

La propagation des ondes en dimension 3 : analyse des difficultés des étudiants quant au modèle géométrico- ondulatoire

Analysis of students' difficulties on the wave geometrical model of three dimensional waves

Laurence MAURINES

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

Résumé

Cet article analyse la manière dont les étudiants utilisent les concepts de « rayon » et de « surface d'onde » ainsi que le principe de Huygens-Fresnel pour décrire, expliquer et représenter graphiquement des situations où une onde (sonore ou lumineuse) se propage selon plusieurs directions (propagation, réflexion, diffraction). Pour les deux types d'onde, on note les mêmes tendances vers un raisonnement de type géométrique et mécaniste, vers une réduction du nombre de variables, vers une matérialisation des concepts. Quelques remarques sur des livres scolaires ou de vulgarisation et quelques propositions pédagogiques sont faites.

Mots clés : *raisonnement commun, université, rayon, surface d'onde, principe de Huygens-Fresnel.*

Abstract

This paper analyses the difficulties encountered by students while learning propagative wave phenomena in a three dimensional medium. Two types of waves (sound, light) and three types of situations (propagation in an open space, reflection, diffraction) are considered. The main question explored concerns the ways students use the concepts of « ray » and « wave surface » as also the Huygens-Fresnel principle when drawing their ideas. Three tendencies are shown to recur : a geometric and mechanistic reasoning, a reduction in the number of variables, a materialization of concepts. Some school text-books have been analysed and some pedagogical implications are discussed.

Key words : *common reasoning, university, ray, wave surface, Huygens-Fresnel principle.*

Resumen

Este artículo analiza la manera como los estudiantes utilizan los conceptos de « rayo » y de « superficie de onda », así como el principio de Huygens-Fresnel, para describir, explicar y representar gráficamente situaciones donde una onda (sonora o luminosa) se propaga en diferentes direcciones (propagación, reflexión, difracción). Para los dos tipos de onda, se nota la misma tendencia hacia un razonamiento de tipo geométrico y mecánico, y una reducción del número de variables, así como una materialización de los conceptos. Se plantea en el mismo algunas observaciones a los libros escolares o de vulgarización y se proponen algunas proposiciones pedagógicas.

Palabras claves : *razonamiento común, universidad, rayo, superficie de onda, principio de Huygens – Fresnel.*

1. INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années, de nombreuses études, inspirées par les travaux de Bachelard (1938) et Piaget (1941), ont montré qu'une large fraction des apprenants partageait, 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 mais aussi, dans certains cas, résultats d'un passé scolaire, ces conceptions et raisonnements contredisent fréquemment la science enseignée, se révèlent sur certains points très résistants à l'enseignement et partagés à un degré divers par tout le monde. Si, aujourd'hui, suite à une vision constructiviste de l'apprentissage, il existe un consensus sur la nécessité de tenir compte dans l'enseignement de ces raisonnements « communs », il y en a peu sur

les moyens de le faire. Cette étude s'inscrit dans une perspective constructiviste de l'apprentissage décrite par Viennot de la manière suivante : « *Seule la confrontation permanente du formalisme et du réel construit une authentique pratique scientifique... 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* » (Viennot, 1979, p. 151). Le principal objectif du travail que nous menons dans le domaine des « ondes » est donc de contribuer à une meilleure connaissance des difficultés des étudiants et de leur raisonnement spontané afin de permettre aux enseignants de leur en renvoyer l'image et de les conduire à s'en rendre maîtres.

L'étude que nous présentons ici porte sur les difficultés soulevées par la **modélisation géométrico-ondulatoire** de la propagation d'une onde dans un milieu de dimension 3 en présence ou non d'obstacles. Cette modélisation est basée sur les concepts de **rayon** et de **surface d'onde** ainsi que sur le principe de **Huygens-Fresnel**. Cette étude vise à savoir, d'une part, dans quelles situations les élèves et les étudiants utilisent ces concepts et ce principe, et d'autre part, comment ils le font. Après avoir précisé la problématique et la méthodologie de cette étude, nous en donnerons les résultats ainsi qu'une première analyse. La discussion qui suivra montrera que les représentations graphiques « communes » des phénomènes sonores et lumineux, bien que différentes, révèlent toutes deux des tendances vers un raisonnement de type géométrique et mécaniste, vers la matérialisation des concepts ainsi que la simplification des phénomènes et des théories. Quelques remarques sur les programmes du secondaire, les manuels scolaires et les ouvrages destinés au grand public révéleront que les pratiques enseignantes et de vulgarisation ne peuvent que renforcer ces caractéristiques du raisonnement « commun ». Nous concluons par quelques propositions pédagogiques.

2. PROBLÉMATIQUE

2.1. Objectif général

Nous avons choisi les ondes comme thème général de recherche car c'est un domaine de la physique très peu exploré par la didactique et connu des enseignants et des étudiants comme difficile à enseigner et à comprendre. Notre objectif est d'analyser les principales tendances de raisonnement observées dans des groupes d'élèves et d'étudiants

relativement variés afin d'en proposer un « modèle », c'est-à-dire une description organisée, aussi synthétique et prédictive que possible. Bien que ces tendances ne se manifestent pas toujours majoritairement (cela dépend beaucoup des situations physiques proposées et du mode de questionnement), nous supposons qu'elles sont susceptibles d'intervenir, à un moment ou à un autre, dans le raisonnement de tout apprenant. Des tendances différentes, voire contradictoires entre elles peuvent coexister sans que cela ne gêne l'apprenant. La problématique et la méthodologie orientant notre travail s'inscrit dans un cadre décrit de manière détaillée par Closset (1983).

2.2. Thèmes spécifiques de l'étude

Alors que dans nos recherches précédentes (Maurines, 1986, 1992, 1993) nous avons analysé les difficultés soulevées par la propagation des signaux selon **une** direction (propagation d'un signal « visible » tel qu'un signal transversal sur une corde, propagation d'un signal « invisible » tel qu'un son dans l'air), nous nous intéressons ici à celles soulevées par la propagation d'une onde selon **plusieurs** directions.

Une première enquête exploratoire portant sur le son a débuté dès 1991, motivée tant par l'absence de travaux dans le domaine que par la part importante que l'étude du son allait prendre dans les nouveaux programmes français du secondaire à la rentrée de 1993. Les résultats de cette enquête exploratoire et ceux d'une étude menée parallèlement sur les concepts de phase et de surface d'onde (Maurines, 1995) nous ont alors conduits à élargir le domaine d'étude à la lumière à des fins de comparaison et à focaliser une partie de la recherche sur les représentations graphiques d'un phénomène ondulatoire en dimension trois.

Le bilan que nous présentons ici répond aux quatre questions suivantes.

Comment les étudiants dessinent-ils des phénomènes ondulatoires se produisant dans un milieu à trois dimensions quand on leur demande de les décrire et de les expliquer ? Utilisent-ils des rayons, des surfaces d'onde, ou bien autre chose ? Quelle est la signification de leur dessins ?

Les dessins et explications des étudiants dépendent-ils du type d'onde (son ou lumière) ?

Les dessins et explications des étudiants dépendent-ils de la situation étudiée (propagation dans un milieu illimité, réflexion, diffraction) ?

À quelle(s) théorie(s) (géométrique ou/et ondulatoire) les étudiants associent-ils les concepts de rayon et de surface d'onde ?

2.3. Quelques remarques sur les théories utilisables pour l'étude des ondes en dimension trois

Il existe deux théories pour étudier les ondes : la théorie géométrique et la théorie ondulatoire.

Dans la théorie géométrique, rien n'est dit sur la nature de l'énergie qui se déplace (onde ou particule) mais son trajet peut être prévu. La théorie géométrique s'appuie sur les concepts de rayon de propagation de l'énergie et de surface d'onde. Ces surfaces sont qualifiées de géométriques et définies en référence à une grandeur appelée « chemin » et comptée le long des rayons. Elles sont déterminées par l'équation eikonale, traduction mathématique du théorème de Malus disant que les surfaces d'onde sont toujours orthogonales aux rayons (Frank et al., 1974).

Dans la théorie ondulatoire, l'onde est dite correspondre à la modification de deux champs (champs électrique et magnétique dans le cas de la lumière, champs de surpression et de vitesse vibratoire dans le cas du son). Ces champs vérifient une équation différentielle du deuxième ordre appelée « équation de propagation » et des conditions aux limites. Dans le cas d'une onde progressive monochromatique, le concept de phase est introduit, et, en dimension trois, sont définis des surfaces équiphases et des rayons de propagation de la phase, des surfaces d'onde et des rayons de propagation de l'énergie.

Dans beaucoup de situations où l'onde est localement plane, la connaissance d'un seul champ suffit. Les surfaces d'onde coïncident alors avec les surfaces équiphases et les rayons de propagation de l'énergie avec les rayons de propagation de la phase. Les surfaces d'onde « ondulatoires » et les rayons de propagation de l'énergie sont alors orthogonaux entre eux et coïncident avec les surfaces d'onde et rayons de la théorie géométrique. Dans ce type de situations, une théorie ondulatoire « approchée » peut être utilisée. Nous avons choisi de l'appeler modèle « **géométrico-ondulatoire** », car basé sur le principe de superposition des amplitudes des ondes émises par des sources réelles ou fictives d'une surface d'onde (principe de Huygens-Fresnel), il s'appuie à la fois sur les concepts de champ et de phase propres à la théorie ondulatoire et sur ceux de rayon et de surface d'onde communs aux deux théories.

Il y a trois différences essentielles entre la modélisation géométrique de la théorie géométrique et celle de la théorie ondulatoire « approchée ».

La théorie géométrique décrit directement ce qui se passe à un niveau macroscopique avec des rayons de propagation de l'énergie et des surfaces d'onde orthogonales à ces rayons alors que la théorie ondulatoire

« approchée » le reconstruit : il est le résultat de la superposition d'ondes émises à un niveau « microscopique » par des sources réelles ou fictives (sources de Huygens).

