

Mécanique spontanée du signal

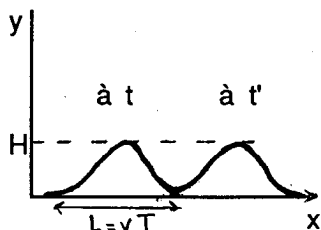
par L. MAURINES et E. SALTIEL,
L.D.P.E.S. Paris 7.

I. INTRODUCTION.

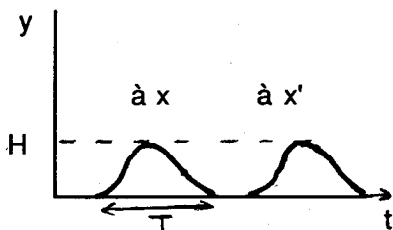
Cet article présente les résultats d'une recherche visant à dégager les difficultés rencontrées par les étudiants lors de l'étude de la propagation des signaux mécaniques visibles, à analyser les modes de raisonnement les plus fréquents, à favoriser une réflexion sur les objectifs pédagogiques à poursuivre et sur les méthodes à utiliser pour les atteindre.

Les thèmes spécifiques de cette recherche s'appuient sur le programme (1) de première S, classe où débute l'enseignement des ondes. Celui-ci est essentiellement expérimental et qualitatif :

- de nombreuses expériences de propagation de signaux de nature variée (signaux sur une corde, un ressort, de l'eau ; signaux sonores et lumineux) sont présentées aux élèves. Les signaux mécaniques visibles à une dimension se propagent toujours dans des milieux légèrement dissipatifs ou dispersifs avec une vitesse constante, tout en diminuant d'amplitude jusqu'à disparaître ;
- l'étude à l'aide de graphes des deux descriptions possibles d'un phénomène de propagation ne concerne que des milieux « parfaits » pour lesquels un signal à une dimension se propage sans déformation. La description spatiale donne l'état du milieu à un instant donné, t , et la description temporelle, l'évolution de l'état du milieu au cours du temps, en un point donné, x :



Description spatiale.



Description temporelle.

H , L , T et V désignent l'amplitude, la largeur, la durée et la vitesse de propagation (ou célérité) d'un signal dans un milieu donné.

(1) Année 1982 et programme de Première C et D, année 1979.

Quelques interviews d'élèves et questionnaires très ouverts, s'intéressant aux descriptions spontanées données avant tout enseignement sur les ondes de différentes expériences de propagation, nous ont amenés à la construction d'une vingtaine de questionnaires plus fermés, visant à être suffisamment démonstratifs et pouvant par la suite servir d'outil pédagogique dans une classe. La majorité d'entre eux porte sur la propagation d'un signal transversal sur une corde. Ils peuvent être regroupés selon quatre problématiques :

- comment les élèves expliquent-ils la propagation et l'existence d'un signal ?
- caractérisent-ils le signal par une grandeur temporelle, sa durée, ou par une grandeur spatiale ?
- comment manient-ils les descriptions spatiales et temporelles ?
- comment utilisent-ils une relation telle que $L = VT$? quelles dépendances fonctionnelles établissent-ils ?

Nous ne présenterons ici que les résultats obtenus aux trois premières problématiques et renvoyons le lecteur intéressé par la quatrième à l'article cité en référence [1].

Nous montrerons que les élèves expliquent la propagation d'un signal sur une corde comme si la forme visible qui se déplace (« la bosse ») était un objet matériel créé et mis en mouvement par la source, que leurs réponses peuvent s'interpréter en supposant l'existence d'un concept hybride appelé « capital ». Ces raisonnements de type mécaniste ne sont que des tendances d'ensemble et non ceux d'un élève en particulier. Ils présentent une grande stabilité puisqu'ils se manifestent aussi après enseignement à des degrés divers.

