
Bulletin de l'Union des Physiciens

Association des professeurs de Physique et de Chimie

Les élèves et la propagation des signaux sonores

par L. MAURINES
LDPES - Université Paris VII
Case 7021 - 2, place Jussieu - 75251 Paris Cedex 05

RÉSUMÉ

Les conceptions d'élèves sur la propagation d'un signal sonore sont dégagées et analysées. Comme dans le cas de la propagation d'un signal sur une corde, le signal est assimilé à un objet créé et mis en mouvement par la source, le milieu étant un support passif voire inutile. Le caractère mécaniste de ces conceptions s'accompagne d'une tendance à amalgamer en une seule notion différentes grandeurs physiques. Quelques implications pédagogiques sont présentées.

INTRODUCTION

Cet article présente les résultats d'une recherche portant sur les raisonnements spontanés en acoustique. Elle vise à dégager les difficultés des élèves, à analyser les modes de raisonnements les plus fréquents afin d'en proposer une description organisée et prédictive, à favoriser une réflexion sur les objectifs pédagogiques à poursuivre et sur les méthodes à utiliser pour les atteindre.

Elle fait suite à une recherche sur les difficultés soulevées par la propagation d'un signal sur une corde [1, 2, 3] et cherche à savoir si les raisonnements de type mécaniste et monotonien à l'origine de ces difficultés se manifestent aussi pour des signaux sonores, c'est-à-dire pour des signaux non visibles et se propageant avec une vitesse plus élevée.

La recherche sur la propagation d'un signal sur une corde a guidé celle sur la propagation des signaux sonores tant au niveau de l'élaboration des questionnaires (une dizaine environ) que de l'interprétation des résultats. Des éléments de réponses ont été apportés aux problèmes suivants : pour les élèves,

- un milieu matériel est-il nécessaire à la propagation d'un son, si oui celui-ci peut-il se propager dans un solide, un liquide, un gaz ?
- de quoi dépendent la vitesse de propagation V et la durée T d'un signal sonore ?
- un signal sonore a-t-il une étendue spatiale, en particulier une longueur L , si oui de quoi dépend-elle et comment est-il localisé à un instant donné ?

Nous allons montrer que comme dans le cas du signal sur la corde, les élèves décrivent et expliquent la propagation du son comme si celui-ci était un objet matériel créé et mis en mouvement par la source, le milieu n'étant qu'un support passif voire dans ce cas inutile, que leurs réponses peuvent s'interpréter comme s'appuyant sur une seule notion, celle de CAPITAL. Les raisonnements dégagés ne sont que des tendances d'ensemble et non ceux d'un élève particulier. Ils se manifestent à des degrés divers après enseignement.

La population interrogée est de l'ordre de cinq cent cinquante élèves avant enseignement sur les ondes (classes de troisième, seconde, première scientifique *programme 1988*) et de cent cinquante après (classes de première et terminale scientifique *programme 1988 et 1989*, deux premières années d'université scientifique). L'énoncé des questionnaires est donné dans les annexes. Les pourcentages des différentes réponses sont calculés sur le nombre d'élèves interrogés, accompagnés de E_0 , E_1 , selon le type de population interrogée (E_0 avant enseignement, E_1 après enseignement).

MÉCANIQUE SPONTANÉE DU SON

1. VITESSE DU SON DANS L'AIR

Dans un milieu matériel homogène, isotrope, non dissipatif, à trois dimensions, un signal sonore émis par une source ponctuelle se propage radialement, quelle que soit son amplitude initiale, à la même vitesse dans chaque direction. Le signal s'atténue lors de la propagation mais garde la même vitesse, caractéristique du milieu. L'air peut être

considéré comme un tel milieu pour les fréquences audibles. Les questionnaires des encadrés 1 à 3 montrent que pour les élèves ce n'est pas le cas.

• Vitesse du son et source

La première question du questionnaire de l'encadré 1 porte sur la comparaison des vitesses de deux signaux sonores émis par des sources d'amplitudes différentes.

Beaucoup des élèves interrogés (E_0 , 40 %, $N = 62$; E_1 , 21 %, $N = 34$) répondent que l'auditeur ne commence pas à entendre les sons émis par les deux sources au même instant : la source de plus grande amplitude sonore est entendue en premier. Les justifications explicitent le **lien entre l'amplitude sonore et la vitesse de propagation** (92 % des réponses justifiées pour la population E_0), certaines d'entre elles indiquant que **le son est considéré comme une balle que l'on lance** :

«elle entend Pierre en premier car il chante plus fort»

«elle entend Pierre en premier car le son étant plus élevé est projeté plus vite»

«C'est Pierre qu'elle va entendre en premier car comme il chante plus fort le son arrive plus vite à son pavillon»

• Vitesse du son et amplitude du son

L'assimilation du signal à un objet et la liaison entre l'amplitude et la vitesse de propagation apparaît de nouveau sur les résultats obtenus aux deux premières questions du questionnaire de l'encadré 2. Celui-ci porte sur la comparaison de deux sons émis par des sources identiques, l'un se propageant à l'air libre, l'autre étant guidé par un tube (quand une onde sonore, se propageant à l'air libre à la vitesse c et de longueur d'onde λ , est guidée par un tube cylindrique de diamètre d , différents modes de propagation peuvent exister. Chaque mode, sauf le fondamental, se propage avec une vitesse de propagation différente de c mais toujours inférieure. Si le diamètre du tube est suffisamment petit devant la longueur d'onde, l'onde sonore se propage sans atténuation selon le mode fondamental [4]).