Les rayons de propagation de l'énergie de la théorie géométrique sont des courbes qui ne dépendent que du milieu et ce localement par l'intermédiaire de l'indice et ne dépendent pas de la fréquence de l'onde (si l'on néglige la dispersion du milieu). Ce n'est pas le cas des rayons de la théorie ondulatoire : ceux-ci dépendent en plus de l'environnement d'un point donné du milieu (par exemple, de la taille d'une ouverture) et de la fréquence de l'onde.

Pour obtenir l'intensité d'une onde dans la théorie géométrique, il suffit d'utiliser la conservation du flux énergétique dans un faisceau et d'ajouter les intensités des ondes émises par les sources réelles (photo et acoustométrie) alors que dans la théorie ondulatoire, il est nécessaire de passer à un niveau « microscopique » et d'ajouter les amplitudes des ondes.

Il existe trois types de situations : les situations géométriques pour lesquelles la théorie géométrique suffit pour comprendre le niveau macroscopique (propagation, réflexion et réfraction), les situations ondulatoires et géométrico-ondulatoires pour lesquelles il est nécessaire de faire appel à une théorie ondulatoire « exacte » ou « approchée » (diffraction, interférences, ondes stationnaires, etc.) La théorie ondulatoire conduit aux mêmes résultats que la théorie géométrique lorsqu'elle est appliquée à des situations géométriques et à des résultats pouvant s'interpréter comme perturbation de cette théorie si elle est appliquée aux situations géométrico-ondulatoires, la théorie géométrique étant une approximation de la théorie ondulatoire. En effet, l'équation eikonale se déduit de l'équation de propagation des champs par passage à la limite, en considérant que l'amplitude des champs varie peu sur une distance de l'ordre de la longueur d'onde. Dans cette interprétation ondulatoire de la théorie géométrique, l'équation eikonale est une équation de propagation de la phase.

Ce qui permet de caractériser une situation est l'ordre de grandeur de la longueur d'onde devant les dimensions mises en jeu dans la situation. Dans les situations géométriques et géométrico-ondulatoires, on est en champ lointain et en présence d'obstacles, d'interfaces dont les dimensions sont « grandes » devant la longueur d'onde et les irrégularités de surface « petites ». Dans le premier cas, l'amplitude des champs varie peu sur une distance de l'ordre de la longueur d'onde, dans le second cas elle varie trop pour être négligée. La différence essentielle entre ces deux types de situations est que les **rayons de propagation de l'énergie sont**

indépendants dans les situations géométriques alors qu'ils ne le sont pas dans les situations géométrico-ondulatoires : une suppression d'une partie des rayons d'énergie n'entraîne pas de modification des autres rayons d'énergie dans le premier cas alors qu'il en entraîne une dans le second. De plus, dans les situations géométriques, l'intensité de l'onde n'est pas modulée alors qu'elle l'est dans les situations géométrico-ondulatoires (franges brillantes et sombres d'interférence).

Dans les annexes 1 et 2, des tableaux récapitulent ce qui vient d'être dit. Dans l'annexe 3, sont regroupées les représentations graphiques portant d'une part sur le niveau macroscopique de deux situations géométriques (propagation, réflexion) et d'une situation géométrico-ondulatoire (diffraction) et d'autre part sur le niveau « microscopique » de la situation de diffraction.

2.4. Quelques remarques sur l'enseignement des ondes

En France, jusqu'à la rentrée scolaire de 1993, les ondes étaient abordées pour la première fois en classe de première scientifique (âge moyen des élèves : 17 ans). Le programme de cette classe daté de 1988 n'était pas focalisé sur un type d'onde particulier. Il demandait de mener l'étude des ondes « invisibles » (son et lumière) en liaison avec l'étude des ondes mécaniques « visibles » (ondes se propageant sur une corde, un ressort, à la surface de l'eau). Il abordait successivement l'étude de la propagation, de la réflexion et de la transmission, de la diffraction et des interférences. Les concepts de rayon de propagation et de surface d'onde étaient introduits. À propos de la surface d'onde, le programme soulignait l'intérêt de la cuve à ondes, celle-ci permettant de montrer des ondes circulaires ou rectilignes. Le programme comportait également une partie d'optique géométrique portant sur les lois de la propagation rectiligne, de la réflexion et de la réfraction.

Depuis la rentrée de 1993, les ondes sont abordées pour la première fois dans une classe généraliste, la seconde (âge moyen des élèves : 16 ans). On débute par le son et poursuit par la lumière. L'étude de la propagation du son est faite selon une direction et s'appuie sur les concepts de fréquence, longueur d'onde et vitesse de propagation. Le concept de surface d'onde n'est pas introduit et l'étude de la réflexion utilise celui de rayon sonore. Dans la partie sur la lumière, les lois de l'optique géométrique sont introduites. Depuis la rentrée de 1995, la diffraction et les interférences lumineuses sont abordées dans une classe préparant à un baccalauréat scientifique, la terminale S (âge moyen des élèves : 18 ans). Aucune formalisation mathématique des phénomènes n'est faite. Les

élèves doivent savoir que l'existence du phénomène de diffraction est lié au rapport de la dimension de l'ouverture à celle de la longueur d'onde et expliquer le phénomène d'interférences comme résultant de la superposition constructive et destructive de deux ondes en un point.

Contrairement à ce qui se passe dans l'enseignement secondaire, il n'existe pas, dans l'enseignement supérieur, un programme officiel commun aux différentes universités scientifiques. C'est à ce niveau que le concept de phase et le principe de Huygens-Fresnel sont introduits. La formalisation des phénomènes dépend du niveau d'enseignement et de la filière suivie. Pour la majorité des étudiants interrogés dans nos enquêtes, il semble que l'optique ait toujours fait partie de leur cursus universitaire contrairement à l'acoustique, et que, si les théories géométrique et ondulatoire ont été abordées dans le cas de la lumière, seule la deuxième l'a été dans le cas du son.

3. MÉTHODOLOGIE

À la suite de l'enquête exploratoire sur le son précédemment citée (une première série de questionnaires portant, entre autres, sur ce qui arrive au son émis par un violoniste dans différentes situations), nous avons émis des hypothèses quant à l'utilisation par les étudiants des concepts de rayon et de surface d'onde, quant au principe de Huygens-Fresnel. Nous avons cherché à valider ces hypothèses de deux façons. D'une part, nous avons rédigé un questionnaire de type Q.C.M. portant sur les concepts et lois utilisés en optique géométrique et ondulatoire. D'autre part, nous avons mis au point une deuxième série de questionnaires portant sur les représentations graphiques de six phénomènes ondulatoires différents. Trois situations de l'enquête exploratoire ont été reprises et utilisées aussi bien pour le son que pour la lumière (propagation en milieu illimité, propagation face à un plan réfléchissant, propagation à travers une « petite » ouverture). Pour pouvoir comparer les réponses fournies aux différents questionnaires, les situations ont été présentées de manière très voisine et les questions ont eu des libellés très proches : « *Expliquez ce qui arrive au son (ou à la lumière). Représentez ce qui se passe sur le schéma ci-dessus en précisant bien ce que vous dessinez* ». Bien que les phénomènes auxquels nous nous intéressions étaient à trois dimensions, nous avons été conduits, pour des raisons pratiques, à analyser des représentations graphiques à deux dimensions. Cela n'enlève rien aux tendances de raisonnement dégagées.

La population interrogée est d'environ 340 élèves ou étudiants ayant suivi un enseignement sur les ondes. Nous désignerons par E_1 la

population âgée de 17 à 19 ans et ayant suivi uniquement un enseignement de niveau secondaire (170 élèves de première ou terminale scientifiques, étudiants ayant un baccalauréat scientifique et en début de premier cycle universitaire ou de classe préparatoire aux grandes écoles) et par E₂ la population âgée de 20 à 23 ans et ayant suivi également un enseignement de niveau supérieur (170 étudiants scientifiques, en classes préparatoires aux grandes écoles, à l'université en licence ou en préparation à un concours pour devenir professeur de physique et chimie dans le secondaire). La nature et l'effectif des populations interrogées à chaque questionnaire n'ont pas permis, à cette étape de la recherche, de faire une analyse comparative systématique des résultats en fonction du niveau et du type d'enseignement suivi. Sur les points évoqués ci-après et pour lesquels il n'y a pas de différence significative entre les réponses fournies par les deux types de population, les résultats ont été regroupés.

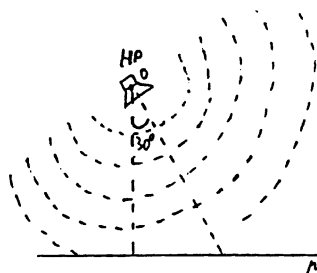
Les réponses des étudiants ont d'abord été analysées questionnaire par questionnaire. L'effectif de la population interrogée à chaque questionnaire n'étant pas toujours suffisamment élevé, les pourcentages des différentes réponses ne peuvent être interprétés qu'en tant que tendances majoritaires ou minoritaires. Un pourcentage de 20% de réponses erronées après enseignement peut être le signe d'une difficulté s'il était légitime d'attendre un pourcentage nul ; il en est de même d'un pourcentage faible de réponses correctes.

Les résultats obtenus à l'ensemble des questionnaires ont ensuite été confrontés. L'interprétation que nous en donnons met en lumière les grandes lignes d'un raisonnement « commun » sur les ondes en dimension trois et sur leur représentation graphique. Elle trouve sa justification, non pas dans le nombre de réponses obtenues à une question particulière, mais dans le fait qu'elle donne sens et cohérence à nos résultats.

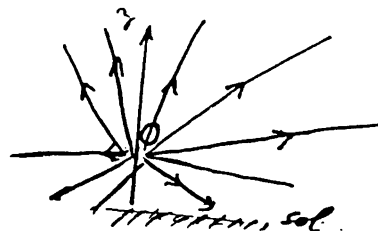
Nous n'entrerons pas ici dans une analyse exhaustive des résultats obtenus, notamment en ce qui concerne la diffraction (pour plus de détails, voir Maurines, 1997) et la réflexion sonore. On trouvera en annexe les énoncés schématisés des questionnaires portant sur les représentations graphiques des phénomènes sonores et lumineux ainsi qu'un tableau récapitulatif de résultats. Le total ligne n'est pas toujours égal à 100 car les pourcentages des non-réponses et des réponses n'ayant pas pu être codées ne sont pas indiqués. Nous illustrerons la présentation des résultats par des exemples significatifs de réponses d'étudiants. Pour une meilleure lisibilité, certains commentaires accompagnant les dessins ont été dactylographiés.

