumineux parmi cet ensemble est fixé par le choix du point d'observation. Comment une telle interprétation peut-elle être cohérente avec celle exposée au niveau universitaire? Les rayons sont-ils vraiment "lumineux"?

Toujours dans (1s), lors de l'énoncé d'un exercice, on note : "On considère les rayons passant par S_1 et S_2 qui interfèrent en un point M."

Dans (4s), on trouve également : "La différence de marche entre deux rayons interférant en M..."

Dans ces deux passages, les rayons ne sont pas qualifiés de lumineux mais cela n'empêche pas de s'interroger sur la signification à donner à l'"interférence" de deux rayons. Quelle caractéristique attachée au rayon pourrait faire qu'il interfère avec un autre rayon? Les élèves peuvent également se poser la question.

A noter, toutefois que dans (5s), hormis la symbolisation des schémas, le traitement des interférences s'effectue sans utilisation du mot "rayon".

Les TRF, schématisés par un trait fléché, sont présents sur de nombreux schémas.

Sur les figures 21, 22 et 23, les TRF représentent, de façon totalement implicite, les limites des faisceaux et, par conséquent, du champ d'interférences.

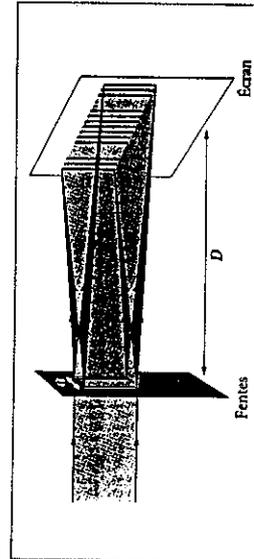


Figure 21

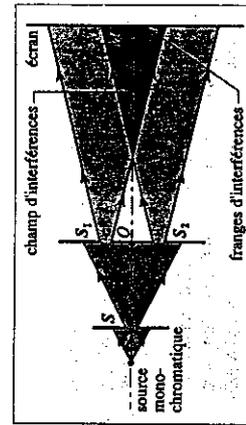


Figure 22

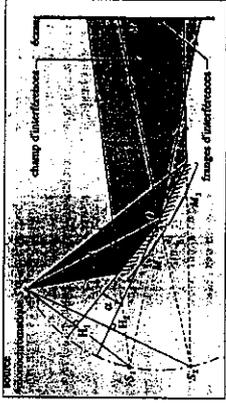


Figure 23

Sur les figures 24, 25 et 26, ils figurent, selon les auteurs, les trajets des vibrations lumineuses qui interfèrent.

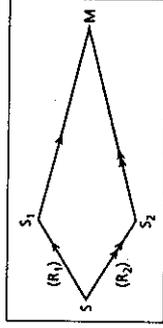


Figure 24

Le schéma (24) est utilisé pour illustrer une situation quelconque où intervient le phénomène d'interférences (dispositif d'Young ou miroirs de Fresnel, par exemple). La continuité de la symbolisation des "rayons", associée aux commentaires qui qualifient ceux-ci de lumineux, suggère la conservation de leur intégrité à travers le système interférentiel quel qu'il soit.

C'est ce que l'on retrouve sur les schémas (25) et (26) pour lesquels les dispositifs interférentiels sont spécifiés et sur lesquels la symbolisation des rayons reste identique. Aucun commentaire n'est fait sur la légitimité, d'une part, d'identifier le rayon lumineux réfléchi par un miroir à celui diffracté par une ouverture, d'autre part, de conserver leur statut de rayon lumineux jusque dans le champ d'interférences.

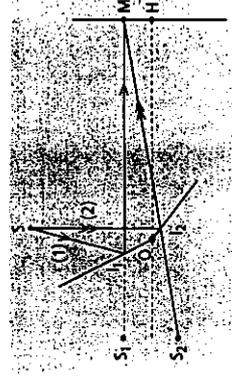


Figure 25

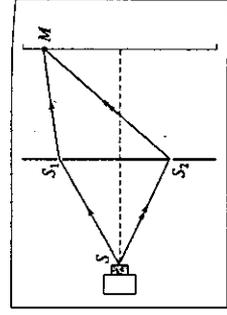


Figure 26

3. Réseau

Les réseaux ne sont pas traités en cours sauf dans (1s) où ils sont abordés lors du chapitre consacré à l'obtention de spectres lumineux. Des exercices leurs sont consacrés dans (1s) et (4s). Des activités expérimentales (détermination de la longueur d'onde d'une radiation lumineuse) s'y rapportent dans (3s) et (5s).

Bien que l'obtention de spectres à l'aide de réseaux résulte de phénomènes ondulatoires (diffraction et interférences), les rayons apparaissent fréquemment sur les schémas et dans les textes (partie de cours, énoncés d'exercices, fiches expérimentales).

Par exemple, dans (1s), on trouve le schéma (27)

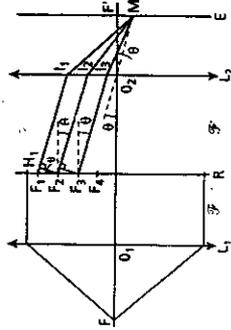


Figure 27

pour lequel, selon l'auteur, F' représente l'"ensemble des rayons diffractés dans la direction θ ".

Accompagnant ce schéma, est donné le commentaire suivant, dans lequel figure à plusieurs reprises (notée ici en gras) le terme "rayon" :

"Lorsqu'un réseau est éclairé par un faisceau parallèle de lumière monochromatique, les fentes se comportent comme des sources cohérentes ; on obtient donc sur un écran, après focalisation des rayons par une lentille, la figure d'interférence des N ondes issues des N fentes.

Pour simplifier, nous ne considérerons que les différents rayons parallèles issus de fentes sources secondaires F_1, F_2, \dots, F_N du réseau. Ces rayons étant parallèles, ils interféreront, en l'absence de lentille, à l'infini. La présence de la lentille permet leur rencontre sur l'écran, et permet ainsi d'observer sur celui-ci une figure d'interférence.

Pour qu'il y ait interférence constructive la différence de marche δ entre deux rayons successifs doit être égale à un multiple entier de la longueur d'onde : $\delta = k\lambda$

Or la différence de marche, appliquée à deux rayons parallèles issus du réseau, s'écrit $\delta = F_1H_1 = F_2H_2 = \dots = a \sin \theta$

a' étant la distance entre deux fentes successives du réseau (grandeur appelée pas du réseau) et θ l'inclinaison des rayons par rapport à la normale."

Nous retrouvons ici les glissements de sens déjà repérés dans le paragraphe relatif aux interférences : "interférence" et "différence de marche" entre "rayons." Quelle signification peuvent donner les élèves aux directions d'interférences constructives et destructives? "Les rayons" disparaissent-ils dans certaines directions?

Sur les figures 28 et 29, nous observons des TRF et la continuité de la symbolisation laisse penser à la conservation des propriétés de ces "rayons" entre la source et l'écran :

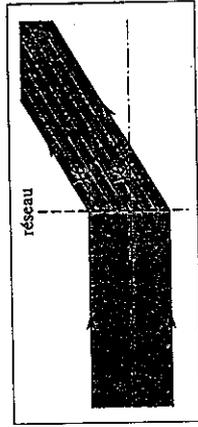


Figure 28

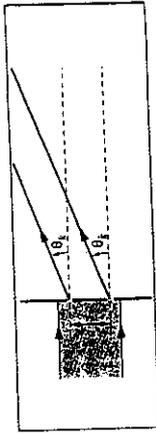


Figure 29

4. Conclusion

Les paragraphes précédents relatifs au statut du "rayon" en optique ondulatoire ont mis en évidence l'utilisation fréquente de la notion de "rayon" aussi bien dans les textes qu'au niveau de la symbolisation des schémas sous forme de TRF.

La continuité du "rayon" entre la source et le point d'observation est soulignée à la fois dans les développements et par la symbolisation. Elle est encore accentuée chez (1s) par le fait que le "rayon" est qualifié de lumineux sur l'intégralité de son trajet.

De nombreux glissements de sens ont été relevés pouvant conduire les élèves à conférer aux "rayons" des propriétés de type ondulatoire ("interférences" et "différence de marche" entre "rayons", "rayons diffractés"). Ces glissements sont sans doute renforcés par la faiblesse des liens établis entre rayon et onde et la difficulté d'explicitation des notions d'onde progressive et de phase^{10,13}. Seuls deux manuels définissent de façon précise la phase.

Les situations mettant en jeu à la fois les phénomènes d'interférences et de diffraction (trous d'Young, réseaux) restent difficiles à interpréter à ce niveau surtout si l'on s'appuie partiellement sur la notion de "rayon".

b. Niveau universitaire

1. Interférences

Les développements théoriques relatifs aux phénomènes d'interférence font intervenir principalement la superposition d'ondes en un point, dont le résultat dépend de la différence de phase entre ondes ou vibrations qui interfèrent en ce point. Le terme de "rayon" apparaît très peu à ce niveau des démonstrations, sauf pour (1u) et surtout (2u).

Concernant ces deux auteurs, on relève les passages suivants :

"En un point M de l'écran convergent tous les couples de rayons issus de tous les points de (S)..." (1u)

"... la différence de chemin optique des deux rayons qui interfèrent en M..." (1u)

"Considérons alors deux rayons SI_1JM et SI_2JM issus d'une même source (S) et interférant en M après avoir parcouru des trajets différents..." (2u)

" δ est la différence de chemin optique entre deux trajets suivis par les rayons lumineux qui viennent interférer en M..." (2u)

Certains schémas très approximatifs, accompagnant les développements généraux, pourraient être mal interprétés et accentuer l'idée de continuité du rayon (voir la figure 30 inappropriément accompagnée, dans (2u), du commentaire suivant : "on isole spatialement deux parties d'une onde venant d'une même source (S) que l'on fait ensuite se rencontrer pour interférer ; c'est la division du front d'onde, utilisée en particulier dans le montage des trous d'Young").

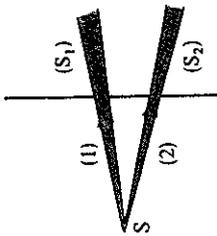


Figure 30

(2u), à propos du problème général de la cohérence de la source nécessaire à l'obtention d'interférences, propose le schéma (31).

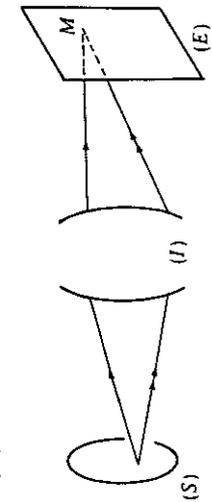


Figure 31

Sur les schémas relatifs aux dispositifs interférentiels basés sur les phénomènes de réflexion et de réfraction (c'est-à-dire autres que les dispositifs d'Young ; ceux-ci seront considérés au A.III.3.b.3.), les "rayons" sont systématiquement représentés, soit comme "rayons" limites des faisceaux qui interfèrent (figure 32), soit comme exemples de "rayons" se rencontrant en un point du champ d'interférences (figure 33).

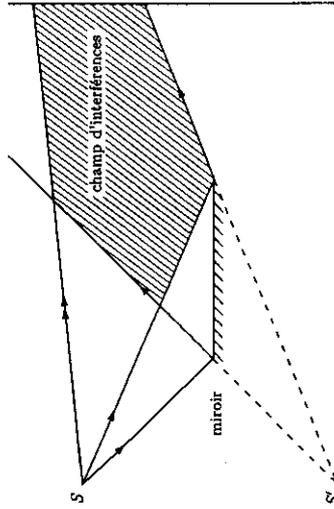


Figure 32

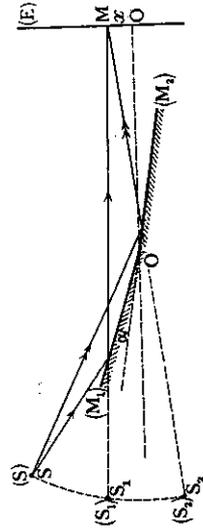


Figure 33

Dès que l'on aborde la description des dispositifs interférentiels expérimentaux, on y retrouve les "rayons" que ce soit dans le texte ou sur les schémas.

Les glissements de sens, déjà signalés chez (1u) et (2u), se retrouvent chez d'autres auteurs comme l'illustrent les passages suivants :
"On considère les interférences entre les rayons directs issus d'une source S et les rayons issus de cette même source mais réfléchis sur un miroir." (4'u)
"... les rayons (1) et (2) n'acquiescent pas de nouvelle différence de marche..." (4'u)
"Pour une source monochromatique ponctuelle S, par réflexion, il existe toujours un couple de rayons interférant en M..." (5'u)

(6u) n'utilise pas l'expression d'"interférence entre rayons" mais celle d'"interférence entre ondes véhiculées par les rayons" comme dans le passage suivant :
"Les rayons réfléchis qui semblent provenir des images respectives S1 et S2 se rencontrent, et les ondes qu'ils véhiculent interfèrent."

A propos de cette formulation, nous pouvons nous demander comment une onde, caractérisée notamment par ses surfaces d'onde, peut être définie à partir d'un "rayon" unique, sauf s'il s'agit d'une onde plane, voire sphérique si la localisation de la source est donnée.

Des formulations, moins fortes que celle d'"interférence entre rayons", peuvent être source de difficultés pour les étudiants.

