

LE RAISONNEMENT DES ETUDIANTS DANS LA PHYSIQUE DES ONDES

Laurence Maurines

I.U.F.M. de Créteil

L.D.S.P., Université Denis Diderot Paris 7

laurence.maurines@creteil.iufm.fr

INTRODUCTION

Nous résumons ici les grandes lignes des recherches, que nous menons depuis une vingtaine d'années, sur les difficultés liées à l'apprentissage d'un domaine de la physique encore peu exploré sur le plan de la didactique : les « ondes ». Nous avons ainsi successivement abordé la propagation selon une direction d'un signal mécanique « visible » (un ébranlement sur une corde, 1988, 1992) ou non (un son, 1998), la propagation selon plusieurs directions d'ondes sonores et lumineuses en présence ou non d'obstacles matériels (c'est à dire de phénomènes tels que la réflexion, la réfraction et la diffraction, 1995, 1997, 1999, à paraître), la formation des images en éclairage cohérent (2000) ou non (2001). Dans la littérature en didactique, on rencontre peu d'études portant sur ces phénomènes (Ambrose, 1999 ; Colin, 2000 ; Linder, 1989 ; Wittmann, 1999). Par contre, il en existe beaucoup sur le domaine de l'optique géométrique (voir par exemple, Fawaz, 1986 ; Kaminsky, 1989 ; Galili, 1996).

Nos recherches s'inscrivent dans un large courant d'études apparu il y a une vingtaine d'années (Johsua, 1993 ; Viennot, 1996). Inspirées des travaux de Bachelard (1938), Piaget (1941) et Vygotski (1985), et de l'idée que l'on construit ses connaissances avec celles que l'on possède déjà, ces études montrent qu'une large fraction des apprenants partagent, en marge du savoir scientifique enseigné, des conceptions et des modes de raisonnement « spontané » ou « naturel », c'est à dire non appris en tant que tels à l'école, au lycée ou à l'université. Issus de l'expérience quotidienne et existant avant tout enseignement, mais aussi, dans certains cas, renforcés ou même induits par lui, ces conceptions et raisonnements contredisent fréquemment la science enseignée. S'adaptant facilement de sorte à intégrer des faits nouveaux, ils se révèlent sur certains points très résistants à l'enseignement et partagés à un degré divers par tout le monde. S'il existe aujourd'hui un consensus sur la nécessité de tenir compte de cette connaissance de « sens commun » dans l'enseignement, il y en a peu sur la façon de le faire. Un accord minimal semble cependant se faire autour de l'idée de la mettre en regard avec la science enseignée et de conduire les élèves et étudiants à prendre conscience de ce qui les sépare. Nous souscrivons à la description qu'en donne Viennot (1979) : « *Faut-il réaffirmer cette évidence : seule la confrontation permanente du formalisme et du réel construit une authentique pratique scientifique. Sans doute est-ce inutile, sous cette forme. Mais on peut ajouter que le réel engendre immédiatement une interprétation, que l'on n'a qualifiée de « spontanée » ou « d'intuitive » que pour la distinguer de modèles plus élaborés. C'est donc aussi à cette première lecture du réel qu'il faut confronter le formalisme, ce qui n'est possible que si l'on est conscient du premier terme de la comparaison. Cette prise de conscience et cette confrontation sont deux démarches personnelles et actives dont l'étudiant ne peut faire l'économie(...). Il reste que l'enseignant ne peut stimuler ses étudiants dans cette voie qu'à deux conditions : avoir lui-même une connaissance sûre de la démarche spontanée déclenchée par telle ou telle situation physique et trouver les moyens d'en avertir les étudiants* ». Le principal objectif des recherches que menons dans le domaine des ondes est donc de contribuer à une meilleure connaissance des raisonnements des élèves et étudiants afin de permettre aux enseignants de leur en renvoyer l'image et de les aider à s'en rendre maîtres.

Tout au long de nos recherches, nous avons cherché à établir un modèle de raisonnement permettant d'interpréter les difficultés rencontrées par des groupes d'élèves et d'étudiants relativement variés. Par modèle, nous entendons une description organisée, aussi synthétique et prédictive que possible, des principales tendances de raisonnement observées. Nous sommes tout à fait consciente qu'un élève ou étudiant ne se conformera pas nécessairement totalement au modèle proposé. Nous faisons cependant l'hypothèse que les tendances dégagées sont susceptibles d'intervenir à un moment ou à un autre dans le raisonnement de tout apprenant. Le travail que nous avons réalisé n'est qu'une

première étape en vue de l'élaboration de séquences d'enseignement adaptées aux difficultés des élèves et étudiants. Il nous a conduit à faire des propositions pédagogiques. Si celles concernant la propagation selon une direction ont été reprises par les nouveaux programmes de terminale scientifique, celles concernant les ondes en dimension trois et la formation des images demandent à être mises en pratique et tester.

La détermination des thèmes et questions à explorer lors de chacune des recherches mentionnées précédemment a résulté d'une étude « théorique » et d'une étude « empirique ».

Une grande partie de l'étude théorique a été consacrée à une analyse de contenu de la physique des ondes et à la définition d'un cadre de référence en physique auquel comparer le raisonnement des élèves et étudiants. Répondant au souci d'une vision unifiée des phénomènes ondulatoires et des modèles utilisés dans leur étude, elle nous a permis de clarifier le domaine conceptuel, plus particulièrement dans les situations où un modèle scalaire à un champ peut être utilisé (champ de rayonnement de Fresnel et de Fraunhofer). L'explicitation, et parfois la rectification de certains points délicats, nous ont conduit à donner un éclairage différent de celui habituellement rencontré. Nous avons ainsi été amenée à distinguer deux modèles géométriques (un « classique » et un « moderne ») et deux modèles ondulatoires (un « géométrico-ondulatoire » basé sur le principe de Huygens-Fresnel et un « spectral » basé sur la décomposition de Fourier). Le reste de l'étude théorique a été consacrée à une analyse de l'histoire de la physique des ondes et de manuels d'enseignement. Celle-ci révèle que les étudiants rencontrent les mêmes difficultés que les scientifiques autrefois et qu'ils ne sont pas aidés par l'enseignement actuel des ondes.

L'étude empirique a été réalisée à l'aide de questionnaires papier-crayon auprès d'une population de 3100 élèves et étudiants (lycée, DEUG et licence de sciences physiques, candidats au Capes de sciences physiques). Nous avons interrogé non seulement des élèves n'ayant pas reçu d'enseignement sur les ondes mais aussi des élèves et étudiants en ayant reçu un de niveau secondaire ou supérieur. D'une part, nous voulions dégager les difficultés des élèves avant tout apprentissage sur les ondes et examiner la résistance du raisonnement commun à l'enseignement. D'autre part, certaines questions ne pouvaient être posées qu'après enseignement. La plupart des questions sont qualitatives. Ne fournissant pas de données numériques et ne demandant pas de calcul, elles permettent de dégager des difficultés que les exercices habituels évitent ou cachent. Certaines sont ouvertes : elles demandent de décrire et d'expliquer, à la fois verbalement et graphiquement, une situation physique donnée (par exemple, la propagation d'une onde à travers une ouverture). D'autres sont plus fermées et portent sur un point précis. Elles peuvent demander de répondre par « oui » ou « non » dans une situation donnée (par exemple, la vitesse d'une onde qui se propage à travers une ouverture est-elle la même avant et après la traversée de l'ouverture?), de comparer la valeur prise par telle grandeur physique dans différentes situations (par exemple, la longueur de deux signaux se propageant sur deux cordes différentes et obtenus par des mouvements de main identiques). Elles peuvent également porter sur le tracé de la « forme » du signal ou de l'onde à un instant donné, du trajet suivi par l'onde... Les questions sont toujours accompagnées d'une demande de justification.

Le modèle de raisonnement que nous proposons permet d'interpréter les réponses des élèves et des étudiants à partir du moment où ils conçoivent une onde comme une entité distincte se propageant de la source au récepteur. Il donne sens et cohérence non seulement à nos observations mais aussi aux résultats obtenus par les chercheurs en didactique qui se sont intéressés aux ondes. Le raisonnement commun sur les ondes a quatre caractéristiques liées les unes aux autres :

- il est mécaniste : les élèves et étudiants se centrent sur le signal ou l'onde en déplacement et les traitent comme des objets matériels mis en mouvement par la source qui les a créés ;
- il tend à « géométriser » les situations que seul un modèle ondulatoire peut interpréter : les élèves et étudiants raisonnent à l'aide de concepts ressemblant à ceux d'un modèle géométrique « classique ». Ils n'utilisent pas le concept de phase, ne décomposent pas l'onde en ondes

élémentaires, considèrent uniquement des rayons « distinguables » et des sources incohérentes (nous précisons ces termes dans la suite) ;

- il tend à réduire le nombre de concepts mis en jeu et à les « matérialiser », c'est à dire à les relier à un aspect perceptif de la situation étudiée ou à réifier un élément graphique les figurant.

