

Analyse des difficultés des étudiants à propos des concepts de phase et de surface d'onde, du principe de Huygens

Analysis of students' difficulties on the concepts of phase and wave surface, on Huygens' principle

Laurence MAURINES

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

Résumé

La première partie de cet article porte sur des situations de propagation selon une direction et le concept de phase d'une onde. La deuxième concerne des situations de propagation selon plusieurs directions, de réflexion et transmission, de superposition d'ondes sphériques cohérentes et le concept de surface d'onde. Les grandeurs physiques auxquelles les étudiants relient ces deux concepts et les méthodes utilisées pour tracer une surface d'onde sont dégagées et analysées. Des tendances de raisonnement déjà mises en évidence dans nos précédentes recherches se manifestent : considérer l'onde comme un objet matériel, réduire le nombre de concepts et les matérialiser. Quelques remarques sur des manuels d'enseignement et quelques propositions pédagogiques sont faites.

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

Abstract

First, this paper focuses on situations of propagation along one direction and on the concept of wave phase. Second, it deals with situations of propagation along several directions (propagation in an inhomogeneous medium, from an extended source, reflection and transmission, superposition of coherent spherical waves) and on the concept of wave surface. The physical quantities to which the students linked these two concepts and the methods they used in order to draw a wave surface are put forward and analysed. The same trends towards a mechanistic reasoning and towards a reduction and materialization of concepts as those previously pointed out are encountered. Some school text-books have been analysed and some pedagogical implications are discussed.

Key words : *common reasoning, university, wave phase, wave surface, Huygens' principle.*

1. INTRODUCTION

Nous menons depuis plusieurs années des recherches sur les difficultés soulevées par l'étude des phénomènes ondulatoires car il s'agit d'un domaine moins exploré que d'autres sur le plan de la didactique et connu des enseignants comme difficile à enseigner. 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. Nous espérons par là favoriser une réflexion sur les objectifs pédagogiques à poursuivre et sur les méthodes à utiliser pour les atteindre.

Cette étude fait partie d'une recherche portant sur les difficultés soulevées par le modèle géométrico-ondulatoire de la propagation d'une onde dans un milieu de dimension trois, en présence ou non d'obstacles. Dans ce modèle, une onde est décrite au niveau macroscopique à l'aide de rayons et de surfaces d'onde et est reconstruite à l'aide d'ondes élémentaires sphériques (principe de Huygens-Fresnel). Après avoir analysé comment des étudiants ayant reçu un enseignement sur les ondes utilisent les concepts de rayon et de surface d'onde pour représenter graphiquement des phénomènes sonores et lumineux (Maurines, 1997), nous nous intéressons ici aux facteurs dont dépendent, pour eux, les concepts de phase et de

surface d'onde, et aux méthodes utilisées pour tracer une surface d'onde dans une situation donnée. Cette étude vise à examiner si les tendances vers un raisonnement mécaniste et monotonnel, privilégiant l'expérience sensible et des indices perceptibles, mises en évidence pour la propagation d'un signal sur une corde (Maurines, 1986) et d'un signal sonore selon une direction (Maurines, 1992), se manifestent également pour des signaux et des ondes se propageant selon plusieurs directions.

Parmi la littérature en didactique portant sur les conceptions et modes de raisonnement dans le domaine des ondes, nous n'en connaissons pas ayant abordé ces thèmes. Nous pouvons par contre repérer l'existence de tendances vers un raisonnement mécaniste en termes d'objet que l'on suit dans plusieurs études portant sur des situations identiques ou non à celles que nous avons explorées. Il en est ainsi des études sur le son de Linder & Erickson (1989) et de Watt & Russel (1990), des travaux sur la superposition de deux signaux transversaux se propageant sur une corde d'Abboud (1989) et de Wittmann *et al.* (1999), des études sur la lumière de Lefèvre (1988), d'Ambrose *et al.* (1999) et de Colin (1999). Signalons enfin les nombreux travaux sur l'optique géométrique et la formation des images qui mettent en évidence l'existence d'un raisonnement en termes d'image voyageuse (Fawaz & Viennot, 1986 ; Goldberg & Mc Dermott, 1987 ; Kaminsky, 1989 ; Galili, 1996, etc.)

Nous allons tout d'abord préciser la problématique et la méthodologie de cette étude. Puis nous présenterons les résultats obtenus et les analyserons. Nous montrerons que le type de raisonnement, dégagé avant enseignement à propos de la propagation d'un signal sur une corde et d'un signal sonore selon une direction, se manifeste également après enseignement, dans les situations explorées et pour les questions posées. Nous terminerons par une analyse succincte des manuels d'enseignement et quelques propositions pédagogiques.

2. PROBLÉMATIQUE

Nous allons commencer par faire quelques remarques sur le domaine conceptuel concerné par cette étude. Cela permettra de justifier en partie les thèmes spécifiques explorés lors de cette recherche et de situer les réponses des étudiants.

2.1. Quelques remarques sur les concepts de phase et de surface d'onde, sur le principe de Huygens

Nous ne nous intéressons qu'à des situations qui peuvent être étudiées dans le cadre d'un modèle scalaire où la connaissance d'un seul champ suffit (approximation de l'optique et acoustique physiques).

Une onde est une modification d'une propriété de l'espace variable à la fois dans l'espace et le temps. Le champ caractérisant cette propriété est décrit par une fonction F dépendant des variables d'espace et de temps. Les fonctions partielles de la fonction F sont associées aux descriptions spatiale et temporelle du phénomène. Le phénomène de propagation se traduit par le fait que la fonction F dépend d'une fonction couplant l'espace et le temps. Cette fonction est appelée la phase de l'onde progressive (Born & Wolf, 1980, p. 17). Nous la noterons Φ . Nous dirons qu'à une valeur donnée de la phase correspond un point particulier de l'onde et généraliserons ainsi des expressions du type « le front d'un signal », « un sommet », « un zéro d'une onde progressive monochromatique », etc. Si la phase est constante en un point de l'onde, elle dépend du temps en un point du milieu, et de l'espace à un instant donné.

Si le milieu est homogène, non dissipatif et non dispersif, l'onde est décrite dans le cas d'une propagation unidirectionnelle par une fonction du type $F(x - ct)$. La phase est donnée par $\Phi = x - ct$ (celle-ci prend la forme $\Phi = \omega t - kx$ pour une onde sinusoïdale de pulsation ω et de vecteur d'onde k). Un point de l'onde correspond à une valeur constante de Φ et donc également de F . Dans le cas d'une propagation tridirectionnelle, un point de l'onde correspond toujours à une valeur constante de la phase Φ mais plus de F . Ainsi, si la source est omnidirectionnelle, F peut se mettre sous la forme $1/r G(r-ct)$: F décroît avec r et Φ est donnée par « $r-ct$ ». Si la source est directionnelle (comme dans le cas d'un haut-parleur), F est de la forme $A(r, \vartheta) / r G(r - ct)$: F dépend de r et de la direction de propagation, Φ étant toujours donnée par « $r-ct$ ». Si le milieu est dissipatif et non dispersif, un point de l'onde correspond à une valeur constante de la phase, mais la valeur de F en ce point de l'onde décroît exponentiellement au cours de la propagation (les fonctions F précédentes sont multipliées par $e^{-\alpha x}$ ou $e^{-\alpha r}$).

Lors de la propagation dans un milieu de dimension trois, on est amené à définir, à partir de la fonction d'onde $F = Ae^{i\Phi}$, des surfaces particulières. Une surface de phase, encore appelée surface d'onde, est l'ensemble des points atteints au même instant par l'onde (c'est donc l'ensemble des points vérifiant $\Phi = \text{constante}$ à t donné). Une surface isoamplitude est l'ensemble des points pour lesquels l'amplitude A du champ est la même. Sur une surface équiphasé, l'amplitude de l'onde n'est pas nécessairement

constante (Born & Wolf, 1980, p. 17). Ainsi, dans le cas de la propagation d'une onde sonore, émise par un haut-parleur directionnel de diagramme de rayonnement donné, la surface de phase et la surface d'onde sont sphériques, mais la surface d'égale amplitude sonore ne l'est pas.

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 de Helmholtz et Kirchhoff, le principe de Huygens-Fresnel en étant une formulation quantitative approchée (Jessel, 1973, p. 105). Ce théorème 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 convenables réparties sur toute la surface Σ . Le champ rayonné par ces sources (nous les appellerons source de Huygens) correspond, selon les cas, à celui de monopôles (émission omnidirectionnelle) ou/et de dipôles (émission directionnelle). 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 principe de Huygens, ou principe des ondes-enveloppes, peut être utilisé dans le cas de sources fictives réparties sur une surface d'onde mais aussi dans celui de sources ayant une existence réelle. C'est le cas des sources secondaires réparties sur une surface réfléchissante ou de séparation entre deux milieux matériels. C'est aussi celui de sources primaires. Ce principe des ondes-enveloppes dit que la surface d'onde de l'onde résultant de la superposition des ondes émises par une distribution continue de sources ponctuelles monochromatiques cohérentes est l'enveloppe des surfaces d'onde des ondes élémentaires sphériques émises par les sources ponctuelles. Lorsque la distance point d'observation-source est grande devant la longueur d'onde et la dimension de la source, cette surface d'onde est sphérique et la répartition en amplitude varie sur la surface d'onde.