Par exemple, les deux formulations suivantes, concernant le chemin optique, sont souvent rencontrées : *"chemin optique le long d'un rayon"* et *"chemin optique parcouru par un rayon"*. Pour la première, on peut comprendre qu'il s'agit du chemin optique relatif à l'onde

Aucune mise en garde n'est faite concernant le statut (ou le changement de statut) des "rayons" lorsqu'on rentre dans le champ d'interférences, ces "rayons" n'étant plus que chemins de phase (voir appendice 1). (2u) signale toutefois, en introduction, que "lorsque l'on observe des interférences en optique, le principe d'indépendance des rayons lumineux n'est plus valable".

Pour conclure ce paragraphe, nous pouvons retenir les difficultés probables suivantes :

- d'ordre conceptuel liés à la coexistence de deux notions onde et "rayon" dont les relations n'ont pas toujours été clairement posées (par exemple rapport entre "marche d'un rayon" et propagation de l'onde associée).
- d'ordre lexical accentuant les difficultés d'ordre conceptuel (et peut-être révélatrices de ces mêmes difficultés). De nombreux glissements de sens ont été relevés pouvant conduire les étudiants à attribuer des propriétés de type ondulatoire aux "rayons". En particulier, quelle signification attribuent les étudiants au phénomène d'interférence entre deux rayons?"
- liées au statut du "rayon" dans le champ d'interférence. Aucune mise en garde n'est faite concernant ce statut alors que le "rayon" (d'ondelette) n'est plus, dans ces conditions, un chemin d'énergie (voir appendice 1). Au contraire, les commentaires et la symbolisation des schémas tendraient à montrer une continuité du "rayon" entre la source et le point d'observation situé dans le champ d'interférences.

2. Diffraction par une ouverture

L'étude de la diffraction est abordée à partir du principe d'Huygens-Fresnel, sans obligatoirement faire la distinction entre les contributions d'Huygens et de Fresnel. Les éléments unanimement retenus sont les suivants :

- l'existence au niveau de l'ouverture de sources qualifiées de secondaires,
- l'émission par chacune de ces sources d'une onde dans toutes les directions,
- la proportionnalité de l'amplitude des vibrations émises à l'élément de surface considéré et à l'amplitude de l'onde incidente au point considéré,
- l'interférence au point d'observation des vibrations émises.

Des imprécisions et inexactitudes apparaissent si l'analyse est plus fine.

Le caractère non isotrope de l'émission des sources secondaires est souvent peu explicite.

(1u) signale simplement que "l'émission de lumière se fait dans des directions quelconques, néanmoins voisines de celle de la lumière incidente".

De même, (4u) indique que "le calcul se simplifie lorsque toutes les sources secondaires émettent des vibrations de même amplitude ; cela se produit, en particulier, lorsque le diaphragme est plan et parallèle à l'onde plane incidente et que le phénomène de diffraction à l'infini est étudié dans une direction peu inclinée sur la normale au plan d'onde".

Les hypothèses faites pour calculer l'amplitude de la vibration résultante (grande distance entre ouverture et écran d'observation, ouverture plane, faible inclinaison entre les directions de l'onde incidente et d'observation) permettent d'éviter un certain nombre de problèmes.

A signaler également que (1u) indique que la phase d'une ondelette émise par une source secondaire est égale à celle de l'onde incidente pour un point de l'ouverture, alors qu'il existe un déphasage $\pi/2$ entre ces deux ondes. Ceci n'a pas d'influence sur les calculs qui en découlent puisque l'on s'intéresse à l'éclairement d'un écran, donc au module de l'amplitude de la vibration résultante.

(5u) donne la figure 34, qui propose un moyen de tracer une surface d'onde en utilisant une construction de Huygens. Nous comprenons mal comment cette construction s'effectue véritablement : quelle est la surface enveloppe passant par un point donné (voir à ce sujet l'appendice 2) ?

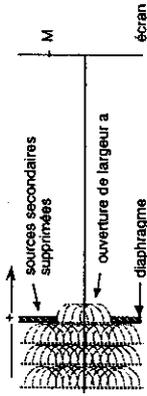


Figure 34

Tous les auteurs (sauf (5u)) emploient l'expression "rayon diffracté" (suivant une direction) sans préciser la nature de ce rayon (3u) parle même de "rayon lumineux secondaire" ou de "rayon fictif". On comprend bien qu'il s'agit d'un rayon que l'on peut qualifier d'ondelette (voir appendice 1). Mais a-t-il le même statut que le rayon géométrique incident? Est-il toujours "porteur d'énergie"? Si oui, sous quelles conditions? Toutes questions non soulevées dans les manuels.

C'est dans l'étude des phénomènes liés à la diffraction que les glissements de sens, déjà relevés dans le paragraphe consacré aux interférences, sont les plus forts. Les extraits suivants en témoignent :

"...les amplitudes totales diffractées (...) soient en phase respectivement avec les rayons réfractés..." (2u)

"Les différences de phases entre les rayons diffractés proviennent alors de différences de trajets parcourus après l'ouverture de l'écran." (2u)

"Prenons comme origine des phases le rayon qui serait diffracté par..." (2u)

"Par conséquent, des rayons diffractés (...) peuvent se superposer (interférer) en M où ils se rencontrent. Le principe énoncé ramène donc les phénomènes de diffraction observés à un phénomène d'interférences entre les rayons lumineux issus des sources secondaires..." (4u)

"Dans l'approximation de Fraunhofer, les rayons qui interfèrent issus de O et M, sont parallèles." (6u)

Nous pouvons constater, pour (2u), que la phase (ou le déphasage) se voit associée à plusieurs reprises à la notion de "rayon". Il s'agit sûrement pour l'auteur d'un abus de langage (le terme "chemin de phase" attribué au rayon (voir appendice 1) serait sans doute plus judicieux). Comment de tels abus sont-ils interprétés par les étudiants?

Nous remarquons également, concernant (4u) et (6u), des glissements de sens non apparus jusqu'alors, relatifs à l'"interférence de rayons", (4u) précisant même qu'il s'agit de rayons lumineux.

Le flou quant au statut des "rayons" apparaît également au niveau de la schématisation. Celle-ci est beaucoup moins homogène que lors des études d'interférences basées sur les phénomènes de réflexion et de réfraction.

(1u), (2u) et (3u) utilisent presque systématiquement des TRF. (4u) utilise des traits non fléchés ou indique par des vecteurs les directions de propagation. (5u) n'utilise pas de TRF dans la majeure partie du cours. (6u) présente l'étude générale de la diffraction sans TRF et ne commence à les utiliser que lorsqu'il aborde l'étude de la diffraction de Fraunhofer.

Si des TRF sont utilisés, on constate, sauf dans (3u), une continuité de la symbolisation entre la source et le point d'observation comme sur la figure 35 tirée de (2u).

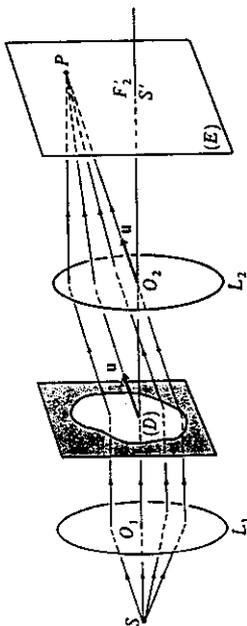


Figure 35

Nous constatons également que dans pratiquement tous les schémas ne sont représentés que les "rayons" provenant de l'ouverture suivant une direction donnée. Les rayons ne participant pas à la figure de diffraction au point considéré ne sont pas figurés. Cette représentation des seuls "rayons" utiles et le parallélisme de ceux-ci pour l'étude de la diffraction de Fraunhofer, induisent deux auteurs, (2u) et (3u), à parler d'onde plane diffractée suivant une direction.

(2u) précise, à propos de la diffraction à l'infini d'une onde plane : "Pour une direction \vec{u} donnée, les surfaces d'onde correspondant aux rayons diffractés sont des plans perpendiculaires à \vec{u} . (...) où \vec{k} est le vecteur d'onde caractérisant l'onde plane diffractée."

(3u) donne, lors de la résolution d'un exercice portant sur la diffraction par une ouverture rectangulaire, la figure 36. Sur cette figure, apparaissent clairement les plans d'onde P. Rien d'étonnant si l'on sait que l'une des questions posées est formulée de la façon suivante: "A quel faisceau diffracté correspond le point M? Préciser la direction de propagation de ce faisceau et son vecteur d'onde. Indiquer la direction des plans d'onde."

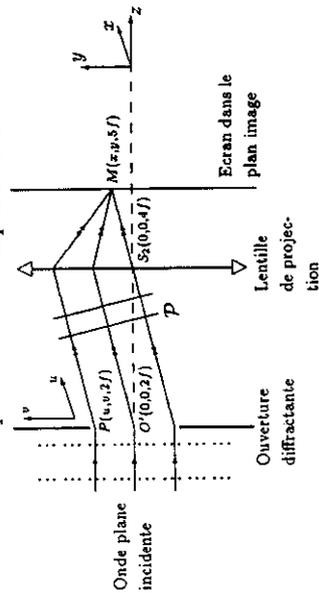


Figure 36

(4u) est moins explicite mais, pour calculer la différence de phase entre les ondes diffractées par deux points O et M de l'ouverture dans une direction \vec{u} , l'auteur utilise la figure 37 sur laquelle Σ_O et Σ_M semblent représenter les plans d'onde passant par ces points.

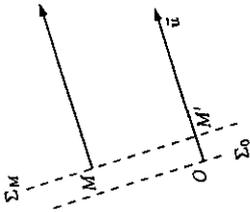


Figure 37

Les sources secondaires étant en phase au niveau de l'ouverture, elles ne peuvent l'être dans les plans considérés. Ces plans ne sont donc pas des plans d'onde et l'ensemble des rayons diffractés dans une direction donnée, bien que parallèles, ne constitue pas une onde plane (voir appendice 2). Ces erreurs proviennent, peut-être, du fait qu'un aspect essentiel semble avoir été oublié : le choix d'un point situé à l'infini, donc d'une direction d'observation, entraîne une sélection parmi l'ensemble des rayons d'ondelettes émises par toutes les sources secondaires de l'ouverture. Il ne s'agit pas d'une quelconque transformation de l'onde diffractée résultante mais d'un tri de rayons d'ondelettes, ceux-ci ne constituant en aucun cas une onde plane. Nous retrouverons cette idée de sélection des rayons dans la partie B.

Nous pouvons retenir les conclusions suivantes relatives aux phénomènes de diffraction:

- le statut du "rayon", le plus souvent qualifié de "diffracté" après l'ouverture, reste très peu éclairci. Le principe d'Huygens affirme qu'il provient d'une source secondaire placée au niveau de l'ouverture mais peu de précisions sont données quant à ses caractéristiques notamment énergétique. La symbolisation très diverse des schémas révèle peut-être cet état de chose. A signaler, également, les quelques inexactitudes relatives à la structure des ondelettes.
- les glissements de sens, notamment relativement à la phase, sont fréquents.
- l'erreur consistant à considérer un ensemble de rayons parallèles comme une onde plane. Apparaît ici la notion de "sélection" des "rayons" suivant une direction donnée, donc suivant le point d'observation, qui sera mise en évidence à plusieurs reprises dans la suite de l'étude.

3. Dispositifs d'Young

Dans les dispositifs d'Young (trous ou fentes), interviennent à la fois les phénomènes d'interférences et de diffraction.

D'une manière générale, les "rayons" sont beaucoup moins utilisés, en tout cas de manière explicite, que pour les autres dispositifs interférentiels. Les "trajectoires" suivies par les vibrations sont le plus souvent représentées par de simples traits.

Toutefois, dans (2u), des TRF figurent les limites du champ d'interférences (figure 38), sans précision sur la signification de ces limites (sans doute les cônes d'Airy). Dans (1u), ils ne sont pas représentés dans les schémas relatifs au cours, mais ils apparaissent sur les schémas présentés en exercices (figure 39). (6u) donne la figure 40 lors de la présentation des systèmes

interférentiels. Que représentent les traits en pointille? La zone ombrée après les fentes? Plus loin dans le cours de (6u), à propos de la cohérence spatiale de la source S, les "rayons" apparaissent (figure 41).

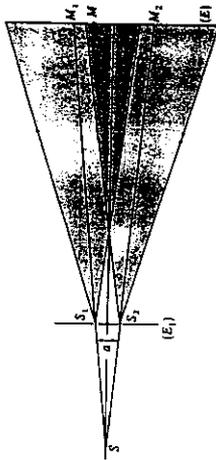


Figure 38

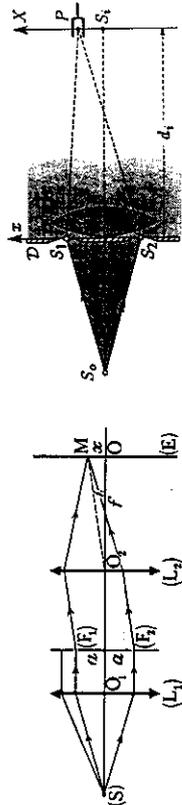


Figure 39

Figure 40

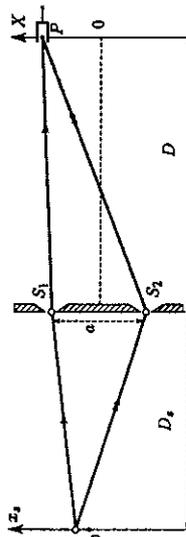


Figure 41

Nous pouvons noter sur les figures 38, 39 et 41, la continuité du symbolisme du "rayon" avant et après les sources secondaires, moins forte peut-être chez (6u), du fait de la symbolisation des sources secondaires sur les trajets.