Dans cet article, nous nous centrerons sur deux points. Nous présenterons tout d'abord les grandes lignes de l'analyse de contenu que nous avons réalisée sur les ondes en dimension trois et sur la formation des images. Nous détaillerons ensuite une seule des caractéristiques du raisonnement des étudiants : la « géométrisation » des situations ondulatoires. Nous terminerons par quelques propositions pédagogiques.

QUELQUES REMARQUES SUR LES MODELES UTILISES DANS L'ETUDE DES ONDES

Les remarques qui suivent portent sur les modèles physiques utilisés pour interpréter des situations où une onde sonore ou lumineuse se propage dans un milieu de dimension trois, en présence ou non d'obstacles, c'est à dire de phénomènes tels que la réflexion, la réfraction et la diffraction, en milieu isotrope, non dissipatif et non dispersif, homogène ou non. Elles visent, d'une part, à expliciter les concepts et principes sur lesquels s'appuient ces modèles, et d'autre part, à caractériser les situations dans lesquelles un modèle particulier doit être utilisé. Comme il ne nous est pas possible pour des raisons de brièveté de rentrer dans les détails de cette analyse, nous renvoyons le lecteur intéressé à la synthèse présentée dans Maurines (2001). Nous avons orienté cette présentation en fonction des tendances de raisonnement que nous allons présenter par la suite.

Les modèles ondulatoires vectoriels et scalaires

Tout phénomène sonore ou lumineux peut être étudié à l'aide d'un modèle ondulatoire vectoriel à deux champs. Dans ces modèles, le son et la lumière correspondent à une onde, c'est à dire à la modification de deux champs dont au moins un est vectoriel : champs électrique \mathbf{E} et magnétique \mathbf{B} dans le cas de la lumière, champs de surpression p et de vitesse vibratoire \mathbf{u} dans le cas du son. Ces champs sont décrits par des fonctions dépendant de l'espace (\mathbf{P}) et du temps (t). Ils vérifient une équation aux dérivées partielles linéaire du deuxième ordre, appelée équation de propagation. Dans les milieux considérés, elle est du type $\Delta \psi - 1/c^2 \partial^2 \psi / \partial t^2 = 0$ (ψ désigne une composante des champs vectoriels ou le champ scalaire p ; c est la célérité de l'onde dans le milieu considéré). Les champs vérifient également des conditions aux limites (par exemple à la surface d'un obstacle matériel), et des conditions initiales (par exemple au niveau d'une source). La linéarité de l'équation de propagation et le théorème de Fourier conduisent à accorder une grande place à des solutions particulières : les ondes monochromatiques.

Dans beaucoup de situations, il n'est pas nécessaire d'utiliser un modèle ondulatoire vectoriel à deux champs, ni même possible. Un modèle ondulatoire scalaire à un champ ψ suffit lorsque la distance séparant le point d'observation \mathbf{P} à la source est grande devant la longueur d'onde λ de l'onde monochromatique et la dimension a de la source. Le champ scalaire décrivant l'onde ψ vérifie l'équation de propagation, des conditions aux limites et des conditions initiales. Le champ associé à une onde monochromatique est du type $\psi(\mathbf{P}, t) = \Psi(\mathbf{P}) \exp j 2\pi \nu t$, où $\Psi(\mathbf{P})$ désigne l'amplitude complexe de l'onde et ν sa fréquence. Il peut aussi s'écrire sous la forme $\psi(\mathbf{P}, t) = \Psi_a(\mathbf{P}) \exp j \Phi(\mathbf{P}, t)$ où $\Psi_a(\mathbf{P})$ et $\Phi(\mathbf{P}, t) = 2\pi \nu t - \phi(\mathbf{P})$ sont deux fonctions réelles, respectivement appelées amplitude et phase de l'onde ($\phi(\mathbf{P})$ est la phase de l'onde à l'origine des temps).

En dimension trois, on définit des surfaces d'onde et des rayons. Les premières sont des surfaces équiphasées (ensemble des points atteints au même instant par l'onde et vérifiant $\Phi(\mathbf{P}, t) = \text{constante}$) et les seconds des lignes de propagation de l'énergie. Sur une surface d'onde, l'amplitude de l'onde Ψ_a n'est pas nécessairement constante : elle peut être modulée (il peut y avoir des nœuds et des ventres d'amplitude). Nous distinguerons les ondes homogènes et les ondes inhomogènes (Born et Wolf,

1980). Pour les premières, l'amplitude est constante sur une surface équiphase, pour les secondes, ce n'est pas le cas. Ainsi, un champ du type $\psi(\mathbf{P}, t) = a \exp j(2\pi vt - kx)$ correspond à une onde plane monochromatique homogène alors qu'un champ du type $\psi(\mathbf{P}, t) = \Psi(y, z) \exp j(2\pi vt - kx)$ correspond à une onde plane monochromatique inhomogène. De même, un champ du type $\psi(\mathbf{P}, t) = a/r \exp j(2\pi vt - kr)$ correspond à une onde sphérique homogène alors qu'un champ du type $\psi(\mathbf{P}, t) = \Psi a(\theta_1, \theta_2) \exp j(2\pi vt - kr)$ correspond à une onde sphérique inhomogène (par exemple l'onde sonore émise par un haut-parleur). Les lignes de propagation de l'énergie sont confondues avec les lignes de propagation de la phase et sont orthogonales aux surfaces d'onde : l'onde est localement plane.

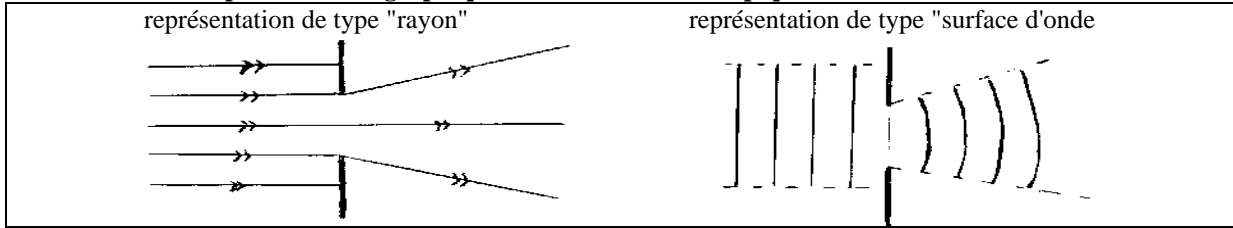
En examinant la façon dont on cherche l'amplitude complexe, $\Psi(\mathbf{P})$, d'une onde monochromatique, $\psi(\mathbf{P}, t) = \Psi(\mathbf{P}) \exp j 2\pi vt$, dans les différentes situations que nous avons explorées, nous avons été amenée à distinguer deux catégories de modèles : les modèles ondulatoires (nous omettrons dans ce qui suit le terme scalaire) et les modèles géométriques modernes (nous reprenons ici l'expression de Dettwiller, 1990).

Nous dirons qu'un modèle est ondulatoire si le champ $\psi(\mathbf{P}, t)$ vérifie l'équation de propagation, ou ce qui revient au même si l'amplitude complexe de l'onde monochromatique $\Psi(\mathbf{P})$ vérifie l'équation de Helmholtz : $(\Delta + k^2) \Psi = 0$. De la linéarité de l'équation de Helmholtz découle le principe de superposition des amplitudes ($\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$). Ce principe conduit à décomposer une onde monochromatique quelconque en ondes élémentaires monochromatiques sphériques ou planes. En suivant Halbwachs (1974) qui définit un modèle comme un ensemble structuré de concepts, lois et principes, nous avons choisi de distinguer deux modèles ondulatoires selon la façon dont l'onde est décomposée. Le modèle basé sur la décomposition en ondes sphériques et le principe de Huygens-Fresnel a été appelé « modèle géométrico-ondulatoire ». Le modèle basé sur la décomposition en ondes planes a été appelé « modèle spectral ». Selon la situation, on utilise un modèle plutôt que l'autre.