2.2. Questions explorées

Cette étude sur les concepts de phase et de surface d'onde et sur le principe de Huygens a débuté, dès 1989, à la suite de nos premiers travaux sur la propagation d'un signal transversal sur une corde et, depuis, a été

menée en parallèle avec nos autres recherches. Elle a commencé par une première enquête exploratoire, centrée sur le concept de phase et mettant en jeu un signal ou une onde monochromatique se propageant selon une direction. Cette enquête était motivée tant par l'absence de travaux à ce sujet que par le rôle clé qu'accordaient au concept de phase les études de Colmez (1975) et Hulin (1975) ainsi que l'analyse de contenu réalisée pour notre précédente recherche (Maurines, 1986). Les résultats de cette première enquête et le fait que nous avions débuté, en 1991, une étude sur les difficultés soulevées par la propagation d'une onde selon plusieurs directions, nous ont conduits, en 1993, à élargir le domaine d'étude au concept de surface équiphasse, c'est-à-dire au concept de surface d'onde. Une seconde enquête exploratoire, centrée sur le concept de surface d'onde et mettant en jeu une onde monochromatique sonore se propageant dans l'air, a alors été réalisée. Le bilan de ces deux premières enquêtes exploratoires (Maurines, 1995) et une analyse des conséquences des tendances de raisonnement mises en évidence nous ont conduits par la suite à nous intéresser au principe de Huygens.

Lors de ces enquêtes sur les concepts de phase et de surface d'onde et sur le principe de Huygens, quatre types de problèmes ont été explorés.

Les recherches sur la propagation des signaux transversaux sur une corde montrant que les élèves et les étudiants tendent à accorder à un point d'une corde une composante longitudinale de mouvement (Maurines, 1986) ou de vitesse (Abboud, 1989), nous avons fait l'hypothèse qu'ils ne distinguent pas un point d'une onde d'un point du milieu et que le concept de phase ne devait pas être dissocié de celui de valeur du champ (maximum ou à un instant donné). Pour valider ces hypothèses, nous avons cherché à répondre aux questions suivantes :

– sur les graphes associés à la description spatiale de la propagation d'une onde selon une direction, comment les étudiants déplacent-ils les points de l'onde et les points du milieu ?

– pour les étudiants, la phase d'une onde progressive varie-t-elle linéairement avec l'espace ou bien est-elle la même en différents points de l'onde à un instant donné ? Si elle est la même en différents points de l'onde, pour lesquels ?

– pour les étudiants, la phase d'une onde progressive est-elle constante au cours du temps en un point de l'onde ? Si elle n'est pas constante, comment varie-t-elle ?

– pour les étudiants, la phase d'une onde progressive varie-t-elle linéairement au cours du temps en un point du milieu ?

– les étudiants calculent-ils la vitesse d'un point d'une onde progressive en annulant la différentielle de la fonction phase Φ ou bien en dérivant par rapport au temps la fonction champ, autrement dit calculent-ils ou non la vitesse d'un point de l'onde comme si c'était un point du milieu ?

Comme l'enquête exploratoire confirmait notre hypothèse sur les difficultés des étudiants à dissocier le concept de phase de celui d'amplitude d'une onde dans des situations mettant en jeu des ondes se propageant selon une direction, nous avons supposé qu'il devait en être de même pour des ondes se propageant selon plusieurs directions. Nous avons alors exploré les questions suivantes :

– pour les étudiants, une surface d'onde est-elle une surface équiphasé ou une surface isoamplitude ?

– pour les étudiants, la position des franges d'interférences résultant de la superposition de deux ondes émises par des sources synchrones et cohérentes ne dépend-elle que de la différence de phase entre les deux ondes en un point du milieu ou bien change-t-elle si l'intensité d'une des deux sources change ?

Comme la recherche sur la propagation d'un signal transversal sur une corde montrait que les élèves et les étudiants décrivent et expliquent ce qui se passe en se centrant sur une forme en mouvement considérée globalement comme un ensemble de points équivalents (« la bosse »), nous avons supposé qu'il en était de même pour la propagation d'une onde selon plusieurs directions et que les étudiants raisonnaient en suivant une surface d'onde. La recherche sur la propagation d'un signal transversal sur une corde révélant de plus que les élèves et les étudiants attribuent à la « bosse » qui se propage sur une corde des caractéristiques d'objet (avoir une forme indépendante de la vitesse de propagation et de la source qui crée le signal), nous avons fait l'hypothèse qu'il en est de même pour la surface d'onde. Les questions suivantes ont ainsi été abordées :

– pour les étudiants, la forme d'une surface d'onde dépend-elle ou non de la vitesse de propagation de l'onde, autrement dit du milieu ?

– pour les étudiants, la forme d'une surface d'onde dépend-elle ou non de la forme de la source qui crée l'onde, si celle-ci est étendue ?

– pour les étudiants, que devient la forme d'une surface d'onde d'une onde incidente lors d'une réflexion sur un obstacle ou d'une transmission d'un milieu à un autre ?

Comme un raisonnement, en termes d'objet que l'on suit, implique une centration sur le seul niveau macroscopique, nous avons fait l'hypothèse que les étudiants n'utilisent pas le concept d'enveloppe et le principe de

Huygens car ceux-ci nécessitent de prendre en compte simultanément le niveau macroscopique et celui des ondes élémentaires émises par les sources de Huygens. Pour tester cette hypothèse, nous avons choisi des situations mettant en jeu des distributions de sources ponctuelles non seulement continues mais aussi discontinues. Dans le premier cas, nous avons retenu des situations de réflexion et de transmission, et dans le second, deux situations « classiques » de l'enseignement : superposition des ondes émises par deux sources ponctuelles monochromatiques cohérentes ou par une distribution infinie de telles sources, alignées sur une droite et équidistantes. Nous avons abordé les questions suivantes :

- les étudiants utilisent-ils ou non le principe de Huygens pour construire une surface d'onde d'une onde réfléchie ou transmise ?
- pour les étudiants, existe-t-il ou non une surface d'onde pour l'onde résultant de la superposition de plusieurs ondes progressives monochromatiques cohérentes ? La forme de celle-ci dépend-elle ou non du déphasage entre les sources ?

3. MÉTHODOLOGIE

À la suite des deux enquêtes exploratoires précédemment citées (une première série de questionnaires papier-crayon portant sur la propagation d'une onde ou d'un signal sur une corde et d'un son sinusoïdal émis par un haut-parleur), nous avons cherché, d'une part à étayer davantage les conclusions du premier bilan (Maurines, 1995), et d'autre part à valider l'hypothèse d'un raisonnement en termes d'objet centré sur le niveau macroscopique. Pour cela, nous avons affiné les questionnaires déjà construits et en avons élaboré d'autres. Les tableaux 1 et 2 présentent les grandes lignes de la quinzaine de questionnaires rédigés lors de cette deuxième étape. Une moitié de ces questionnaires porte sur la phase d'une onde progressive, l'autre sur la surface d'onde et le principe de Huygens. Beaucoup de questionnaires ne précisent pas le type d'onde utilisé alors que d'autres le font (ondes sonores, ondes lumineuses, rides à la surface de l'eau). La plupart des questions sont qualitatives et ne nécessitent pas de calcul. Elles sont toujours accompagnées d'une demande de justification.

Une population d'environ 550 étudiants a été interrogée après enseignement sur les ondes :

- 170 étudiants, âgés de 17 à 19 ans, ont suivi un enseignement de niveau secondaire sur les ondes (60 élèves de première et terminale scientifiques, 110 étudiants en début de première année de classes préparatoires aux grandes écoles scientifiques ou de premier cycle universitaire).