Même lorsque les "rayons" ne sont pas représentés, ils sont présents au niveau lexical comme le montrent les extraits suivants :

- "Considérons un point M de l'écran (E) recevant les rayons émis par les points S1 de (S1) et S2 de (S2)." (1u)
- "Dans cette zone, les rayons issus de (S1) et (S2) vont interférer." (2u)
- "... pour que des rayons issus de deux fentes puissent se rencontrer au point P..." (6u)

(4u) évite dans tout son cours sur les interférences d'utiliser la notion de rayon, que ce soit au niveau lexical ou de la symbolisation des schémas, mais n'y échappe pas lorsqu'est

énoncé le théorème suivant : "La surface de localisation est le lieu d'intersection de deux rayons provenant d'un même rayon incident."

Bien que les dispositifs d'Young présentent simultanément des phénomènes d'interférence et de diffraction, les manuels ne sont pas plus explicites sur le statut des "rayons" utilisés pour décrire et interpréter ces situations.

4. Réseau

Dans cette partie, nous ne traitons pas les aspects plus directement liés à l'utilisation du réseau en spectroscopie. Ce sera l'objet de la partie A.IV.

Le réseau par transmission est traité dans tous les manuels. On le suppose, dans un premier temps, constitué de fentes infiniment fines, de façon à négliger l'influence de la largeur des fentes sur la figure de diffraction.

Nous constatons que, chez tous les auteurs, les rayons sont abondamment utilisés que ce soit au niveau du texte ou au niveau des schématisations, sans précision sur le statut de ces rayons. En voici quelques exemples :

"Pour obtenir des interférences à ondes multiples il faut faire interférer entre eux plusieurs rayons issus d'une même source. [...] Les rayons diffractés par les N fentes dans une direction donnée viennent interférer en M dans le plan focal de la lentille (L). Il y a autant de rayons qui interfèrent en M qu'il y a de fentes sur le diaphragme - ou réseau" (2u)

"En général les rayons diffractés par les différentes fentes présentent un déphasage entre eux." (2u)

"La différence de phase entre les rayons issus de deux de ces sources consécutives et diffractés dans la même direction..." (4u)

"En réalité, on sélectionne les rayons interférant à l'infini grâce à une lentille convergente. [...] La différence de marche entre deux rayons successifs est..." (5u)

"La différence de phase entre deux rayons successifs dans la direction θ par les centres O_n et O_{n+1} de deux fentes voisines..." (1u)

L'interprétation de la diffraction par un réseau faisant appel à la fois aux phénomènes d'interférence et de diffraction, nous pouvons réitérer, à propos de ces extraits, les conclusions tirées dans les paragraphes précédents.

Nous nous intéressons ici à l'amplitude complexe résultante diffractée en un point M situé à l'infini dans une direction θ (voir appendice 3 pour quelques rappels). Seuls convergent en M les rayons d'ondelette diffractés dans la direction θ . En tout état de cause, ils appartiennent à l'onde globale diffractée par le réseau, sans que l'on connaisse exactement la structure de cette onde. Mais, l'ensemble des rayons diffractés dans une direction θ constitue-t-il une onde plane? Nous retrouvons une situation analogue à celle rencontrée lors de l'étude de la diffraction dans une direction θ par une ouverture plane (voir A.III.3.b.2.). Deux auteurs (2u, 3u) affirment qu'il en est ainsi.

"Pour le faisceau incident comme pour le faisceau diffracté les surfaces d'onde sont des plans perpendiculaires à la direction des rayons." (2u)

Certains auteurs font référence à des ondes diffractées ou émises par deux fentes successives dans une direction donnée : (2u) parle de "déphasage à l'infini entre les ondes diffractées par deux fentes successives" et (3u) calcule "le retard de marche entre les ondes

émises par deux traits consécutifs". Mais quelle relation existe-t-il entre ces ondes et l'onde résultante diffractée par une fente ou par le réseau?

Les figures 42 et 43 illustrent ce dispositif pour lequel on retrouve la continuité de la symbolisation des rayons entre la source et le point d'observation.

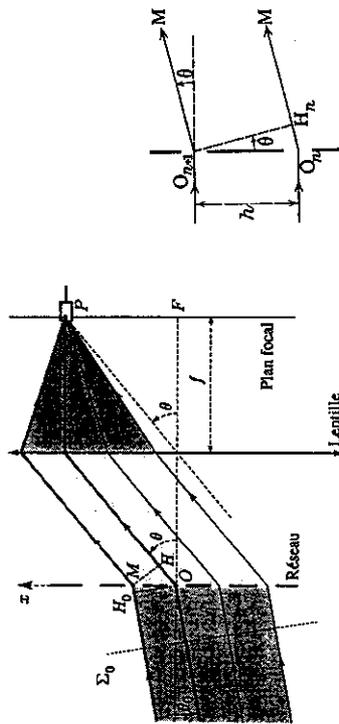


Figure 42

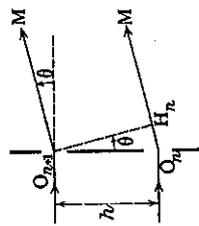


Figure 43

Le réseau est sans doute le dispositif le plus complexe de ceux étudiés puisqu'il réunit les phénomènes d'interférence et de diffraction. Nous y retrouvons donc l'ensemble des difficultés déjà recensées lors de l'étude de ces phénomènes.

5. Conclusions

Le statut du "rayon" dans les situations d'optique ondulatoire envisagées reste flou dans tous les manuels. Aucune mise en garde n'est donnée concernant le contenu énergétique du "rayon". Au contraire, la continuité du "rayon" est souvent fortement suggérée sur les schémas (même symbolisation sur des TRF n'ayant pas le même statut) et parfois dans les développements de cours.

De nombreux glissements de sens ont été relevés. Ceux-ci peuvent entraîner les étudiants à conférer au "rayon" des propriétés de type ondulatoire (propagation d'un "rayon", attribution d'une phase à un "rayon", interférence entre "rayons").

L'observation à l'infini des phénomènes de diffraction (par une ouverture ou un réseau) amène, dans certains manuels, à confondre un ensemble de "rayons" parallèles avec une onde plane. La notion de sélection ou de tri des "rayons", fonction du point d'observation, parmi l'ensemble des "rayons" constituant l'onde diffractée par une ouverture ou un réseau n'est qu'exceptionnellement évoquée.

IV. Déviation et optique ondulatoire

Cette notion de "déviation" s'introduit à ce niveau de l'étude puisque d'une part, elle intervient lors de l'utilisation en spectroscopie des réseaux, précédemment étudiés, et que

d'autre part, elle illustre un glissement de sens peut-être induit par ceux précédemment dénoncés.

La description et le fonctionnement des spectroscopes à prisme et à réseau se font souvent suite dans les parties consacrées à la spectroscopie.

Ce sujet, peu abordé au niveau secondaire, fait l'objet dans certains manuels du supérieur (1u, 2u, 4u et 6u) d'un chapitre entier.

Les deux dispositifs ayant les mêmes fonctions, il est logique de vouloir comparer leurs qualités expérimentales, notamment leur résolution. Par contre, mettre en parallèle leurs principes de fonctionnement, qui restent fondamentalement différents, peut entraîner de forte dérive comme le montre la notion de "déviation", notion centrale en spectroscopie.

1. Niveau secondaire

Les développements théoriques étant peu poussés (seuls (1s) et (4s) calculent la différence de marche entre deux "rayons successifs"), les glissements de sens sont beaucoup moins forts qu'au niveau universitaire.

Voici quelques formulations qui illustrent la qualité des commentaires fournis :

"les raies brillantes, obtenues lorsque l'interférence est constructive, sont observées lorsque l'angle θ précédemment défini satisfait à la relation : $\sin \theta = \frac{k\lambda}{a}$ " (1s)

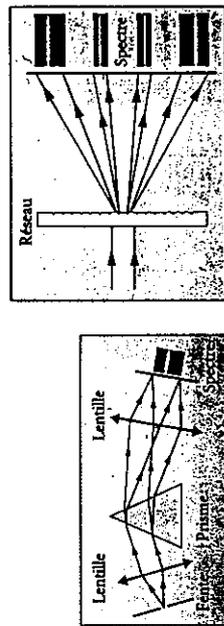
"Un réseau plan éclairé normalement par un faisceau parallèle de lumière monochromatique, de longueur d'onde λ , donne des maxima lumineux dans des directions faisant des angles θ_k par rapport à la normale au plan du réseau, tels que : $\sin \theta_k = kN\lambda$ " (3s)
 "écart angulaire θ des différents ordres par rapport à la direction incidente" (5s)

Dans ces commentaires, il n'est pas fait mention de "déviation", mais d'écart angulaire entre directions des maxima d'intensité, ce qui constitue une formulation correcte.

La notion de "déviation" n'apparaît qu'à deux occasions dans l'ensemble des manuels analysés.

Dans (5s), sur la figure représentant le dispositif expérimental relatif à la mesure de longueur d'onde, il est indiqué "trace du pinceau non dévié", pouvant laisser entendre que les autres pinceaux sont, eux, déviés.

Dans (4s), les schémas (44) et (45) sont présentés dans le paragraphe relatif à la spectroscopie.



1. Principe du spectroscopie à prisme : les radiations violettes sont plus déviées que les rouges.
 2. Principe du spectroscopie à réseau : ici, ce sont les radiations rouges qui sont les plus déviées.

Figure 44

Figure 45

A noter, surtout, le commentaire de la figure (45) qui laisse penser que, pour les deux dispositifs, les radiations sont "dévies" et que, par conséquent, les phénomènes mis en jeu sont du même ordre. Il est toutefois précisé, mais sans aucune mise en garde particulière, les principes de fonctionnement des deux dispositifs : "Le fonctionnement d'un spectroscopie ou d'un spectromètre est basé sur la décomposition de la lumière en ses différentes radiations : - par un prisme de verre (dont l'indice de réfraction est fonction de la longueur d'onde); - par un réseau (dont les traits diffractent la lumière : celle-ci ne peut interférer de façon constructive que dans certaines directions privilégiées)."

Nous retrouvons dans (3s) les commentaires suivants relatifs aux principes de fonctionnement des spectroscopes :

"Le dispositif essentiel d'un spectroscopie peut-être constitué de deux façons :

- par un prisme : l'indice du verre constituant un prisme varie avec la longueur d'onde (phénomène de dispersion) ; ainsi chaque radiation monochromatique composant une lumière est déviée différemment ;
- par un réseau : le plus simple des réseaux est constitué par des fentes très fines et très serrées, gravées sur une plaque de verre. Dans ce cas, la décomposition de la lumière est provoquée par des phénomènes de diffraction et d'interférence."

Ici, il n'est pas fait mention de "déviation" dans le cas du spectroscopie à réseau.

Le terme de "déviation" n'est donc que très peu utilisé mais il faut souligner que les réseaux ne sont que très peu abordés dans les programmes de terminale S.

2. Niveau universitaire

a. Places relatives des spectromètres à prisme et à réseau dans les manuels

Trois manuels (1'u, 4'u et 6'u), sur les six analysés, font suivre l'étude du spectromètre à prisme par celle du spectromètre à réseau. L'étude du spectromètre à prisme, lorsqu'elle n'est pas associée au sein d'un même chapitre à celle du spectromètre à réseau, vient se placer dans les développements relatifs aux phénomènes de diffraction et d'interférences, et ne constitue donc pas une suite logique du cours. Ainsi, dans (6u), elle se situe après le chapitre d'étude des franges d'égal épaisseur. Plus surprenant, dans (1'u), elle fait partie du chapitre "Diffraction à l'infini par une fente".

Cette juxtaposition des deux dispositifs, sans mise en garde particulière, peut renforcer les glissements de sens mentionnés dans les paragraphes suivants.

b. Etude théorique des réseaux

Lors de l'étude théorique des réseaux, le terme de "déviation" n'est pas utilisé sauf dans (3u) où l'on trouve des commentaires du type suivant : "Mais pour l'angle de déviation θ_1 tel que $\sin \theta_1 = \lambda/a$, on retrouve $E=N$ et donc la forte intensité du faisceau direct, c'est le premier ordre de diffraction."

Les auteurs parlent en général de "directions des maxima principaux d'intensité". Voici quelques exemples de formulation :

"Les directions θ_p des maxima principaux d'ordre p sont données par $h(\sin \theta_p - \sin i) = p\lambda$; celui d'ordre zéro est dans la direction de la lumière incidente." (1u)

"On obtiendra un maximum d'intensité lumineuse pour $\delta = k\lambda$ (...). Les directions de ces maxima sont donc données par $\sin \theta = k(\lambda/a) + \sin i$. Pour $k=0$ on obtient le prolongement du faisceau incident. Pour $k \neq 0$ la position des maxima dépend de la longueur d'onde λ : le réseau disperse la lumière." (2u)

"L'éclairement maximal est obtenu pour $\sin i = \frac{k\lambda}{p}$... " (4u)

"L'équation donnant la position des maxima principaux d'intensité est appelée la relation fondamentale des réseaux." (6u)

c. Etude des spectromètres

C'est dans cette partie que la notion de "déviation" apparaît de façon systématique et que, par conséquent, les glissements de sens risquent d'être les plus forts.