ENCADRÉ 1

Exemples de réponses d'étudiants représentant différemment le son et la lumière



« Propagation des ondes selon des surfaces d'ondes. »



« Tous les rayons émis par la source lumineuse ont la même vitesse car température identique partout. »

Figure 1 : Étudiant E₂ (lumière → son)))

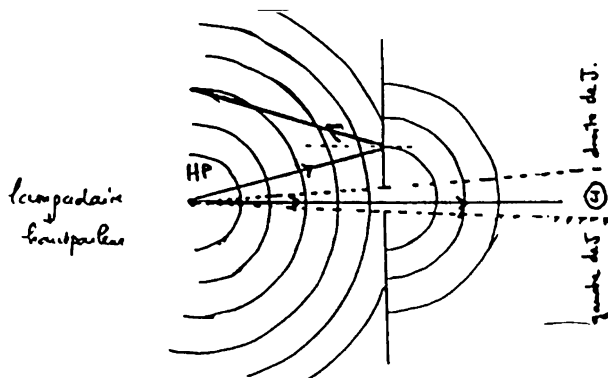
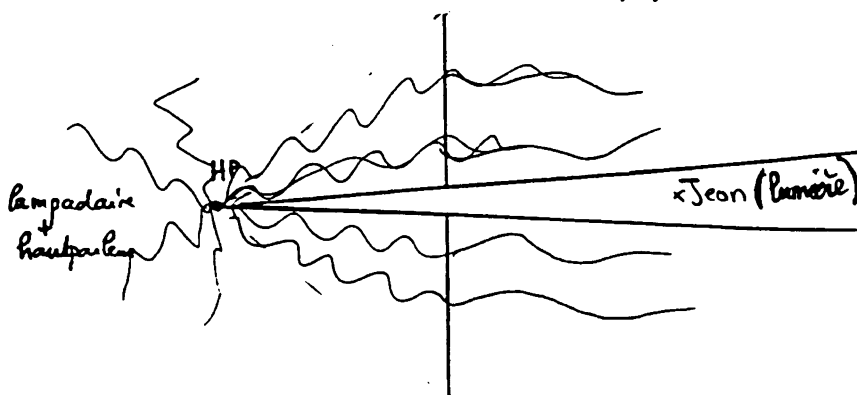


Figure 2 : Étudiant E₁ (lumière → son)))



« Jean peut se trouver partout car le son se diffuse en ondes et n'est pas **rectiligne**. »

Figure 3 : Étudiant E₂ (lumière → son ~~~)

4. RÉSULTATS

4.1. Les étudiants, les concepts de rayon et de surface d'onde et les théories de la lumière

Alors que les concepts de rayon et de surface d'onde interviennent dans les théories géométrique et ondulatoire de la lumière, une majorité d'étudiants E_2 (75%, $N=33$) pensent que le concept de **rayon** est réservé à la **théorie géométrique** et celui de **surface d'onde** à la **théorie ondulatoire** (réponse obtenue à un questionnaire demandant dans quelle(s) théorie(s) ces concepts sont utilisés). Quand il s'agit de préciser ce que chacune de ces théories dit de la lumière, une majorité d'étudiants associe la théorie géométrique à la propagation rectiligne et la théorie ondulatoire à l'existence d'un champ électromagnétique ou d'une onde (respectivement 65% et 85% des étudiants). Un seul étudiant indique que la théorie géométrique ne s'intéresse pas à la nature physique du transport d'énergie et 19% des étudiants insistent à propos de la théorie ondulatoire sur l'aspect périodique ou vibratoire du phénomène. Aucun étudiant ne précise que la théorie géométrique peut être obtenue à partir de la théorie ondulatoire par passage à la limite et qu'elle aussi concerne les ondes. Aucun ne met l'accent sur le fait que la théorie géométrique décrit ce qui se passe à un niveau macroscopique alors que la théorie ondulatoire le reconstruit à partir d'un niveau « microscopique ».

4.2. Les représentations graphiques de la propagation du son et de la lumière données par les étudiants

Alors que tous les phénomènes ondulatoires autres que ceux qui sont non propagatifs (ondes stationnaires) peuvent être représentés à l'aide de rayons et de surfaces d'onde, les étudiants E_1 et E_2 dessinent majoritairement des « **rayons** » pour la propagation de la **lumière** et des « **surfaces d'onde** » pour la propagation du **son**. Il existe par ailleurs des étudiants (surtout parmi la population E_2) qui dessinent des sinusoïdes dans le cas du son, c'est-à-dire qui donnent un type de représentation renvoyant aux graphes spatiaux et temporels d'une onde progressive sinusoïdale et notamment aux courbes visualisées à l'oscilloscope (tableau 1 de l'annexe 4). Cette différence entre les représentations graphiques de la propagation du son et de la lumière se retrouve de manière moins accentuée dans les situations de réflexion et de diffraction (tableaux 2 et 3 de l'annexe 4). Sur les exemples de dessins et de justifications donnés à l'encadré 1, il est à noter l'insistance de certains étudiants sur le fait que la lumière se propage en ligne droite et que le son se propage comme une onde.

Ces résultats pourraient laisser penser que lorsque les étudiants représentent des surfaces d'onde ou des sinusoïdes, ils mettent l'accent sur l'aspect ondulatoire du phénomène. La question se pose de savoir ce que signifie la différence de traitement entre la lumière et le son. Nous allons voir dans ce qui suit qu'elle n'est qu'apparente.

4.3. Pour les étudiants, la surface d'onde sonore n'est pas une surface équiphasé

4.3.1. Les étudiants relient une caractéristique des « surfaces d'onde » à l'intensité de l'onde

Le phénomène de propagation se traduit par le fait que le champ caractérisant l'onde dépend d'une fonction couplant l'espace et le temps : la phase de l'onde. Par exemple, dans le cas de la propagation tridirectionnelle d'une onde sinusoïdale émise par une source ponctuelle dans un milieu non dissipatif et non dispersif, la phase de l'onde est du type « $\omega t - kr$ ». Alors que cette phase ne dépend pas de la valeur du champ propagé, nous avons montré que, pour les étudiants, elle en dépend (Maurines, 1995). Ceci se manifeste notamment dans les réponses à une question demandant d'indiquer la méthode à utiliser pour déterminer expérimentalement une surface d'onde sonore, c'est à dire dans les situations étudiées une surface équiphasé. Pour 61% de 49 étudiants E_2 , une surface d'onde est soit une surface **isoamplitude** soit, à la fois, une surface isoamplitude et une surface équiphasé.

Dans la recherche que nous présentons ici, ce lien entre la surface d'onde et l'intensité de l'onde réapparaît sur 16% des dessins des 31 étudiants E_1 . L'écartement des cercles (figure 1 de l'encadré 2), le nombre ou la longueur des arcs de cercle (figures 2 et 3 de l'encadré 2) représentant les surfaces d'onde varient avec l'intensité sonore. Si les dessins fournis par les étudiants E_2 ne font pas apparaître ce lien, ce n'est pas le cas de certains commentaires : « **sont représentés les points de même amplitude, la distance entre deux cercles est constante et égale à la longueur d'onde λ** ».

4.3.2. Les étudiants ne représentent pas des surfaces d'onde mais des « rayons d'onde »

Les surfaces d'onde d'une onde se propageant dans un milieu homogène de dimension trois et issue d'une source ponctuelle sont des sphères (ou des portions de sphères) de rayon croissant et centrées sur le même point (la source). Parmi les étudiants E_1 et E_2 donnant des

ENCADRÉ 2

Lien entre l'intensité de l'onde et une caractéristique des arcs de cercles représentant des «surfaces d'onde» sonores



«La propagation du son s'explique par la propagation des ondes sonores qui, au fur et à mesure, s'étendent en s'affaiblissant.»

Figure 1 : Étudiant E₁

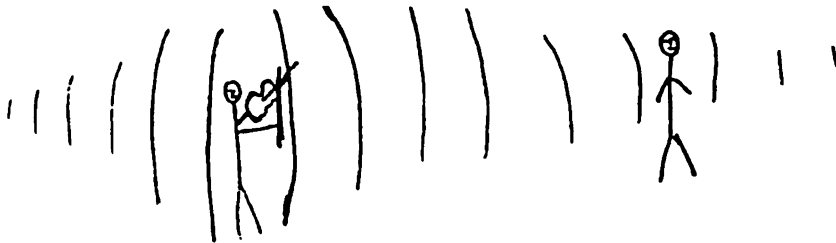
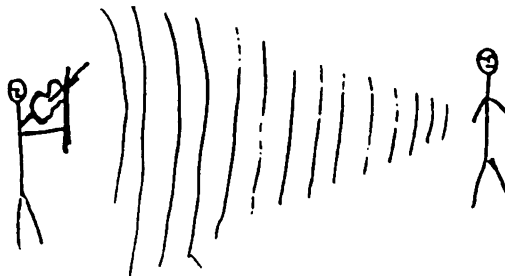


Figure 2 : Étudiant E₁

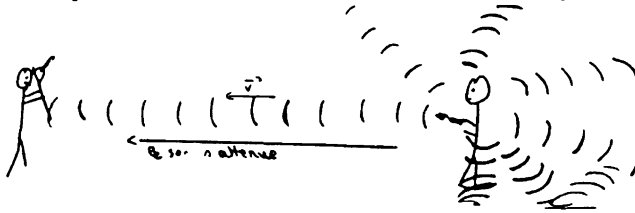


«Représentation des ondes sonores qui deviennent de plus en plus faibles suivant la distance qui sépare les deux protagonistes.»