Une population de l'ordre de 600 élèves avant enseignement sur les ondes (classes de seconde, première scientifique et technique, terminale technique) et de 500 après (classes de première et terminale scientifique, première à quatrième année d'université scientifique, agrégatif de physique) a été interrogée. Dans un premier temps, seuls les résultats des élèves n'ayant pas reçu d'enseignement sur les ondes (population appelé E_0) et de ceux ayant reçu un enseignement de niveau inférieur à celui de la licence de physique (population appelée E_1) (2) seront donnés. Dans un deuxième temps, nous préciserons ce qu'ils deviennent pour les élèves ayant suivi l'enseignement de licence comportant un certificat « vibrations et propagation » (population appelée E_2)

(2) Aussi étonnant que cela puisse paraître, aucune différence significative n'apparaît entre les réponses d'élèves de fin de Première et de début de licence de physique.

et donnerons quelques indications sur les difficultés subsistant après chacun de ces deux niveaux d'enseignement (E_1 , E_2).

L'énoncé de la plupart des questionnaires est schématisé. Les pourcentages des différentes réponses sont calculés sur le nombre d'élèves interrogés, accompagnés de E_0 , E_1 , E_2 , selon le type de population interrogée. Les pourcentages des différentes justifications à une réponse donnée sont calculés sur le nombre d'élèves la fournissant. Les justifications des élèves sont mises entre guillemets.

II. MECANIQUE SPONTANEE DU SIGNAL.

A) Dynamique spontanée du signal.

1) SOURCE ET CÉLÉRITÉ.

Le questionnaire suivant étudie le rôle accordé par les élèves à la source, c'est-à-dire à ce qui est à l'origine du signal.

On attache à une corde, au point R, un fil rouge. On tient la corde à la main à l'une de ses extrémités, O.



En bougeant la main, on observe la forme suivante à l'instant t :



Y a-t-il une façon de bouger la main pour que la forme atteigne le fil rouge à l'instant t ?

OUI

NON

laquelle ?

Alors que la vitesse de propagation ne dépend que du milieu, une majorité d'élèves avant et après enseignement (E_0 , 60 %, $N = 42$; E_1 , 75 %, $N = 16$) la relie à ce que fait la source. Les justifications accompagnant cette réponse sont essentiellement de nature dynamique (E_0 , 84 % ; E_1 , 67 %) :

- « la bosse se déplacera de plus en plus vite si le geste (3) est vif »,
- « la vitesse dépend de la force avec laquelle il a bougé la main »,
- « si l'intensité de la force propagée est plus forte, alors la bosse aussi se répandra plus vite ».

(3) C'est nous qui soulignons.

Ces justifications montrent que la célérité d'un signal dépend des conditions initiales, plus précisément de la force utilisée par la source au départ (comme pour une balle que l'on lance) et non du milieu de propagation.

De plus, la source semble communiquer quelque chose à la corde lors de la formation du signal, quelque chose qui se déplace et reste localisé dans la bosse. Les élèves l'appellent le plus souvent force ; mais c'est en réalité une notion hybride, mélange de force, de vitesse, d'énergie : nous l'avons appelé CAPITAL.

2) PROPAGATION ET CÉLÉRITÉ.

Intéressons-nous à présent à ce que devient la célérité d'un signal au cours de la propagation.

On tient une corde à la main à l'une de ses extrémités, O. En bougeant la main, on observe à l'instant t la forme suivante :



Cette bosse disparaît avant d'atteindre l'autre extrémité de la corde.

La vitesse de la bosse varie-t-elle au cours du temps ?

OUI

NON

Pourquoi ?

Alors que la vitesse de propagation est constante au cours du temps, pour la majorité des élèves avant et après enseignement (E_0 , 68 %, $N = 56$; E_1 , 55 %, $N = 42$) elle diminue (comme pour un solide soumis à des frottements).

Les justifications dynamiques (E_0 , 58 % ; E_1 , 35 %) qui accompagnent cette réponse mentionnent une diminution de « la force » ou de l'action de la main (c'est-à-dire de ce que nous avons appelé capital) et donc de la célérité :

« la hauteur faiblit car l'action de la main s'atténue »,

« si la bosse disparaît, c'est que la force qui la "faisait" disparaît. Pendant ce temps, la vitesse diminue... »

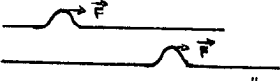
3) DYNAMIQUES SPONTANÉES DU SIGNAL ET DU SOLIDE.

a) similitudes.