L'enseignement dispensé en classe de première S correspondait au programme de 1988 en vigueur jusqu'à la rentrée de 1994. Il débutait par l'étude de la propagation d'un signal et d'une onde selon une direction et poursuivait par celle de la propagation dans un milieu de dimension deux ou trois. L'approche préconisée à ce niveau d'enseignement était descriptive et graphique. L'étude de la propagation selon une direction s'appuyait sur les graphes associés aux descriptions spatiale et temporelle, et celle de la propagation dans un milieu de dimension trois, sur les concepts de surface d'onde et de rayon. L'enseignement dispensé en classe de terminale scientifique correspondait au programme de 1983 en vigueur jusqu'à la rentrée de 1989. Reprenant ce qui avait été vu en première, il formalisait le phénomène de propagation en introduisant l'expression analytique des fonctions associées à la propagation selon une direction d'un signal et d'une onde monochromatique : $F(x,t) = F(x - ct)$ pour le premier, $F(x,t) = a \sin(\omega t - kx)$ pour la seconde. Il donnait ainsi une vision unifiée des descriptions spatiale et temporelle et s'appuyait sur la fonction Φ , phase d'une onde ou d'un signal ;

– 380 étudiants, âgés de 20 à 23 ans, ont suivi un enseignement de niveau supérieur (80 étudiants en deuxième année de premier cycle universitaire, 270 étudiants préparant un concours pour devenir professeur de physique et chimie dans l'enseignement secondaire, 30 professeurs stagiaires venant de réussir ce concours).

Les étudiants n'ont pas été interrogés sur l'ensemble des questionnaires. Ceux auxquels ils ont eu à répondre ont été choisis en fonction de l'enseignement suivi. C'est ainsi que seuls les questionnaires portant sur la direction du mouvement d'un point d'une onde ou du milieu et sur la confusion surface d'onde-surface équiphasé ont été passés en classe de première et terminale scientifiques. Les résultats fournis au même questionnaire par les différents sous-groupes ont été regroupés car ils ne font apparaître aucune différence significative. Le nombre d'étudiants interrogés en moyenne à chaque questionnaire étant d'une quarantaine, les pourcentages doivent être interprétés comme tendances majoritaires ou minoritaires. Un pourcentage de réponses erronées de 25 % après un enseignement sur les ondes est le signe d'une difficulté s'il est légitime d'attendre un pourcentage nul ; il en est de même d'un pourcentage faible de réponses correctes ou d'un taux élevé de non-réponses.

Les réponses des étudiants ont d'abord été analysées questionnaire par questionnaire. Les résultats obtenus à l'ensemble des questionnaires ont ensuite été confrontés. L'interprétation que nous en donnons met au jour les grandes lignes d'un raisonnement « commun » sur la propagation des ondes en dimension trois. Il trouve sa justification non pas dans le nombre de réponses obtenues à une question particulière mais dans les multiples recou-

pements qu'il autorise, que ce soit à l'occasion des thèmes de recherche abordés dans cette étude que dans ceux abordés dans l'étude sur la propagation des signaux selon une direction (Maurines, 1986, 1992) ou sur les représentations graphiques « communes » des ondes en dimension trois, en présence ou non d'obstacles (Maurines, 1997).

Nous n'entrerons pas ici dans une présentation exhaustive des résultats obtenus. Seules les tendances les plus représentatives seront décrites. Des exemples significatifs de réponses d'étudiants les illustreront ainsi que leurs pourcentages d'apparition. Ces derniers sont calculés sur le nombre d'étudiants interrogés (comme dans les encadrés présentant des exemples de représentations graphiques), ou parfois, sur le nombre d'étudiants fournissant une réponse lorsque le nombre de non-réponses est élevé.

Principales hypothèses testées	Données	Questions
confusion point d'une onde-point du milieu confusion phase Φ -amplitude A confusion phase Φ -valeur du champ F	description spatiale et expression analytique d'une onde monochromatique amortie rappel de la définition de la phase d'une onde progressive monochromatique	– la valeur de la phase de l'onde est-elle constante au cours du temps, en deux points différents de l'onde, un zéro et un sommet ? – description spatiale une demi période plus tard
confusion point d'une onde-point du milieu confusion phase Φ -amplitude A confusion phase Φ -valeur du champ F	description spatiale et expression analytique d'une onde monochromatique ou d'un signal rappel de la définition de la phase d'une onde progressive monochromatique et généralisation dans le cas d'un signal indéformable	– la valeur de la phase de l'onde est-elle constante au cours du temps, en deux points différents de l'onde (un zéro et un sommet) ou au sommet du signal ? – même question si l'onde ou le signal se propagent en diminuant d'amplitude – pour l'onde monochromatique : description spatiale un quart de période plus tard
confusion point d'une onde-point du milieu confusion phase Φ -amplitude A confusion phase Φ -valeur du champ F	description spatiale d'ondes monochromatiques ou de signaux définition de la phase d'une onde progressive monochromatique et généralisation pour un signal	– comparer la valeur de la phase en différents points d'une onde ou d'un signal
confusion point d'une onde-point du milieu confusion phase Φ -amplitude A confusion phase Φ -valeur du champ F	description spatiale et expression analytique de trois ondes progressives monochromatiques dont l'amplitude est constante, amortie, ou modulée en amplitude	– à quelle vitesse se déplace un sommet de l'onde ?
confusion phase Φ -intensité	interférences lumineuses à deux ondes émises par des sources ponctuelles monochromatiques cohérentes et de même intensité	– la position des franges d'interférences varie-t-elle si l'une des deux sources a une intensité double de l'autre ?

Tableau 1 : Caractéristiques des questionnaires portant sur le concept de phase

Principales hypothèses testées	Données	Questions
confusion surface d'onde-surface isoamplitude	– un GBF, un oscilloscope, un haut-parleur et un microphone branché à l'oscilloscope	– quelle méthode doit-on choisir pour déterminer une surface d'onde sonore : garder l'amplitude de la courbe visualisée à l'oscillo constante ou faire en sorte qu'elle ne se décale pas horizontalement ?
confusion surface d'onde-surface isoamplitude	– diagrammes de rayonnement de deux hauts-parleurs assimilés à des sources ponctuelles	– comparer et tracer les surfaces d'onde
surface d'onde assimilée à un objet matériel	sources ponctuelles dans un milieu homogène ou non : – lumière et son dans air de température uniforme ou non – rides à la surface d'un lac de profondeur constante ou non	– comparer et tracer les surfaces d'onde
surface d'onde assimilée à un objet matériel	– une boule et un pavé cubique tombant dans un lac	– comparer et tracer les surfaces d'onde
surface d'onde assimilée à un objet matériel et considérée globalement au niveau macroscopique	surfaces d'onde d'une onde incidente plane monochromatique surface de séparation entre deux milieux homogènes de forme « sinusoïdale »	– tracer une surface d'onde transmise
surface d'onde assimilée à un objet matériel et considérée globalement au niveau macroscopique	surfaces d'onde d'une onde incidente plane monochromatique surface réfléchissante de forme « parabolique »	– tracer une surface d'onde réfléchie en utilisant le principe de Huygens
confusion surface d'onde-surface isoamplitude concept d'enveloppe non utilisé	deux sources ponctuelles monochromatiques cohérentes	– tracer une surface d'onde de l'onde émise par les deux sources émettant en phase – peut-elle être dissymétrique ?
confusion surface d'onde-surface isoamplitude concept d'enveloppe non utilisé	une distribution de sources ponctuelles monochromatiques équidistantes alignées sur une droite	– peut-on avoir une surface d'onde plane parallèle à la ligne de source, non parallèle à la ligne de sources ?

Tableau 2 : Caractéristiques des questionnaires portant sur la surface d'onde et le principe de Huygens

4. RÉSULTATS

4.1. Les étudiants, les « points d'une onde » et les « points du milieu »

Sur les schémas associés à la description spatiale de la propagation d'une onde, le graphe de la fonction représentant la forme de l'onde à un instant donné est translaté au cours du temps. Deux types de points sont à considérer. Les uns sont attachés à la courbe représentant la forme de l'onde

et se déplacent avec elle : ce sont les points de l'onde (« sommet », « creux », « zéro », etc.) en lesquels la phase de l'onde est constante au cours du temps. La valeur de la phase est caractéristique du point de l'onde considéré et varie linéairement avec l'espace. Les autres ont des coordonnées spatiales fixes : ce sont les points du milieu en lesquels la phase de l'onde varie linéairement avec le temps. Alors que la vitesse de phase ou vitesse de propagation d'un point d'une onde sinusoïdale (amortie ou non) est constante au cours du temps, la vitesse d'un point du milieu varie avec le temps. La première est obtenue en annulant la différentielle de la phase Φ de l'onde alors que la seconde est obtenue en dérivant par rapport au temps la fonction F donnant le champ, l'abscisse x étant fixée. Pour les étudiants, ce n'est pas le cas.

Quand il s'agit d'indiquer comment bougent les points d'une corde, lors de la propagation d'une onde sinusoïdale, beaucoup d'étudiants (57 %, $N = 30$) **translatent les points de la corde avec l'onde** au lieu de les faire bouger transversalement en leur laissant une abscisse constante (Maurines, 1995).