A la première question portant sur l'intensité sonore, 89 % des élèves interrogés (E_0 , $N = 28$) répondent à juste titre que le son guidé est plus fort. 92 % d'entre eux justifient leur réponse. Si la plupart des élèves invoquent le fait que le son est «coincé» (72 % d'apparition), un nombre significatif d'entre eux pensent que dans le tube le son n'est pas gêné comme à l'air libre par **des obstacles**, une **résistance...** (28 % d'apparition), qu'il n'y a pas de **perte** (20 %).

A la deuxième question portant sur la vitesse de propagation, 79 % des élèves (E_0 , $N = 28$) répondent que le son guidé par le tube n'est pas entendu au bout du même inter-

valle de temps que le son se propageant à l'air libre. 68 % d'entre eux (c'est-à-dire 54 % sur la population totale) pensent que la vitesse du son guidé est plus grande. Le point important est que les justifications accompagnant cette réponse sont de même nature que celles données pour l'intensité et qu'une corrélation entre les réponses obtenues aux deux questions fait apparaître un lien privilégié du type «**la vitesse de propagation augmente avec l'amplitude sonore**» (43 % de réponses) :

«Jean reçoit plus de "son". Il l'entend plus tôt car le son lui parvient un peu plus tôt grâce au tube qui accompagne directement les ondes évitant ainsi les pertes»

«l'intensité du son n'est pas la même, elle est plus grande, car dans cette situation rien ne perturbe la propagation du son, puisque le son est isolé. Jean commence à entendre Pierre plus tôt puisque rien ne freine ou perturbe le passage du son de Pierre à Jean»

• *Vitesse du son et propagation*

Le lien entre l'amplitude sonore et la vitesse de propagation apparaît également sur les résultats obtenus à un questionnaire portant sur ce qui est entendu lors de la propagation d'un signal en deux points de l'espace situés à des distances différentes de la source (encadré 3).

A la première question, une majorité d'élèves (E_0 , 80 %, $N = 25$; E_1 , 97 %, $N = 34$) répondent que le son n'est pas entendu au même instant par les deux observateurs et montrent ainsi que **le son se propage avec une vitesse finie**.

A la deuxième question, les durées de propagation sur deux parcours de même longueur ne sont pas identiques (E_0 , 32 %, $N = 25$; E_1 , 15 %, $N = 34$). Certaines justifications font clairement apparaître que **la vitesse et l'amplitude du son diminuent au cours du temps** :

«car le son s'atténue de plus en plus et va donc plus lentement comme un séisme»

«le son ralentit et donc il ne mettra pas autant de temps pour aller de M à J que de P à M»

Les résultats précédents rappellent ceux obtenus pour la corde : pour les élèves, la vitesse de propagation dépend de la source et de l'amplitude du signal, peut diminuer au cours du temps. De plus, tout semble se passer comme si la source communiquait quelque chose au milieu lors de la création du signal et que le «signal-objet», ici le «corpuscule sonore», le matérialisait. Ce quelque chose, que nous avons appelé CAPITAL est en fait un mélange de force, d'énergie, d'intensité, de vitesse, d'amplitude... et est l'unique support du raisonnement des élèves. Ce capital détermine l'amplitude et la vitesse du son, peut se modifier au cours de la propagation (par exemple si le milieu est à trois dimensions) ou rester constant (par exemple dans un tube). En se modifiant, il

entraîne la variation simultanée des grandeurs qu'il amalgame, notamment de l'amplitude et de la vitesse du son.

2. RÔLE DU MILIEU

Dans le contexte que nous venons de décrire, le milieu ne semble avoir, comme dans le cas de la corde, qu'un rôle limité : celui de support passif. En effet, la propagation du signal ne résulte pas d'une interaction entre un point du milieu et ses voisins par l'intermédiaire du champ interne de forces élastiques mais du capital stocké dans le corpuscule. Nous allons montrer que dans le cas du son, le milieu n'est pas utile à la propagation mais qu'il est plutôt perçu comme un obstacle, qu'un déplacement de matière à grande échelle peut accompagner la propagation du son dans un milieu fluide.

Le questionnaire de l'encadré 4 demande de comparer la propagation d'un son émis par des sources identiques dans des «milieux» différents : un gaz (l'air), un liquide (eau), un solide (acier) et le vide.

Analysons les résultats obtenus avant enseignement. Beaucoup de ces élèves (E_0 , 44 %, $N = 108$) pensent qu'**un son peut se propager dans le vide**. La propagation est par contre **impossible** pour un nombre significatif d'entre eux (22 %) dans un liquide et, pour un nombre encore plus élevé (61 %), **dans un solide**. Les résultats ainsi que les justifications données renvoient bien à l'idée de signal-objet et indiquent que plus le milieu est dense, plus il gêne la propagation :

«oui pour le vide : le son ne rencontre aucune opposition»

«oui, sauf l'acier plein parce que le son ne pourra pas traverser le tube plein pour être enregistré, et l'eau»

«oui pour l'air, le vide, ... car il n'y a pas la présence d'isolant comme l'eau dans le tube 3»

«sauf acier, car c'est un métal compact qui ne laisse passer ni l'air ni l'eau donc les sons ne pourront passer»

Les réponses obtenues à la question sur les vitesses de propagation confirment que la propagation est d'autant plus difficile que le milieu est dense. Bien que 76 % des élèves avant enseignement pensent que la vitesse de propagation du son dépend du milieu, le classement donné ne correspond pas à la réalité. **Un son se propage plus vite dans le vide que dans l'eau ou l'acier, comme si c'était un objet matériel :**

«cela dépend du tube. Le son mettra plus de temps dans l'acier que dans le tube où le vide a été fait»

Bien que le nombre de réponses du type «le son se propage dans l'eau» soit élevé (E_0 , 73 %, $N = 108$), il ne signifie pas que les élèves conçoivent ce milieu comme support de la propagation d'une énergie. Des justifications semblent indiquer que **l'eau peut se déplacer dans son ensemble** (ceci peut être rapproché de ce qui avait été mis en évidence [3] pour un autre type de signal se propageant également dans un milieu fluide : les rides à la surface de l'eau. Pour les élèves, quand elles se propagent l'eau se déplace et entraîne avec elle des bouchons posés sur sa surface) :