On ne s'intéresse ici qu'à l'étude de la figure de diffraction (à l'infini) et en particulier aux maxima principaux d'intensité. Il s'opère alors un certain nombre de simplifications qui ne seront souvent plus rappelées par la suite : les maxima secondaires ne sont pas pris en compte ; les fentes sont supposées infiniment fines ; la figure complexe de diffraction est "remplacée" par des spectres de raies.

C'est ce passage de la figure de diffraction aux spectres de raies qui pourrait occasionner le plus de difficultés si l'on perd de vue que les directions θ prises en compte correspondent aux directions des maxima principaux d'intensité.

Or, l'obtention des spectres, telle que décrites dans les manuels, ne clarifie pas toujours ce passage, surtout c'est l'occasion d'un parallèle avec le dispositif à prisme. Les passages suivants illustrent cette opinion :

"Pour chaque valeur de p , on obtient une "image de diffraction" de la fente (F). Cette image a la forme allongée d'une raie (...). Pour chaque valeur de p et pour chacune des radiations composant la lumière émise, on obtient une raie : leur ensemble constitue le spectre d'ordre p de la lumière analysée. Dans un tel spectre, les déviations varient dans le même sens que les longueurs d'onde alors que dans un prisme la plus grande déviation correspond à la plus petite longueur d'onde." (1'u)

"La formule $\sin \theta = k(\lambda/a) + \sin i$ montre que pour k donné, chaque longueur d'onde est diffractée dans une direction dépendant de λ . On obtient des spectres pour les valeurs non nulles de k . (...) Pour chaque valeur de k correspond un spectre que l'on appelle : spectre d'ordre k . (...) On retiendra donc que le réseau disperse un faisceau de lumière blanche, un peu à la manière d'un prisme. Le "mécanisme" qui régit cette dispersion est cependant très différent dans les deux cas. En particulier, pour un réseau, les radiations rouges sont plus déviées que les radiations bleues (pour un ordre k donné), ce qui est le contraire du phénomène observé par un prisme." (2u)

"La déviation est plus grande pour le rouge que pour le violet dans le cas d'un réseau alors que c'est l'inverse dans le cas d'un prisme." (4'u)

"Lorsque deux ondes planes, de longueurs d'ondes voisines λ et $\lambda + d\lambda$, tombent sur un réseau en faisant le même angle d'incidence θ_0 , l'écart $d\theta$ entre les angles que font les ondes diffractées, s'obtient (...) contrairement au prisme, les ondes de grandes longueurs d'ondes (rouge) sont plus dispersées que celles de petites longueurs d'ondes (bleu)." (6u)

A noter que (6u) utilise dans ce passage la notion de "dispersion" mais que, par la suite, il la remplace par celle de "déviation". (2u) insiste sur la différence entre les mécanismes régissant la dispersion par un prisme et un réseau, mais en donne une conséquence (déviation différente des radiations) et non une explication.

Nous remarquons donc le changement de vocabulaire, favorisant les glissements de sens : on passe des directions des maxima principaux d'intensité aux déviations des radiations définies par leur longueur d'onde.

Si la mesure de longueur d'onde est développée dans le cours (1'u, 2u et 6u), la notion de "déviation" est toujours employée, surtout du fait des propriétés du "minimum de déviation". Le parallélisme avec le prisme est tentant puisque l'on utilise les propriétés du minimum de déviation dans les spectroscopes à prisme.

Voulant introduire la notion de "minimum de déviation", il est nécessaire de définir plus précisément celle de "déviation". Voici les formulations proposées :

"Pour une longueur d'onde λ donnée et un ordre p fixé, la déviation est $D = \theta_p - i$." (voir figure 46) (1'u)

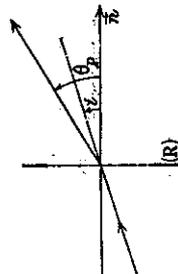


Figure 46

"Pour un réseau éclairé sous une incidence i et diffractant dans la direction θ , l'angle de déviation est, par définition : $D = \theta - i$." (2u)

"Dans un réseau par transmission, la déviation de l'onde incidente, $D = \theta - \theta_0$, passe par un minimum comme dans un prisme." (6u)

Ces formulations appellent quelques commentaires. (1u) et (2u) ne précisent pas (ou ne rappellent pas) à quoi s'applique cette "déviation", s'il s'agit même d'une déviation au sens habituel du terme, à savoir changement de direction d'un "objet". (6u) précise qu'il s'agit de la "déviation de l'onde incidente" ce qui ne fait qu'ajouter à la confusion. Enfin, la formulation de (2u) "diffractant dans la direction θ " laisse penser que le phénomène de diffraction n'existe que dans certaines directions privilégiées.

d. Conclusion

La notion de "déviation", apparemment consacrée par l'usage pour l'étude des spectromètres, pourrait être la source de nombreuses difficultés d'interprétation pour les étudiants, même si, à ce niveau, ils disposent de la formalisation mathématique adaptée (à supposer que celle-ci constitue un avantage).

Les obstacles suivants s'opposent à l'interprétation correcte de ce qui n'est, dans le cas du réseau, qu'un abus de langage, la "déviation" des "rayons".

Les notions de base "rayon" et onde ne sont pas clairement précisées.

Des glissements lexicaux fréquents font passer des notions de type ondulatoire dans le cadre du modèle du "rayon", ceci, le plus souvent, sans aucune précision ou mise en garde.

La symbolisation des schémas (TRF) pourrait suggérer aux étudiants une continuité du "rayon" entre source et point d'observation. L'étude en parallèle du spectromètre à prisme pourrait renforcer cette idée.

Ce parallélisme d'étude et des hypothèses simplificatrices insuffisamment rappelées concernant l'interprétation de la figure de diffraction du réseau, pourraient conduire à amalgamer les principes forts différents à l'origine de la dispersion dans les deux types de spectromètres.

B. Sélection de rayons. Sélection par l'aval

Une onde (par exemple l'onde résultant de la dispersion par un prisme ou de la diffraction par un réseau) est constituée de rayons d'ondelettes. En général, l'onde est fort complexe et la construction des surfaces d'onde très difficile. Nous sommes donc amenés à nous intéresser à l'onde de façon locale (en fait, en un point d'observation) et non pas de façon globale. Le problème à résoudre est donc, de déterminer, parmi l'ensemble des rayons d'ondelettes, ceux qui convergent au point d'observation considéré.

C'est donc le point d'observation (ou le plan d'observation, si les phénomènes sont du même ordre dans ce plan), qui opère une "sélection" des rayons d'ondelette : il s'agit d'une "sélection par l'aval". L'analyse se déroule en quelque sorte à "rebrousse-rayon" (voir appendice 1) par rapport à l'analyse "traditionnelle" qui procède de la source vers le point d'observation. Suivant le point (ou le plan) d'observation choisi, les regroupements des rayons d'ondelette sont très différents et peuvent donner lieu à des phénomènes relevant, par "tradition", de l'optique géométrique ou de l'optique ondulatoire.

Dans cette partie, nous essaierons de voir si une telle approche des phénomènes optiques est présente dans les manuels.

I. Niveau secondaire

Seuls, (1s) et (4s), présentent des situations où cette idée de sélection est pertinente et donc susceptible d'être mentionnée.

Dans le cadre d'un exercice sur les réseaux, (1s) donne le commentaire suivant : "Les ondes issues des fentes $F_1, F_2, F_3, \dots, F_i, \dots$ interfèrent (...). On considère *seulement* les interférences entre rayons parallèles, ces rayons concourent en un point situé à l'infini (...). Souvent, ces franges sont focalisées dans le plan focal d'une lentille."

Comment un élève peut-il interpréter le terme "seulement" dans ce passage? Pourquoi ne considère-t-on que ces "rayons"? Qu'advient-il des autres "rayons"? L'idée de "sélection par l'aval", à savoir que le choix d'une direction d'observation ou d'un point d'observation dans le plan focal de la lentille fixe les "rayons" à prendre en compte, semble fort éloigné.

De même, dans le chapitre relatif à l'obtention de spectres lumineux, (1s) précise : "Pour simplifier, nous ne considérerons que les différents rayons parallèles issus de fentes secondaires F_1, F_2, \dots, F_N du réseau. Ces rayons étant parallèles, ils interfèrent, en l'absence de lentille à l'infini. La présence de la lentille permet leur rencontre sur l'écran..."

Dans quelle mesure l'élève analyse-t-il la simplification opérée en ne s'intéressant qu'à la diffraction à l'infini? Comprend-il que la diffraction à l'infini est moins complexe que celle à distance finie ou que l'on ne prend pas en compte une partie des "rayons"?

Dans l'énoncé d'un exercice, (4s) formule une question de la façon suivante :

"Exprimer la différence de marche entre les rayons diffractés par deux fentes successives (ces rayons sont parallèles entre eux)..."

L'affirmation du parallélisme des "rayons" amène à s'interroger : pourquoi considère-t-on uniquement ces "rayons" et pourquoi sont-ils parallèles? L'élève semble avoir bien peu d'éléments pour répondre correctement, même de façon partielle, à ces questions.

Même si les éléments de discussion sont rares, nous constatons l'absence de la notion de "sélection par l'aval" qui pourrait être pertinente dans l'interprétation de la diffraction par les

réseaux. Au contraire, l'analyse des situations procède toujours de la source vers le point d'observation, ne facilitant pas la compréhension des élèves.

II. Niveau universitaire

Nous donnerons, dans un premier temps, des exemples de situations classiques d'optique mettant en évidence l'idée de "sélection" de rayons. Dans un deuxième temps, nous illustrerons l'idée de "sélection par l'aval" dans des situations de type purement géométrique puis de type ondulatoire.

1. Sélection de rayons

Dans l'ensemble des manuels, il est en général peu fait allusion à l'ensemble des rayons et l'on ne s'intéresse qu'aux rayons "utiles" (voir A.III.2.). L'idée de "sélection" des rayons parmi un ensemble n'est donc pas évidente.

Seul (5u) utilise cette notion de sélection lors de l'étude de la diffraction d'un faisceau parallèle par un réseau plan : "En réalité, on sélectionne les rayons interférant à l'infini grâce à une lentille convergente."

C'est la position du plan d'observation dans le plan focal image de la lentille qui assure la formation de l'image de diffraction en rassemblant tous les rayons d'ondelettes parallèles à une direction émergente θ donnée, en provenance de tous les points du réseau. Cette situation se retrouve dans d'autres dispositifs : diffraction à l'infini par une ouverture, dispositifs d'Young. C'est donc le paramètre θ qui assure la sélection des rayons d'ondelette. Dans le cas des anneaux à l'infini d'une lame à faces parallèles (voir figure 47), de même que pour l'interféromètre de Fabry-Pérot, l'angle θ joue ce rôle.

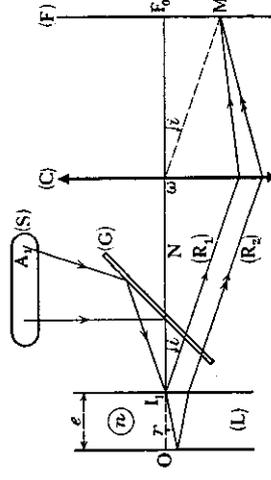


Figure 47

Dans ces situations, la position du point d'observation permet la construction des rayons d'ondelette convergeant en ce point, utilisant le fait que le rayon d'ondelette passant par le centre optique de la lentille n'est pas dévié.

Les auteurs (hormis (5u)) n'utilisent donc pas la notion de sélection de rayons. Dans ces conditions, les étudiants possèdent-ils les notions requises (multidirectionnalité des sources secondaires liée au phénomène de diffraction, sélection opérée parmi l'ensemble des rayons d'ondelette par le dispositif expérimental) pour interpréter correctement les situations

présentées?. Ces difficultés probables pourraient-elles être aplanies par une insistance plus forte sur la notion de sélection de rayons d'ondelette au cours des séances d'enseignement?

2. Sélection par l'aval

Le paragraphe précédent ne concernait des situations où l'observation ne s'effectue que dans un seul plan (le plan focal image de la lentille), ne mettant pas en évidence ce qui se passe en dehors de ce plan.

Les situations suivantes vont illustrer le rôle fondamental joué par la position du plan d'observation dans la sélection des rayons et la formation de l'"image" observée.

a. Situations de type géométrique

(4u) propose en exercice le dispositif de la figure 48.

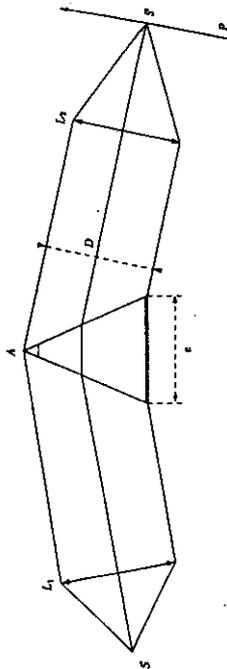


Figure 48

L'écran est placé dans le plan focal image de L_2 .

La source ponctuelle S émet deux raies de même intensité et de longueurs d'onde λ_1 et

λ_2 .

On modifie le dispositif en plaçant une fente fine sur la face d'entrée du prisme dans le plan focal objet de L_2 , la lentille L_3 dans le plan focal image de la lentille L_2 et l'écran dans le plan focal image de L_3 (voir figure 49).