Quand il s'agit de tracer la courbe représentant la forme de l'onde à un instant différent de l'instant de référence et de positionner des points de l'onde à cet instant, beaucoup d'étudiants donnent une réponse incorrecte. Par exemple, dans la situation présentée dans l'encadré 1, mettant en jeu une onde sinusoïdale amortie et deux points de l'onde correspondant à des valeurs différentes du champ (un est un « zéro » de l'onde, l'autre un « sommet »), on observe que :

– **pour 16 % des étudiants ($N = 44$), l'onde serpente.** La courbe reste identique à elle-même et l'onde progresse par ajout de bosses, les points de l'onde étant déplacés le long de la courbe (voir la figure 2 de l'encadré 1) ;

– **pour 20 % des étudiants, les points de l'onde ont une abscisse fixe au cours du temps** et la courbe représentant la forme de l'onde à l'instant $t+T/2$ est la symétrique de la courbe donnée en référence. Ces étudiants semblent confondre point de l'onde et point du milieu, onde progressive et onde stationnaire (voir la figure 3 de l'encadré 1).

4.2. Les étudiants, la phase et la vitesse de l'onde

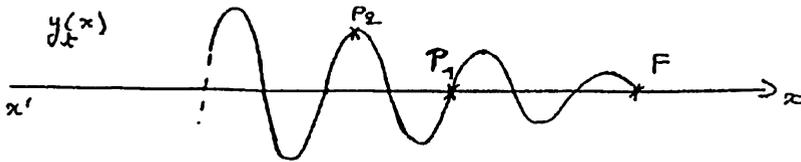
Alors que la phase de l'onde, en différents points d'une onde monochromatique se propageant sur une corde, augmente linéairement avec l'abscisse x , la majorité des étudiants (68 %, $N = 28$) considèrent que la phase est la même en deux sommets différents de l'onde. En fait, les

ENCADRÉ 1

Description spatiale de la propagation d'une onde sinusoïdale amortie

Donnée

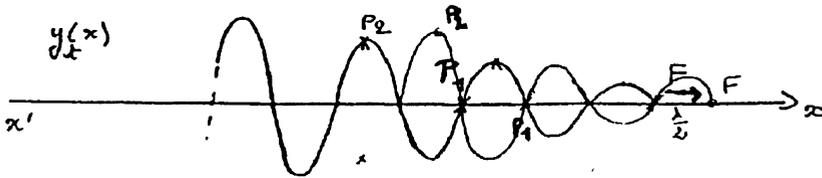
Schéma donnant l'état du milieu à un instant t . Les points F , P_1 et P_2 sont des points de l'onde, en particulier F est le front de l'onde.



Questions : Schéma donnant l'état du milieu à l'instant $t+T/2$, la position des points F , P_1 et P_2 .

Exemple de réponses considérées comme correctes (45 %, N = 44)

Figure 1



Nous n'avons pas tenu compte du fait que l'étudiant n'a pas donné une amplitude correcte à la sinusoïde. Seuls trois étudiants l'ont fait.

Exemples de réponses incorrectes (36 %, N = 44)

Figure 2

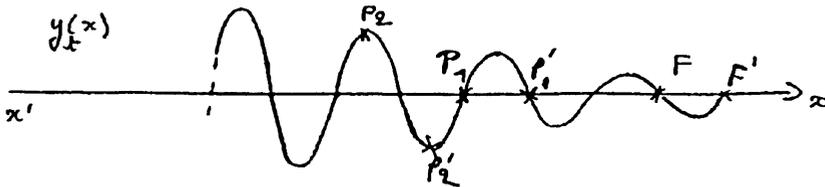
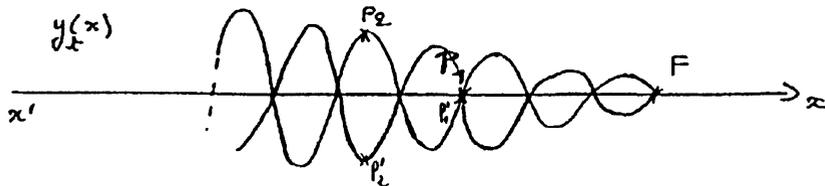


Figure 3



étudiants raisonnent sur les points de l'onde comme si c'étaient des points de la corde : ils comparent leur mouvement et répondent « **même valeur de la phase** » pour « **mouvements en phase** » (Maurines, 1995).

Quand il s'agit d'indiquer si la phase de l'onde est constante ou non au cours du temps en un point de l'onde, beaucoup d'étudiants répondent que **la phase de l'onde varie en un point de l'onde** : 58 % de l'ensemble des réponses obtenues aux différentes situations proposées aux étudiants portant sur cette question (N = 196). Sur les justifications données, certains étudiants traitent implicitement ou non un point de l'onde comme un point du milieu en raisonnant sur une abscisse fixe. D'autres considèrent que la phase de l'onde en un point de l'onde dépend de la valeur du champ à un instant donné en un point donné du milieu ou de la valeur maximum du champ, c'est-à-dire de l'amplitude de l'onde. Par exemple, dans la situation présentée à l'encadré 1, les justifications associées aux réponses « la phase de l'onde varie au cours du temps en P_1 et P_2 , respectivement zéro et sommet de l'onde monochromatique amortie », sont majoritairement du premier type (83 %, 45 % des 44 étudiants interrogés) : « la phase est $u = \omega t - kx$ or ω , k sont des constantes. Si on reste en P_1 , **alors x est constant**. Comme le temps varie, u varie proportionnellement à t ». Une minorité d'entre elles (17 %, 9 % des 44 étudiants interrogés) sont du deuxième type : « *si on considère que P_1 appartient au signal, la phase n'est pas constante car le signal **s'amortit** au cours du temps (la phase diminue). C'est la même chose pour le point P_2* ». C'est cette relation non pertinente entre la valeur du champ et la phase de l'onde qui conduit 7 % des 44 étudiants à répondre que la phase de l'onde est constante uniquement pour le point P_1 , celle au point P_2 variant avec le temps : « **l'amplitude de l'onde n'est pas constante**. La phase de l'onde en P_1 ne varie pas au cours du temps (le point P_1 est sur l'axe). La phase de l'onde au point P_2 varie au cours du temps car l'amplitude de l'onde n'est pas constante. »

Pour calculer la vitesse d'un point d'une onde, beaucoup d'étudiants font comme si ce point était un point du milieu et dérivent l'expression F du champ. Ainsi, pour obtenir la vitesse d'un sommet P d'une onde sinusoïdale d'amplitude constante, beaucoup d'étudiants (45 %, N = 40) emploient cette méthode : « Le point P se déplace à la vitesse $v = dy/dt = a\omega \cos(\omega t - kx)$ car P ne se déplace pas sur l'axe xx' mais en revanche, **il bouge de haut en bas**. » Parmi les 9 étudiants répondant que la vitesse d'un point de l'onde est ω/k , un seul justifie sa réponse en disant : « $\omega t_1 - kx_1 = \omega t_2 - kx_2$ d'où $\omega \Delta t = k \Delta x$ et $v = \Delta x / \Delta t = \omega / k$ ». Lorsqu'il s'agit de calculer la vitesse de propagation d'un sommet d'une onde sinusoïdale amortie ou modulée en amplitude (questions moins « classiques » que la précédente), cet étudiant ne répond pas.

Terminons, en disant que, parmi les étudiants qui différencient un point d'une onde et un point du milieu, beaucoup ne savent pas que la phase d'une onde est constante en un point de l'onde. C'est ainsi qu'une corrélation entre les réponses obtenues au questionnaire présenté dans l'encadré 1 montre que, pour 63 % des 16 étudiants qui traduisent un point de l'onde avec la forme de l'onde, la phase de l'onde varie linéairement avec le temps en un point de l'onde.

4.3. Pour les étudiants, la surface d'onde est-elle une surface équiphase ?

Une surface d'onde est une surface équiphase sur laquelle l'amplitude de l'onde, et par conséquent l'intensité de l'onde, n'est pas nécessairement constante. Ainsi dans le cas de la propagation d'une onde sonore sinusoïdale, émise par un haut-parleur directionnel de diagramme de rayonnement donné, la surface d'onde en champ lointain est sphérique mais la surface isoamplitude ne l'est pas. Pour déterminer expérimentalement une surface d'onde sonore grâce à un oscilloscope et un microphone, il faut faire en sorte que la sinusoïde observée à l'écran ne se décale pas horizontalement et ne pas chercher à ce qu'elle garde la même amplitude. Pour les étudiants, ce n'est pas le cas.