«air : oui, c'est comme un souffle

eau : oui, car lorsque l'eau bouge ça s'entend

acier : non, parce que l'acier ne fait pas de bruit, reste immobile

vide : non, il n'y a rien»

D'autres justifications montrent que la propagation est possible car le milieu contient un gaz (air ou oxygène). Elles correspondent peut-être elles aussi à un transport de matière à grande échelle, le gaz se déplaçant avec le son :

«air : oui, l'air conduit le son jusqu'au microphone

eau : oui, il y a de l'oxygène dans l'eau

vide : non, il n'y a pas d'air pour conduire le son

acier : oui, l'air conduit le son»

«sauf acier, car c'est un métal compact qui ne laisse passer ni l'air ni l'eau donc les sons ne pourront passer»

Les résultats obtenus auprès des élèves ayant reçu un enseignement révèlent encore l'existence de difficultés.

Tout d'abord, en ce qui concerne la propagation dans un solide, 35 % d'entre eux (E_1 , $N = 34$) pensent qu'elle est impossible. Certaines justifications données à ce niveau portent **sur l'échelle microscopique**. Elles font intervenir les molécules du milieu et le fait que pour les élèves dans un solide les molécules sont fixes :

«acier et vide : aucun son est enregistré. Le son se propage uniquement dans des milieux où il y a des molécules mobiles. Dans le vide, il n'y a pas de molécules et dans l'acier les molécules sont fixes»

Sur d'autres justifications, il semble qu'il puisse y avoir des vibrations mais que soit, celles-ci restent localisées à la surface du solide et ne se propagent pas à l'intérieur, soit ne correspondent pas à un son :

«acier : pas d'enregistrement, le son ne peut pas traverser le métal mais on peut voir des vibrations»

«le son ne se propage pas dans l'acier mais lorsqu'on tape sur une barre de fer à un étage, le choc est ressenti tout le long»

En ce qui concerne la propagation dans l'eau, si toutes les réponses brutes sont correctes, certaines justifications sont du même type que celles données avant enseignement : elles évoquent le fait que le son est accompagné par un déplacement de matière à grande échelle, que ce soit par l'eau elle-même ou par des molécules d'air qu'elle contient :

*«vide : non, car il n'y a pas de courant pour transporter le son jusqu'au microphone
acier : non, le son ne peut traverser l'acier
eau : l'enregistrement est possible car le courant et l'air qu'elle contient amène le son jusqu'au microphone»*

La dernière difficulté concerne la comparaison des vitesses de propagation. 44 % des élèves (E_1 , $N = 34$) donnent un classement faux. Les justifications portent de nouveau sur l'échelle microscopique : elles mentionnent les molécules du milieu mais ne tiennent compte que d'un paramètre à la fois, leur nombre, leur mobilité... :

«la vitesse de propagation dépend du milieu. Elle est freiné par les collisions avec les molécules plus ou moins nombreuses du milieu : eau, air, vide (ordre croissant donné pour les vitesses)»

«non, les molécules d'air sont beaucoup plus souples que celles de l'eau. Le son se déplacera beaucoup plus facilement dans l'air que dans l'eau»

3. DURÉE D'AUDITION EN UN POINT DE L'ESPACE

Dans un milieu non dispersif un signal se propage en gardant une durée constante, égale à celle de la source, que ce soit dans un milieu à une dimension où l'amplitude reste constante ou dans un milieu à trois dimensions où l'amplitude diminue. Rappelons qu'il en est de même pour un milieu à une dimension légèrement dissipatif dans lequel le signal se propage en diminuant d'amplitude mais en gardant une longueur constante.

Un raisonnement en terme de capital, celui-ci conditionnant à la fois l'existence et le déplacement du son, conduit à une interdépendance entre la vitesse de propagation et ce qui est entendu en un point de l'espace, c'est-à-dire à des liens entre les trois grandeurs V , H , T . Ainsi nous venons de voir que les élèves peuvent déduire la vitesse du son de l'amplitude sonore. Nous allons montrer que dans d'autres situations, ils relient la durée sonore à l'amplitude sonore ou au milieu de propagation.

Le lien entre l'amplitude H et la durée T d'un signal apparaît dans les réponses à la dernière question des questionnaires présentés dans les encadrés 1 à 3 : 52 % des répon-

ses en moyenne pour la population E_0 ($N = 115$) et 31 % pour la population E_1 ($N = 68$). Les justifications montrent que le lien majoritaire est du type «**T augmente avec H**». Comme dans les réponses portant sur la vitesse de propagation, les justifications évoquent «l'éparpillement» du son, «l'épuisement» du son. En voici quelques-unes obtenues au questionnaire de l'encadré 3 :

Marie entend plus longtemps car :

- «le son s'atténue et devient plus court»
- «elle est la deuxième et le son est tout frais»
- «le son ralentit. Quand Jean le recevra, tout ne sera pas entendu»
- «le son est éparpillé. Il y a plus de molécules d'air mis en mouvement au départ»

Une analyse poussée de la nature des justifications et de leur répartition ne peut être faite. Plusieurs questions méritent d'être approfondies, entre autres : le lien entre H et T ne serait-il pas induit par la perception de l'oreille ? que signifient les termes «résonance», «écho», rencontrés sur certaines justifications («Il y a une résonance qui fait durer la voix de Pierre plus longtemps») ? A quels phénomènes correspondent-ils exactement ?