Figure 3 : Étudiant E₁

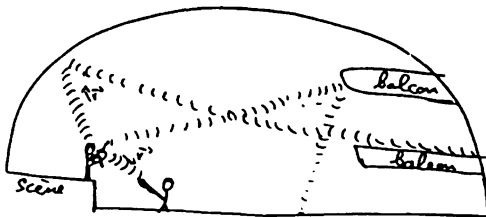
ENCADRÉ 3

Exemples de réponses d'étudiants dessinant des rayons d'onde sonores



« Le son entendu par le technicien n'est pas le même de part son intensité. En effet, étant en rase campagne, le son "s'éparpille" de tout côté. Le son arrivant 10m plus loin n'est donc pas aussi puissant. »

Figure 1 : Étudiant E₁



« Dans cette situation, le son que perçoit le technicien est beaucoup plus intense qu'en rase campagne du fait que les deux individus sont enfermés dans une pièce et que le son est renvoyé par les murs. »

Figure 2 : Étudiant E₁

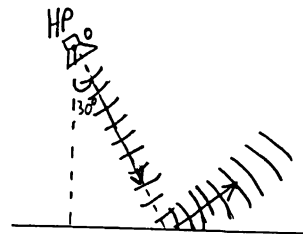
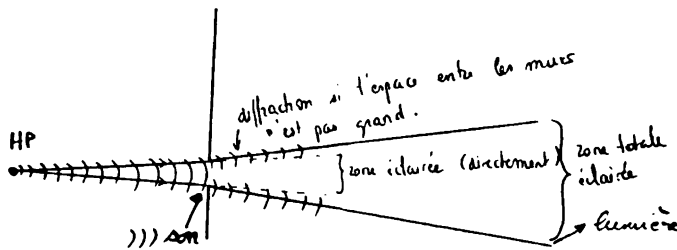


Figure 3 : Étudiant E₂



« Au passage entre les murs se produit le phénomène de diffraction (si l'espace entre les 2 est faible : 10m, c'est peut-être beaucoup !) La zone éclairée est donc plus grande que celle prévue par l'optique géométrique. Il y a aussi diffraction de l'onde sonore. »

Figure 4 : Étudiant E₂

« Le son se propage en toutes directions depuis le H.P. à la rencontre du mur. Le son se propagera à travers lui et rebondira sur lui. Entre les deux murs, il y a diffraction du son. La lumière, elle, est en partie renvoyée par le mur mais ne le traverse pas. Il y a là aussi à travers le mur diffraction. »

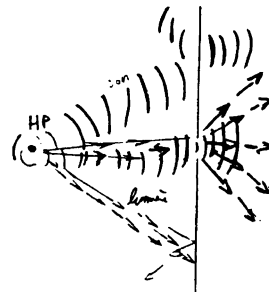


Figure 5 : Étudiant E₁

représentations du type « surfaces d'onde » pour la propagation du son, 18% dessinent en fait une succession d'arcs de cercle de même rayon. Les arcs de cercle ne sont pas centrés sur le même point, la source ; les points à même distance de la source ne sont pas nécessairement sur le même cercle (figure 1 de l'encadré 3). Nous avons appelé « **rayon d'onde** » ce type de représentation d'un phénomène ondulatoire car il amalgame les notions de rayon et de surface d'onde. Ces « rayons d'onde » ne correspondent pas à des rayons de propagation de la phase car tout se passe comme si les points à même distance de la source n'étaient pas liés par une relation de phase et étaient incohérents. La non dissociation de la phase et de l'intensité les rend proches de rayons de propagation de l'énergie.

Si le taux de représentations correctes de type « surface d'onde » dans la situation de propagation est élevé (82%), ce n'est pas le cas des situations de réflexion et de diffraction sonore. En effet, respectivement 68% et 55% des représentations de type « surfaces d'onde » correspondent à des représentations de type « rayons d'onde » (figures 2, 3, 4 et 5 de l'encadré 3).

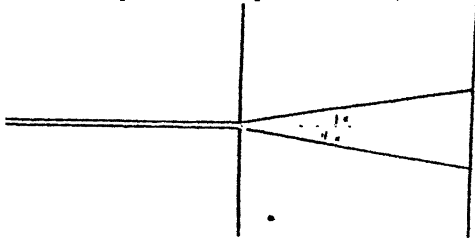
Les tendances qui viennent d'être décrites (ne pas dissocier la phase et l'intensité de l'onde, tracer des « rayons d'onde ») permettent aux étudiants de raisonner sur une grandeur directement mesurable, l'intensité, ainsi que de localiser et de suivre « quelque chose » dans son déplacement. Pouvant diminuer au cours de la propagation et se révélant par son intensité, ce « quelque chose » est représenté par des arcs de cercles dont une des caractéristiques peut changer (longueur, écartement, nombre). Ce faisant, les étudiants semblent raconter l'histoire d'objets fictifs se déplaçant le long de trajectoires-rayons énergétiquement indépendants les uns des autres. Alors que les premiers résultats pouvaient suggérer que le son est traité de manière très différente de la lumière, nous venons de voir, dans l'analyse détaillée des représentations graphiques de type « surfaces d'onde », qu'elles sont très proches de représentations de type « rayons ».

4.4. Les étudiants ne considèrent que des rayons énergétiquement indépendants

Si l'explication d'une situation géométrique peut se faire à un niveau macroscopique, celle d'une situation ondulatoire nécessite de se placer d'abord à un niveau « microscopique ». Nous allons voir que, dans une situation de diffraction du son ou de la lumière, les étudiants donnent une explication relevant en fait d'une théorie géométrique : ils restent à un niveau macroscopique et tout se passe comme si les rayons de propagation de l'énergie étaient indépendants derrière l'ouverture.

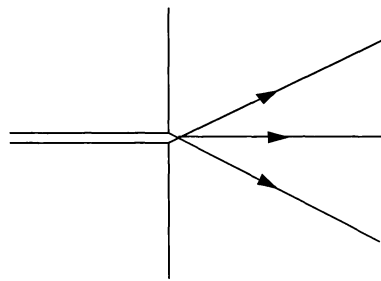
ENCADRÉ 4

Exemples de réponses d'étudiants sur la diffraction de la lumière



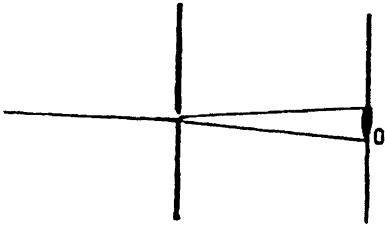
« À gauche de l'écran, la lumière se propage en ligne droite
 La partie centrale du faisceau passe comme si de rien n'était.
 Le reste est partiellement diffracté, c'est-à-dire qu'une partie
 du faisceau va subir un changement de trajectoire de part et
 d'autre du trou. »

Figure 1 : Étudiant E2



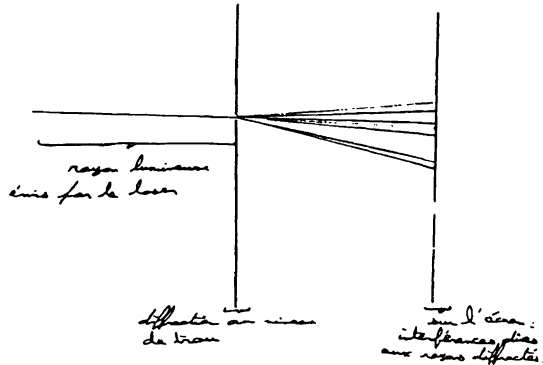
« Une partie du faisceau lumineux qui arrive à l'écran n'est
 pas dévié si ce faisceau n'entre pas en contact avec l'écran
 Les faisceaux arrivant à la limite sont déviés. »

Figure 2 : Étudiant E1



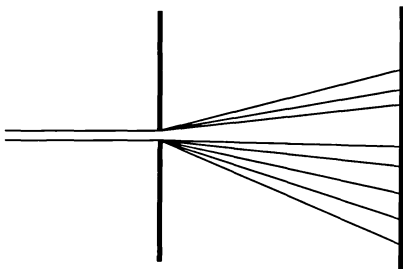
« En passant par un trou très fin, la lumière se disperse.
 Il y a réfraction et dispersion de la lumière. »

Figure 3 : Étudiant E1



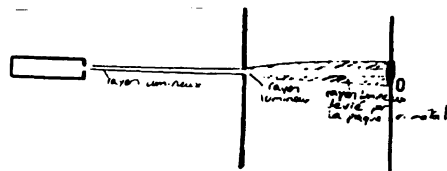
« La lumière est diffractée par le trou : le rayon **se divise** en
 une infinité de rayons ... Par rapport à l'écran, le trou est
 alors une source ponctuelle émettant une lumière mono-
 chromatique, la différence de marche est faible, la longueur
 d'onde est la même, entre deux rayons lumineux, il y a
interférences. »

Figure 4 : Étudiant E2



« La lumière issue du laser est diffractée par l'écran percé
 il y a interférences issues de l'écran. En fait c'est comme si
 l'ouverture était tapissée de multiples sources ponctuelles. »

Figure 5 : Étudiant E2



« Les particules du rayon lumineux qui ne rencontrent pas
 la plaque métallique ne sont pas déviées et se retrouvent sur
 l'écran avec la même épaisseur. Mais ceux qui rencontrent
 la plaque sont déviés, cela change leurs trajectoires. »

Figure 6 : Étudiant E1

4.4.1. Diffraction de la lumière

Un questionnaire portant sur la propagation d'un faisceau laser à travers une petite ouverture a été passé auprès de 113 étudiants E_1 et E_2 . Il a été rédigé sous deux formes : l'une correspond à celle décrite plus haut et concerne la prédiction de ce qui se passe, l'autre demande d'expliquer pourquoi il y a une tache et non un point sur l'écran d'observation. Dans les deux cas, une représentation graphique est demandée. Les réponses fournies par les étudiants étant similaires, les résultats ont été regroupés.

On rencontre majoritairement deux types de schémas de diffraction :

- **schémas de type D** (D pour déviation) (33% des 83 schémas de diffraction) : le faisceau incident est représenté par deux rayons s'appuyant sur les bords de l'ouverture diffractante et changeant de direction au passage de l'ouverture (figures 1 et 2 de l'encadré 4) ;

- **schémas de type d** (d pour division) : le faisceau incident est représenté par un rayon se divisant en deux rayons (sous-catégorie d_D apparaissant à 19%) ou plus (sous-catégorie d_S apparaissant à 40%) au passage de l'ouverture (figures 3 et 4 de l'encadré 4).