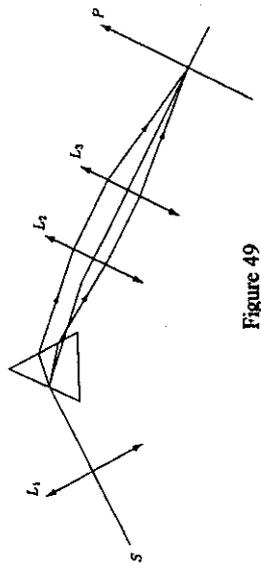


Figure 49

Les questions posées portent sur ce que l'on observe dans chaque cas sur l'écran.

On observe, dans la première situation, deux points lumineux correspondant au spectre de la lumière utilisée. Il s'agit donc d'un "tri" des rayons suivant leur longueur d'onde : pour chaque longueur d'onde, les rayons, déviés parallèlement par le prisme, forment un faisceau parallèle qui converge en un point du plan focal image de L_2 (voir figure 50).

Dans la deuxième situation, la fente sur la face d'entrée du prisme étant placée dans le plan focal objet de L_2 , un point de l'écran rassemble tous les rayons issus d'un point de la face d'entrée (voir figure 50) : on obtient donc sur l'écran l'image de la face d'entrée du prisme. (4u) donne en solution le commentaire suivant : "Dans le plan focal de L_2 il y a recombinaison de la lumière ($\lambda_1 + \lambda_2$) dans l'image de la fente placée sur la face d'entrée du prisme."

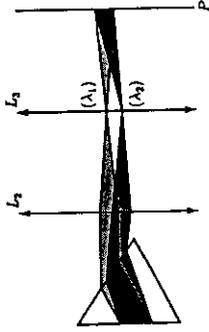


Figure 50

(5u) utilise un montage analogue (voir figure 51) dans la partie de son cours consacrée à l'analyse et à la synthèse de la lumière. En plaçant un petit obstacle dans le plan focal de la lentille L' , on peut occulter une partie du spectre et l'image de la face d'entrée sera obtenue avec le spectre résiduel. La lentille L' permet donc l'analyse de la lumière dans son plan focal image et la synthèse de la lumière dans le plan image de la face d'entrée du prisme. Cette situation est en fait analogue à celle classique en optique de Fourier où le spectre de l'objet est obtenu dans le plan de Fourier et l'image de l'objet, transformée ou non par filtrage dans le plan de Fourier, dans le plan image.

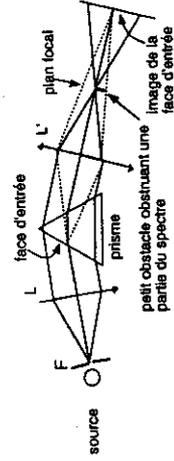


Figure 51

Les auteurs mettent peu l'accent sur le fait que ce sont les mêmes rayons sur lesquels s'effectuent des "regroupements" différents suivant le plan où l'on les observe. Les figures 50 et 51 devraient mettre en évidence cet aspect du problème (quoique la figure 51 soit très peu claire de ce point de vue).

Au travers de ces exemples, nous voyons donc que, même pour des situations de type purement géométrique, c'est le choix de la position du plan d'observation qui est primordial pour l'analyse du problème (obtention d'un spectre, recombinaison partielle ou totale de la lumière) et que cet aspect n'est à aucun moment souligné par les différents auteurs.

b. Situations de type ondulatoire

Les situations du paragraphe précédent ne mettaient en jeu que des rayons lumineux tels que définis dans le cadre de l'optique géométrique. Les situations suivantes, relevant de l'optique de Fourier, sont plus complexes puisqu'elles relèvent typiquement de l'optique ondulatoire : les rayons peuvent être considérés comme des rayons "purement géométriques" ou des rayons d'ondelettes suivant les cas. Mais l'idée de "sélection par l'aval" des "rayons" reste identique à celle développée dans le paragraphe précédent (l'introduction de l'optique de Fourier y a d'ailleurs déjà été annoncée).

Ces types de situations sont traitées à des degrés très différents dans (2u), (5u) et (6u). (2u) présente le dispositif de strioscopie comme simple introduction aux phénomènes de diffraction. (5u) en fait de même dans son cours mais y ajoute un exercice sur le sujet. Seul (6u) consacre un chapitre entier à l'optique de Fourier (le manuel s'adresse également à des étudiants en licence).

Les situations analysées seront celles relatives au filtrage des fréquences spatiales en éclairage cohérent :

- filtrage en amplitude : image d'un réseau (6u),
- filtrage des objets de phase : strioscopie (5u et 6u).

Le filtrage est mis en oeuvre dans le montage "A₁F" (figure 52) donné par (6u).

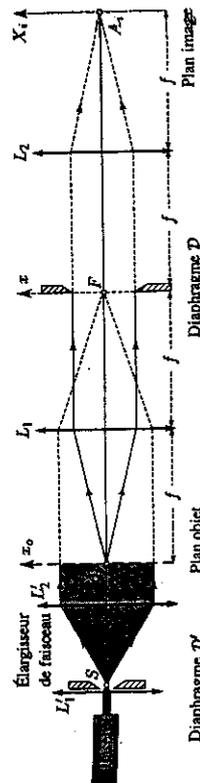


Figure 52

Ce schéma reste très peu clair quant à la nature et à la marche des "rayons" comme en témoigne la symbolisation (TRF, traits pointillés fléchés et non fléchés). Un ou plusieurs schémas montrant les trajets de rayons d'ondelette quelconques et leurs regroupements dans le plan de Fourier et dans le plan image seraient plus démonstratifs (voir figures 53 et 54).

(6u) commente ce dispositif de la façon suivante :

"... un ensemble $\{L_1, L_2\}$ de deux lentilles minces convergentes identiques, de même distance focale image f , (qui) donne une image géométrique située à la distance $4f$ de l'objet."

Plus loin, (6u) décrit le phénomène observé dans le plan focal image de L_1 :

"Autour de l'image géométrique F du point de focalisation S , formée par l'ensemble $\{L_2, L_1\}$, on observe la figure de diffraction de Fraunhofer donnée par le diaphragme que constitue l'objet, le rôle des montures des lentilles étant négligé."

(6u) analyse les pics de la répartition d'amplitude de la figure de diffraction en terme de fréquences spatiales de l'objet et introduit le filtrage des fréquences spatiales :

"Ce qui précède suggère d'intervenir dans le plan du diaphragme, où se trouve exhibé le spectre de l'objet, afin de ne visualiser dans le plan image que les informations présentant de l'intérêt. C'est ainsi qu'on filtre dans le plan focal de L_1 les fréquences spatiales caractéristiques de certains détails de l'objet."

Les expressions suivantes sont employées par (6u) pour décrire le filtrage en amplitude (l'objet peut par exemple être un réseau) :

"... occulter certains pics dans le plan de diffraction où se trouve le spectre du réseau."

"... en ne laissant passer qu'un spot sur deux ..."

"Les rayons diffractés par le réseau sous un angle θ supérieur à $l/(2f)$ sont arrêtés par la fente et n'atteignent donc pas le plan image du réseau... les premiers ordres sont donc arrêtés et à fortiori tous les ordres supérieurs."

Pour le filtrage des objets de phase (strioscopie par exemple), nous trouvons des expressions analogues :

"La strioscopie consiste à occulter, à l'aide d'un écran opaque, la composante spatiale nulle ($u=0$) dans le plan spectral. (...) Ainsi, la strioscopie permet de voir des objets de phase en arrêtant, dans le plan de diffraction, la fréquence spatiale nulle de l'objet. Comme cette fréquence spatiale est à l'origine de l'éclaircissement uniforme du plan image, les détails de l'objet apparaissent sur fond noir." (6u)

"Le diaphragme centré au foyer permet d'occulter la contribution due à la fente de largeur a . Donc l'information correspondante n'apparaît pas dans le plan image..." (6u)

"Il faut cacher l'image géométrique de S ." (5u)

Nous n'avons relevé ici que les éléments pertinents quant à notre étude. Les développements mathématiques utilisés se basent évidemment sur les transformées de Fourier.

Dans les extraits cités et le schéma présenté, nous constatons la coexistence d'éléments appartenant à l'optique géométrique (image géométrique de la source au niveau du diaphragme, de l'objet dans le plan image) et à l'optique ondulatoire (figure de diffraction, fréquences spatiales de l'objet, "rayons" diffractés).

Même s'il semble évident à la lecture des commentaires des auteurs que les "rayons" peuvent "traverser" le dispositif ou être "arrêtés" au niveau du diaphragme, les auteurs soulignent peu, dans l'ensemble, les aspects suivants :

- la "marche des rayons" entre l'objet et son image,
- les différents "regroupements des rayons" à l'origine de la formation de la figure de diffraction dans le plan de Fourier et de l'image de l'objet dans le plan objet.

En revanche, les figures (53) et (54)²⁵ pourraient être proposées pour illustrer ces aspects.

C. Conclusions et perspectives

L'objet de cet étude portait sur le passage de l'optique géométrique à l'optique ondulatoire au niveau de la terminale S et du premier cycle universitaire. La problématique porte donc en fait sur la cohérence des modèles introduits dans chacun des deux domaines.

Nous constatons que cette cohérence souhaitée n'est pas pleinement atteinte.

En effet, au niveau du secondaire, peu de liens sont présentés entre les deux modèles géométrique et ondulatoire, sans doute en liaison avec la difficulté d'introduction des notions de propagation et de phase. Il ne s'agit pas en fait d'une transition "douce" mais plutôt d'une juxtaposition de deux modèles. Le premier est abandonné devant la mise en défaut d'un de ses principes fondamentaux (la propagation rectiligne de la lumière) et son incapacité à interpréter des phénomènes de type ondulatoire. Cette séparation nette entre optiques géométrique et ondulatoire est toutefois remise en cause par l'introduction dans les schémas de TRF (tracés rectilignes fléchés) pouvant symboliser des rayons et les développements de cours où le terme "rayon" est souvent employé. Les élèves peuvent s'interroger sur la nature de ces "rayons" dans des situations typiques d'optique ondulatoire (diffraction et interférences). Deux aspects rendent difficile le passage de la notion de rayon à celle d'onde :

- les glissements de sens fréquents : le lexique propre aux phénomènes ondulatoires (propagation, phase, interférences) se trouve attribué aux "rayons" ; inversement, la notion de déviation, relative aux "rayons", est appliquée à la diffraction par un réseau, phénomène typiquement ondulatoire ;
- la symbolisation des schémas (utilisation des TRF). Celle-ci laisse le plus souvent penser à une continuité des "rayons" à la traversée d'un dispositif, même si ce dispositif met en jeu des phénomènes de diffraction et d'interférences.

A noter également, que le contenu énergétique du rayon lumineux est rarement précisé ce qui pose le problème de l'interprétation du "partage" du rayon lumineux sur une surface de séparation entre deux milieux.

Au niveau universitaire, nous constatons la diversité des approches du modèle géométrique et par conséquent des transitions différentes. En fait, nous pouvons relever deux types d'approche :

- une approche ondulatoire basée sur la formalisation mathématique de l'onde,
- une approche géométrique basée sur une des quatre formulations équivalentes (hypotheses de Descartes, principe de Fermat, théorème de Malus, construction d'Huygens).

Même si la formalisation mathématique est plus poussée (introduction des notions de propagation et de phase pour la première approche) et si l'accent est mis sur le contenu énergétique du "rayon", les conclusions énoncées pour le niveau secondaire restent valides.

Les relations entre "rayon" et onde sont peu explicitées. Les limites du modèle du rayon lumineux sont présentées en faisant appel au phénomène de diffraction. Une séparation relativement nette est tracée entre optiques géométrique et ondulatoire. Toutefois, comme au niveau secondaire, les "rayons" apparaissent dans de nombreuses situations d'optique ondulatoire, sans aucune mise en garde sur le statut de ces "rayons", notamment au regard de leur contenu énergétique. Les mêmes remarques peuvent être faites relativement aux glissements de sens et à la symbolisation, qu'au niveau secondaire.

A noter plus particulièrement les glissements de sens de la notion de déviation dans les phénomènes de diffraction par les réseaux.

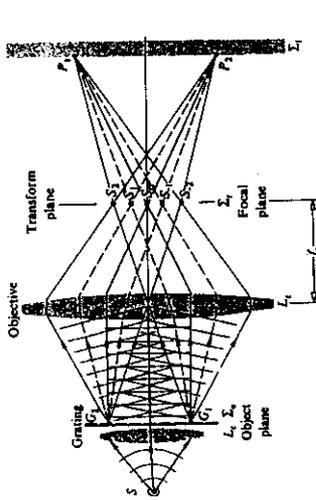


Figure 53

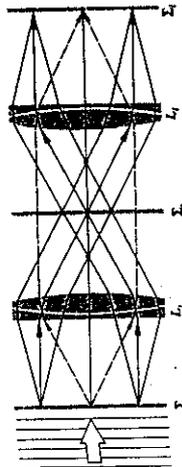


Figure 54

Cette présentation ne permet évidemment ni de connaître l'amplitude résultante en chacun des points de la figure de diffraction ou de l'image de l'objet, ni d'apprécier la contribution respective des différents rayons d'ondelette à la formation d'un point de l'image (la formalisation mathématique et le calcul sont nécessaires).

Par contre, elle peut faciliter la compréhension des phénomènes en en donnant une présentation plus explicite. A un autre niveau, elle met en évidence la cohérence des concepts introduits en optique : un dispositif unique comporte des éléments relevant du domaine de l'optique géométrique (image d'un objet donnée par un système de lentilles) et d'autres de l'optique ondulatoire (figure de diffraction, fréquences spatiales).