Le lien entre la durée T et le milieu apparaît dans les réponses à la dernière question du questionnaire sur les quatre tubes présentés dans l'encadré 4 (E_0 , 54 %, $N = 108$; E_1 , 38 %, $N = 34$). Certaines justifications montrent clairement, comme c'était déjà le cas pour la propagation d'un signal sur une corde, que les durées d'observation d'un signal en un point donné de l'espace sont confondues avec les durées de propagation d'un point du signal d'un point de l'espace à un autre :

« $t = d/c$, la vitesse dépend du milieu. La distance est constante (tubes de même longueur). Les durées d'enregistrement seront donc différentes. Plus c est grand, plus t est petit, aussi l'ordre est acier, eau, air»

D'autres suggèrent que les élèves se focalisent sur l'atténuation du signal : plus le milieu est dense, plus l'atténuation est grande et plus la durée d'observation est petite :

«les microphones n'enregistrent pas pendant la même durée. Selon le milieu, l'onde est soumise à une résistance plus ou moins grande et est atténuée»

4. ÉTENDUE SPATIALE D'UN SIGNAL SONORE À UN INSTANT DONNÉ

Le questionnaire de l'encadré 5 cherche à savoir si pour les élèves un signal sonore a une étendue spatiale et comment ils relient la longueur du signal à sa durée et à la vitesse de propagation. Il demande si des magnétophones placés sur une route rectiligne à des distances différentes de la source peuvent enregistrer un son au même instant lors de la propagation dans l'air d'un son de durée déterminée. Il comporte deux questions

supplémentaires dans lesquelles soit la durée du signal, soit la vitesse de propagation (le son se propage dans l'eau et non dans l'air) est modifiée.

La question lors d'une première passation ayant été comprise par certains élèves comme «y a-t-il plusieurs magnétophones qui enregistrent le **même** son au même instant ?», le questionnaire a été repassé [5] en supprimant le mot «son». Les résultats étant proches dans les deux passations ont été regroupés. Pour répondre au questionnaire, il faut comparer la longueur du signal (donnée par la relation $L = VT$) à la distance entre deux magnétophones successifs.

Examinons tout d'abord les résultats à la première question obtenus avant enseignement. 47 % des élèves (E_0 , $N = 64$) répondent que deux magnétophones ne peuvent enregistrer au même instant. Les justifications à ces réponses montrent que les **élèves assimilent le signal à un point**, phénomène déjà mis en évidence pour le signal sur la corde lorsqu'il s'agit de le positionner à un instant précis :

«non, puisque les magnétophones sont séparés par une distance. Ils enregistrent un son mais pas au même instant»

«n'enregistrent pas le son au même instant car le son se propage. M_1 enregistre avant M_2 »

47 % des élèves répondent que plusieurs magnétophones peuvent enregistrer au même instant. La plupart d'entre eux (38 % sur l'ensemble) mentionne l'étendue du son et lui attribue une longueur exacte.

La plupart des élèves sont cohérents dans leurs réponses aux trois questions. La **dépendance L-V semble poser comme dans le cas de la corde plus de problèmes que la dépendance L-T** : le nombre de réponses correctes diminue de la première à la troisième question (38 %, 30 %, 23 %) et le nombre de non réponses (6 %, 20 %, 31 %) augmente.

Les résultats obtenus auprès des élèves après enseignement montrent une nette amélioration (61 % de réponses correctes en moyenne sur les trois questions, $N = 49$). D'autres questions par comparaison de situations (telles la première et la troisième de ce questionnaire) seraient nécessaires pour savoir si la grandeur physique qui est conservée lors de la transmission d'un son d'un milieu à un autre est pour les élèves, comme dans le cas de la corde, la longueur du signal et non sa durée.

5. CINÉMATIQUE DU SIGNAL SONORE

La description spatio-temporelle du signal, qu'il soit sonore ou se propageant sur une corde, est une cinématique de forme étendue analogue à la cinématique de la translation rectiligne à vitesse constante d'un solide. Nous allons voir dans ce qui suit que les difficultés de cette cinématique, elles aussi liées au caractère réducteur du raisonnement spontané et déjà mises en évidence pour la propagation d'un signal sur une corde, se manifestent aussi pour le son.

Le questionnaire de l'encadré 5 a été posé aux mêmes élèves sous une autre forme : celle-ci demande quels sont les magnétophones qui enregistrent à un instant de valeur numérique donnée, ici quatre secondes. Pour répondre à cette deuxième formulation du questionnaire, les élèves doivent localiser le signal à cet instant. Pour cela ils doivent calculer soit la position du front et celle de la queue du signal, soit la position du front et la longueur du signal. Examinons tout d'abord les résultats obtenus avant enseignement ($N = 64$) à la première question :

– Comme pour la formulation précédente mais en nombre plus faible (20 % au lieu de 47 %), et comme dans le cas de la corde, on retrouve des élèves qui assimilent le signal à un point en ne considérant que le front du signal :

«en quatre secondes, le son a parcouru $4 \times 340 = 1360$ m aucun magnétophone car il n'y a pas de magnétophone à 1360 m du HP»

– Bien que pour une majorité d'élèves le signal soit étendu, le nombre de réponses correctes quant au positionnement et à la longueur du signal est faible (22 %). **Les réponses incorrectes «signal étendu» obtenues en plus grand nombre qu'au questionnaire précédent correspondent ici à des élèves n'explicitant pas la longueur du signal.** Ils calculent la position d'un point du signal en utilisant la relation $x = Vt$ et localisent le signal le plus souvent derrière ce point sur une distance indéterminée, mais aussi parfois devant ou de part et d'autre :

« M_1 et M_2 enregistrent. Les magnétophones sont distants de 500 m l'un de l'autre, et la vitesse du son est de 340 m/s. En quatre secondes l'émission n'aura parcouru que 1360 m, elle ne sera pas encore arrivée en M_3 »

Ces élèves ont du mal à considérer le signal comme un ensemble de points distincts dont le mouvement est décrit pour chacun d'entre eux par une équation du type $x - x_0 = V(t - t_0)$. On retrouve souvent d'autres erreurs déjà mises en évidence pour la propagation d'un signal sur une corde :

– confusion entre la représentation temporelle et la représentation spatiale conduisant à une inversion de la position du front et de la queue. Il est à noter que c'est elle qui explique les erreurs de lecture sur l'oscilloscope ;

- prise en compte pour positionner le front du signal non pas de l'instant t donné mais de l'instant $t + T$ comme si le signal ne commençait à se propager qu'une fois entièrement formé ;
- confusion entre instant de représentation t et durée du signal T ...