Les raisonnements de type mécaniste rencontrés ici sont à rapprocher de ceux mis en évidence par E. SALTIEL [2] et L. VIENNOT [3] en mécanique spontanée du solide.

Le tableau 1 souligne la grande similitude existant entre les arguments donnés par les élèves pour la propagation d'un signal et pour le mouvement d'une balle que l'on lance.

Tableau 1

Propagation d'un signal	Mouvement d'une balle (L.Viennot)
"On ne donne pas tout le temps une impulsion à la bosse pour qu'elle avance"	" si une balle continue à monter après qu'on l'ait lancée, c'est qu'elle a de la force vers le haut, sans ça elle descendrait."
" la vitesse dépend de la force avec laquelle il a bougé la main"	" les forces sont différentes puisque les vitesses le sont"
" la force que la main a fournie s'atténue"	
" on peut aussi dire qu'il se forme des vagues qui bougent à cause de la force F"	" la force que lui a imprimé le bonhomme diminue de plus en plus"
	

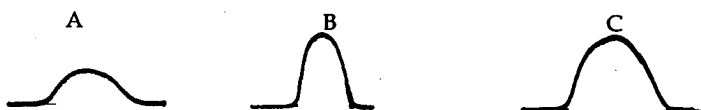
Tout comme le capital de force que L. VIENNOT a introduit, le capital est mis en mouvement par la source, reste localisé dans la bosse, peut diminuer et enfin détermine la vitesse de propagation.

b) spécificités de la dynamique spontanée du signal.

α) capital et forme du signal.

Si la dynamique spontanée du signal ressemble à celle du solide, elle présente cependant des différences. La source non seulement met en mouvement le capital mais lui donne une forme, forme que matérialise la bosse. Nous le constatons en particulier sur les réponses obtenues au questionnaire suivant :

« 3 cordes sont posées sur le sol d'une grande salle. L'une des extrémités de chaque corde est tenue à la main par un enfant. Les trois enfants bougent leur main et observent des formes différentes qui se déplacent. Voici à un instant donné les formes obtenues :



Est-il possible que les formes dessinées précédemment se propagent à la même vitesse ?

OUI NON.

Si oui, pourquoi ?

Si non, quelle est celle qui va le plus vite, le moins vite ? »

Pour une majorité d'élèves avant enseignement (E_0 , 87 %, $N = 93$) et un nombre non négligeable après (E_1 , 41 %, $N = 27$), des signaux de forme différente peuvent avoir des célérités différentes.

Les justifications sont dynamiques (E_0 41 % ; E_1 , 45 %) ou géométriques (E_0 , 88 % ; E_1 , 45 %) :

« la C va le plus vite parce que c'est elle qui a la plus grande forme, donc une plus grande force »,

« la C va le plus vite car la force fournie par le bras de l'enfant modifie la forme de la bosse et la vitesse. Donc plus la force est intense, plus la forme de la bosse sera grande et plus la vitesse sera grande. »

Ces justifications montrent que des formes différentes impliquent des capitaux différents et donc des célérités différentes. Il en est de même du questionnaire sur la bosse qui disparaît.

Citons enfin cette dernière justification, très explicite quant au lien entre le capital et la forme du signal :

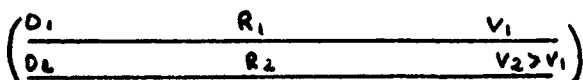
« cela dépend de la force avec laquelle le mouvement a été fait. Cela se voit selon la grandeur de la bosse... elle est le reflet de cette force engagée par l'enfant pour arriver à ce résultat. »

β) interdépendance du mouvement transversal d'un point du milieu et de la vitesse de propagation du signal.

Un raisonnement en terme de capital, c'est-à-dire d'objet formé et mis en mouvement par la source conduit les élèves à relier les paramètres caractérisant le mouvement transversal d'un point du milieu (amplitude, durée, vitesse) à la vitesse de propagation du signal. Ainsi, les élèves peuvent déduire la célérité d'un signal, du mouvement de la source, de son amplitude.