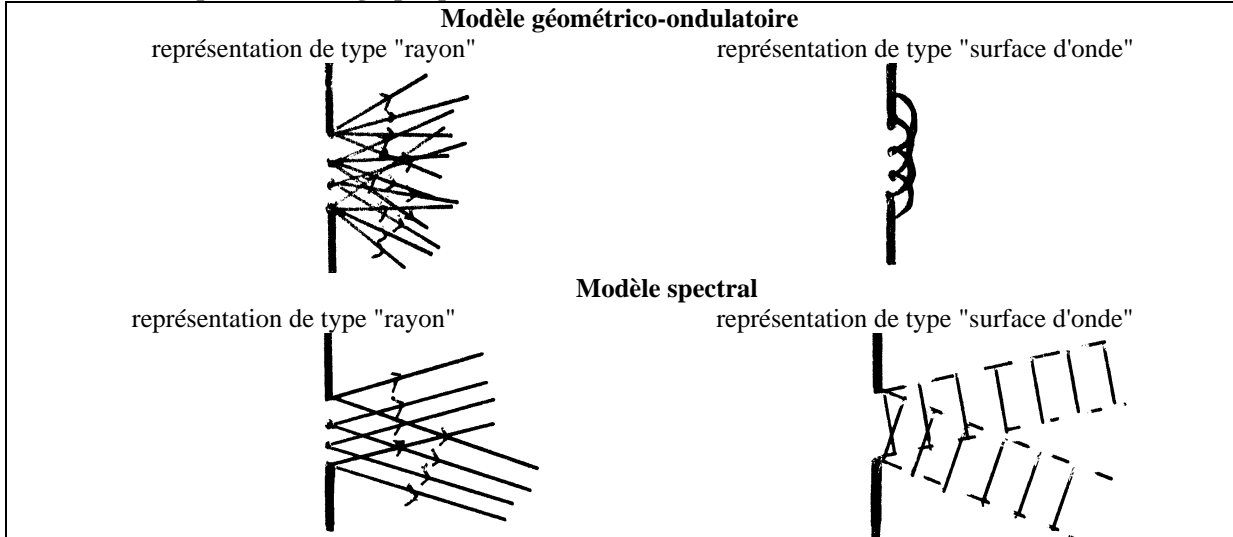
Il est possible de représenter graphiquement les rayons et les surfaces d'onde de l'onde étudiée ainsi que ceux et celles des ondes élémentaires en lesquelles elle peut être décomposée (sur les difficultés soulevées par l'interprétation des schémas, voir Maurines, 2000). Dans les encadrés 1 et 2, sont donnés les schémas associés à une situation de diffraction par une ouverture. Faute de termes universellement utilisés, nous dirons que les schémas représentant les rayons et les surfaces d'onde de l'onde étudiée portent sur le « niveau macroscopique » (encadré 1) et que ceux représentant les rayons et les surfaces d'onde des ondes composantes portent sur le « niveau des ondes élémentaires » (encadré 2). Nous dirons également que dans les modèles ondulatoires, il existe deux niveaux de modélisation.

Le principe de Huygens est un principe de superposition qui permet de comprendre la propagation de proche en proche d'une onde. Il apparaît aujourd'hui comme la formulation qualitative du théorème intégral qui permet de chercher une solution de l'équation de Helmholtz sous la forme d'une somme d'ondes élémentaires sphériques, le principe de Huygens-Fresnel en étant une formulation quantitative approchée (Jessel, 1973). Ce théorème intégral montre qu'une onde, se propageant à l'extérieur d'une surface fermée Σ contenant la source (par exemple une surface d'onde), est identique à celle que l'on obtiendrait en supprimant cette source et en la remplaçant au temps t par des sources fictives réparties sur la surface Σ , convenablement calculées et appelées sources de Huygens. Le principe de Huygens dit que, grâce à cette équivalence, on peut passer de la surface d'onde à un instant donné à la surface d'onde à un instant ultérieur par simple construction de l'enveloppe des surfaces d'ondes des ondes émises par les sources de Huygens. Le principe de Huygens-Fresnel permet, quant à lui, d'obtenir l'amplitude de l'onde en un point donné : celle-ci est égale à la somme des amplitudes des ondes émises par les sources de Huygens. Le schéma illustrant le principe de Huygens, ou principe des ondes-enveloppes (encadré 3), met bien en évidence l'existence des deux niveaux de modélisation du modèle géométrico-ondulatoire. Pour reprendre les termes de Hempel (1972), nous dirons que ce principe est un principe de liaison reliant le niveau des ondes élémentaires au niveau macroscopique.

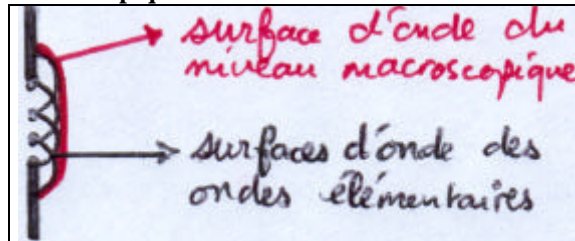
Encadré 1 : représentations graphiques au niveau macroscopique d'une situation de diffraction



Encadré 2 : représentations graphiques au niveau des ondes élémentaires d'une situation de diffraction



Encadré 3 : le principe de Huygens ou comment lier qualitativement et graphiquement le niveau macroscopique et le niveau des ondes élémentaires



Le principe de superposition des amplitudes conduit à distinguer deux types de situations : celles pour lesquelles le principe de superposition des intensités est aussi vérifié ($I = I_1 + I_2$, avec $I = \Psi\Psi^*$) et celles pour lesquelles il ne l'est pas ($I \neq I_1 + I_2$). Dans les premières situations, les sources sont incohérentes et les rayons issus de ces sources sont indépendants, autrement dit, ils ne dépendent pas de la présence ou non des autres sources. Dans les secondes situations, les sources ont une grande cohérence temporelle (nous dirons plus brièvement qu'elles sont cohérentes) et les rayons issus de ces différentes sources ne correspondent plus au trajet suivi par l'énergie : il existe une onde résultante et il passe en un point du milieu un seul rayon et une seule surface d'onde. S'il n'est pas toujours utile de choisir un modèle ondulatoire pour rendre compte du premier type de situations, il est nécessaire de le faire pour le second. Ces situations que nous avons qualifiées d'ondulatoires correspondent aux interférences (sous réserve que $r \gg \lambda$ et $r \gg a$), à la diffraction par une ouverture et à la formation des images en éclairage cohérent en présence ou non de diffraction (sous réserve que $r \gg \lambda$ et $r \gg a$; $a \gg \lambda$; approximation paraxiale).

Les modèles géométriques

Nous dirons qu'un modèle est géométrique moderne si la phase à l'origine des temps, $\phi(\mathbf{P})$, d'une onde monochromatique d'amplitude complexe $\Psi(\mathbf{P}) = \Psi_a(\mathbf{P}) \exp -j \phi(\mathbf{P})$, est proportionnelle à une

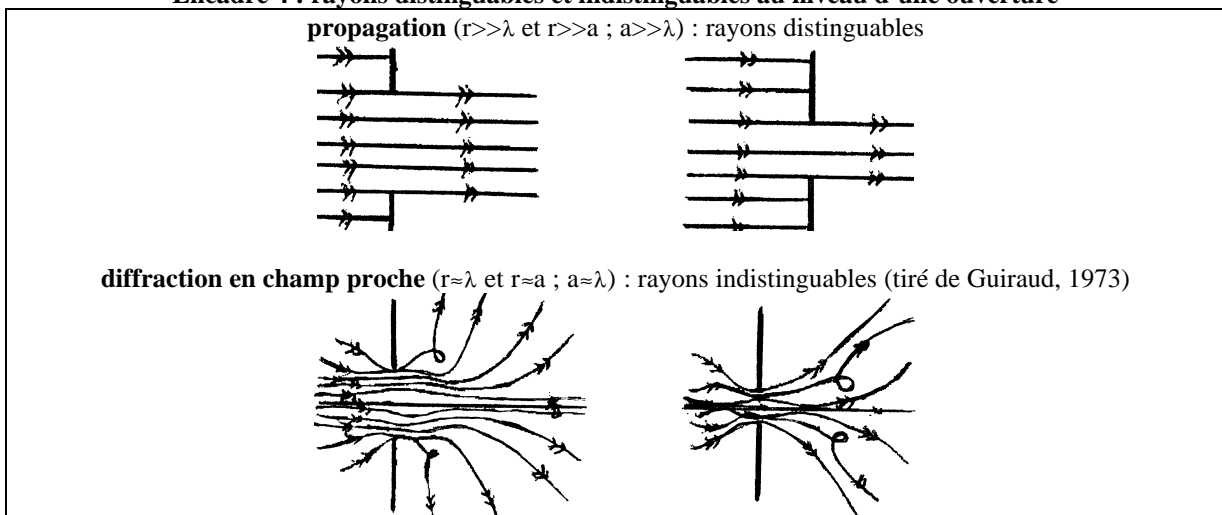
fonction réelle appelée eikonale, notée $L(\mathbf{P})$ et vérifiant l'équation $(\text{grad } L)^2 = n^2(\mathbf{P})$. Cette équation, qualifiée d'eikonale, est obtenue à partir de l'équation de Helmholtz en faisant l'approximation que la variation relative de l'amplitude de l'onde est négligeable sur une distance de l'ordre de la longueur d'onde $(\text{grad } \Psi_a / \Psi_a)^2 \ll 1/\lambda^2$.