Alors que les surfaces d'onde de deux hauts-parleurs de diagrammes de rayonnement différents, un omnidirectionnel et un directionnel, sont toutes les deux sphériques, une majorité d'étudiants (90 %, N = 41) répond qu'elles sont différentes. Beaucoup (51 % sur la population totale) justifient cette réponse en traçant des surfaces isoamplitudes et non des surfaces d'onde (voir la figure 2 de l'encadré 2). Les réponses des quelques étudiants, dessinant une surface d'onde sphérique pour la source omnidirectionnelle et une portion de sphère limitée par un cône pour la source directionnelle, ne peuvent être considérées comme correctes, car les justifications accompagnant les dessins assimilent une surface d'onde à une surface isointensité (voir la figure 3 de l'encadré 2).

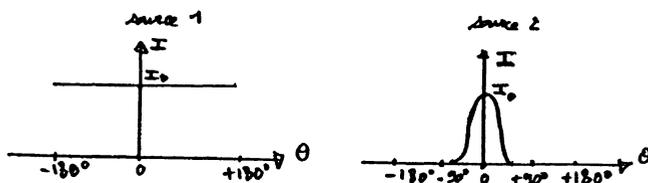
Lorsqu'il s'agit de choisir une méthode pour déterminer expérimentalement une surface d'onde sonore, une majorité d'étudiants (61 %, N = 49) impose à l'amplitude de la sinusoïde observée sur l'écran de l'oscilloscope de rester constante. Pour les étudiants qui retiennent cette seule condition (33 % sur la population totale), tout se passe comme si une surface d'onde était une surface isoamplitude : « *surface d'onde : même amplitude* ». Pour les autres qui imposent de plus à la sinusoïde de ne pas se décaler horizontalement (28 % sur la population totale), tout se passe comme si une surface d'onde était à la fois une surface équiphase et une surface iso amplitude : « *il*

ENCADRÉ 2

Forme de la surface d'onde des ondes émises par deux sources sonores monochromatiques ayant des diagrammes de rayonnement différents

Données

Diagrammes de rayonnement de deux sources sonores (considérées comme ponctuelles) émettant à 2 000 Hz.



Exemple de réponses correctes (5 %, N = 41)

Figure 1



La surface d'onde provenant d'une source ponctuelle est sphérique car celle-ci représente les points d'égale phase et les lie Or $\Phi = cte$ correspond à $r = cte$ d'où sphère.

Exemples de réponses incorrectes (90 %, N = 41)

Figure 2

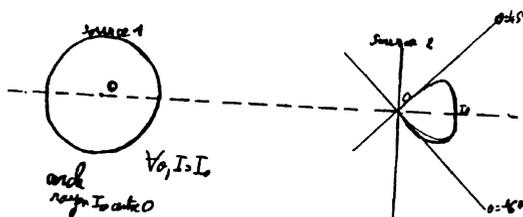


Figure 3



faut combiner les deux méthodes car il faut satisfaire la condition sur l'amplitude et la phase ».

4.4. Pour les étudiants, la forme d'une surface d'onde dépend-elle de la vitesse de propagation et de la forme de la source à l'origine de l'onde ?

Une surface d'onde étant l'ensemble des points du milieu atteints au même instant par un point de l'onde, sa forme dépend de la vitesse de propagation. La surface d'onde d'une onde émise par une source ponctuelle est sphérique uniquement si le milieu est homogène. La forme d'une surface d'onde dépend de la forme de la source en champ proche (autrement dit « très peu de temps » après la création de cette surface d'onde) et n'en dépend pas en champ lointain. Pour les étudiants, ce n'est pas le cas.

Pour beaucoup d'étudiants, la surface d'onde d'une onde progressive sinusoïdale se propageant dans un milieu inhomogène est sphérique comme si l'onde se propageait dans un milieu homogène. Ainsi, parmi les étudiants fournissant une réponse, il y en a 67 % qui répondent de cette manière pour la propagation du son (N = 27), 41 % pour la propagation de la lumière (N = 17) et 63 % pour la propagation de rides à la surface de l'eau (N = 30). Les justifications accompagnant ce type de réponse précisent clairement que la forme de la surface d'onde ne dépend pas de la vitesse de propagation (voir la figure 2 de l'encadré 3) : « *oui, la surface est la même mais elle parvient au récepteur M plus vite* », « *oui, le changement de température fait varier la vitesse **mais pas** la forme de la surface d'onde* ».

Pour beaucoup d'étudiants, la forme de la surface d'onde d'une onde émise par une source étendue ne dépend pas de la forme de la source. Ainsi, pour 63 % des étudiants fournissant une réponse (N = 30), les rides se propageant à la surface d'un lac, juste après le lâcher d'une boule et d'un pavé cubique, ont la même forme. Certaines justifications insistent sur le fait que la forme des rides n'a rien à voir avec la forme de la source étendue : « *Les fronts d'onde sont toujours circulaires. **Elles sont indépendantes de la forme.** Seule l'amplitude variera en fonction de la masse des objets* », « *car ce n'est pas la forme de l'objet qui est importante, c'est le fait qu'il y ait contact avec la surface de l'eau* ».

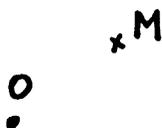
Bien que ces réponses puissent provenir d'une référence implicite à l'expérience familière consistant à jeter des cailloux dans l'eau, elles nous semblent significatives par l'insistance des commentaires. De plus, elles peuvent être interprétées comme les réponses portant sur la propagation dans un milieu inhomogène en disant que les étudiants considèrent

ENCADRÉ 3

Forme de la surface d'onde d'une onde émise par une source ponctuelle monochromatique sonore (ou lumineuse), se propageant dans de l'air dont la température varie avec l'altitude

Données

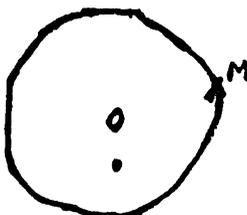
Il n'y a pas de vent et la température diminue avec l'altitude. On rappelle que la vitesse du son (ou de la lumière) croît (décroit) avec la température.



Exemple de réponses correctes (31 %, N = 61)

Figure 1

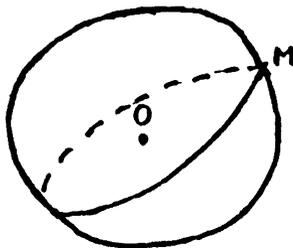
La vitesse du son diminue avec T. C'est une sphère déformée. Les points à haute altitude sont plus éloignés que les autres.



Exemple de réponses incorrectes (57 %, N = 61)

Figure 2

Il n'y a pas de perturbation donc tous les points à la même distance de la source sont sur la même surface d'onde.



globalement une surface d'onde. En effet, sur les schémas fournis, aucun n'obtient la surface d'onde à un instant t en considérant que la surface d'onde à l'instant origine correspond à la surface de la source et qu'une surface d'onde s'accroît perpendiculairement à elle-même avec une vitesse égale à la vitesse de propagation. Par ailleurs, il est à signaler que tous les étudiants raisonnent au seul niveau macroscopique. Aucun ne décompose la surface de la source en un ensemble de points-sources cohérents émettant des ondes élémentaires sphériques : ni le principe de Huygens, ni le terme « enveloppe » ne sont mentionnés.

4.5. Pour les étudiants, comment est la forme de la surface d'onde d'une onde réfléchie ou transmise ?

Pour obtenir la forme d'une surface d'onde d'une onde réfléchie ou transmise, les formes d'une surface d'onde incidente et de la surface de séparation (réfléchissante ou réfractante) étant données, on peut utiliser trois méthodes. Deux portent sur le niveau macroscopique : une fait appel aux lois de la réflexion ou de la réfraction ainsi qu'à l'orthogonalité de la surface d'onde et des rayons ; une autre utilise le fait que le « chemin » parcouru le long d'un rayon par un point de l'onde ne dépend pas du point choisi sur la surface d'onde incidente. La troisième méthode relie le niveau macroscopique et le niveau des ondes élémentaires. Elle s'appuie sur le fait que chaque point de la surface de séparation se comporte comme une source de Huygens émettant une onde élémentaire sphérique et que la surface d'onde de l'onde réfléchie ou transmise est l'enveloppe des surfaces d'onde des ondes élémentaires. Les sources de Huygens ne sont pas toujours en phase car elles ne sont pas toujours atteintes au même instant par une surface d'onde incidente donnée. Leur déphasage dépend des formes de la surface d'onde incidente et de la surface de séparation ainsi que de la direction de propagation de l'onde incidente. Les surfaces d'onde d'une onde réfléchie ou transmise n'ont pas toujours une forme similaire à celle de l'onde incidente, ou à celle de la surface de séparation. Pour les étudiants, ce n'est pas le cas.