«tous les 500 m sont situés un micro et un magnétophone. Le son parcourt 340 m/s il parcourt donc en quatre secondes quatre fois plus soit 1360 m/s or à cette distance seul M_3 et M_4 détectent encore le son après l'émission»

«quatre secondes après le début, le son se trouve à 1360 m du point de départ, donc entre M_2 et M_3 , le son est audible durant 680 m ($1360 \times 0,5$) donc M_2 et M_3 détectent tous les deux un son»

On constate comme à la formulation précédente de ce questionnaire une plus grande déstabilisation des élèves à la question portant sur la vitesse de propagation (le nombre de non réponses augmente de la première à la dernière question). Bien que les résultats soient meilleurs après enseignement (41 % de réponses correspondant à un signal bien positionné), le nombre de réponses incorrectes reste encore élevé.

6. PÉRIODE DE FORMATION DU SIGNAL SONORE

La recherche sur la corde [1] a montré que les élèves, même à un niveau élevé d'enseignement, ont des difficultés à comprendre que le signal n'est pas formé instantanément ou qu'il commence à se propager dès la création du front. Certaines justifications à des questions sur la position du signal sonore à un instant donné ou sur sa durée laissent penser qu'il en est de même pour le son :

«le haut-parleur émet le son pendant 0,5 s donc au bout de 4 s plus un seul magnétophone capte le son»

«quatre secondes après le début de l'émission, c'est le premier magnétophone qui détecte le son. Les autres ne perçoivent que l'écho» (réponses obtenues au questionnaire de l'encadré 5)

Le questionnaire de l'encadré 6 a été construit dans le but d'explorer ce point. Il demande s'il est possible d'entendre un son après qu'une source sonore a fini d'émettre. Le nombre de non réponses avant enseignement est relativement élevé (E_0 , 23 %, $N = 30$) et indique une certaine déstabilisation des élèves. 37 % des élèves pensent qu'il n'est pas possible d'entendre le son après l'arrêt de l'émission :

«non pourquoi entendrait-il encore les cloches alors qu'elles ne sonnent plus ?»

Bien que ce type de réponses peut aussi indiquer une difficulté liée au choix de l'origine spatio-temporelle et une confusion entre instant d'audition t et durée d'audition

T, on peut se demander si pour ces élèves le son n'est pas partout instantanément dès l'émission du son. C'est ce qu'explique la justification suivante :

«non car la distance ne va pas plus ou moins retarder le son des cloches mais par contre la distance peut agir sur la puissance du son. S'il est loin, il les entendra moins fort mais pas après»

Ce type de réponses est à rapprocher des descriptions données par les élèves pour la propagation d'un ébranlement longitudinal sur un ressort [3] : 32 % d'entre eux ($N = 71$, E_0) disent que toutes les spires du ressort bougent en même temps et 43 % décrivent une perturbation étendue à tout le ressort et se modifiant sur place.

Comme dans les réponses aux questions sur les durées d'audition du son en un point donné de l'espace, on retrouve l'utilisation des mots «écho »et «résonance». Pour ces élèves, le son ne peut être entendu que si ces phénomènes se produisent (20 % d'apparition, E_0 , $N = 30$), aucune idée de propagation n'apparaissant sur leurs justifications. Ainsi, le terme «écho» peut être :

– utilisé alors qu'il n'y a aucun obstacle à la propagation du son. Une réverbération pourrait exister à l'air libre pour certains élèves :

«mais il peut y avoir un effet d'écho surtout s'il habite la campagne»

– mis sur le même plan que le vent. Ils pousseraient tout deux un son qui serait instantanément partout ou tout au moins sur une certaine distance autour de la source :

«oui : s'il habite à la montagne car il y a de l'écho. Tandis que s'il habite en plaine, le son ne pourra se propager à travers les blés que s'il y a du vent»

Alors que le questionnaire de l'encadré 3 montre que la propagation non instantanée du son ne semble pas poser de problème avant enseignement, celui de l'encadré 6 montre que c'est un point délicat lorsque l'accent est mis sur la durée du son et la période de formation. Bien que ce problème semble résolu après enseignement (94 % de réponses correctes, $N = 34$), il existe encore 18 % d'élèves qui mentionnent un écho.

CONCLUSION

Le modèle de raisonnement mécaniste et monotonionnel dégagé pour le signal sur la corde permet de donner un sens aux réponses des élèves en acoustique. Il a trouvé confirmation lors de plusieurs mémoires professionnels de deuxième année d'IUFM pour lesquels il a servi de point de départ. Certaines des questions présentées ici ont été passées avant enseignement sur le son à des élèves de seconde et fournissent des résultats similaires. D'autres [6] non exploitées ont été reprises, notamment une sur la température du milieu gazeux : la réponse majoritaire indique que la température n'influe

pas sur la vitesse de propagation (E_0 , 44 %, $N = 34$) [7]. Cette réponse a priori étonnante montre que les élèves avant enseignement ne s'intéressent pas aux molécules du milieu et à leurs interactions mais se focalisent sur le signal en le considérant globalement et en assimilant le milieu à un support passif. Bien que 27 % des réponses indiquent un lien entre la température et la vitesse de propagation, on retrouve sur la plupart des justifications l'importance des obstacles rencontrés par le corpuscule sonore :

«l'air chaud se dilate, il y a moins d'obstacle»

Une autre question [6] non reprise mériterait d'être approfondie, celle d'une liaison éventuelle entre la vitesse de propagation et la pression d'un gaz. On pourrait s'attendre à un lien du type «quand P augmente, V diminue», une plus grande pression correspondant à un plus grand nombre d'obstacles.