Aucun de ces schémas ne correspond à la reconstruction du niveau macroscopique à partir du niveau « microscopique ». En effet, sur le premier type de schémas l'accent est mis sur l'élargissement du faisceau incident ou sur la déviation des rayons lumineux au passage de l'ouverture et donc sur le niveau macroscopique. Il pourrait en être de même de beaucoup de schémas de la sous-catégorie d_D car ils peuvent être équivalents à ceux de la catégorie D avec un seul rayon incident au lieu de deux. Quant aux schémas de la sous-catégorie d_S , ils portent eux-aussi sur le niveau macroscopique car ils assimilent l'ouverture à une nouvelle source de lumière mais ne font apparaître qu'une seule source secondaire au niveau de l'ouverture au lieu d'une infinité de sources.

Il est à noter l'existence minoritaire d'un troisième type de schémas (type D+d). Combinaison des deux précédents, il semble indiquer que le phénomène de diffraction ne se produit que sur les **bords de l'ouverture** (figure 5 de l'encadré 4).

Alors que la description du phénomène de diffraction lumineuse par une ouverture prend en compte la déviation des rayons incidents au passage de l'ouverture et l'existence d'une modulation d'intensité de l'onde, les étudiants se focalisent sur le premier point : la présence de franges obscures et brillantes n'est mentionnée que par 41% des 66 étudiants qui ont eu à prédire ce qui se passe.

La plupart des **commentaires** fournis avec les schémas sont en fait des descriptions du phénomène. Portant sur le **niveau macroscopique**, ils mentionnent l'élargissement du faisceau lumineux ou la déviation des rayons. Des termes du langage courant sont utilisés (« *le faisceau s'élargit* », « *les rayons sont déviés* », « *se séparent* ») mais aussi des termes appartenant à la fois au registre quotidien et à celui de l'optique (*diffusion*, *dispersion*) ou bien encore des termes n'appartenant qu'à l'optique (*réflexion*, *réfraction*). Si 49% des 113 étudiants interrogés utilisent le terme « diffraction », il est à noter que 18% des 80 étudiants E_1 utilisent des termes d'optique mal à propos en parlant de réflexion, réfraction, diffusion, dispersion.

Si certains étudiants utilisent des **comparaisons** pour décrire et expliquer ce qui se passe, ces comparaisons rapprochent la situation de diffraction de **situations d'optique géométrique** où les rayons sont indépendants et non de situations d'interférence où les rayons ne sont pas indépendants. Ainsi l'élargissement du faisceau incident au passage de l'ouverture diffractante est comparé à celui produit par des dispositifs basés sur l'utilisation de lentilles (« *la lumière diffuse comme au cinéma* », « *cela agrandit le champ de vision* »).

Une explication du phénomène de diffraction, basée sur la décomposition de l'ouverture diffractante en une infinité de sources secondaires et sur la superposition cohérente des ondes émises, n'est donnée que par 2 étudiants sur les 83 qui donnent un schéma de diffraction. Le mot « source » apparaît sur 11% des 76 réponses commentées de diffraction (majoritairement, dans le sens d'une nouvelle et unique source de lumière et non dans celui de sources secondaires sur la surface d'onde incidente) et le mot « interférence » sur 3% d'entre elles. Les seules explications fournies par les étudiants portent en fait sur le niveau macroscopique et mettent l'accent sur les bords de l'ouverture de deux façons différentes (16% des commentaires). D'une part, l'utilisation de termes tels que *obstacle*, *heurter*, *contact*, et de schémas de type D+d pourrait indiquer que la déviation d'un rayon lumineux au passage de l'ouverture provient d'une action de **contact** des bords de l'ouverture avec les seuls rayons extérieurs - autrement dit d'une réflexion ou d'une diffusion (figure 2 de l'encadré 4). D'autre part, une différence de traitement entre la partie extérieure du faisceau lumineux et la partie intérieure (certains étudiants pensent que seuls les rayons extérieurs sont déviés) pose la question de savoir s'il n'y aurait pas une attraction des rayons extérieurs par les bords de l'ouverture (figure 1 de l'encadré 4).

4.4.2. Diffraction du son

Comme nous l'avons déjà signalé, 29% des étudiants E_1 et E_2 interrogés sur la diffraction sonore utilisent des surfaces d'onde. Sur 57%

de ce type de dessins, les surfaces d'onde sont en fait transformées en « rayons d'onde » ; 70% des « rayons d'onde » sont tracés pour l'onde diffractée uniquement (figure 4 de l'encadré 4) et 30% déjà pour l'onde incidente (figure 5 de l'encadré 4). On retrouve sur certains schémas l'apparition d'une liaison entre l'intensité de l'onde et la longueur des arcs de cercle. Les schémas de diffraction basés sur l'utilisation de rayons sont du même type que ceux fournis pour la lumière (type D : 24% des schémas de diffraction, type d : 13%, type D+d : 13%).

Les commentaires accompagnant les schémas sont quasiment toujours des descriptions de la déviation et de l'élargissement du faisceau sonore.

Le nombre élevé de réponses portant sur le niveau macroscopique pourrait être dû à la formulation de la question, celle-ci ne dissociant pas assez la description du phénomène de son explication. Les réponses obtenues au questionnaire sur la diffraction de la lumière ne dépendant pas de la formulation utilisée, tout laisse supposer que la tendance à rester au niveau macroscopique et à raconter l'histoire de « quelque chose » se déplaçant le long de rayons énergétiquement indépendants est une caractéristique du raisonnement commun.

5. DISCUSSION

5.1. Modèle du raisonnement des étudiants

Un nombre limité d'hypothèses peut être introduit pour rendre compte des résultats précédents. Le raisonnement commun sur la propagation des ondes en dimension trois a deux caractéristiques qui sont reliées : il tend à **réduire** la complexité des phénomènes et des théories, il est de type **géométrique et mécaniste**. En effet :

– d'une part les étudiants ne différencient pas clairement les concepts mis en jeu mais les amalgament ou les lient (il en est ainsi des concepts de phase et de champ, de surface d'onde et de surface isoamplitude, de rayon et de surface d'onde), d'autre part ils les utilisent de manière dissociée (surface d'onde pour le son et la théorie ondulatoire, rayon pour la lumière et la théorie géométrique) ;

– tout se passe comme si les étudiants racontaient l'histoire au niveau macroscopique d'objets fictifs qui se déplacent le long de trajectoires-rayons énergétiquement indépendants. Si pour eux, la situation présente un caractère ondulatoire marqué, la notion de surface d'onde est favorisée au détriment de celle de rayon. L'histoire est alors racontée à l'aide de « rayons

d'onde », ceux-ci leur permettant à la fois de dessiner et de suivre les objets dans leur déplacement. Si la situation ne présente pas de caractère ondulatoire marqué, l'histoire est racontée à l'aide de rayons. Dans une situation de diffraction, l'onde du niveau macroscopique n'est pas reconstruite à partir d'un niveau « microscopique » fictif ; tout se passe comme si les rayons de propagation de l'énergie de l'onde incidente étaient réfléchis ou réfractés par les bords de l'ouverture et restaient indépendants derrière l'ouverture.

Le raisonnement des étudiants n'est donc ni un raisonnement en termes de champ et de phase, ni un raisonnement basé sur le principe de superposition et les sources de Huygens. Les concepts de champ et de phase n'étant pas dissociés, les étudiants semblent raisonner sur les « objets » des théories géométriques (la « lumière », le « son »). Il existe cependant une différence essentielle entre les « objets » que l'on peut introduire pour rendre compte du raisonnement des étudiants et ceux des théories géométriques. Tout se passe comme si les « objets » sur lesquels s'appuie le raisonnement des étudiants possédaient « quelque chose » leur permettant d'avancer, d'avoir une intensité, une « forme »... Ce « quelque chose » peut varier lors de la propagation, ce qui se manifeste par un changement d'intensité ou/et de « forme » de l'onde et ce qui entraîne la variation simultanée d'une ou plusieurs autres caractéristiques de l'onde. Ainsi nous avons vu que, pour les étudiants, une diminution d'intensité de l'onde au cours de la propagation se traduit par une modification de la forme des arcs de cercle représentant les surfaces d'onde. D'autres questions révèlent que lors de la diffraction d'une onde au passage d'une « petite » ouverture, donc lors d'un changement de « forme » de l'onde incidente, au moins une des trois grandeurs, vitesse de propagation, longueur d'onde, fréquence est changée (Maurines, 1997). Pour rendre compte du raisonnement des étudiants, une seule notion suffit. Cette notion est un concept hybride, amalgamant nombre des concepts susceptibles d'intervenir dans une situation donnée (la phase, l'intensité, la surface d'onde, la vitesse de propagation, la fréquence, etc.) et entraînant la variation simultanée de plusieurs grandeurs physiques. Elle a été appelée « capital », pour reprendre un terme introduit par Viennot (1979) et utilisé dans nos recherches antérieures sur la propagation des signaux selon une direction.

Cette tendance à une analyse géométrico-mécaniste et réductrice des phénomènes s'accompagne d'une tendance à **matérialiser** les concepts, c'est-à-dire à les appréhender au travers d'aspects immédiats et perceptifs des phénomènes ou en référence à l'idée d'objet matériel. En effet :

– le concept de phase n'est pas distingué par les étudiants de celui d'amplitude ou d'intensité de l'onde. Ils raisonnent ainsi, non pas sur une fonction de deux variables, la phase, mais sur des grandeurs directement accessibles à l'observateur, l'amplitude dans le cas du son et l'intensité dans le cas de la lumière ;

– le concept de rayon est assimilé à celui de trajectoire de particules. Cette tendance apparaît dans certaines justifications fournies par les étudiants à propos de la lumière (figure 6 de l'encadré 4) et explique sans doute que des étudiants tendent à considérer que « *l'optique **géométrique** ne tient compte que de l'aspect **corpusculaire** de la lumière et non de l'aspect ondulatoire* » (réponse donnée par 4 étudiants E_2 sur 16 à une question demandant pourquoi l'optique géométrique ne permet pas d'interpréter l'existence de franges d'interférence dans l'expérience des fentes d'Young).