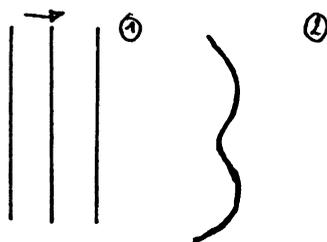
Lorsqu'il s'agit de représenter une surface d'onde d'une onde transmise par une interface « sinusoïdale », l'onde incidente étant plane et aucune méthode n'étant imposée, beaucoup d'étudiants tracent une surface d'onde transmise de même forme que la surface de séparation (figure 2 de l'encadré 4) et quelques-uns une surface d'onde plane (figure 3 de l'encadré 4). Rares sont les étudiants qui tracent une surface d'onde transmise de forme différente de la surface de séparation. Ces dessins ne sont pas justifiés et portent sur le niveau macroscopique, aucune surface d'onde secondaire n'apparaissant.

ENCADRÉ 4

Forme de la surface d'onde d'une onde transmise d'un milieu homogène à un autre

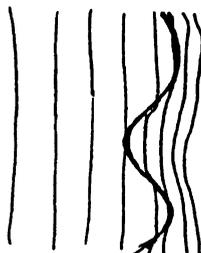
Données

Surface d'onde de l'onde incidente, forme de la surface de séparation. V_1 supérieure à V_2 .



Exemple de réponses correctes (13 %, N = 15)

Figure 1



Exemples de réponses incorrectes (60 %, N = 15)

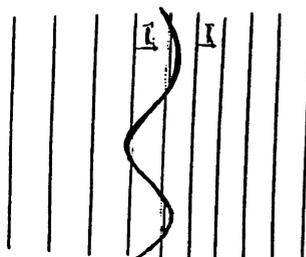
Figure 2

Surface d'onde = surface sur laquelle les points arrivent en phase.



Figure 3

Le déphasage sera le même en tout point de la surface de séparation. Après avoir passé la surface, tous les points de l'onde incidente se retrouvent en phase.

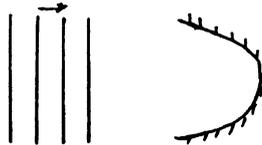


ENCADRÉ 5

Forme de la surface d'onde d'une onde réfléchi

Données

Surface d'onde de l'onde incidente, forme de la surface réfléchissante.



Exemples de réponses où la surface d'onde a une forme correcte (18 %, N = 49)

Figure 1

Chaque point de la surface réfléchissante se comporte comme une source ponctuelle émettant une onde sphérique.

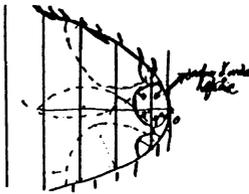
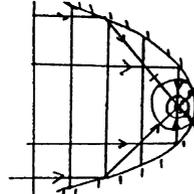


Figure 2

Pour une surface parabolique, l'optique géométrique prévoit que les rayons réfléchis convergent au foyer. Les surfaces d'onde sont normales aux rayons.



Exemples de réponses où la surface d'onde a une forme incorrecte (37 %, N = 49)

Figure 3

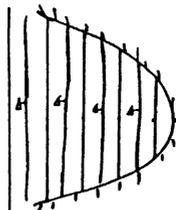
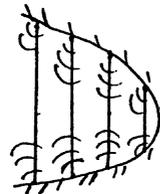


Figure 4



Figure 5

D'après le P. de Huygens, à partir d'un point source propagation selon une onde sphérique, d'où les surfaces d'onde au niveau de la surface réfléchissante.



Lorsqu'il s'agit de représenter une surface d'onde d'une onde réfléchiée par une surface « parabolique », l'onde incidente étant plane et la méthode basée sur le principe de Huygens étant imposée, beaucoup d'étudiants (45 %, N = 49) ne répondent pas, certains demandant ce qu'est le principe de Huygens (13 %).

La majorité des dessins fournis (67 %, N = 27) porte uniquement sur le niveau macroscopique, la moitié représente une surface d'onde de forme correcte (figure 2 de l'encadré 5). Parmi les dessins représentant une surface d'onde de forme incorrecte, on retrouve des surfaces d'onde réfléchiée ayant la forme de la surface d'onde incidente (figure 3 de l'encadré 5) et d'autres ayant la forme de la surface de séparation (figure 4 de l'encadré 5).

Parmi les dessins prenant en compte le niveau des ondes élémentaires (33 %, N = 27), certains ne portent que sur ce niveau (15 %, N = 27 ; figure 5 de l'encadré 5) et d'autres aussi sur le niveau macroscopique (18 %, N = 27). Seulement les deux tiers de ces réponses proviennent d'une utilisation correcte du principe de Huygens (figure 1 de l'encadré 5).

4.6. Pour les étudiants, existe-t-il une surface d'onde pour l'onde résultant de la superposition d'ondes émises par des sources ponctuelles cohérentes ?

La surface d'onde de l'onde résultant de la superposition de deux ondes émises par des sources ponctuelles cohérentes en phase est de forme elliptique. Elle peut être assimilée à l'enveloppe des surfaces d'onde des ondes émises par les deux sources lorsqu'on est suffisamment loin des sources de sorte à pouvoir considérer la distribution des sources comme continue. L'amplitude de l'onde résultante est modulée : il existe des surfaces hyperboliques d'intensité maximum et nulle (franges d'interférences). Si les deux sources ne sont pas en phase, la surface d'onde n'est plus symétrique. Pour les étudiants, ce n'est pas le cas.

Lorsqu'il s'agit de tracer une surface d'onde de l'onde résultant de la superposition des ondes émises par deux sources cohérentes en phase, seulement 41 % des 32 étudiants fournissant une réponse (N = 27) dessinent les surfaces d'onde des ondes émises par les deux sources ponctuelles ainsi que leur enveloppe (figure 1 de l'encadré 6). Une majorité de réponses est incorrecte (59 %, N = 27). La moitié d'entre elles correspond à des étudiants qui ne raisonnent qu'au niveau des ondes élémentaires : les surfaces d'onde des ondes émises par les deux sources ponctuelles sont représentées mais pas leur enveloppe (figure 2 de l'encadré 6). L'autre moitié correspond à des

ENCADRÉ 6

Forme de la surface d'onde de l'onde résultant de la propagation de deux ondes émises par deux sources ponctuelles monochromatiques

Donnée

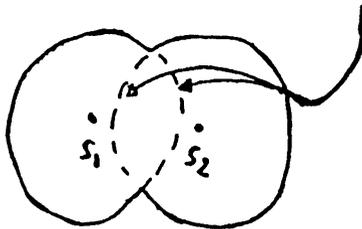
Surface d'onde de l'onde émise par une source. Position des deux sources.



Exemple de réponses correctes (34 %, N = 32)

Figure 1

Les parties en pointillé ayant subi des interférences, elles ne font plus partie de la surface d'onde.



Exemples de réponses incorrectes (50 %, N = 32)

Figure 2

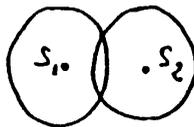
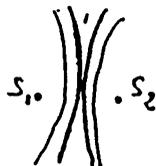


Figure 3

Interférences



étudiants qui confondent surface d'onde et surface isoamplitude : des franges d'interférences et non des surfaces d'onde sont dessinées (figure 3 de l'encadré 6).

Seulement 36 % des 32 étudiants fournissant une réponse (N = 22) disent que l'onde résultant de la superposition de deux ondes émises par des sources monochromatiques cohérentes peut avoir une surface d'onde dissymétrique. Comme les étudiants tendent à confondre une surface d'onde et une surface isoamplitude, on comprend que seule une minorité d'entre eux donne un moyen correct en disant que les sources ne doivent pas émettre en phase (9 %, N = 22) et que la majorité (27 %, N = 22) ne fait pas appel au déphasage des sources : il faut « *déplacer la source S_2* », « *lui donner une intensité plus grande...* » C'est sans doute aussi la raison pour laquelle on obtient un nombre élevé d'étudiants qui répondent qu'obtenir une surface d'onde dissymétrique est impossible (64 %, N = 22). La même difficulté à raisonner sur des situations « non symétriques » se manifeste sur les réponses obtenues à un questionnaire demandant s'il est possible d'obtenir une onde plane à partir d'une ligne de sources monochromatiques équidistantes. Alors qu'il est impossible d'obtenir une surface d'onde plane pour 28 % des étudiants (N = 29) lorsque celle-ci est parallèle à la ligne de sources, ce nombre passe à 45 % lorsque l'onde ne se propage pas perpendiculairement à la ligne de sources. Parmi les 34 % d'étudiants qui disent que c'est possible, seule la moitié donne un moyen correct lié au déphasage des sources.