En dimension trois, on définit des surfaces d'onde géométriques et des rayons. Les premières sont des surfaces isoeikonales et les seconds des lignes de propagation de l'énergie. Les surfaces d'onde géométriques et les rayons sont orthogonaux : cette propriété se traduit analytiquement par l'équation eikonale (Frank et al., 1974). $L(\mathbf{P})$ étant proportionnelle à la phase de l'onde, une surface d'onde géométrique est aussi une surface d'onde des modèles ondulatoires, c'est à dire une surface équiphasse. Sur une surface d'onde géométrique, l'amplitude de l'onde n'est pas nécessairement constante.

Contrairement aux rayons des modèles ondulatoires, les rayons des modèles géométriques ne dépendent pas des conditions aux limites, c'est à dire de la dimension d'une ouverture ou de la présence d'un obstacle. L'équation des rayons $(d/ds [n(\mathbf{P}) d\mathbf{P}/ds] = \text{grad } n(\mathbf{P}))$, elle-même déduite de l'équation eikonale, montre en effet qu'ils ne dépendent que du milieu, et ce localement par l'intermédiaire de son indice n , ainsi que des conditions initiales. Les modèles géométriques ne peuvent donc rendre compte que de situations physiques où les rayons ont cette propriété. Faute de terme communément reconnu pour la désigner, nous reprenons ceux de Kravtsov (1993) et dirons que de tels rayons sont « distinguables ». Dans un milieu homogène, ils sont rectilignes.

Pour expliciter ce que nous venons de dire, intéressons-nous tout d'abord à la propagation de la lumière à travers une ouverture. Deux cas sont à distinguer (encadré 4). Dans l'un, la figure observée sur un écran placé derrière l'ouverture est coupée à l'emporte-pièce quand la dimension de l'ouverture est diminuée (situations dites de propagation). Dans l'autre, la figure n'est plus coupée à l'emporte-pièce : sa structure même est modifiée (situations dites de diffraction). Les rayons utilisés pour rendre compte des situations de propagation sont distinguables : ils ne dépendent pas de la taille de l'ouverture et tout se passe comme s'ils pouvaient être séparés les uns des autres sans être modifiés. Les rayons utilisés pour rendre compte des situations de diffraction sont indistinguables : une modification de la taille de l'ouverture entraîne un changement des rayons qui ne peuvent donc être séparés sans être modifiés.

Encadré 4 : rayons distinguables et indistinguables au niveau d'une ouverture

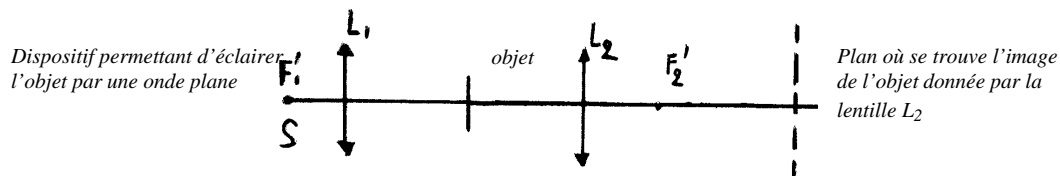


Intéressons-nous à présent à l'image donnée par une lentille d'un objet éclairé par une onde plane. Le schéma 1 de l'encadré 5 présente le dispositif expérimental et les deux photographies indiquent comment l'image d'une pointe est modifiée lorsqu'un petit disque opaque est placé au foyer image de la lentille, c'est à dire en un point de convergence du faisceau lumineux. L'image n'est pas coupée à l'emporte pièce, seuls les contours apparaissent lumineux sur fond noir. Cette expérience (dite de

strioscopie) peut être interprétée en disant que les rayons lumineux sont indistinguables au voisinage du foyer image : ils ne peuvent être séparés sans entraîner une modification de la structure de la figure observée sur un écran placé plus loin. Le schéma 2 de l'encadré 5 montre en effet que les rayons, déterminés dans ce cas par un modèle ondulatoire vectoriel, ne sont pas rectilignes. L'interprétation « énergétique-ondulatoire » proposée par Kravtsov (1993) de la condition de distinguabilité des rayons au voisinage d'une caustique, c'est à dire d'un point de convergence d'un faisceau, est présentée en annexe.

Encadré 5 : rayons indistinguables au voisinage d'un point de convergence d'un faisceau lumineux

schéma 1 : expérience permettant d'obtenir l'image donnée par une lentille d'un objet éclairé par une onde plane



photographies montrant la modification de l'image d'une pointe lorsqu'un petit cache opaque est placé au foyer image de la lentille L₂ (expérience dite de strioscopie)

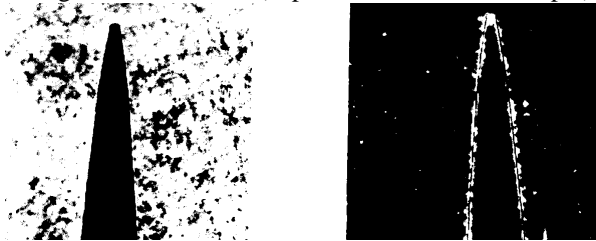
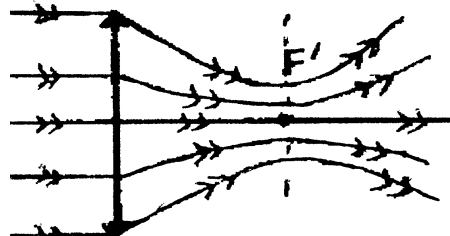


schéma 2 : rayons indistinguables au voisinage d'un foyer image (tiré de Boivin et al., 1967)



Le modèle géométrique moderne s'appuie aussi sur le principe de superposition des amplitudes. Celui-ci conduit à distinguer les deux mêmes types de situations que celles introduites précédemment dans le cas des modèles ondulatoires : celles où les sources sont incohérentes et les rayons indépendants (on a alors $I = I_1 + I_2$, avec $I = \Psi\Psi^*$), celles où les sources sont cohérentes et où il existe une onde résultante ($I \neq I_1 + I_2$). Le modèle géométrique moderne peut rendre compte du premier type de situations et de celles du deuxième type à condition que les rayons soient distinguables et que l'amplitude de l'onde varie lentement sur une distance de l'ordre de la longueur d'onde. Cela se produit quand on est loin des obstacles, des ouvertures et des points de convergence des faisceaux. Si ce modèle permet de rendre compte des interférences et de la diffraction dans les conditions précédemment définies, il ne permet pas d'interpréter la formation d'une image. Comme dans les modèles ondulatoires, il existe dans ce modèle deux niveaux de modélisation et deux types de représentations graphiques. Dans ce cas, les ondes élémentaires en lesquelles une onde cohérente peut être décomposée vérifient l'équation eikonale et non l'équation de Helmholtz.

Les modèles dont nous venons de parler sont ceux utilisés actuellement par les chercheurs. Ils sont diversement enseignés à l'université. Il semble que le modèle géométrico-ondulatoire soit traditionnellement enseigné en deuxième année de premier cycle et que le modèle spectral soit peu utilisé au niveau du deuxième cycle. Quand au modèle géométrique moderne, il ne semble pas être

enseigné avant un niveau élevé d'enseignement et apparaît ainsi comme un modèle réservé aux spécialistes.

Le modèle géométrique moderne n'ayant sans doute pas été abordé par les étudiants que nous avons interrogés, nous nous sommes intéressée au modèle géométrique enseigné en début d'université. Dans ce modèle, que nous avons qualifié de « géométrie classique », rien n'est dit sur la nature de l'énergie qui se propage (onde ou particule). Ce modèle s'appuie sur les concepts de rayon (direction de propagation de l'énergie), de « chemin » ($L_{MN} = \int_C ds$ où n est l'indice du milieu) ainsi que sur le principe de Fermat ($\delta L_{MN} = \int_C \delta(n ds) = 0$). Les rayons d'une onde émise par une source ponctuelle sont distinguables, c'est à dire qu'ils ne dépendent pas des conditions aux limites. Le théorème de Malus dit que les surfaces d'onde géométriques, ou surfaces d'égale chemin, sont orthogonales aux rayons. Ce modèle s'appuie sur le principe de superposition des intensités et ne fait donc intervenir que des sources incohérentes et des rayons indépendants. Il peut être utilisé dans les mêmes situations que le modèle géométrique moderne à condition que l'intensité de l'onde ne soit pas modulée. Il est ainsi utilisé dans les situations dites de propagation, réflexion et réfraction, de formation d'images en éclairage incohérent, situations que nous avons qualifiées de « géométriques ». Contrairement à ce qui se passe dans les modèles ondulatoires et géométrique moderne, dans le modèle géométrique classique, il n'existe qu'un type de représentation graphique d'une onde cohérente : celui qui porte sur le niveau macroscopique.