Certaines des difficultés et erreurs que nous avons dégagées rejoignent les observations faites dans d'autres études. Une tendance vers une utilisation confuse du vocabulaire d'optique a été décelée par Lefèvre (1988) et Palacios et al (1989), respectivement chez des étudiants français et des professeurs espagnols. Ces deux études ainsi que celle de Kaminsky (1989) signalent une tendance vers une matérialisation de la lumière. Des tendances vers une compréhension mécaniste des phénomènes sonores ont été notées chez de futurs enseignants au Canada et en Afrique du sud (Linder & Erickson, 1989). La tendance à confondre réalité et modèle, remarquée chez des futurs enseignants en Afrique du Sud (Smit & Finegold, 1995), rejoint la tendance à matérialiser les concepts.

Les tendances vers un raisonnement réducteur en terme d'objet dégagées lors de cette étude se rencontrent également auprès d'élèves interrogés sur la diffraction et n'ayant pas reçu d'enseignement sur les ondes (Maurines, 1997). Elles sont identiques à celles mises en évidence dans nos recherches sur la propagation des signaux selon une direction. Elles sont certainement le propre du raisonnement commun comme le montrent d'autres études en électricité (Closset, 1983), mécanique (Viennot, 1979, 1996 ; Saltiel & Malgrange, 1980), optique géométrique (Fawaz & Viennot, 1986 ; Galili, 1996), thermodynamique (Rozier & Viennot, 1991).

5.2. Quelques remarques sur les programmes et manuels scolaires, sur les ouvrages de vulgarisation

À ce stade de l'étude, la question se pose de savoir quelle peut être l'influence de l'enseignement sur le raisonnement des étudiants. Nous n'entrerons pas ici dans une analyse exhaustive des programmes et des manuels, notre but étant simplement de souligner quelques points.

ENCADRÉ 5

Quelques dessins extraits de livres scolaires ou de vulgarisation

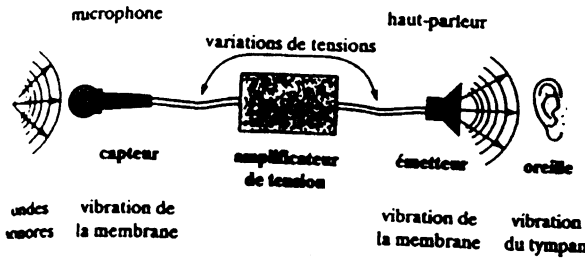


Figure 1 : Physique-Chimie, seconde. Hachette, 1993, p. 133

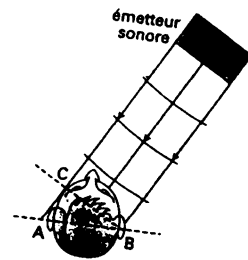


Figure 2 : Physique-Chimie, seconde. Hatier, 1993, p. 127

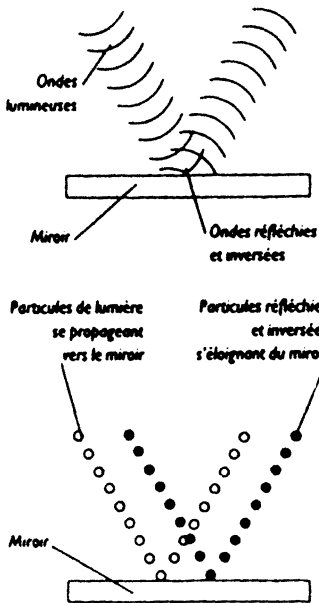
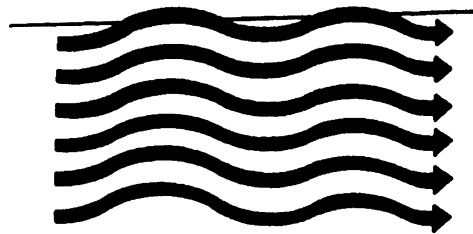


Figure 3 : Passion des sciences «La lumière». Gallimard, p. 35



Ondes lumineuses du laser
Figure 4 : Gamma jeunesse «Plein feux sur la lumière». Héritage, p. 27

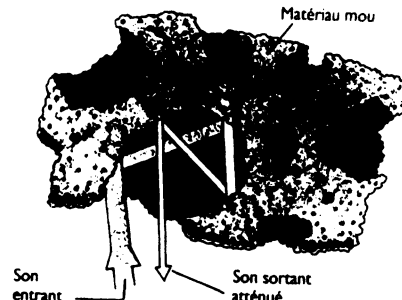


Figure 6 : Gamma jeunesse «Plein feux sur le son». Héritage, p. 19

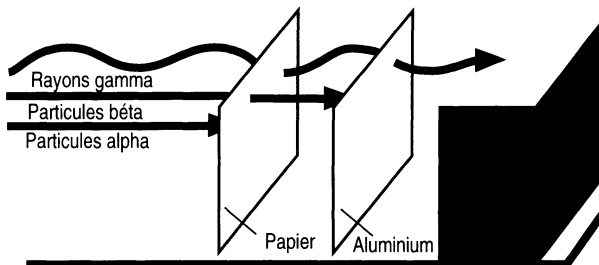


Figure 5 : Encyclopédie des jeunes «Le monde de l'atome». Artoria, p. 30

Il est tout d'abord à noter que les représentations graphiques des phénomènes sonores précédemment citées ont été obtenues auprès d'élèves et étudiants ayant suivi un enseignement dans lequel le concept de surface d'onde apparaissait. Nous avons voulu tester l'impact du changement de programme dans l'enseignement secondaire en faisant repasser un questionnaire sur la propagation du son à des élèves ayant suivi le nouveau programme de seconde. On obtient dans ce cas majoritairement des représentations de type « rayon » (50%, N=28) alors qu'auparavant on obtenait majoritairement des représentations de type « surfaces d'onde » (71%, N=31). Il est vraisemblable, vu la nature du changement de programme, que celui-ci a eu un effet sur le type de représentations graphiques utilisées et non sur le type de raisonnement mis en oeuvre.

On peut se demander ensuite pourquoi, après un enseignement universitaire ou secondaire type « ancien programme », il y a une telle prédominance des représentations de type surface d'onde pour le son et de type rayon pour la lumière. Une analyse du programme de première scientifique daté de 1988 et des manuels d'enseignement montre une tendance à introduire des concepts en s'appuyant sur des expériences permettant de les visualiser par **matérialisation**. Ainsi, en ce qui concerne le concept de surface d'onde, le programme recommande l'utilisation de la cuve à eau, qui permet, dit-il, de « **montrer** » des rides circulaires et rectilignes. En ce qui concerne le rayon, des recherches en optique géométrique (Kaminski, 1989) ont montré qu'il était largement fait appel à des pinces lumineuses visualisées par « diffusion ».

Une tendance à considérer que le concept de rayon n'est pas utilisable dans la situation de diffraction se manifeste dans les programmes du secondaire. En effet, les expériences dans lesquelles on fait tendre la section des pinces lumineuses vers zéro, ne sont pas interprétées, en disant que la loi de la propagation rectiligne de l'optique géométrique est mise en défaut, mais en disant que « *le concept de rayon lumineux apparaît comme une **approximation limite** qui revient à négliger le phénomène de **diffraction*** » (programme 1995 de terminale S). Pourtant, ce n'est pas parce qu'on ne peut pas isoler expérimentalement un rayon, qu'on ne peut pas utiliser le concept de rayon dans une situation ondulatoire (Dettwiller, 1990). De cette tendance à considérer que le concept de rayon n'est utilisable que dans des situations géométriques résulte sans doute la réticence qui se décèle dans les commentaires du programme de seconde à utiliser le concept de rayon dans le cas de sons audibles. En effet, le terme rayon y est utilisé une seule fois, et ce à propos de la réflexion des ultrasons : « *lors des expériences avec les ultrasons on est dans des conditions où l'on peut parler de rayons sonores, ce qui est beaucoup **moins approprié** à la physique des sons audibles (à cause de la **diffraction**)* ».

Pourtant, ce n'est pas parce que l'acoustique géométrique donne de meilleurs résultats pour des ondes de fréquence élevée, qu'on ne peut pas l'appliquer à des ondes de fréquence plus petite. C'est un modèle largement utilisé pour la propagation atmosphérique ou sous-marine du son (Frank et al., 1974 ; Pierce, 1981 ; Rossi, 1986). Il est également utilisé dans le domaine technique et architectural car d'utilisation facile (Raes, 1964 ; Viví & Cassan, 1990), mais comme tout modèle, il a des limites et celui-ci ne permet pas une étude fine des phénomènes.

Vu les résultats obtenus lors des enquêtes, on peut conclure qu'introduire les concepts par visualisation et considérer le rayon comme un « **rayon géométrique expérimental** » conduit les étudiants à penser que le concept de rayon est réservé à la lumière et à la théorie géométrique, que le concept de surface d'onde est réservé au son et à la théorie ondulatoire.

En ce qui concerne la diffraction, on note que tous les programmes du secondaire en donnent un commentaire minimum. La plupart tend à faire penser que le concept de rayon n'a plus de sens et aucun ne demande d'expliquer le phénomène de diffraction en considérant la superposition d'une infinité d'ondes émises par des sources fictives : le principe de superposition et les interférences sont présentés après la diffraction et il n'y a pas de retour en arrière. On ne peut s'étonner dans ces conditions que les étudiants ayant reçu un enseignement sur les ondes de niveau secondaire expliquent la diffraction comme si c'était une situation géométrique. Mais que dire alors de ceux ayant reçu un enseignement universitaire sur les ondes ?

Après ces quelques remarques sur les programmes du secondaire, passons aux manuels.

En ce qui concerne le rayon sonore, certains livres de seconde donnent les lois de la réflexion avant d'avoir défini ce qu'est un rayon sonore et quand ils le font, assimilent rayon sonore et son. On peut ainsi lire : « *un émetteur ponctuel d'onde sonore émet des rayons sonores qui se propagent en ligne droite dans toutes les directions* ». En comparant cette définition avec celle donnée plus loin à propos du rayon lumineux (« *on appelle rayon lumineux le **trajet** suivi par la lumière pour aller d'un point à un autre* »), on peut se demander si ce manque de rigueur dans la méthode et la définition ne traduit pas une gêne à utiliser le concept de rayon dans le cas du son (Tomasino & Pénigaud, 1993, p. 174 et p. 195).