5. DISCUSSION

5.1. Modèle du raisonnement des étudiants

On retrouve sur les résultats précédents les mêmes tendances vers un raisonnement mécaniste que celles mises en évidence dans nos précédentes recherches. En effet, pour les étudiants, l'onde est représentable graphiquement par des surfaces en mouvement auxquelles ils attribuent des caractéristiques d'objet. En effet, pour eux :

– la forme de la surface d'onde d'une onde progressive ne dépend pas de la vitesse de propagation, tout comme la forme d'un solide indéformable ne dépend pas de sa vitesse de déplacement ;

– la forme de la surface d'onde d'une onde progressive ne dépend pas de la source étendue qui est à l'origine de l'onde, tout comme la forme d'une balle ne dépend pas de la main qui la lance ;

– la forme de la surface d'onde d'une onde incidente est conservée lors d'une réflexion ou d'une transmission d'un milieu à un autre comme si cette forme était celle d'un objet indéformable, ou bien garde l'empreinte de ce qui s'est passé comme si cette forme était faite en pâte à modeler ;

– dans des situations de superposition d'ondes cohérentes, l'onde résultante n'a pas de surface d'onde car chaque onde élémentaire garde son identité propre, comme c'est le cas pour deux anneaux accrochés l'un à l'autre.

De plus, dans ces situations de propagation dans un milieu à trois dimensions, on observe les mêmes tendances à raisonner sur des concepts indifférenciés. En effet, pour les étudiants :

– un point d'une onde n'est pas distingué d'un point du milieu. Sur les graphes associés à la description spatiale de la propagation d'une onde, un point d'une onde garde une abscisse fixe au cours du temps au lieu de se déplacer avec l'onde. La phase de l'onde en un point de l'onde varie linéairement avec le temps au lieu d'être constante. La vitesse d'un point d'une onde est calculée de la même manière que la vitesse d'un point du milieu. La phase d'une onde progressive sinusoidale ne varie pas linéairement avec l'espace mais est la même en chaque sommet ;

– le concept de phase d'une onde n'est pas dissocié de ceux de valeur du champ et d'amplitude du champ. La phase de l'onde, en un point d'une onde, varie dans le temps de la même façon que le champ ou diminue si l'amplitude de l'onde diminue. La surface d'onde est soit une surface isoamplitude, soit une surface isoélongation. La surface d'onde résultant de la superposition de plusieurs ondes possède la symétrie liée à la répartition spatiale des sources car celle-ci n'est pas perçue comme une surface équiphasé. La position des franges d'interférences résultant de la superposition de deux ondes émises par des sources ponctuelles monochromatiques cohérentes dépend de l'intensité des sources ;

– une surface d'onde est considérée en « bloc » et n'est pas discrétisée. Elle n'est pas considérée comme un ensemble de points distincts se déplaçant perpendiculairement à cette surface à une vitesse égale à la vitesse de propagation.

Par ailleurs, on rencontre la même tendance à matérialiser les concepts. En effet, relier la phase de l'onde et l'amplitude de l'onde, assimiler un point d'une onde et un point du milieu, traiter la surface d'onde comme un objet, sont des manières de rendre plus concrets les concepts abstraits mis en jeu.

Si la tendance à raisonner en suivant une forme en mouvement n'est pas spécifique de la propagation selon plusieurs directions, elle se traduit ici par une tendance propre à ce type de propagation : se focaliser sur un seul niveau, le niveau macroscopique ou celui des ondes élémentaires. Il en résulte que le concept d'enveloppe n'est pas utilisé. En effet :

– dans les situations de réflexion et de transmission, les étudiants se concentrent majoritairement sur le seul niveau macroscopique si bien que l'onde du niveau macroscopique n'est pas recomposée à l'aide d'ondes élémentaires sphériques ;

– dans les situations de superposition d'ondes sphériques cohérentes, les étudiants restent au niveau des ondes élémentaires si bien que celles-ci gardent leur identité propre et ne définissent pas une onde résultante caractérisée par une surface d'onde unique.

5.2. Quelques remarques sur l'enseignement des ondes

Arrivés au terme de cette étude, nous voudrions montrer, sur quelques points, que l'enseignement, ne mettant pas l'accent sur les points délicats et laissant trop d'implicite et d'ambiguïté, favorise les tendances de raisonnement que nous venons de présenter.

Faisons, tout d'abord, quelques remarques sur les programmes du secondaire suivis par la majorité des étudiants interrogés. Les objectifs de connaissance et de savoir-faire à propos des concepts de phase et de surface d'onde restaient implicites.

Dans le programme de terminale scientifique de 1983, le terme « phase » apparaît pour la première fois dans le chapitre traitant des oscillateurs harmoniques pour désigner la fonction ϕ de la seule variable temporelle dont dépend la fonction sinusoïdale décrivant le mouvement d'un oscillateur : $y(t) = a \sin(\omega t + \phi_0)$ avec $\phi(t) = \omega t + \phi_0$. Le terme « phase » réapparaît dans le chapitre sur l'onde progressive sinusoïdale, le programme demandant d'introduire sans plus de précision la phase de l'onde, c'est-à-dire la fonction Φ des deux variables x et t dont dépend le champ caractérisant l'onde : $y(x,t) = a \sin(\omega t - kx)$ avec $\Phi(x,t) = \omega t - kx$. Rien n'est dit sur les confusions possibles résultant du fait que le même terme renvoie au mouvement d'un oscillateur matériel (que ce soit un oscillateur unique ou un oscillateur faisant partie d'un milieu continu parcouru par une onde) ou au mouvement d'un point d'une onde. Aucun commentaire n'est fait sur les variations spatiotemporelles de la phase d'une onde. On ne peut alors s'étonner que les étudiants raisonnent sur des oscillateurs matériels au lieu de raisonner sur les points d'une onde et répondent « mouvement en phase » pour « même valeur de

la phase d'une onde » ou bien que la phase d'une onde n'est pas constante en un point de l'onde.

Dans le programme de première scientifique de 1982, peu de choses est dit sur la surface d'onde. Aucune définition n'est donnée et aucun commentaire n'apparaît sur le fait que l'amplitude de l'onde n'est pas nécessairement constante sur une surface d'onde. S'il est recommandé d'utiliser la cuve à eau pour « montrer » des rides circulaires et rectilignes, la détermination expérimentale d'une surface d'onde sonore n'est pas demandée.

Les manuels du secondaire portant sur ces programmes n'explicitaient pas davantage les points délicats. Ils laissaient par contre apparaître des commentaires pouvant prêter à confusion.

Ainsi, en ce qui concerne la surface d'onde, on observe une tendance à associer « vibration en phase » et « même état vibratoire ». L'expérience réalisée sur la cuve à eau préconisée par le programme de première scientifique daté de 1982 pour introduire le concept de surface d'onde est ainsi décrite par : « *tous les points situés sur une même circonférence, c'est-à-dire à la même distance r du point source, donnent, à chaque instant, le même éclaircissement sur l'écran : nous pouvons penser qu'ils ont, à chaque instant, le même état vibratoire et qu'ils vibrent en phase. Ces points appartiennent à la même surface d'onde* » (Bramand *et al.*, 1982, p. 237). Même si la définition encadrée hors texte (« *une surface d'onde est une surface dont tous les points vibrent en phase* ») ne laisse pas subsister d'ambiguïtés, on peut se demander ce qu'auront retenu les élèves. Cette tendance à associer « vibration en phase » et « même état vibratoire » se retrouve dans des manuels de terminale scientifique dans les rappels portant sur le cours de première : « *surfaces d'ondes ou surfaces équiphases : ce sont les surfaces sur lesquelles les points **vibrent en phase**, c'est-à-dire **ont même mouvement** à tout instant* » (Charlot *et al.*, 1980, p. 335). De même, un manuel de seconde portant sur le programme daté de 1993 en vigueur jusqu'à la rentrée 2000 décrit une expérience réalisée avec un haut-parleur, un oscilloscope et un microphone de la manière suivante : « *déplaçons maintenant le microphone sur un cercle de centre O , la **sinusoïde de la voie Y_B reste identique à elle-même**. Et on obtiendrait le même résultat en déplaçant le microphone sur une sphère de centre O . Pour cette raison, on dit que l'onde sonore est sphérique (**l'état vibratoire est le même sur une sphère de centre O**)* ». Pourtant, lors de l'expérience, le haut-parleur n'émettant pas avec la même intensité dans toutes les directions, l'amplitude de la sinusoïde varie et ne reste pas constante, contrairement à ce qui est écrit (Tomasino & Penigaud, 1993).

Les démarches utilisées par les manuels de l'enseignement supérieur peuvent, elles-aussi, laisser subsister des confusions.

Ainsi, en ce qui concerne le concept de phase d'une onde, certains manuels la définissent comme la constante ϕ intervenant dans l'expression $(\omega t - kx + \phi)$. On ne peut s'étonner dans ces conditions de ne pas voir précisé que la vitesse de phase d'une onde est obtenue en annulant la différentielle de la fonction à deux variables « $\omega t - kx$ » (Queyrel & Mesplède, 1996, pp. 12-13).