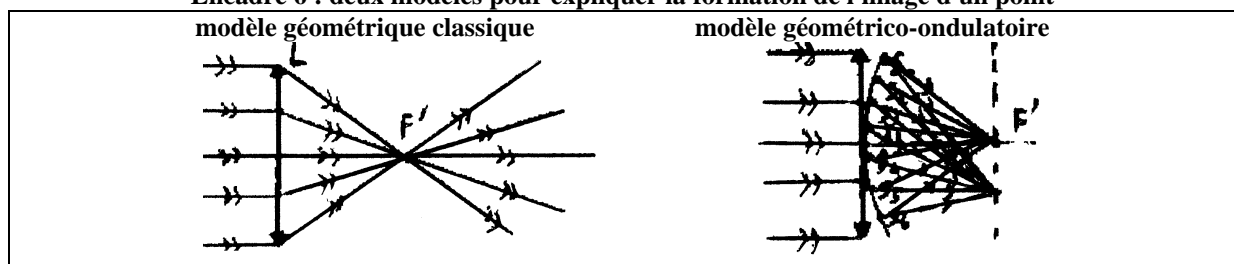
Le tableau 1 récapitule les grandes lignes de ce que nous venons de dire.

Tableau 1 : comparaison des différents modèles

| | MODELE GEOMETRIQUE CLASSIQUE | MODELE GEOMETRIQUE MODERNE | MODELES ONDULATOIRES SCALAIRES |
|--------------------------------|--|--|---|
| SURFACE D'ONDE (une source) | intensité non modulée | amplitude peut être modulée | amplitude peut être modulée |
| RAYONS (une source) | distinguables | distinguables | distinguables ou non |
| SOURCES | incohérentes <i>rayons indépendants</i> | cohérentes ou non | cohérentes ou non |
| GRAPHES | un niveau de modélisation | deux niveaux de modélisation | deux niveaux de modélisation |
| SITUATIONS | propagation, réflexion, réfraction, images en éclairage incohérent | interférences, diffraction champ lointain | interférences, diffraction, images éclairage cohérent |

Terminons ces remarques en rappelant qu'un modèle ondulatoire peut rendre compte d'une situation géométrique. Il en est ainsi de la formation d'une image, c'est à dire d'une distribution d'intensité lumineuse ressemblant à celle de l'objet (selon la définition de Goodman, 1972). Les schémas de l'encadré 6 montrent que, dans le modèle géométrique classique, l'image d'un point donnée par une lentille corrigée des aberrations géométriques est le point de concours des rayons émergents de la lentille, et que, dans le modèle géométrico-ondulatoire, l'image d'un point est le lieu de superposition constructive des ondes émises par les sources de Huygens. C'est donc une petite tache. Cette tache est assimilable à un point lorsque la diffraction par la lentille est négligeable.

Encadré 6 : deux modèles pour expliquer la formation de l'image d'un point



UN RAISONNEMENT QUI TEND A GEOMETRISER LES CONCEPTS

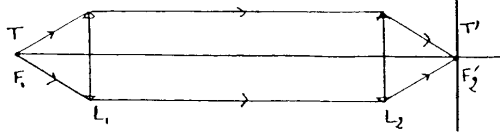
Après avoir présenté le cadre théorique qui a orienté l'analyse de nos résultats, nous allons illustrer la tendance des étudiants à utiliser des concepts ressemblant à ceux d'un modèle géométrique classique dans des situations devant être étudiées à l'aide d'un modèle ondulatoire. Pour des raisons de brièveté, nous ne donnerons que quelques résultats et renvoyons le lecteur aux articles cités en référence. Pour commencer, nous nous appuyerons sur les résultats d'une recherche portant sur des situations ondulatoires de formation d'images (images en éclairage cohérent, en présence ou non de diffraction, Maurines, 2000) et aborderons les difficultés soulevées par les concepts d'image, de décomposition en ondes élémentaires, de rayons indistinguables et de sources cohérentes.

Les étudiants et les concepts d'image, de décomposition en ondes élémentaires, de sources cohérentes et de rayons indistinguables

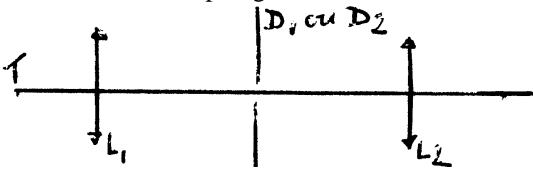
L'énoncé schématisé d'un des questionnaires construits pour cette recherche est présenté dans l'encadré 7. Une situation de référence est proposée (il est dit qu'on observe sur l'écran l'image du point-source). Deux autres situations sont ensuite étudiées. Dans la première, un diaphragme est intercalé entre les deux lentilles. Dans la seconde, un petit cache opaque est ajouté au foyer image de la lentille L_2 (expérience de strioscopie). Pour chaque situation, deux cas étaient envisagés : la diffraction de la lumière était négligée avec le diaphragme D_1 et ne l'était pas avec le diaphragme D_2 . Les questions portaient sur l'existence, la place et la forme des images : images de la source et du diaphragme dans la situation 1, image du diaphragme dans la situation 2.

Encadré 7 : énoncé schématisé du questionnaire sur la formation des images en éclairage cohérent, en présence ou non de diffraction

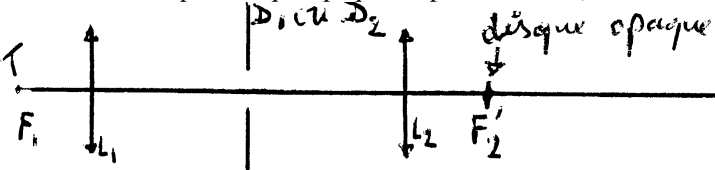
situation de référence *écran : on observe l'image de T en F'_2*



situation 1 : un diaphragme est intercalé entre les lentilles (D_1 diffraction négligée ; D_2 diffraction considérée)



situation 2 : un petit disque opaque est placé en F'_2 (D_1 diffraction négligée ; D_2 diffraction considérée)



Nous attendions des étudiants (pour les deux tiers des candidats au Capes de sciences physiques, $N=73$) qu'ils sachent que, dans la première situation, on peut observer deux images derrière la lentille : celle de la source ponctuelle située à l'infini, déformée ou non par la diffraction au niveau du diaphragme et située dans le plan focal image de la lentille ; celle du diaphragme, située dans le plan image conjugué et ressemblant au diaphragme que la diffraction soit négligée ou non. Nous attendions également qu'ils puissent fournir des schémas pour expliquer la formation de ces images et qu'ils sachent que dans la deuxième situation (strioscopie), l'image du diaphragme est non seulement moins lumineuse mais aussi modifiée (on voit les bords lumineux sur fond noir et non plus un disque lumineux).

Image d'une source ponctuelle à l'infini en présence de diffraction

Si le modèle géométrique classique peut expliquer la formation de l'image de la source quand la diffraction par le diaphragme est négligée, il est nécessaire d'utiliser un modèle ondulatoire dans le cas contraire. Dans le cadre de l'explication relevant du modèle géométrico-ondulatoire, l'image de la source ponctuelle située à l'infini résulte de la superposition des ondes émises par les sources de Huygens réparties sur la surface du diaphragme. L'image se trouve dans le plan prévu par l'optique géométrique, ici le plan focal image de la deuxième lentille. Sa forme dépend de la forme de l'ouverture limitant la surface d'onde de l'onde émergente du système, c'est à dire de la forme du diaphragme. Un exemple de schéma basé sur cette explication est donné à l'encadré 8 (schéma 1).

Alors que seulement 4% des étudiants (N=73) considèrent que la source n'a pas d'image en l'absence de diffraction, ce chiffre s'élève à 42% en présence de diffraction. Les justifications fournies montrent que pour beaucoup de ces étudiants, une image est l'image stigmatique de l'optique géométrique classique et que seul le modèle géométrique classique permet d'expliquer la formation des images. En effet, pour 45% d'entre eux (N=31), ce qui est observé est une figure de diffraction et non une image : « *on observe une figure de diffraction et non plus une image du trou* ». Pour 20%, il n'y a plus d'image car en présence de diffraction, il n'y a plus de lois pour les rayons : « *les rayons sont diffractés : ils partent dans des directions aléatoires, on ne peut appliquer les lois de l'optique géométrique* ».