Bien que le programme de seconde 1993 ne porte pas sur le concept de surface d'onde, beaucoup de manuels de cette classe utilisent des représentations graphiques qui en découlent sans expliquer de quoi il s'agit. Il est à noter que ces surfaces d'onde ne sont tracées que pour le son

et pas pour la lumière. Certains dessins font apparaître les mêmes erreurs que celles commises par les étudiants : on observe un lien entre l'intensité de l'onde et l'écartement des arcs de cercle sur la figure 1 de l'encadré 5 et un rayon d'onde sur la figure 2 de cet encadré.

La tendance à matérialiser les rayons ne peut être renforcée par l'analyse de l'optique géométrique faite par certains manuels de l'enseignement supérieur. Que reste-t-il dans l'esprit des étudiants de premier cycle universitaire lorsqu'ils ont lu « *la lumière se propage comme le ferait un ensemble de **particules matérielles** (qu'on assimile bien entendu, aux photons) dans un champ de force. En particulier, dans un milieu homogène, elle se propage en ligne droite comme des particules dans un champ nul. Cette **approximation** constitue l'optique géométrique. Les **trajectoires des particules** sont alors les rayons lumineux* » (Suardet, 1967, p. 13). Même s'il est exact que formellement l'optique géométrique est à rapprocher de la mécanique variationnelle (Born & Wolf, 1980 ; Landau & Lifchitz, 1970) l'approximation de l'optique géométrique n'a rien à voir avec la nature corpusculaire de la lumière et la propagation rectiligne mais avec l'ordre de grandeur de la longueur d'onde devant les dimensions mises en jeu dans les situations étudiées.

La tendance à considérer qu'en optique géométrique, seul le concept de rayon est utilisable ne peut être remise en question par l'absence dans beaucoup de livres universitaires français de schémas mettant en évidence la modification des surfaces d'onde lors de la réflexion et de la réfraction de la lumière, ou de la formation des images. Il est vraisemblable que l'impact visuel de tels schémas (Hecht, 1987) devrait permettre aux étudiants de comprendre que la théorie géométrique peut recevoir une interprétation ondulatoire.

La tendance à considérer qu'en optique ondulatoire, le concept de rayon n'est pas utilisable ne peut être remise en question par le fait que quasiment aucun livre universitaire ne s'intéresse aux rayons de propagation de l'énergie dans la situation de diffraction. Un livre parmi ceux consultés se distingue sur ce point (Dettwiller, 1990).

Terminons par quelques remarques sur les représentations graphiques rencontrées dans les livres de vulgarisation (encadré 5). La plupart de ces livres utilisent des représentations différentes pour la propagation de la lumière et du son, rayon pour la première et surface d'onde ou parfois sinusoïde pour la deuxième. Lorsqu'il s'agit de mettre l'accent sur le caractère ondulatoire de la lumière, on retrouve en ce qui la concerne des « rayons d'onde » (figure 3 de l'encadré 5) et des sinusoides (figures 4 et 5 de l'encadré 5). Il est à noter par ailleurs qu'on rencontre des schémas sur lesquels le déplacement du son est représenté par une flèche

dont l'épaisseur diminue avec l'intensité (figure 6 de l'encadré 5). Comme avec le « rayon d'onde », ce type de représentation permet de raconter l'histoire d'un objet en déplacement. Il ne peut favoriser une dissociation entre le concept de direction de propagation de l'énergie et celui d'intensité de l'onde.

5.3. Propositions pédagogiques

L'enseignement actuel des phénomènes ondulatoires ne favorise pas une remise en cause du raisonnement commun. Il n'est pas question ici de proposer un enseignement type mais de dégager quelques pistes de réflexion pouvant conduire à une définition précise d'objectifs d'enseignement tant au niveau de l'enseignement secondaire que de celui du supérieur.

Il va sans dire qu'il y a tout un travail à faire auprès des étudiants pour qu'un des concepts-clés de la théorie ondulatoire, la phase, soit maîtrisé. Des questions telles celles élaborées dans nos recherches antérieures (Maurines, 1995) peuvent être utilisées pour amener les étudiants à dématérialiser ce concept.

Décrire et représenter graphiquement au niveau macroscopique, une même situation, qu'elle soit sonore ou lumineuse, à l'aide de rayons et de surfaces d'onde devrait permettre aux étudiants de comprendre que ces deux concepts peuvent être utilisés pour modéliser tout phénomène ondulatoire propagatif.

Modéliser une même situation géométrique, aussi bien au niveau macroscopique qu'au niveau « microscopique », devrait permettre aux étudiants de comprendre que la théorie ondulatoire n'est pas réservée aux seules situations ondulatoires et que si elle n'est pas utilisée dans les situations géométriques, c'est pour des raisons de rapidité. De même, utiliser les deux types de modélisations pour une même situation géométrico-ondulatoire devrait aider les étudiants à saisir que le choix de l'une ou l'autre des modélisations dépend du degré de précision souhaité. Par ailleurs, tout ceci devrait permettre aux étudiants de comprendre que la modélisation de la théorie géométrique consiste en une description de l'onde du niveau macroscopique alors que celle de la théorie ondulatoire consiste en sa reconstruction à partir d'un niveau « microscopique » fictif.

Soulignons, pour terminer, l'intérêt d'une méthode déjà proposée en conclusion de la recherche sur la propagation des signaux mécaniques visibles (Maurines, 1986) : la comparaison, par ressemblances et différences, de phénomènes de nature différente. On pourrait ainsi proposer aux étudiants de comparer le comportement d'un flux de particules et celui d'une onde dans diverses situations (passage à travers un trou, d'un milieu à un autre etc), le comportement d'une ouverture diffractante et celui d'une

lentille divergente. Ceci devrait leur permettre de mieux cerner les caractéristiques de chacun de ces phénomènes.

6. CONCLUSION

Le modèle de raisonnement commun proposé lors de cette étude permet de donner sens et cohérence aux réponses des étudiants. Si, de par sa nature mécaniste et réductrice, il rejoint le modèle proposé pour la propagation d'un signal à une dimension et ceux avancés pour d'autres domaines de la physique, il est, de par sa nature géométrique, spécifique à la propagation des ondes en dimension trois. L'enseignement actuel des ondes peut contribuer à renforcer ces tendances du raisonnement commun.

Si l'analyse du domaine conceptuel et la caractérisation du raisonnement commun à propos des ondes en dimension trois nous ont conduits à faire quelques propositions pédagogiques, il reste encore beaucoup à faire sur ce point. Le modèle de raisonnement que nous venons de présenter a été mis à l'épreuve. Sa nature mécaniste a été testée plus avant dans la recherche sur la diffraction à travers une « petite » ouverture (Maurines, 1997). Sa nature géométrique a été testée par Maurines (à paraître) lors d'une étude portant sur des situations de formation d'image nécessitant l'utilisation du principe de Huygens-Fresnel (éclairage cohérent en présence ou non de diffraction).

BIBLIOGRAPHIE

- ARDLEY N. (1990). *Le monde de l'atome*. Bruxelles, Artis-Artoria.
- BACHELARD G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin.
- BORN M. & WOLF E. (1980). *Principles of optics*. New York, Pergamon Press.
- BURNIE D. (1993). *La lumière*. Paris, Gallimard.
- CLOSSET J.-L. (1983). *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*. Thèse de troisième cycle, Université Paris 7.
- DETTWILLER L. (1990). *Qu'est-ce que l'optique géométrique ? fondements et applications*. Paris, Bordas.
- DURANDEAU J.-P., DURUPHTY A., BRAMAND P., DURUPHTY O., FAYE P., GIACINO M., JAUBERT A., MARTEGOUTES R., SAHUN R. & THOMASSIER G. (1993). *Physique Chimie Seconde*. Paris, Hachette.
- FAWAZ A. & VIENNOT L. Image optique et vision. *BUP*, n° 686, pp. 1125-1146.
- FRANK P.G., BERGMANN P.G. & YASPAN A. (1974). Ray Acoustics. In R.B. Lindsay (Éd.), *Physical Acoustics*. Stroudsburg, Dowden, Hutchinson and Ross Inc., pp. 32-56.
- GALILI I. (1996). Students' conceptual change in geometrical optics. *International Journal of Science Education*, vol. 18, n° 7, pp. 847-868.