En ce qui concerne le concept de surface d'onde, on y retrouve les mêmes commentaires tendant à associer phase et amplitude que ceux rencontrés dans les manuels du secondaire. On lit ainsi :

« *La grandeur vibrante qui se propage est caractérisée par la fonction d'onde $\Psi(r,t)$. Surfaces d'onde : ce sont les surfaces sur lesquelles, à chaque instant, $\Psi = \text{cte}$* » (Soum et al., 1995, p. 7) ;

« *Un front d'onde est une surface sur laquelle chaque grandeur acoustique **a même valeur** en tout point, quel que soit l'instant considéré* » (Rossi, 1986, p. 17).

6. CONCLUSION

Les résultats présentés ici montrent que les tendances vers un raisonnement monotonnel en termes d'objet que l'on suit, tout d'abord mises en évidence pour la propagation unidirectionnelle des signaux, visibles ou non, se rencontrent également dans le cas de la propagation selon plusieurs directions d'une onde. Elles se manifestent, non seulement dans des situations géométriques de propagation, de réflexion ou de transmission, mais aussi dans des situations ondulatoires de superposition d'ondes sphériques cohérentes, de diffraction (Maurines, 1997) ou de formation d'images en éclairage cohérent (Maurines, 2000). Elles semblent bien être une caractéristique du raisonnement commun car elles se rencontrent dans d'autres domaines de la physique (Viennot, 1996). Elles sont difficilement remises en question par l'enseignement actuel des ondes, celui-ci restant implicite ou ambigu sur des points délicats.

La connaissance des difficultés rencontrées par les élèves et les étudiants nous permet de suggérer quelques propositions pédagogiques.

Pour dégager le caractère abstrait de l'onde, il nous semble souhaitable d'introduire un vocabulaire spécifique en généralisant des expressions telles que le « front » d'un signal, les « crêtes » ou les « creux » d'une onde. On introduirait ainsi le concept de « point d'une onde » et dirait qu'un point i d'une onde « coïncide » à un instant donné t avec un point du milieu d'abs-

cisse x , autrement dit que son mouvement obéit à une équation du type $x - x_i = v (t - t_i)$. Cela pourrait être fait à un premier niveau d'enseignement. Par la suite, on définirait la phase d'une onde et préciserait que la vitesse de phase est obtenue en annulant la différentielle de cette fonction. S'il est important d'introduire la phase d'une onde, cela n'est pas suffisant. En effet, il est souhaitable d'apprendre aux élèves et aux étudiants à éliminer les paramètres non pertinents auxquels ils ont pensé. Des questions qualitatives, telles celles qui sont présentées ici, peuvent être utilisées à cette fin. Mettant l'accent sur des points traditionnellement oubliés dans l'enseignement, elles devraient aider les étudiants à différencier un point d'une onde d'un point du milieu et à dissocier la phase d'une onde de son amplitude.

En ce qui concerne la surface d'onde, il est nécessaire de la définir comme une surface équiphase et de faire comprendre aux élèves et aux étudiants que l'amplitude n'est pas toujours constante sur une surface d'onde. C'est dans le domaine de l'acoustique que l'on peut trouver des exemples facilement abordables à un premier niveau d'enseignement (diagramme de rayonnement des sources sonores). À un deuxième niveau, on peut s'intéresser à la structure de l'onde résultant de la superposition de deux ondes cohérentes : la surface d'onde est de forme elliptique et l'amplitude est modulée (franges hyperboliques d'amplitude maximale ou nulle). À un troisième niveau, on peut étudier la structure de l'onde émise par un dipôle électromagnétique oscillant grâce à un modèle ondulatoire vectoriel. De plus, il est souhaitable de proposer aux élèves et aux étudiants des exercices mettant l'accent sur le fait qu'une surface d'onde n'est pas un objet matériel indéformable à considérer en « bloc ». Des questions portant sur la construction graphique d'une surface d'onde dans une situation donnée (propagation dans un milieu inhomogène ou non, propagation d'une onde créée par une source étendue, réflexion, transmission) peuvent être proposées. Par ailleurs, pour lutter contre la tendance à suivre une forme en mouvement et à se focaliser sur un seul niveau, il est souhaitable de proposer des exercices centrés sur le principe de Huygens. Permettant de faire un lien, de manière qualitative et graphique, entre le niveau des ondes élémentaires et le niveau macroscopique, il pourrait aider les étudiants à prendre conscience de l'existence de deux niveaux d'analyse, l'impact visuel de la mise en regard des schémas portant sur chaque niveau n'étant pas à sous-estimer. L'étude qualitative et graphique portant sur la surface d'onde et le principe de Huygens pourrait s'appuyer sur l'outil informatique car, facile d'emploi, il permet de mettre rapidement en évidence les conséquences d'un changement de paramètre (vitesse de propagation, forme de la source étendue, direction de l'onde incidente, forme d'une surface réfléchissante, etc.)

BIBLIOGRAPHIE

- ABBOUD R. (1989). *Difficultés de l'enseignement dans deux domaines de la physique : le phénomène d'induction électromagnétique et la propagation d'ondes mécaniques*. Thèse, Université Paris 7.
- AMBROSE B.S., SHAFFER P.S., STEINBERG R.N. & Mc DERMOTT L.C. (1999). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double slit-interference. *American Journal of Physics*, vol. 67, n° 2, pp. 146-155.
- BORN M. & WOLF E. (1980). *Principles of Optics*. New York, Pergamon Press.
- BRAMAND P., FAYE P. & THOMASSIER G. (1982). *Physique, première S*. Paris, Hachette.
- CHARLOT R., GOUGEON J. & WALTER C. (1980). *Fondements de la physique, Terminale C*. Paris, Belin.
- COLIN P. (1999). *Deux modèles dans une situation de physique : le cas de l'optique. Difficultés des étudiants, points de vue des enseignants et propositions pour structurer des séquences d'enseignement*. Thèse, Université Denis Diderot Paris 7.
- COLMEZ F. & MOREAU R. (1975). *Propagation dans un milieu à une dimension*. Document de travail de la commission Lagarrigue.
- FAWAZ A. & VIENNOT L. (1986). Image optique et vision. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 686, pp. 1125-1146.
- GALILI I. (1996). Students' conceptual change in geometrical optics. *International Journal of Science Education*, vol. 18, n° 7, pp. 847-868.
- GOLDBERG F.M. & Mc DERMOTT L.C. (1987). An investigation of students understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. *American Journal of Physics*, vol. 55., n° 2, pp. 108-119.
- HULIN M. (1975). Propagation d'un signal dans un milieu linéaire. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 574, pp. 949-956.
- JESSEL M. (1973). *Acoustique théorique Propagation et Holophonie*. Paris, Masson.
- KAMINSKI W. (1989). Conceptions des enfants et des autres sur la lumière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 973-996.
- LEFÈVRE R. (1988). *Contribution à l'étude des conceptions des étudiants 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). Mécanique spontanée du son, Actes du deuxième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques, Sète 1992. *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. Kaminsky (Coord.), *Actes du cinquième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques*. Reims, IUFM de Reims et Université de Reims-Champagne-Ardennes, pp. 107-123.
- MAURINES L. (1997). Students and the wave geometrical model of the propagation of waves in a three dimensional medium. In M. Bandiera, S. Caravita, E. Torraca & M. Vicentini (Coord.), « *Research in science education in Europe* », *Sélection des actes de la première conférence internationale de l'association européenne de recherche en sciences de l'éducation (ESERA), Rome, 1997*. Dordrecht, Kluwer, pp. 103-112.

- MAURINES L. (2000). Les étudiants, la diffraction de Fraunhofer et la formation des images en éclairage cohérent. *Didaskalia*, vol. 17, pp. 55-99.
- QUEYREL J.-L. & MESPLÈDE J. (1996). *Précis de Physique, Optique. Deuxième année.* Paris, Bréal.
- ROSSI M. (1986). *Électroacoustique.* Paris, Dunod.
- SOUM G., DENIZART M. & JAGUT R. (1995). *Optique*, tome 1. Paris, Hachette.
- TOMASINO A. & PENIGAUD A. (1993). *Physique, seconde.* Paris, Nathan.
- VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en physique.* Paris, De Boeck.
- WATT D. & RUSSELL T. (1990). *Sound. Primary SPACE Project Research Report.* Liverpool, Liverpool University Press.
- WITTMANN M., STEINBERG R.N. & REDISCH E.F. (1999). Making sense of how students make sense of mechanical waves. *The physics teacher*, n° 37, pp. 15-21.

Cet article a été reçu le 20 juillet 1998 et accepté le 29 août 2002.