3. Conclusions

La notion de sélection des rayons n'apparaît pratiquement jamais (une phrase s'y réfère) dans l'ensemble des manuels analysés. Cependant, elle paraît être intéressante à plusieurs titres. Elle permet, à priori, (ceci reste bien sûr à vérifier auprès des élèves et étudiants) :

- d'éviter la confusion entre rayons parallèles et onde plane, en soulignant que ces rayons sont sélectionnés à partir de l'ensemble des rayons constituant l'onde considérée ;
- d'assurer une meilleure compréhension des phénomènes liés, en particulier, à l'optique de Fourier ;
- de donner une vision plus unifiée de l'optique en analysant de façon cohérente le fonctionnement de dispositifs mettant en jeu des phénomènes relevant de l'optique géométrique et de l'optique ondulatoire.

Nous rappelons, enfin, les conclusions relatives à la notion de sélection (par l'aval) des rayons, notion qui n'est pratiquement jamais présentée. Cette notion consiste à analyser un certain nombre de situations (analyse et synthèse de la lumière, diffraction par un réseau, interférences par une lame à faces parallèles, interféromètre de Fabry-Pérot, filtrage en optique de Fourier) comme une sélection de rayons parmi l'ensemble des rayons constituant l'onde considérée. Cette sélection s'opère par le choix de la position du plan d'observation dans lequel peut se former une figure de diffraction ou l'image géométrique d'un objet.

Cette présentation permettrait probablement :

- d'éviter la confusion entre ensemble de rayons parallèles et onde plane ;
- d'assurer une meilleure compréhension des phénomènes liés, en particulier, à l'optique de Fourier ;
- de donner une vision plus unifiée de l'optique en analysant de façon cohérente le fonctionnement de dispositifs mettant en jeu des phénomènes relevant de l'optique géométrique et de l'optique ondulatoire.

Comme indiqué en introduction, cette étude fait suite à une préenquête effectuée sur des étudiants auquel n'a pas participé l'auteur de ce mémoire. Les nombreuses questions relatives à la compréhension par les étudiants des phénomènes d'optique soulevées par cette préenquête et par le présent mémoire n'ont pas encore fait l'objet d'une étude approfondie susceptible d'en confirmer la pertinence.

Une étude (entretiens, questionnaires auprès d'étudiants et enseignants) pourrait donc être engagée pour mettre à jour les difficultés liées à la problématique proposée dans ce mémoire. Ces difficultés pourraient s'analyser du point de vue de l'articulation entre optiques géométrique et ondulatoire (la continuité de la représentation du rayon peut par exemple constituer un élément d'analyse) et de la nécessaire sélection de l'information lumineuse que l'on prend en compte pour traiter tel ou tel problème.

Cette étude pourrait déboucher sur une réflexion sur les contenus d'enseignement et les objectifs pédagogiques à poursuivre relativement aux difficultés rencontrées, ainsi que sur les outils et séquences d'enseignement à construire.

Bibliographie

De recherche

1. Guesne, E. 1984. Children's ideas about light / les conceptions des enfants sur la lumière, *New Trends in Physics Teaching*, Vol IV UNESCO, Paris, pp. 179-192.
2. Tiberghien, A. 1984a. Revue critique sur les recherches visant à élucider le sens de la notion de lumière chez les élèves de 10 à 16 ans, recherche en didactique de la physique : *les actes du premier atelier international*, La Londe les Maures, 1983, CNRS, Paris, pp. 125-136.
3. Peralès, 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.
4. Kaminski, W. 1989. Conceptions des enfants et des autres sur la lumière, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 716, pp. 973-996.
5. Viennot, L. 1987. Recherche en didactique autour de la transition Secondaire-Supérieur. Deux exemples : l'optique géométrique, l'algèbre des grandeurs et des lois physiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 699, pp. 1251-1268.
6. Fawaz, A. et Viennot, L. 1986. Image optique et vision : enquête en classe de Première au Liban, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 686, pp. 1125-1146.
7. Chauvet, F. 1994. Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception : principes d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement. Thèse. Université Paris 7.
8. Gailli, I. 1996. Student's conceptual change in geometrical optics, *International Journal of Science Education*, Vol. 18, n° 7, pp. 847-868.
9. Maurines, L. 1986. Premières notions sur la propagation des signaux mécaniques : étude des difficultés des étudiants. Thèse. Université Paris 7.
10. Maurines, L. 1993. Mécanique spontanée du son. *Trema*. IUFM de Montpellier, pp. 77-91.
11. Maurines, L. et Salihi, E. 1988a. Mécanique spontanée du signal. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 707, pp. 1023-1041.
12. Moreau, R. 1992. Propagation guidée des ondes acoustiques dans l'air. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 742, pp. 1385-1398.
13. Maurines, L. 1995. Les étudiants et la phase propagative : résultats d'une enquête exploratoire, *Actes du cinquième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques*, Université de Reims-Champagne-Ardenne I.U.F.M. de Reims.
14. Verkerk, G. and Bouwens, R.E.A. 1993. Learning optics from seeing light, *Proceedings of International Conference on Physics Education GIREP'93, Braga (Portugal)*, pp. 100-121.
15. Pagliese J., S. P. et Ronen M. 1993. Workshop on teaching geometrical optics, *Proceedings of International Conference on Physics Education GIREP'93, Braga (Portugal)*, pp. 223-227.
16. Taylor, C. 1986. L'optique retrouvée, *New Trends in Physics Teaching*, Vol IV UNESCO, Paris, pp. 162-177.
17. Taylor, C. 1993. Images, optics and education, *Proceedings of International Conference on Physics Education GIREP'93, Braga (Portugal)*, pp. 122-136.
18. Dumin-Borkowski, J. 1993. Crooked paths of straight rays, *Proceedings of International Conference on Physics Education GIREP'93, Braga (Portugal)*, pp. 333-337.
19. Kai-Hua, Z. and Xi-Hua, Z. 1993. Teaching basic principles of optical information processing by phase factor analysis, *Proceedings of International Conference on Physics Education GIREP'93, Braga (Portugal)*, pp. 167-175.

20. Meheut, M. 1996. Enseignement d'un modèle particulière cinétique de gaz au collège. Questionnement et simulation, *Didaskalia*, 8, pp. 7-32.
 21. Lemeignan, G. et Weil-Barais, A., 1987. *Apprentissage de la modélisation à propos de l'enseignement de la mécanique au lycée*, Rapport de fin contrat MIR MEN : enseignement des apprentissages de la modélisation au collège et au lycée (action concertée "Recherche en éducation et en formation").
 22. Meheut, M. et Chaumat M. 1990. The bounds of children atomism; an attempt to make children build up a particulate model of matter, *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles : a central problem in secondary science education*, P.L. Lijnse, P. Licht, Wo de Vos, A.J. Waarlo editors.
- Des manuel d'enseignement**
- cités
23. Dévoré, G. et Annequin, R. 1996. *Cours de physique. Optique II*. 3ème éd. Paris, Librairie Vuibert.
 24. Bruhat, G. 1959. *Cours de physique générale. Optique*. 5ème éd. Paris, Masson.
 25. Hecht, E. 1987. *Optics*. 2ème éd. Addison-Wesley.
- analysés
- niveau secondaire (enseignement obligatoire de Terminale S) :
- (1s). Dubod, C., Dulac, Y., Fromont, J.C., Garay, B., Nordmann, J. 1995. *Physique Terminale S*, Collection D. Secrétan, Didier.
 - (2s). Lecardonnell, J.P., Bouland, A., Cauwet, J., Mercier, B., Laguillier, J.M., Paul, J.C. 1995. *Physique Terminale S*, Collection Galileo, Bordas.
 - (3s). Durandeau, J.P., Bramand, P., Faye, Ph., Martegouttes, R., Sahun, R., Thomassier, G. 1995. *Physique Terminale S*, Collection Durandeau, Hachette Livre.
 - (4s). Grossetête, C., Bouyrie, G., Déjous, C., Marsan, D. 1995. *Physique Terminale S*, Belin.
 - (5s). Tomasino, A., Fauris, M., Parent, C., Patrigeon, F., Simon, C. 1995. *Physique Terminale S enseignement obligatoire*, Nathan.
- niveau premier cycle universitaire
- (1u). Annequin, R., Boutigny, J. 1973 *Optique, mathématiques supérieures, Cours de Sciences Physiques*, 2ème édition, Vuibert, Paris.
 - (1'u). Annequin, R., Boutigny, J., 1974. *Optique 2. mathématiques spéciales, Cours de Sciences Physiques*, Vuibert, Paris.
 - (2u). Bertin, M., Faroux, J.P., Renault, J. 1986. *Optique et physique ondulatoire optique géométrique et optique physique phénomènes de propagation*, Cours de physique, 3ème édition, Bordas, Paris.
 - (3u). Levy, J.-C., S., Lazzarini, S., Numa, E. 1993. *Optique géométrique et physique. Ondes*, Edition Marketing, Paris.
 - (4u). Gouzerh, J., Perreau, M. 1996. *Optique géométrique*, Collection Pavages, Diderot Editeur, Arts et sciences, Paris.
 - (4'u). Gouzerh, J., Perreau, M. 1996. *Optique ondulatoire*, Collection Pavages, Diderot Editeur, Arts et sciences, Paris.
 - (5u). Quaramta, L. 1996. *Optique*, Collection Ampai Sciences, Masson, Paris.
 - (6u). Pérez, J.P. 1994. *Optique géométrique et ondulatoire*, Collection Enseignement de la physique, 4ème édition, Masson, Paris.

L.Viennot
Octobre 1996

Le rayon lumineux en optique géométrique et en optique ondulatoire

L. Viennot (octobre 1996)

Il est bien connu que l'optique géométrique est un modèle auquel il faut renoncer pour toute une série de phénomènes, lesquels nécessitent qu'on le remplace par l'optique ondulatoire. Le rayon lumineux, outil d'analyse attaché à l'optique géométrique, disparaît-il alors de la boîte à outils, comme on pourrait le croire à lire les mises en garde qui accompagnent fréquemment son introduction? Plus largement, quels sont les éléments conceptuels auxquels il faut renoncer, quels sont ceux qui restent utiles quand on passe de l'optique géométrique à l'optique ondulatoire? La brève analyse qui suit sert de prélude à une autre qui portera sur les manuels du secondaire et du supérieur (tutorat de P.Colin, 1996). Elle suit une enquête exploratoire qui fait état des difficultés qu'ont des étudiants de licence et de BTS d'optique pour concilier ces deux approches des phénomènes optiques: géométrique et ondulatoire (Viennot, doc. interne Juin 96).

Le texte qui suit est donc une analyse du contenu de la physique. Celui-ci n'étant accessible à l'auteur qu'à travers livres, expérience étudiante et enseignante, discussions entre collègues, il va sans dire que cette note réalise déjà une sorte de synthèse d'analyses de manuels, de pratiques courantes d'enseignement et de raisonnement personnel. Que ce texte rejoigne (on l'espère) ou non un consensus de physiciens, il sert de toute façon à définir une référence pour les analyses citées plus haut.

Modèle du rayon lumineux en optique géométrique

1- *Le rayon en optique géométrique représente un trajet de lumière, sans qu'on ait besoin d'en savoir plus sur sa définition. C'est un être individuel, en ce sens qu'on définit ses propriétés indépendamment des autres rayons.* Ces propriétés, ou encore les lois phénoménologiques qui régissent l'évolution du rayon, sont les suivantes:

-Si la lumière suit un trajet donné dans un milieu donné, elle le suit également dans l'autre sens: c'est le principe du retour inverse de la lumière. Un rayon peut donc "servir" dans les deux sens.

-De façon générale, ce trajet est "stationnaire", un point détaillé en annexe.

-Dans un milieu homogène et isotrope, le trajet de la lumière est rectiligne.

La pulsation ω est inversement proportionnelle à la période temporelle T , c'est à dire proportionnelle à la fréquence ν .

Le module du vecteur d'onde \vec{k} est inversement proportionnel à la période spatiale ou longueur d'onde λ .

Sans rentrer dans les détails, l'oscillation locale de la valeur du champ électrique se retrouve "identique plus tard, plus loin", en suivant un chemin tangent en tout point au vecteur d'onde \vec{k} . Ce chemin qui est en quelque sorte celui de la phase indique le (plus court) chemin de la phase PP , laquelle se propage à la vitesse (dite "de phase") $c = \omega/k$. La direction du vecteur \vec{k} est perpendiculaire à la surface d'onde qui passe au même point.

Le vecteur \vec{k} est partout le même pour une onde progressive monochromatique plane, il est radial et de module constant pour une onde progressive monochromatique sphérique. Tant que l'onde reste dans un milieu homogène et isotrope, ce vecteur \vec{k} est colinéaire au vecteur de Poynting $\vec{P} = (\vec{E} \wedge \vec{B}) / \mu$ qui donne la densité surfacique de flux de l'énergie* (la valeur maximum du module de \vec{P} est proportionnelle au carré de l'amplitude maximum du champ électrique). Il peut donc être considéré comme indiquant aussi le chemin de l'énergie. Mais comme plus haut, parler d'énergie impose un modèle continu pour cette grandeur et conduit à renoncer au rayon sans dimension porteur d'énergie. Ceci n'exclut pas l'idée d'un "chemin d'énergie" toujours tangent au vecteur de Poynting, comme une ligne blanche marque le milieu d'une route.