Les étudiants, qui répondent que l'image du point-source existe en présence de diffraction, ne font pas appel pour autant à un modèle ondulatoire. En effet, 35% d'entre eux (N=40) n'utilisent pas le principe de Huygens-Fresnel au niveau du diaphragme mais suivent les rayons lumineux issus de la source de lumière. Comme ces rayons divergent après le diaphragme, l'image d'un point source à l'infini est derrière le plan focal image de la lentille. C'est ainsi qu'au lieu de donner un schéma similaire au schéma 1 de l'encadré 8, ils fournissent des schémas identiques au schéma 2 et le justifient en disant : « *Oui, l'image de T peut être observée mais pas à la même place (l'écran doit être éloigné)* » Ces étudiants ne décomposent pas l'onde incidente en ondes élémentaires et raisonnent donc sur un seul niveau, celui spécifique au modèle géométrique classique.

Encadré 8 : image d'un point source situé à l'infini en présence d'un diaphragme "diffractant"

schéma 1 : réponse correcte, l'image de la source se trouve dans le plan focal image ;
l'onde incidente est décomposée en ondes élémentaires au niveau du diaphragme

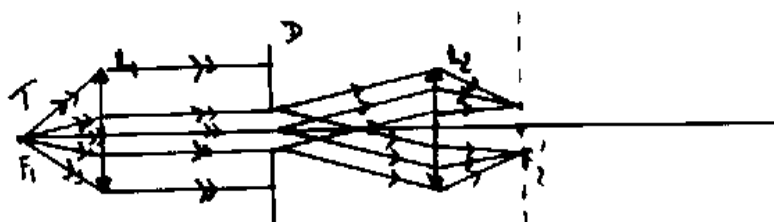


schéma 2 : réponse fautive, l'image de la source se trouve derrière le plan focal image ;
l'étudiant raisonne au niveau macroscopique en suivant les rayons de l'onde

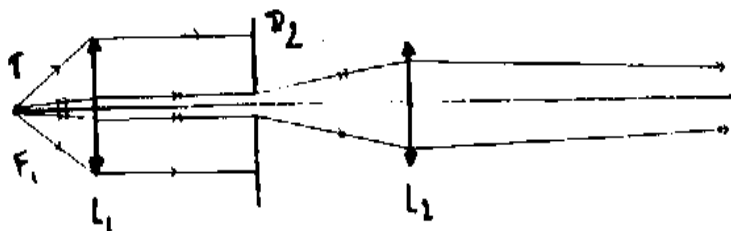


Image d'un diaphragme éclairé en lumière cohérente

Dans le cadre de l'explication relevant du modèle géométrico-ondulatoire et proposée pour la première fois par Lord Rayleigh en 1896, l'image du diaphragme résulte de la superposition des images données par la lentille L_2 des sources de Huygens réparties sur la surface du diaphragme. La diffraction de la lumière au niveau de la lentille n'étant pas négligée, ces images sont des taches dont la dimension dépend du diamètre de la lentille. Elles sont de plus cohérentes car les sources de Huygens le sont (l'éclairage est cohérent). Un exemple de schéma basé sur cette explication est donné à l'encadré 9 (schéma 1). Il correspond au cas limite où la diffraction par la lentille est négligée. Pour l'explication relevant du modèle spectral en germe dans les travaux d'Abbe en 1873, ainsi que les avantages et inconvénients de chaque méthode, se référer à Maurines (2000).

La moitié des étudiants pensent que l'image du diaphragme « non diffractant » n'existe pas (49%, $N=73$). La majorité des justifications fournies (36% sur la population totale) indiquent que les étudiants ne décomposent pas le diaphragme en points-objets et raisonnent au niveau macroscopique. La plupart note que les rayons émergents du diaphragme sont parallèles : « *on ne peut observer l'image de D_1 , car d'après le dispositif, il n'émerge de D_1 qu'un faisceau de lumière parallèle (qui converge après la lentille en T') donc on ne peut récupérer l'image de D_1* ».

Un nombre moindre mais non négligeable d'étudiants pensent que l'image du diaphragme « diffractant » n'existe pas (32%, $N=73$). Sur 87% des justifications (18% sur la population totale) apparaît de nouveau l'idée qu'une image est l'image stigmatique de l'optique géométrique classique et que seul le modèle géométrique classique permet d'expliquer la formation des images : « *à cause de la diffraction, ce qu'on observe est une figure de diffraction* », « *c'est un phénomène de diffraction qui n'est plus régi par les lois de l'optique géométrique* ».

On retrouve la tendance à raisonner au niveau macroscopique sur les réponses de beaucoup d'étudiants qui disent que l'image des diaphragmes existent. La moitié d'entre eux (20% sur la population totale) pensent qu'elles se trouvent dans le plan focal image de la lentille. Ils sont ainsi conduits à confondre l'image du diaphragme « non diffractant » avec l'image de la source (« *On a une image de D_1 , si celui-ci est placé à une distance supérieure à la distance focale de L_2 . L'image sera alors en F'_2* » et schéma 2 de l'encadré 9) et l'image du diaphragme « diffractant » avec le centre de la figure de diffraction (« *image de D_2 : image géométrique à travers L_2 , c'est à dire dans le plan image F'_2 . Cette image de D_2 sera sur le centre de la figure de diffraction* »).

Encadré 9 : image d'un diaphragme éclairé en lumière cohérente

schéma 1 : réponse correcte, l'image du diaphragme se trouve dans le plan image conjugué ; l'onde est décomposée en ondes élémentaires au niveau du diaphragme

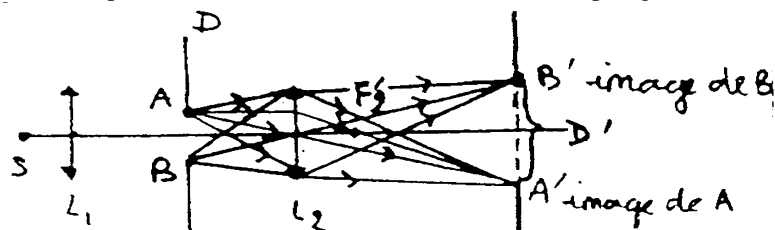


schéma 2 : réponse fautive, l'image de la source et du diaphragme sont confondues ; l'étudiant suit les rayons de l'onde au niveau macroscopique

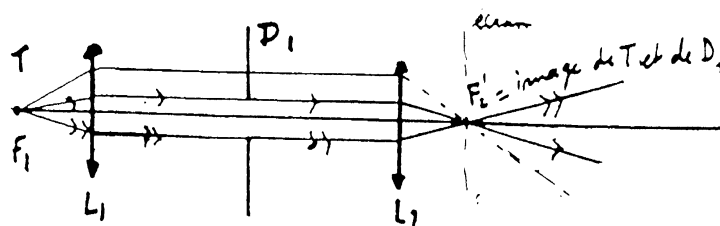
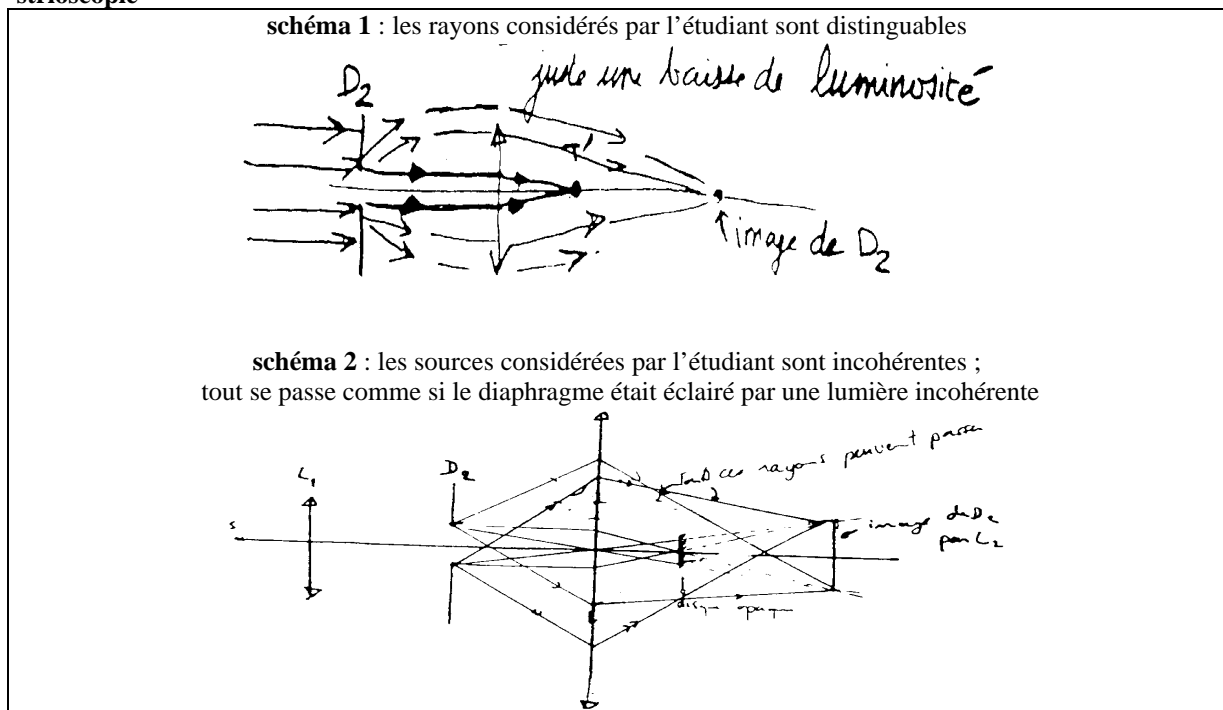