Des questions s'inspirant de celles présentées ici et portant sur la perception sonore d'un son grave et d'un son aigu montrent que si 47 % des élèves (E_0 , $N = 34$) [7] ne font aucune différence entre eux, 32 % lient la hauteur et l'intensité sonore. Ce dernier point ainsi que la liaison entre l'intensité sonore et la vitesse de propagation permet de rendre compte de la plupart des liaisons entre la vitesse de propagation et la hauteur du son (41 %, $N = 34$ [7] ; 78 %, $N = 59$ [8]) : plus le son est aigu, plus l'intensité et la vitesse du son sont grandes. Aux différentes grandeurs physiques (force, énergie, amplitude, intensité, vitesse...) que les élèves amalgament en utilisant un raisonnement mononotionnel, il faut ajouter la hauteur sonore.

Il est à noter que les problèmes rencontrés par les élèves aujourd'hui sont ceux que nos prédécesseurs ont eu à surmonter. C'est ainsi que Lasos d'Hermione et Hippase de Métaponte (VI^e et V^e siècles) avaient établi un rapport entre la hauteur du son et sa vitesse de propagation. Au XVIII^e siècle, Gassendi a montré que la vitesse du son ne dépend pas de son amplitude. A la même époque Nollet a prouvé que l'eau conduit le son et que la vitesse de propagation ne dépend pas de la fréquence.

Les tendances vers un raisonnement mononotionnel en terme d'objet dégagées ici se rencontrent non seulement chez de jeunes enfants mais aussi chez de futurs enseignants scientifiques, que ce soit en France ou à l'étranger :

– D. Watt et D. Russel [9] ont noté que «la transmission du son n'est pas une idée qui est exprimé par beaucoup de jeunes enfants (sept à dix ans)... Lorsqu'un déplacement du son est mentionné, il y a l'idée que le son a besoin d'un chemin libre pour avancer».

– C. Linder et G. Erickson [10, 11] ont étudié les représentations du son mises en jeu par des étudiants licenciés de physique et suivant une préparation à l'enseignement. Quatre types de conceptions apparaissent. Une seule d'entre elles correspond à une propagation, c'est-à-dire à une interaction entre une molécule et ses voisines. Les trois au-

tres sont compatibles avec l'assimilation d'un son à un objet matériel, quelle que soit la description utilisée (microscopique ou macroscopique) et la façon dont le milieu bouge.

– V. Dumet [12] a interrogé dix étudiants ayant une formation scientifique (physique, chimie, sciences naturelles) et pour la moitié d'entre eux préparant le capes de sciences physiques. Des erreurs identiques à celles faites par des élèves n'ayant reçu aucun enseignement sur les ondes ont été commises : propagation dans le vide, propagation grâce à l'oxygène de l'atmosphère, fréquence dépendant du milieu...

Nous venons de voir que les tendances vers un raisonnement mécaniste et monotonnel sont très résistantes à l'enseignement. Elles le sont d'autant plus que comme nous allons le signaler sur quelques points celui-ci le remet peu en question. Une meilleure connaissance de la nature des obstacles sur lesquels butent les élèves doit permettre de faire des choix pédagogiques plus adaptés, que ce soit en ce qui concerne les objectifs à atteindre que les méthodes à utiliser. Nombre des suggestions faites pour la corde [1] pourraient être reconduites pour le son :

– Bien que l'étude de la description spatio-temporelle d'un son ne soit pas explicitement au programme de seconde, les élèves y sont confrontés dans les expériences de mesure de la vitesse du son. En effet, ils sont amenés à exploiter des descriptions temporelles de signaux non ponctuels par l'utilisation de l'oscilloscope ou de l'ordinateur et à faire des mesures de distance entre deux points de l'espace. On pourrait les préparer à différencier la description temporelle de la description spatiale et à comprendre que l'on doit prendre le même point du signal pour faire une mesure en leur proposant des exercices soulevant les mêmes difficultés mais portant sur des mouvements d'objet : train de longueur donnée, voitures ponctuelles de couleur différente partant à des intervalles de temps égaux de la ligne de départ et roulant à la même vitesse [3, 13]. Les questions porteraient sur le positionnement du train à différents instants, sur l'instant de passage de l'avant ou de l'arrière du train... et la méthode utilisée pour la résolution laisserait une grande place aux deux types de description et de représentation graphique. L'introduction de ces exercices aurait de plus l'avantage de montrer que la cinématique d'une forme étendue n'est pas le propre d'un signal ou d'une onde.

– Il est manifestement insuffisant d'affirmer aux élèves que la vitesse de propagation dans les milieux étudiés est constante sans préciser les paramètres dont cette vitesse dépend et NE DÉPEND PAS. Il est en revanche possible de leur apprendre à éliminer les paramètres non pertinents auxquels ils ont pensé. Pour ce faire, des questions qualitatives telles celles élaborées au cours de cette recherche pourraient être utilisées avant tout enseignement. Elles permettraient aux élèves d'exprimer leurs idées, de susciter leur curiosité et d'introduire un débat d'où surgirait une question dont la réponse serait apportée par une expérience leur permettant de confronter leur intuition à la réalité. Cette démarche laissant une grande place à l'élève (celui-ci doit faire des prévisions,

«trouver» la manipulation, interpréter...) et basée sur des situations-problèmes peut-être mise à profit pour les expériences traditionnellement utilisées.