Ce chemin (de phase et d'énergie) d'une onde progressive monochromatique plane ou sphérique sera nommé, dans la suite, "rayon d'onde OPMPS".

Dans un milieu anisotrope, les chemins de phase et d'énergie sont différents: on choisit usuellement d'appeler "rayon" le chemin de l'énergie. L'optique ondulatoire contraint donc, si l'on tient à définir un chemin de lumière analogue au rayon lumineux de l'optique géométrique, à introduire cette fois une grandeur physique bien particulière associée au rayon, au lieu de cette notion indifférenciée de "lumière".

*Ceci n'est vrai que si l'onde n'interfère pas avec une autre: voir plus loin.

Le principe de Huygens stipule que chaque point d'une onde se comporte comme une source qui donne naissance à une "ondelette" sphérique. Si tel est le cas, on peut définir un "rayon d'ondelette" comme chemin de phase PP .

Le champ en un point est la somme des champs associés à toutes les ondelettes émises antérieurement.

*Contrairement à ce qui se passe pour un rayon "géométrique", le devenir d'un "rayon d'onde" ne peut donc se déterminer indépendamment du devenir de l'ensemble de l'onde, c'est à dire de celui de tout un ensemble de "rayons d'ondelettes"**.*

Et surtout, il est maintenant crucial d'associer au "rayon d'ondelette" une expression impliquant des grandeurs physiques: amplitude maxima (ici: valeur maximale du champ par unité de surface diffusante) et phase. Un rayon d'ondelette est donc associé à une étendue, au moins au départ. L'onde résultant de la superposition des ondelettes, expression d'un champ électrique (en tout point M à chaque instant t) s'exprime aussi à l'aide d'une amplitude maximum et d'une fonction harmonique du temps. Reste à savoir si l'argument de cette fonction peut ou non se mettre sous la forme d'une phase propagative.

Une onde progressive monochromatique plane ou sphérique dans un milieu homogène et isotrope, se maintient comme telle en l'absence d'obstacle, par ondelettes interposées. On illustre souvent ceci en figurant l'enveloppe à un instant t des ondelettes émises par les points d'une surface d'onde à un instant antérieur.

En l'absence de tout obstacle, cette enveloppe est identique à une surface d'onde classiquement déduite de la structure de l'onde: elle est elle-même plane ou sphérique. Dans ce cas, un "rayon d'onde OPMPS" suit le tracé rectiligne d'un rayon géométrique, il apparaît comme possédant la même individualité: en fait, il la doit au caractère global, complet, de l'onde.

L'arrivée d'une telle onde sur une interface d'étendue très grande (devant mille fois la longueur d'onde) autorise que l'on garde aussi le "rayon", moyennant la loi de Descartes pour la réfraction.

*Il faut ajouter quelques précisions et infléchissements pour rejoindre, avec ce principe, la solution analytique des équations de Maxwell qui est compatible avec les conditions aux limites imposées par l'onde incidente et la géométrie de l'ouverture diffractante, autrement dit avec la valeur du champ électrique en tout point de la surface diffractante et des écrans qui la limitent. Ce sont:

- un déphasage de $\pi/2$ pour l'émission des ondelettes diffusées par rapport à l'onde incidente,
- une amplitude qui est fonction de l'angle de diffraction par rapport à la normale à l'onde incidente, pour dire vite: maximum vers l'avant et nulle vers l'arrière. On doit donc renoncer à l'idée d'isotropie pour les ondelettes.

De même, un obstacle absorbant "grand" (selon le même critère) autorise (grosso modo, bien sûr) que, pour analyser les zones d'ombres, on applique l'optique géométrique à un rayon d'onde défini à partir de ce qui reste de cette onde après l'obstacle, comme si l'espace de propagation avait été découpé au cordeau.

Que l'onde rencontre un obstacle dont au moins une dimension est petite (devant mille fois la longueur d'onde) et tout change. Alors, la superposition des champs associés aux ondelettes ne reconstruit plus une onde analogue à l'onde incidente, ni encore moins un "morceau" de cette onde découpée au cordeau dans l'espace comme le sont les ombres géométriques. Plus de surfaces d'onde simples, mais un champ complexe d'amplitudes lumineuses qui ne peut plus s'exprimer avec une amplitude fonction simple de l'espace et une seule expression de phase $\vec{\omega}t - \vec{k} \cdot \vec{r}$. D'ailleurs, la plupart du temps, on s'intéresse seulement à l'amplitude maximum résultante en un ensemble restreint de points d'observation, à l'exclusion de tout terme de phase.

En particulier, plus de surface d'onde enveloppe de toutes les ondelettes émises précédemment: voilà une image ondulatoire qui ne concerne que les situations où l'optique géométrique suffit tout à fait. Cette image a donc l'intérêt de faire le pont entre point de vue géométrique et point de vue ondulatoire, mais l'inconvénient de prêter le flanc à généralisation abusive.

En conclusion, dans ce registre de la diffraction, un "rayon d'ondelette" peut représenter un chemin de phase propagative d'ondelette.

Quant au "rayon d'onde" pour une onde diffractée (résultante d'ondelettes superposées), et donc compliquée, comment le définir? Les choses cessent d'être simples.*

Reste le vecteur de Poynting résultant, associé au champ total. Les lignes de champ de ce vecteur de Poynting peuvent faire office de "rayons d'onde diffractés". Leur disposition n'a rien d'évident.

*Notamment, il ne faut pas considérer que la lumière diffractée par un réseau parallèlement à une direction oblique donnée constitue une onde plane: dans un plan perpendiculaire à cette direction, aucune ondelette ne présente la même phase. Sans doute peut-on définir un gradient de phase, mais son lien avec le vecteur de Poynting n'a rien d'évident.

L'énergie dans le modèle ondulatoire

Si l'on s'intéresse à l'énergie, il peut se passer des choses très surprenantes dès lors que plusieurs ondes ou ondelettes se superposent quelque part (Feynmann, lumière et matière, Interéditions).

La densité de flux d'énergie en un point donné est proportionnelle au carré du champ total en un point: ce n'est donc plus la somme des vecteurs de Poynting de chaque onde.

Lorsque deux OPM sont "incohérentes", la différence de leurs phases en un point de l'espace prend des valeurs équiprobables au cours du temps, ce qui entraîne que la moyenne de la densité de flux d'énergie en un point donné est en fait la moyenne du module de la somme des vecteurs de Poynting individuels.

Mais lorsque deux OPM sont "cohérentes", c'est à dire lorsque leurs phases gardent une différence constante au cours du temps en un point de l'espace (ce sera alors le cas dans au moins une partie* de la zone de recouvrement des ondes), la densité de flux d'énergie en un point donné n'est plus la moyenne du module de la somme des vecteurs de Poynting de chaque OPM: la conservation de l'énergie est globalement maintenue, mais celle-ci fait en quelque sorte des grumeaux par rapport à la répartition qu'indiquent les vecteurs de Poynting.

Ceci peut s'appliquer à plusieurs ondes OPM si elles sont émises par des sources ponctuelles reliées d'une manière ou d'une autre. Les "grumeaux" renvoient alors à ce qu'on nomme traditionnellement des franges d'interférences.

Ceci s'applique toujours aux ondelettes émises par les sources secondaires que constituent les "points" d'une même surface d'onde, et se traduit éventuellement par des "pics" plus ou moins étroits de diffraction.

On l'a dit plus haut, une OPM plane ou sphérique s'accommode de ceci pour se reconstituer à l'identique à partir de chacune de ses surfaces d'ondes. Le champ total associé à cette onde permet bien d'exprimer le flux d'énergie résultant de toutes les ondelettes impliquées.

*Cette précaution tient à la question de la cohérence temporelle propre à chaque onde.

** En fait, des "petits éléments" de cette surface.

Du point de vue d'une éventuelle représentation en "rayon d'onde", ou "rayon d'ondelette", les situations de superposition avec cohérence de phase (interférence et diffraction) interdisent de considérer alors un "rayon" impliqué dans une telle superposition (en quelque sorte: un rayon "composant") comme un chemin d'énergie. Il est donc dépourvu de sens de considérer un rayon d'ondelette comme un chemin d'énergie: cela ne peut représenter qu'un chemin de phase PP.

Du bon usage du "rayon" en optique géométrique ou ondulatoire: l'importance de l'"aval".

La première section de cette note présente le modèle du "rayon lumineux" impliqué dans les phénomènes relevant de l'optique géométrique.

La seconde et la troisième présentent les phénomènes qui rendent impératif l'appel à un modèle ondulatoire de la lumière: diffraction et interférences.

La question est maintenant de savoir

-a) quel usage peut être fait de l'idée de "rayon" selon les cas,

-b) quand un trajet donné devra être interprété d'une manière ou d'une autre. Poser cette question peut sembler mettre la charrue avant les boeufs, en l'occurrence le rayon avant sa signification. Nous allons voir que cette question n'est pas ridicule du point de vue de la physique. Du point de vue de l'usage scolaire, elle est posée par les traits que l'on voit sur les figures illustrant les cours d'optique.

-a) Récapitulons d'abord les significations éventuelles acceptables pour des "rayons" en optique ondulatoire.

Cas de l'OPMPS (en milieu isotrope, donc), sans "petit" obstacle et seule (sans superposition cohérente):

le "rayon d'onde OPMPS" représente à la fois un chemin de phase PP et un chemin d'énergie. Les règles de l'optique géométrique appliquées à ce "rayon d'onde OPMPS" en prévoient très bien le trajet. Une photométrie des faisceaux "géométriques" convient.

Cas de l'OPMPS seule, avec "petit" obstacle:

l'analyse en termes d'ondelettes conduit à faire intervenir un "rayon d'ondelette" qui représente seulement un chemin de phase PP, pour l'onde diffractée (résultante), le "rayon d'onde diffractée" ne fait pas actuellement l'objet d'une définition explicite consensuelle. En tout état de cause, il ne peut représenter un chemin d'énergie qu'à condition qu'aucune autre onde ne lui soit superposée avec cohérence.

Cas de superposition cohérente de plusieurs OPMPS:

Le "rayon d'onde OPMPS" défini plus haut ne représente plus qu'un chemin de phase PP. Les règles de l'optique géométrique appliquées à ce "rayon d'onde OPMPS sup. coh." en prévoient également très bien le trajet, mais n'expliquent rien sur l'aspect énergétique dans la zone de superposition.

-b) Dans tout ce qui vient d'être dit ou presque, l'analyse suit le sens d'une onde supposée: on parle de l'onde incidente, de son devenir après un obstacle. De plus, on reconnaît des catégories familières d'exercices: optique géométrique et lentilles, interférences, diffraction.

Un point de vue vient modifier ce tableau: celui qui ~~part~~ du récepteur. C'est souvent le point d'arrivée de la lumière qui est décidé: récepteur électronique ou chimique, rétine de l'oeil. Pour savoir ce qui se passe au niveau de ce récepteur, il faut faire de l'optique "à rebrousse-lumière" sinon "à rebrousse-rayons".

Soit par exemple un réseau éclairé d'un côté en lumière monochromatique "parallèle" (c'est-à-dire avec une onde plane: les "rayons d'onde" sont sous-jacents à cette appellation), une lentille convergente étant située au delà en suivant le sens de la lumière. Si l'on met un écran dans le plan focal, on observera ce qu'on nomme "la figure de diffraction à l'infini" du réseau: à chaque direction de "rayons d'ondelettes émergents" est associé un point du plan focal, où s'observe un éclaircissement. Si l'on met l'écran dans la position optiquement conjuguée du réseau, au sens de l'image géométrique, alors on observe l'image du réseau, au sens d'une représentation de l'objet "réseau".

Un même trajet dessiné sur le schéma de l'ensemble peut donc représenter un rayon d'ondelette utilisable pour faire une image géométrique et un rayon d'ondelette utilisable pour faire de la diffraction: c'est la position de l'écran qui décide.

L'ensemble système optique - point donné du récepteur ne sélectionne pas à chaque fois le même ensemble de rayons, si l'on peut

s'exprimer ainsi (se souvenir qu'un rayon infiniment fin pose quelques problèmes).

Un point donné de l'écran placé au plan focal rassemble tous les "rayons d'ondelettes" parallèles à une direction émergente donnée, en provenance de tous les points du réseau. On l'a dit plus haut, ces rayons, tout parallèles qu'ils soient, ne constituent pas une onde plane.

Un point de l'écran situé à l'emplacement de l'image géométrique rassemblée, lui, tous les rayons d'ondelettes émis, dans toutes les directions, par un point donné du réseau: cette fois il s'agit d'une onde sphérique, ensemble de "rayons d'ondelettes" cohérents associés à un point d'émission.

Certes l'action géométrique de la lentille et la diffraction par le réseau sont toujours simultanément à l'oeuvre. Mais certaines positions favorisent plus la coïncidence de phase de type géométrique, et d'autres la coïncidence de phase de type diffraction.

Le première est celle qu'assure une lentille stigmatique: tous les rayons lumineux issus d'un point objet font le même "trajet optique" autrement dit le même chemin de phase PP jusqu'au point image.

La seconde est celle, très variable selon le point d'observation, qu'ont entre eux les rayons d'ondelettes émis par des points différents.

En d'autres termes, l'image optique est très brouillée lorsque l'écran est au plan focal, de même pour la coïncidence de phase de diffraction lorsque l'écran est à la position d'image optique.

En conclusion, ce n'est pas seulement à partir des dimensions d'obstacle que l'on raisonne pour décider d'analyser un problème en terme d'image géométrique ou de diffraction, c'est aussi en considérant la sélection par l'aval d'un ensemble de "rayons d'ondelettes".