Image d'un diaphragme dans une situation de strioscopie

Parmi les étudiants qui disent que l'image du diaphragme « diffractant » existe toujours lorsqu'un cache est placé au foyer image de la lentille d'observation (51%, $N=73$), on retrouve une tendance à utiliser un modèle géométrique classique. En effet, un nombre non négligeable d'entre eux (19%, $N=37$) répondent que l'image du diaphragme n'est pas modifiée quand on supprime une partie de la lumière issue de la lentille. Les justifications révèlent là encore qu'une image est associée au modèle géométrique classique : "les caches ne gênent pas pour l'image géométrique de D_2 ". Les dessins fournis montrent que :

- les étudiants qui obtiennent l'image du diaphragme en suivant les rayons lumineux issus de la source primaire de lumière les considèrent au niveau du foyer image de la lentille comme distinguables et non comme indistinguables (schéma 1 de l'encadré 10) ;
- les quelques étudiants qui ne suivent pas les rayons issus de la source de lumière mais décomposent le diaphragme en points-objets considèrent des sources incohérentes et des rayons indépendants (schéma 2 de l'encadré 10). Tout se passe comme si le diaphragme était éclairé par une lumière incohérente.

Encadré 10 : pour les étudiants, l'image d'un diaphragme ne change pas dans une expérience de strioscopie



Les étudiants et le concept de surface d'onde

Après les concepts d'image, de décomposition en ondes élémentaires, de rayons indistinguables et de sources cohérentes, venons-en aux difficultés soulevées par le concept de surface d'onde (Maurines, 1995, à paraître). Lorsqu'on demande aux étudiants de choisir entre deux méthodes (éventuellement d'en donner une autre) pour déterminer expérimentalement une surface d'onde du son émis par un haut-parleur, une majorité d'entre eux choisissent une méthode incorrecte (62%, $N=49$). Pour une moitié de ces étudiants, il faut garder l'amplitude de la sinusöde observée à l'écran constante : "première méthode, surface d'onde : la même amplitude". Pour l'autre moitié des étudiants, il faut à la fois que la sinusöde observée à l'écran garde une amplitude constante et ne se décale pas horizontalement : "nous devons combiner les deux méthodes car les deux conditions sur l'amplitude et la phase doivent être vérifiées". Pour ces étudiants, une surface d'onde est une surface isoamplitude ou isoélongation. C'est donc celle du modèle géométrique classique car l'amplitude y est nécessairement constante.

CONCLUSION

Les résultats que nous venons de présenter peuvent être interprétés à l'aide de quatre tendances de raisonnement :

- les étudiants considèrent qu'une image est une image stigmatique obtenue par les lois de l'optique géométrique classique. Pour eux, il ne peut donc y avoir d'image en présence de diffraction (aussi bien pour la source primaire de lumière que pour l'objet éclairé) ;
- les étudiants ne décomposent pas l'onde en ondes élémentaires mais raisonnent au niveau macroscopique. Ils sont ainsi conduits à placer l'image d'une source à l'infini derrière le plan focal image de la lentille quand la diffraction ne peut être négligée, à nier l'existence de l'image d'un objet transparent éclairé en lumière cohérente ou bien à la confondre avec celle de la source primaire de lumière ;
- les étudiants considèrent des rayons distinguables au voisinage d'un point de convergence d'un faisceau lumineux et des sources incohérentes au niveau d'un objet éclairé en lumière cohérente. Ils en concluent que, dans une expérience de striescopie, l'image de l'objet éclairé n'est pas modifiée ;
- les étudiants considèrent qu'une surface d'onde est aussi une surface isoamplitude, autrement dit une surface isointensité.

Tout cela peut être résumé en disant que les étudiants tendent à utiliser des concepts ressemblant à ceux utilisés dans le modèle géométrique « classique ».

La tendance vers un raisonnement en termes d'objet que l'on suit préexiste à l'enseignement des ondes (Maurines, 1988, 1992, 1997, 1998). Il n'est pas spécifique des ondes puisque de nombreuses recherches montrent l'existence de cette tendance de raisonnement dans d'autres domaines de la physique (Viennot, 1996). Par contre, la tendance vers un raisonnement « géométrique » est spécifique au domaine des ondes. Intimement liée à la nature mécaniste du raisonnement commun, elle est la manifestation de ce type de raisonnement dans le domaine des situations ondulatoires. Elle indique que le raisonnement commun résiste et s'adapte à de nouvelles situations.

Une analyse des manuels révèle que l'enseignement actuel peut renforcer et même induire certaines des tendances de raisonnement des élèves et étudiants (Maurines, 2001). En effet, on y retrouve les erreurs qu'ils commettent. Il en est ainsi des tendances à représenter la lumière à l'aide de rayons et le son à l'aide de surfaces d'onde, à associer les concepts de rayon au seul modèle géométrique et de surface d'onde au seul modèle ondulatoire. Il ne faut pas déduire de cette utilisation sélective des concepts que les étudiants et les manuels traitent le son et la lumière de manière très différente. Les rayons et les surfaces d'onde qu'ils font intervenir relèvent en fait du modèle géométrique classique : les premiers sont indépendants et distinguables, les seconds sont des surfaces isointensités.

Terminons par quelques propositions pédagogiques issues de nos recherches :

- la spécificité des modèles ondulatoires n'est pas tant d'être basé sur le concept de surface d'onde mais sur le fait qu'il existe deux niveaux de modélisation. Il nous semble donc important d'insister sur ce point en utilisant le principe de Huygens, parent pauvre de l'enseignement actuel. Celui-ci permet de bien mettre en évidence, et ce de manière qualitative et graphique, l'existence de ces deux niveaux de modélisation. Il peut être utilisé dans des situations géométriques, telles que la réflexion et la réfraction, mais aussi dans des situations ondulatoires, telles que la diffraction et les interférences ;

- comme le signalaient déjà Fleury et Mathieu en 1962, les modèles ondulatoires et géométrique classique se complètent. Pour le mettre en évidence, il nous semble important de montrer qu'une situation géométrique peut être expliquée à l'aide des deux modèles. De même, il est souhaitable d'utiliser ces deux modèles dans une même situation ondulatoire. Cela permettrait de mettre en évidence les limites du modèle géométrique classique et de montrer que le choix d'un modèle dépend de l'échelle d'observation choisie et du degré de précision souhaité. Cela peut être fait pour une situation de propagation à travers une ouverture et de formation de l'image d'un point par une lentille ;
- il nous paraît souhaitable de donner une définition « expérimentale » de l'image d'un objet (une image est une représentation de l'objet), et non celle du stigmatisme rigoureux (point de concours des rayons émergents). Par ailleurs, il est important de préciser qu'une lentille donne une image non seulement de sources primaires de lumière mais aussi de tout « objet » éclairé. De plus, il est nécessaire de souligner qu'il est possible d'observer derrière une lentille plusieurs images lorsqu'on se déplace sur l'axe optique. Si l'on peut mettre l'accent sur ces points très tôt dans l'enseignement, il nous semble judicieux de préciser au niveau universitaire qu'il existe deux types de modèles pour expliquer la formation des images (ondulatoire ou géométrique classique). Des expériences voisines de celles présentées dans le questionnaire présenté ci-dessus, mettant en jeu des objets éclairés étendus, des sources primaires ponctuelles ou étendues et un cache placé au foyer image de la lentille de projection, pourraient être réalisées afin de mettre en évidence l'influence de la nature de l'éclairage sur les propriétés de l'image, et donc sur le modèle à utiliser pour en rendre compte. Si dans un premier temps, on peut se contenter de l'utilisation du principe de Huygens-Fresnel et de la décomposition en ondes sphériques, il nous semble nécessaire dans un deuxième temps d'introduire la décomposition en ondes planes et le modèle spectral car ils permettent de donner une interprétation physique simple des calculs par transformée de Fourier et des situations de filtrage spatial.