– Une analyse des manuels scolaires révèle que la majorité des exercices sont numériques et basés sur l'utilisation d'une relation du type «distance = vitesse \times temps». Des questions mettant l'accent sur les difficultés mises en évidence et de préférence qualitatives pourraient venir les enrichir : on pourrait par exemple conclure l'exercice en demandant ce que deviendrait la vitesse de propagation si le son était plus fort, plus aigu...

– Terminons ces quelques suggestions en rappelant que l'enquête exploratoire de ces recherches sur les signaux [3] a révélé qu'une comparaison explicite par ressemblances et différences entre le mouvement d'un solide et la propagation d'un signal peut aider les élèves à mieux appréhender ce qui caractérise chacun. Les méthodes précédentes peuvent être utilisées à cet effet et devraient permettre aux élèves de comprendre que si la description spatio-temporelle de la propagation d'un signal est identique à la description spatio-temporelle du mouvement d'un objet, il n'en est pas de même des facteurs dont dépendent leur vitesse de déplacement.

Le travail présenté ici n'est qu'une étape de plus dans la compréhension des difficultés rencontrées par les élèves lors de l'étude de la propagation. Le raisonnement monotonique en terme d'objet d'abord dégagé pour la propagation d'un signal sur une corde ne semble pas provenir des caractéristiques visuelles de ce signal (localisé, vitesse de propagation faible si bien qu'il est suivable des yeux) puisqu'il se manifeste aussi pour un signal invisible et se propageant plus vite. Il trouve sans doute son origine dans l'expérience commune, ce qui expliquerait son apparition dans d'autres domaines de la physique (mécanique [14, 15], électricité [16], thermodynamique [17]). Ce raisonnement ayant été dégagé pour la propagation dans un milieu à une dimension, la question est à l'étude de savoir s'il se manifeste pour d'autres phénomènes (propagation dans un milieu à trois dimensions, réflexion, diffraction...) et d'autres types d'ondes (lumière).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] L. MAURINES : «*Mécanique spontanée du signal*» - BUP n° 707, pp. 1023-1041 (1988).
- [2] L. MAURINES : «*Raisonnement spontané sur la propagation des signaux : aspect fonctionnel*» - BUP n° 733, pp. 669-677 (1991)
- [3] L. MAURINES : «*Premières notions sur la propagation des signaux mécaniques : analyse des difficultés des étudiants*» - Nouvelle thèse - Paris VII (1986).
- [4] R. MOREAU : «*Propagation guidée des ondes acoustiques dans l'air*» BUP n° 742, pp. 385-398 (1992).

- [5] A. GUILLON : «*Sur quelques notions concernant le son chez des élèves de premières et terminales scientifiques*» - Mémoire de tutorat du DEA de didactique de la physique, Université Paris VII (1991).
- [6] L. MAURINES : «*Mécanique spontanée du son*» - Actes du deuxième séminaire de didactique des sciences physiques, Sète, aussi dans Trema n° 3-4, IUFM de Montpellier (1992).
- [7] N. RIVIÈRE : «*Les conceptions en acoustique*» - Mémoire professionnel de deuxième année d'IUFM, IUFM de Toulouse (1994).
- [8] J. DUGAVE et D. LAINE : «*A propos de la propagation du son*» - Mémoire professionnel de deuxième année d'IUFM, IUFM de Créteil (1994).
- [9] D. WATT and D. RUSSEL : «*Sound*» Primary space project, research report, (Liverpool university press, Great Britain), p. 53 (1990).
- [10] C. LINDER and G. ERICKSON : «*A study of tertiary students' conceptualizations of sound*», Int. J. Sci. Educ, vol 11, special issue, pp. 491-501 (1989).
- [11] C. LINDER : «*University physics students' conceptualizations of factors affecting the speed of sound propagation*» - Int. J. Sci. Educ., vol 15, n° 6, pp. 655-662 (1993).
- [12] V. DUMET : «*Conceptions des étudiants sur le son*» - Mémoire de DEA de didactique des disciplines scientifiques, Université Paul Sabatier, Toulouse (1994).
- [13] L. MAURINES et E. SALTIEL : «*Questionnaires de travail sur la propagation d'un signal*» - LDPEs, Université Paris VII.
- [14] L. VIENNOT : «*Intuition et formalisme en dynamique*» - BUP n° 587 (1976).
- [15] E. SALTIEL et J.-L. MALGRANGE : «*Les raisonnements naturels en cinématique élémentaire*» - BUP n° 616 (1980).
- [16] J.-L. CLOSSET : «*Raisonnement séquentiel en électricité*» - Actes du premier colloque international de Lalonde Les Maures, (ed. CNRS, Paris), pp. 313-319 (1984).
- [17] S. ROZIER et L. VIENNOT : «*Students' reasoning in thermodynamics*» Int. J. Sci. Educ, vol 13, n° 2, pp. 159-170 (1991).

Encadré 1

La vitesse du son dépend-elle de l'amplitude de la source ?

ÉNONCÉ DU QUESTIONNAIRE

Pierre, Marie et Jean sont alignés sur une route rectiligne dans la campagne. Pierre et Jean sont à 100 mètres de Marie.

Pierre

Marie

Jean

Pierre et Jean regardent Marie et commencent à chanter au même instant. Ils chantent tous les deux la note «la» pendant une seconde mais Pierre chante plus fort que Jean.

Question 1

Est-ce que Marie commence à entendre Pierre et Jean au même instant ?

Oui ; Pourquoi ?

Non ; Qui entend-elle en premier ? Pourquoi ?

Question 2

Est-ce que Marie entend Pierre et Jean pendant la même durée ?

Oui ; Pourquoi ?