- GENTRIC R., DAHRINGER F., ÉTIENNE M., LE HETET-GUIHEUX G., MARIGNY F. & POUILLAIN L. (1993). *Physique Chimie Seconde*. Paris, Hatier.
- HECHT E. (1987). *Optics*. New York, Addison Wesley.
- KAMINSKI W. (1989). Conceptions des enfants et des autres sur la lumière. *BUP*, n° 716, pp. 973-996.
- LANDAU L. & LIFCHITZ E. (1970). *Théorie des champs*. Moscou, Mir.
- LEFÈVRE R. (1988). *Contribution à l'étude des conceptions des étudiants de l'université sur le thème de l'optique*. Thèse, Université Paris 7.
- LINDER C. & ERICKSON G. (1989). A study of tertiary physics students' conceptualizations of sound. *International Journal of Science Education*, vol. 11, special issue, pp. 491-501.
- MAURINES L. (1986). *Premières notions sur la propagation des signaux mécaniques : analyse des difficultés des étudiants*. Thèse, Université Paris 7.
- MAURINES L. (1992). Spontaneous reasoning on the propagation of visible mechanical signals. *International Journal of Science Education*, vol. 14, n° 3, pp. 279-293.
- MAURINES L. (1993). Mécanique spontanée du son. In Actes du deuxième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques, IUFM de Montpellier. *Trema* n° 3-4, pp. 77-91.
- MAURINES L. (1995). Les étudiants et la phase d'une onde progressive : résultats d'une enquête exploratoire. In G. Mary & W. Kaminski (Éds), *Actes du cinquième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques*. Reims, Université de Reims-Champagne-Ardenne et IUFM de Reims, pp. 107-123.
- MAURINES L. (à paraître). Students and the wave geometrical model of the wave propagation in a three dimensional medium. In *Proceedings of the first international conference of the European Science Education Research Association*.
- MAURINES L. (1997). Raisonnement spontané sur la diffraction. In J. Gréa (Éd.), *Actes du sixième séminaire national de recherche en didactique de la physique, de la chimie et de la technologie*. Lyon, Université Lyon 1, pp. 77-95.
- MAURINES L. (à paraître). Les étudiants et les situations ondulatoires de formation des images. In *Actes des premières rencontres scientifiques de l'Association pour la Recherche en Didactique des Sciences et Techniques*.
- MAURINES L. (à paraître). Les étudiants, la diffraction et la formation des images en éclairage cohérent, *Didaskalia*.
- PALACIOS F., CAZORLA F. & 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.
- PIAGET J. & INHELDER B. (1941). *Le développement des quantités physiques chez l'enfant*. Neuchâtel, Delachaux-Niestlé.
- PIERCE A.D. (1981). *Acoustics, an introduction to its principles and applications*. New York, Mac Graw Hill.
- RAES A.C. (1964). *Isolation sonore et acoustique architecturale*. Paris, Chiron.
- ROSSI M. (1986). *Electroacoustique*. Paris, Dunod.
- ROZIER S. & VIENNOT L. (1991). Students' reasoning in thermodynamics. *International Journal of Science Education*, vol. 13, n° 2, pp. 159-170.
- SALTIEL E. & MALGRANGE J.-L. (1980). Les raisonnements naturels en cinématique élémentaire. *BUP*, n° 616, pp. 1325-1355.
- SMIT J.J.A. & FINEGOLD M. (1995). Models in physics : perceptions held by final-year prospective physical science teachers studying at South African universities. *International Journal of Science Education*, vol. 17, n° 5, pp. 621-634.

- SUARDET R. (1967). *Optique*. Paris, Baillière.
- TAYLOR B. (1993). *La lumière*. Paris, Gamma jeunesse, Héritage.
- TAYLOR B. (1993). *Le son*. Paris, Gamma jeunesse, Héritage.
- TOMASINO A. & PENIGAUD A. (1993). *Physique, classe de seconde*. Paris, Nathan.
- VIENNOT L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Paris, Hermann.
- VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en physique*. Paris, De Boeck.
- VIVIÉ E. & CASSAN M. (1990). Acoustique architecturale. In *Le livre des techniques du son, vol. 1*. Paris, Eyrolle, pp. 71-154.

ANNEXE 1

Situations et théories utilisées*

types de situations	ondulatoires	géométrico-ondulatoires	géométriques
	<i>variation dans l'espace de l'amplitude des champs non négligeable</i>	<i>variation dans l'espace de l'amplitude des champs non négligeable</i>	<i>variation dans l'espace de l'amplitude des champs négligeable</i>
exemples de situations	<p>propagation en champ proche</p> <p>diffraction et diffusion en champ proche ou lointain avec obstacles interfaces ouvertures « petits »</p> <p>propagation dans métaux, milieux anisotropes</p> <p>cavités dont au moins une des dimensions est « petite » (guide d'onde, onde stationnaire)</p>	<p>diffraction en champ lointain avec obstacles interfaces de « grandes » dimensions ouvertures « pas assez grandes » surfaces « lisses »</p> <p>interférence en champ lointain</p>	<p>propagation, réflexion réfraction en champ lointain avec obstacles interfaces cavités ouvertures de « grandes » dimensions surfaces « lisses »</p> <p>superposition d'ondes indépendantes</p>
théories utilisées pour leur étude*	ondulatoire «exacte»	ondulatoire «approchée» modèle géométrico-ondulatoire	géométrique
qu'est ce qui se propage ?	une perturbation <i>modification de deux champs</i>	une perturbation <i>modification d'un champ scalaire</i>	non précisé <i>«lumière» «son»</i>

équation fondamentale	équation de propagation	principe de Huygens-Fresnel	eikonale
concepts et principes fondateurs	champ et phase principe de superposition des amplitudes	champ et phase principe de superposition des amplitudes sources de Huygens	« chemin » principe de superposition des intensités

* Les différentes théories étant emboîtées, il est possible d'utiliser (mais beaucoup plus long !) la théorie ondulatoire « exacte » pour étudier une situation géométrique ou géométrico-ondulatoire, la théorie ondulatoire « approchée » pour étudier une situation géométrique.

ANNEXE 2

Principales caractéristiques de l'onde de différentes situations géométriques et géométrico-ondulatoires.

Une source (milieux homogènes) :

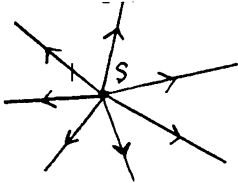

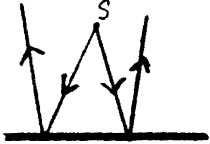

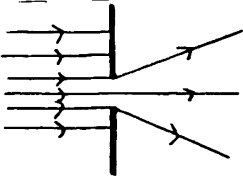

<i>situations</i>	<i>niveau macroscopique</i>	<i>niveau «microscopique»</i>	<i>modèles utilisés pour obtenir l'intensité de l'onde</i>
<p>géométriques</p> <p>propagation</p> <p>réflexion</p> <p>réfraction</p>	<p>intensité I de l'onde non modulée</p> <p>rayons d'énergie rectilignes et indépendants</p>	<p>sources fictives de Huygens cohérentes</p> <p>les rayons des ondes émises par les sources fictives de Huygens sont liés et ne sont pas trajet d'énergie</p>	<p>photo et acoustométrie</p> <p>(conservation du flux énergétique)</p>
<p>géométrico-ondulatoires</p> <p>diffraction par une ouverture ou par un bord</p> <p>voisinage des caustiques</p> <p>formation des images optiques en éclairage cohérent avec diffraction</p>	<p>intensité I de l'onde modulée</p> <p>rayons d'énergie non rectilignes et inter-dépendants</p>		<p>principe de Huygens-Fresnel</p> <p>(amplitude = somme des amplitudes des ondes émises par les sources fictives de Huygens)</p>

Deux sources (milieux homogènes) :

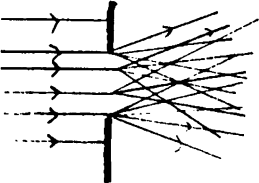
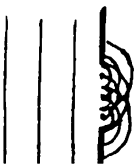
<i>situations</i>	<i>niveau macroscopique</i>	<i>niveau « microscopique »</i>	<i>modèles utilisés pour obtenir l'intensité de l'onde</i>
<p>géométriques</p> <p>superposition de deux ondes indépendantes</p> <p>formation des images optiques en éclairage incohérent et sans diffraction</p>	<p>intensité I non modulée</p> <p>rayons d'énergie des deux ondes rectilignes et indépendants</p> <p>onde résultante totalement incohérente</p>	<p>deux sources réelles incohérentes</p> <p>les rayons des ondes émises par les deux sources sont toujours trajets d'énergie et ne sont pas liés</p>	<p>photo et acoustométrie</p> <p>(intensité I de l'onde résultante = somme des intensités des deux ondes indépendantes)</p>
<p>géométrico-ondulatoires</p> <p>interférence</p>	<p>intensité I modulée</p> <p>rayons d'énergie de l'onde résultante non rectilignes et inter-dépendants</p> <p>onde résultante totalement cohérente</p>	<p>deux sources réelles cohérentes</p> <p>les rayons des ondes émises par les deux sources ne sont plus trajet d'énergie et sont liés</p>	<p>principe de superposition des amplitudes</p> <p>(amplitude Ψ de l'onde résultante = somme des amplitudes des 2 ondes)</p>

ANNEXE 3

Représentations graphiques d'une onde au niveau macroscopique dans le modèle géométrico-ondulatoire

	rayons (d'énergie)	surfaces d'onde
propagation		
réflexion		
diffraction		

Représentations graphiques de la situation de diffraction au niveau microscopique

	rayons des ondes fictives de Huygens	surfaces d'onde des ondes fictives de Huygens
diffraction		

ANNEXE 4

Les étudiants représentent de manière différente les phénomènes lumineux et sonores.

Situation de propagation en milieu illimité :

– un violoniste jouant un « la » et un auditeur situé à 10 mètres de lui, en pleine campagne (population E_1) ;

– une source ponctuelle (lumineuse ou sonore) émettant avec la même intensité dans toutes les directions, dans l'air supposé à température uniforme et sans vent (population E_2).

	rayon	surface d'onde	sinusoïde
lumière $E_2, N=54$	50 %	37 %	2 %
son $E_1 + E_2, N=84$ (31+53)	10 %	68 %	15 %

Tableau 1 : Pourcentage des différents types de représentations graphiques dans une situation de propagation

Situation de réflexion :

– un violoniste jouant un « la » et un auditeur situé à 10 mètres de lui, dans une salle de concert (population E_1) ;

– une source supposée ponctuelle (respectivement lampe de bureau ou haut-parleur alimenté par un générateur délivrant une tension sinusoïdale de 10000 Hz) émettant face à un plan ou à un miroir (population E_2).

	rayon	surface d'onde	sinusoïde
lumière $E_2, N=33$	82 %	6 %	0 %
son $E_1 + E_2, N=83$ (31+52)	36 %	45 %	0 %

Tableau 2 : Pourcentages des différents types de représentations graphiques dans une situation de réflexion

Situation de diffraction par une ouverture :

– pour la lumière : un laser, un écran percé d'un petit trou, un écran d'observation (populations E_1 et E_2) ;

– pour le son : un haut parleur émettant le « la » le plus grave du piano accroché à un lampadaire allumé, situés en face de deux murs séparés de 10 mètres (populations E_1 et E_2).

	rayon	surface d'onde	sinusoïde
lumière $E_1 + E_2$, $N = 113$ (80+33)	85 %	0 %	0 %
son $E_1 + E_2$, $N = 79$ (29+50)	42 %	29 %	2 %

Tableau 3 : Pourcentages des différents types de représentations graphiques dans une situation de diffraction