Le travail que nous venons de récapituler n'est qu'un premier jalon en vue de la définition d'un enseignement adapté aux difficultés des élèves et étudiants. Nous espérons qu'il contribuera à répondre à une question qui nous paraît d'importance pour l'enseignement de l'optique, à savoir celle de la définition d'une progression cohérente du secondaire au supérieur. De nombreuses questions méritent en effet d'être débattues : quand et comment introduire les différents modèles dont nous venons de parler ? Faut-il partir des équations de Maxwell et donc attendre le supérieur ? Est-il possible de choisir une démarche d'enrichissement progressif des modèles, comme cela est fait dans les nouveaux programmes de lycée pour la réaction chimique, et alors commencer dans le secondaire ?

BIBLIOGRAPHIE

- AMBROSE B. S. & SCHAFFER P. S. & STEINBERG R. N. & Mc DERMOTT L. (1999). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double slit-interference. *Am. J. Phys.*, vol. 67, n° 2., pp. 146-155.
- BACHELARD G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Vrin, Paris.
- BOIVIN A. & DOW J. & WOLF E. (1967) Energy flow in the neighborhood of the focus of a coherent beam. *Journal of the Optical Society of America*, vol.57, n°10n pp.1171-1175.
- BORN M. & WOLF E. (1980). *Principles of Optics*, sixième édition. Pergamon Press, Oxford.
- COLIN P. & VIENNOT L. (2000). Les difficultés d'étudiants post-bac pour une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'image optique. *Didaskalia*, vol.17, pp. 29-54.
- DETTWILLER L. (1990). *Qu'est-ce que l'optique géométrique ? fondements et applications*. Dunod, Paris.
- FAWAZ A. & VIENNOT L. (1986). Image optique et vision. *B.U.P.*, n°686, pp.1125-1146.
- FLEURY P. & MATHIEU J.P. (1962). *Images optiques*. Eyrolles, Paris.
- FRANK P.G. & BERGMANN P.G. & YASPAN A. (1974). Ray Acoustics. In R.B. Lindsay (éd), *Physical Acoustics*. Dowden Hutchinson and Ross Inc, Stroudsburg, Pennsylvania, pp.32-56.
- GALILI I. (1996). Students' conceptual change in geometrical optics. *Int. J. Sci. Educ*, vol. 18, n° 7, pp. 847-868.
- GOODMAN J.W. (1972). *Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie*. Masson, Paris.
- GUIRAUD J.L. (1973). Lignes de propagation de l'énergie dans la diffraction d'une onde électromagnétique plane par une fente dans un plan conducteur. *C.R. Acad. Sc.*, t.227, série B-8, pp.103-106.
- HALBWACHS F. (1974). *La pensée physique chez l'enfant et le savant*. Delachaux et Niestlé, Neuchâtel.

- HEMPEL C. (1972). *Eléments d'épistémologie*. Colin, Paris.
- JESSEL M. (1973). *Acoustique théorique. Propagation et holophonie*. Masson, Paris.
- JOSHUA S. & DUPIN J.J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. P.U.F., Paris.
- KAMINSKY W. (1989). Conceptions des enfants (et des autres) sur la lumière. *B.U.P.*, n° 716, pp. 973-996.
- KRAVTSOV Yu A. & ORLOV Yu I. (1993). *Caustics, catastrophes and wave fields*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- LINDER C.& ERICKSON G. (1989). A study of tertiary students' conceptualizations of sound. *Int. J. Sci. Educ.*, vol. 11, special issue, pp. 491-501.
- MAURINES L. & SALTIEL E. (1988). Mécanique spontanée du signal. *B.U.P.*, n°707, pp. 1023-1041.
- MAURINES L. (1992). Spontaneous reasoning on the propagation of visible mechanical signals. *Int.J.Sci.Educ.*, Vol 14,n°3, pp 279-293.
- MAURINES L. (1998). Les élèves et la propagation des signaux sonores. *B.U.P.*, n° 800, pp.1-22.
- MAURINES L. (1995). "Les étudiants et la phase d'une onde progressive : résultats d'une enquête exploratoire", *Actes du cinquième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques, I.U.F.M. de Reims-Champagne-Ardenne et IUFM de Reims*, Kaminsky et Mary (éd), pp.107-123.
- MAURINES L. (à paraître). Analyse des difficultés des étudiants à propos des concepts de phase et de surface d'onde, du principe de Huygens. *Didaskalia*, vol. 22.
- MAURINES L. (1997). Raisonnement spontané sur la diffraction. *Actes du sixième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques, Université Lyon I*, Gréa (Ed), pp. 77-95.
- MAURINES L. (1999). Les étudiants et les ondes en dimension trois : analyse des difficultés des étudiants quant au modèle géométrico-ondulatoire. *Didaskalia*, vol. 15, pp 87-122.
- MAURINES L.(2000). Les étudiants, la diffraction de Fraunhofer et la formation des images en éclairage cohérent. *Didaskalia*, vol. 17, pp.55-99
- MAURINES L. (2001). "Students and the concept of object in optical imaging", In *Selected papers of the international conference on physics education GIREP 2000, Barcelona*, pp.205-208.
- MAURINES L. (2001). *Le raisonnement géométrique en termes d'objet dans la physique des ondes*. Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches, Université Paris Sud.
- PIAGET J.& INHELDER B. (1941). *Le développement des quantités physiques chez l'enfant*. Delachaux et Niestlé, Neufchâtel.
- RAYLEIGH J.W.S. (1896). On the theory of optical images with special reference to the microscope. *Phil.Mag.*, S. 5, vol. 42, n° 255, pp. 167-195.
- VIENNOT L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Hermann, Paris.
- VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en physique*. De Boeck, Paris.
- VOLKMANN H. (1966). Ernst Abbe and his work. *Applied optics*, vol. 5, n°11, pp. 1720-1731.
- VYGOTSKI L. (1985). *Pensée et langage*. Messidor-Éditions sociales, Paris.
- WITTMANN M. & STEINBERG R. N. & REDISH E. F.(1999). Making sense of how students make sense of mechanical waves. *The Physics Teacher*, n° 37, pp. 15-21.

ANNEXE

Une interprétation énergétique et « ondulatoire » de la condition de distinguabilité des rayons est proposée par Kravstov (1993) dans le cas des caustiques, c'est à dire au voisinage d'un point de convergence d'un faisceau. Celle-ci s'appuie sur le concept de volume de Fresnel d'un rayon, c'est à dire sur le volume délimité par l'enveloppe de toutes les premières zones de Fresnel centrées le long du rayon (schéma 1 de l'encadré 11). Le principe de Huygens-Fresnel montrant que le champ, créé à l'extérieur d'une surface d'onde contenant la source, est déterminé, en un point d'observation \mathbf{r} , par les sources réparties sur la première zone de Fresnel, le volume de Fresnel apparaît comme un bon compromis pour localiser le volume dans lequel l'énergie s'écoule (si l'on diminue la taille d'un trou percé dans un écran à une dimension inférieure à la première zone de Fresnel, le champ au point d'observation \mathbf{r} subira des modifications non négligeables, et, si l'on agrandit la taille du trou on perd l'information sur l'endroit d'où vient l'énergie). En faisant l'hypothèse que deux rayons sont distinguables si leurs volumes de Fresnel ne s'interpénètrent pas, Kravtsov et Orlov démontrent que deux rayons voisins d'une caustique dont les différences d'eikonale diffèrent au moins de $\lambda/2$ sont distinguables. C'est ce qui se passe pour les rayons représentés sur le schéma 2 de l'encadré 11. Lorsque les volumes de Fresnel des deux rayons s'interpénètrent comme sur le schéma 3, les rayons ne sont pas distinguables et ne peuvent plus être obtenus par le modèle géométrique moderne.

Encadré 11 : interprétation énergétique-ondulatoire de la condition de distinguabilité des rayons

schéma 1 : volume de Fresnel d'un rayon

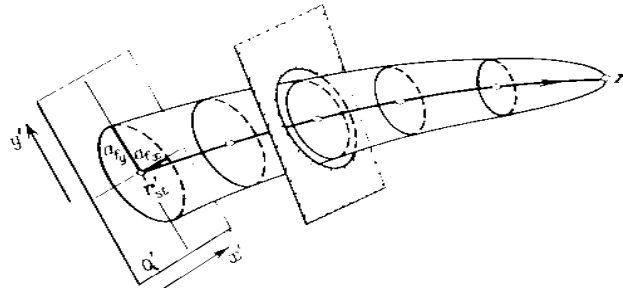


schéma 2 : rayons distinguables

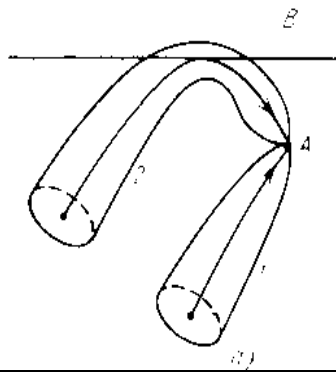


schéma 3 : rayons indistinguables