Non ; Qui entend-elle pendant le plus longtemps ? Pourquoi ?

Encadré 2

La vitesse du son dépend-elle de l'amplitude du signal ?

ÉNONCÉ DU QUESTIONNAIRE

Pierre et Jean sont à cinq mètres l'un de l'autre. Pierre appelle Jean doucement par son prénom, si doucement que Jean l'entend à peine.

Pierre appelle de nouveau Jean de la même façon mais cette fois il le fait à travers un long tube.

Cas 1

Pierre

Jean

Cas 2

Pierre _____ Jean

Questions

Comparez ce qu'entend Jean dans les deux situations. Précisez en particulier :

- 1) si dans la situation 2, l'intensité sonore est plus grande, plus petite, identique à l'intensité sonore dans la situation 1, Pourquoi ?
- 2) si dans la situation 2, Jean commence à entendre Pierre au bout du même intervalle de temps que dans la situation 1, ou si c'est plus tôt ou plus tard ? Pourquoi ?
- 3) si dans la situation 2, Jean entend Pierre pendant la même durée que dans la situation 1 ou si c'est pendant moins longtemps ou plus longtemps ? Pourquoi ?

Encadré 3

*La vitesse du son diminue-t-elle lors de la propagation
dans un milieu à 3 dimensions ?*

ÉNONCÉ DU QUESTIONNAIRE

Pierre, Marie et Jean sont alignés sur une route rectiligne à la campagne. Pierre et Jean sont à cent mètres de Marie.

Pierre

Marie

Jean

Pierre chante pendant une seconde la note «la».

Question 1

Est-ce que Marie et Jean commencent à entendre Pierre au même instant ?

Oui, pourquoi ?

Non, qui commence à entendre le premier ? Pourquoi ?

Si vous avez répondu “non” à la question précédente, répondez aux questions suivantes :

Question 2

Le son met-il autant de temps pour aller de Pierre à Marie que pour aller de Marie à Jean ?

Oui, pourquoi ?

Non, pourquoi ?

Question 3

Est-ce que Marie et Jean entendent Pierre pendant la même durée ?

Oui, pourquoi ?

Non, quel est celui qui entend Pierre pendant la plus grande durée ? Pourquoi ?

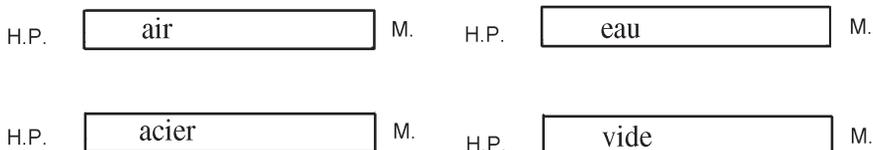
Encadré 4

Milieu et propagation

ÉNONCÉ DU QUESTIONNAIRE

On considère quatre tubes : le premier est rempli d'air, le second est rempli d'eau, le troisième est rempli d'acier et dans le quatrième le vide a été fait (il n'y a rien).

A une extrémité de chaque tube, un haut-parleur (HP) est branché et à l'autre extrémité se trouve un microphone (M) relié à un magnétophone. Tous les haut-parleurs, microphones et magnétophones sont identiques. Tous les haut-parleurs commencent à émettre la note «la» au même instant et s'arrêtent au même instant.



Questions

1) Quels sont les microphones qui enregistrent un son et quels sont ceux qui n'enregistrent pas ? Expliquer pour chaque tube pourquoi.

Pour les microphones qui enregistrent un son, répondez aux questions suivantes.

2) Commencent-ils à enregistrer un son au même instant ?

Oui, pourquoi ?

Non, pourquoi ? classez les microphones par instant d'arrivée du son croissant et justifiez votre réponse.

3) Enregistrent-ils pendant la même durée ?

Oui, pourquoi ?

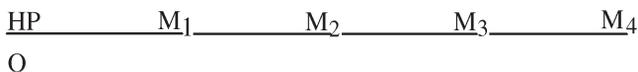
Non, pourquoi ? classez les microphones par durée d'enregistrement croissante et justifiez votre réponse.

Encadré 5

Étendue spatiale d'un signal sonore à un instant donné

ÉNONCÉ DU QUESTIONNAIRE

Sur une route rectiligne, on a placé au point 0 un haut-parleur HP puis tous les cinq cents mètres un microphone et un magnétophone. Au total, il y a quatre magnétophones : M_1, M_2, M_3, M_4 .



Chaque magnétophone possède les caractéristiques suivantes :

- il commence à enregistrer lorsqu'un son est capté par le micro et s'arrête lorsqu'il ne capte plus de son,
- il enregistre l'heure au début et à la fin de l'enregistrement, grâce à une horloge incorporée.

Toutes les horloges sont mises à zéro au départ et démarrent en même temps, à l'instant $t = 0$ s. A cet instant, le haut-parleur commence à émettre un son. Il émet durant 0,5 s.

La vitesse du son dans l'air est de 340 m/s.

Question 1

Y a-t-il plusieurs magnétophones qui enregistrent un son au même instant.

Si oui, lesquels ?

Si non, pourquoi ?

Question 2

Même question mais à présent le haut-parleur émet un son pendant 2 s.

Question 3

Même question mais à présent tout le dispositif est placé dans l'eau (la vitesse de propagation du son dans l'eau est de 1500 m/s) et le haut-parleur émet pendant 0,5 s.

Encadré 6***Période de formation du son***

ÉNONCÉ DU QUESTIONNAIRE

Pierre est à la campagne dans un champ proche du village où il habite. Les cloches de l'église sonnent pendant dix secondes.

Question

Est-ce que Pierre peut entendre les cloches de l'église quand elles ont fini de sonner ?

Oui, pourquoi ?

Non, pourquoi ?