Ceci vaut d'ailleurs aussi bien en optique géométrique (presque) pure: voir le montage concernant prisme et lentille, séparation des couleurs au plan focal et recombinaison de celles qu'on laisse passer dans le plan de l'image géométrique de la face d'entrée.

Appendice 2

Bases de l'optique géométrique. Surface d'onde Quelle utilisation du principe d'Huygens?

I. Bases de l'optique géométrique

1. Hypothèses de Descartes

L'optique géométrique s'appuie sur les "hypothèses de Descartes" que constituent le principe de propagation rectiligne de la lumière et les lois de Descartes relatives à la réflexion et à la réfraction d'un rayon lumineux à la surface de séparation de deux milieux transparents homogènes et isotropes.

En fait, il s'agit de la formulation la plus simple des bases de l'optique géométrique. Il en existe trois autres :

- le principe de Fermat,
- le théorème de Malus, qui introduit la notion de surface d'onde,
- la construction d'Huygens, qui est, en quelque sorte, une traduction géométrique du théorème de Malus et sert de base à l'approche pseudo-ondulatoire du modèle du rayon lumineux.

2. Le principe de Fermat

Le principe de Fermat s'appuie sur la notion de chemin optique. Le chemin optique L entre deux points A et B est égal au chemin qui serait parcouru par la lumière dans le vide dans le temps qu'elle met pour aller de A à B . Par conséquent, $L = (AB) = c \cdot AB/v = n \cdot AB$ si v est la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu et n l'indice de réfraction.

Le principe de Fermat s'énonce alors : **pour aller d'un point A à un point B , la lumière emprunte un chemin tel que le chemin optique soit stationnaire** (c'est-à-dire maximal, minimal ou inflexionnel). En particulier, on retrouve ainsi la propagation rectiligne de la lumière dans un milieu homogène et isotrope. Les lois de Descartes peuvent être déduites du principe de Fermat (voir par exemple (1)). Inversement, on peut retrouver la stationnarité du chemin optique à partir des lois de Descartes. Le principe de Fermat a une portée plus large que les "hypothèses de Descartes" car il s'applique à des milieux d'indice continuellement variable.

3. Le théorème de Malus

Le principe de Fermat concerne le trajet d'un rayon lumineux. Le théorème de Malus suppose quant à lui la connaissance préalable des surfaces d'onde générées par une source ponctuelle. Par définition, une surface d'onde est le lieu des points obtenus en partant d'un point source des longueurs optiques égales sur tous les rayons. Une surface d'onde est donc défini en terme d'égalité de chemin optique. C'est donc une surface d'onde géométrique qui ne fait aucunement appel au caractère ondulatoire de la lumière.

Le théorème de Malus peut s'énoncer ainsi :

Après des réflexions sur et des réfractions à travers un nombre quelconque de surfaces, les rayons lumineux issus d'une source ponctuelle qui arrivent dans un milieu homogène et isotrope sont normaux aux surfaces d'onde dans ce milieu.

L'orthogonalité des rayons lumineux aux surfaces d'onde permet de retrouver le principe de Fermat.

4. Construction d'Huygens

La construction d'Huygens est une traduction géométrique du théorème de Malus ; elle permet de construire des surfaces d'onde à partir de la connaissance de la source ponctuelle ou d'une surface d'onde quelconque (voir figure 1).

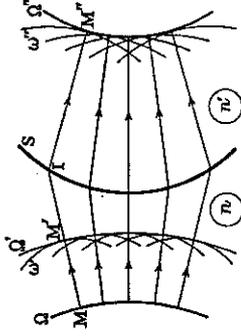


Figure 1

Par exemple, la surface d'onde Ω permet de construire la surface d'onde Ω' . A partir d'un point M de Ω , on obtient la sphère ω' correspondant à un chemin optique $L = MM'/n$. L'ensemble des points M' , surface enveloppe des sphères ω' , constitue la surface d'onde passant par M' . Par cette construction, on peut donc retrouver les lois de Descartes.

II. Surfaces d'onde.

Il faut bien souligner que les surfaces d'onde introduites par le théorème de Malus et la construction d'Huygens sont définies de façon purement géométrique et reposent uniquement sur la notion de chemin optique.

Celles-ci s'identifient avec les surfaces équiphasées définies, dans le cadre ondulatoire, comme l'ensemble des points tels que les vibrations soient en concordance de phase. Il faut également souligner qu'une surface d'onde n'est pas toujours une surface isoamplitude comme illustré par l'exemple suivant (figure 2) tiré de 2.

On considère le phénomène d'interférence entre les vibrations y_1 et y_2 émises par deux sources synchrones S_1 et S_2 . On suppose que les vibrations peuvent s'écrire, en un point M distant de r_1 de S_1 et de r_2 de S_2 :

$$y_1 = a \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} \right), \quad y_2 = a \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} \right).$$

On suppose que l'amplitude a reste constante sur le domaine considéré.

La vibration résultante au point M s'écrit :

$$y = y_1 + y_2 = 2a \cos \pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_1 + r_2}{2\lambda} \right)$$

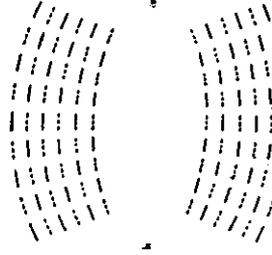


Figure 2

La surface équiphasse passant par M est définie par $r_1 + r_2 = C^{te}$. C'est un ellipsoïde de foyers S₁ et S₂ (donc une ellipse dans le plan de la figure). Sur cette surface, l'amplitude de la vibration résultante passe par des minima et des maxima et n'est donc en aucun cas constante.

Le principe d'Huygens permet la construction de surfaces d'onde lorsqu'il s'agit d'onde plane ou sphérique mais il reste peu utilisable dans les autres cas, en particulier dans les situations typiques d'optique ondulatoire (interférence, diffraction). Par exemple, dans la situation donnée ci-dessus, nous voyons mal comment nous pourrions tracer l'enveloppe des ondes sphériques issues des deux sources, correspondant à une phase donnée de l'onde résultante.

L'utilisation du principe d'Huygens peut entraîner des constructions pour le moins discutables telles que celles tirées de 3. La figure 3 est donnée avec le commentaire suivant : "L'une des nombreuses séries de fronts d'onde émises par une ligne de points sources cohérents".

Quelle signification donnée à ces "fronts d'onde"? Il ne peut pas s'agir de plan d'onde puisque toutes les ondelettes émises par chacun des points-sources sont déphasées. Cette représentation pourrait laisser penser que ces "fronts d'onde", simple collage de morceaux de surfaces d'ondelettes", constituent les plans de l'onde plane diffractée dans la direction indiquée. Ceci est en fait confirmé par les figures 4 et 5.

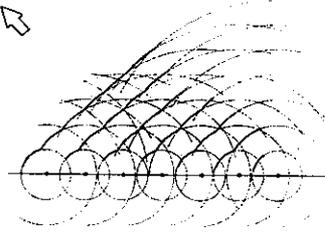


Figure 3

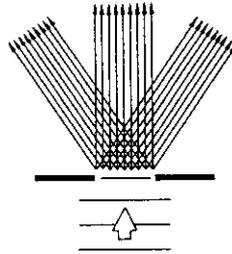


Figure 4

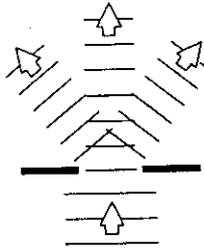


Figure 5

La figure 5 est donnée avec le commentaire suivant : "Ces groupes de rayons (ceux de la figure 4) correspondent à des ondes planes..."

Comment relier les figures 3, 4 et 5 à la figure 6? Pourtant, ce passage semble sans problème pour l'auteur comme en témoignent les commentaires suivants : pour la figure 6, "Ondelettes d'Huygens émises par l'ouverture" ; pour la figure 4, La représentation équivalente (de la figure 6) en termes de rayons. Chaque point émet des rayons dans toutes les directions. On observe les rayons parallèles dans différentes directions".

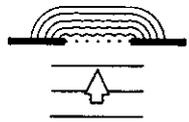


Figure 6

Nous constatons donc que l'utilisation du principe d'Huygens et de la construction correspondante cache, si l'on ne s'en tient pas aux situations classiques d'optique géométrique, de nombreuses difficultés.

1. Dévoré, G. et Annequin, R. 1996. *Cours de physique. Optique II*. 3ème éd. Paris, Librairie Vuibert.
2. Bruhat, G. 1959. *Cours de physique générale. Optique*. 5ème éd. Paris, Masson.
3. Hecht, E. 1987. *Optics*. 2ème éd. Addison-Wesley.

Diffraction par un réseau : quelques éléments d'analyse didactique

Nous ne présentons ici que le cas d'un réseau plan par transmission (R). Il est constitué de N fentes parallèles de largeur a ; les centres de deux fentes consécutives sont distants de h qui est le pas du réseau. Une fente (F) extrêmement fine éclairée par une source monochromatique (S) est placée dans le plan focal d'une lentille (L₁) (Figure 1). Le faisceau parallèle issu de (L₁) traverse le réseau (R) qui en provoque la diffraction et l'on peut observer dans le plan focal de la lentille (L₂) matérialisé par l'écran (E) l'image (F) diffractée par le réseau.

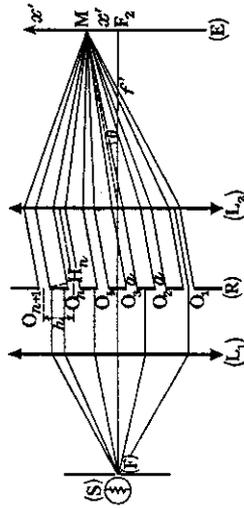


Figure 1

L'interprétation de la figure de diffraction repose à la fois sur les phénomènes de diffraction de Fraunhofer, pour la détermination de la vibration résultante diffractée par une fente dans une direction donnée, et d'interférence entre les vibrations diffractées par chacune des fentes.

On commence donc par calculer la vibration diffractée par une fente dans une direction donnée. Cette vibration résulte de l'interférence au point M des ondelettes émises par les sources secondaires P de l'ouverture diffractante. On montre que la vibration résultante diffractée par la fente est en phase avec l'ondelette émise par le centre de la fente. Ceci autorise les auteurs de manuels à remplacer le système complexe d'ondelettes émises par une fente par une "onde diffractée" (qui peut même devenir plane pour certains auteurs ; voir p.22) représentée par un "rayon diffracté" unique (p.26 figure 42). Cette représentation de la vibration résultante diffractée par une fente par un "rayon diffracté", bien qu'aboutissant à l'expression correcte de l'amplitude de la vibration résultante diffractée par le réseau en un point, entraîne souvent des dérives : ce "rayon diffracté" est uniquement interprété comme représentatif d'une onde plane diffractée par la fente dans une direction donnée et le caractère artificiel de son introduction sera le plus souvent oublié.

Le calcul se termine en sommant les amplitudes des vibrations diffractées par chacune des fentes. Là encore, la conduite du calcul et la schématisation en termes de TRF amènent certains auteurs à assimiler l'onde résultante diffractée par le réseau dans une direction donnée à une onde plane (voir p.25).

Nous voyons donc au travers de l'exemple de la diffraction par un réseau que, bien que les calculs puissent aboutir à des résultats corrects, les manipulations opérées (représentation d'un système complexe d'ondelettes par un "rayon" unique) peuvent conduire à des interprétations physiques erronées.

Résumé

La mise en place d'une conceptualisation cohérente de la diffraction et de la formation d'une image optique pose aux étudiants de niveau universitaire de nombreuses difficultés essentiellement liées à une utilisation non réfléchie des modèles du rayon lumineux de l'optique géométrique et du modèle ondulatoire.

Faisant écho à ces difficultés et à une analyse de manuels d'enseignement, la notion pivot de sélection par l'aval est introduite : l'analyse d'une situation procède d'une lecture à « rebrousse lumière » où la nature du groupement des trajets de lumière parvenant en un point donné dépend de la position de ce point. Cette notion conduit à une rupture du lien entre dispositif et cadre d'analyse, géométrique ou ondulatoire, et à une revisitation du contenu des principales notions d'optique (rayon, objet, image) avec appui sur des expériences très simples.

Avant que de construire des séquences d'enseignement sur ces bases, difficultés des étudiants et analyse de contenu, une étude est menée pour estimer la distance séparant l'analyse proposée de celles d'enseignants. L'analyse thématique des entretiens menés avec des enseignants montre, d'une part, les obstacles que constituent certaines propositions et, d'autre part, les points d'ancrage sur lesquels pourraient s'appuyer certaines d'entre elles. À partir de ces résultats, les propositions sont organisées suivant différents formats de présentation, classés suivant une échelle d'acceptabilité. Ces formats emboîtés, tous centrés sur la notion de sélection par l'aval, s'enrichissent au fur et à mesure de leur empilement.

Cette étude apporte un nouvel éclairage sur la physique mise en jeu dans une perspective d'éducation à la cohérence et propose des lignes directrices en termes de stratégies de présentation (gradation des difficultés, choix et exploitation des situations physiques). Des éléments cruciaux sont ainsi mis à disposition de l'enseignant pour construire une séquence d'enseignement adaptée à un public donné.

Mots clés

Didactique
Enseignement
Optique
Rayon
Onde
Diffraction
Image
Enseignant