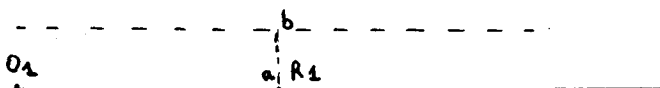
Cette interdépendance se manifeste aussi dans la situation inverse où on demande de comparer la durée du mouvement de deux repères R_1 et R_2 situés sur deux cordes de célérités diffé-

rentes, à même distance des extrémités O_1 et O_2 , lors du passage de deux signaux obtenus par des mouvements de main identiques.

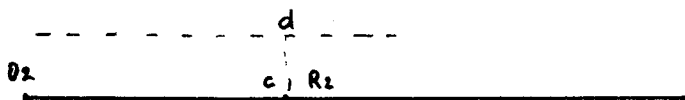


Pour 48 % des 46 étudiants interrogés après enseignement (E_1), les durées des mouvements des deux repères sont différentes, celui se trouvant sur la corde de plus grande célérité bougeant moins longtemps. Les justifications données font clairement apparaître le lien entre la vitesse transversale d'un point du milieu et la célérité :

« le repère R_1 oscille de a à b avec une vitesse linéaire v ,



le repère R_2 oscille de c à d avec une vitesse linéaire $v' = 2v$ parce que la vitesse de propagation de l'onde est deux fois plus grande dans la deuxième corde »,



« la durée du mouvement de R_1 est plus grande que celle de R_2 , car l'amplitude est la même, mais la vitesse de l'onde en R_2 est plus grande qu'en R_1 ».

B) Caractéristiques d'un signal.

Nous venons de voir que les élèves expliquent la propagation d'un signal en se centrant sur l'ensemble de la forme spatiale et en utilisant des raisonnements de type mécaniste. Nous allons voir maintenant qu'ils attribuent au signal certaines caractéristiques d'un objet matériel.

- 1) UN SIGNAL, TOUT COMME UN OBJET MATÉRIEL, NE PEUT EXISTER QU'ENTIÈREMENT FORMÉ.

C'est ce que met en évidence la question suivante :

O _____

v représentée par 1 cm/s.

On lève la main en 1 s d'une hauteur de 10 cm et la ramène à sa position initiale en 1 s. L'instant où commence le mouvement de main est pris comme origine des temps.

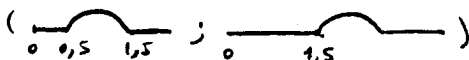
La corde a la forme suivante à l'instant $t = 8 \text{ s}$:



Dessinez la forme de la corde à l'instant $t = 1,5 \text{ s}$.

O

53 % des 47 élèves interrogés après enseignement (E_1) dessinent un signal complètement formé :



alors que le mouvement de main n'est pas encore terminé.

Le front du signal ne semble donc pas se propager avant le retour de la main en O. C'est aussi ce qui se dégage du moyen proposé par certains élèves pour atteindre le fil rouge plus tôt :



« il suffit de bouger plus amplement la main afin d'obtenir une bosse plus grande, la largeur à la base sera plus grande » :



« l'amplitude doit être plus grande ainsi l'onde parcourt une distance plus faible et arrive plus vite ».

Cette dernière réponse montre clairement que la source crée une bosse plus large tout comme un artisan fabrique un pot plus large, et que le déplacement de cet objet ne se fait que lorsqu'il est entièrement fabriqué.

2) LE SIGNAL EST CARACTÉRISÉ PAR UNE GRANDEUR SPATIALE (SA LARGEUR) COMME UN OBJET L'EST PAR SA FORME.

La question suivante porte sur la largeur de deux signaux se propageant sur deux cordes de célérités différentes et obtenus par des mouvements de main identiques.

O₁

O₂

On suppose que V_1 est supérieur à V_2 .

On fait subir en même temps à chaque extrémité des deux cordes le même mouvement d'aller et retour (même

amplitude, même durée) et on observe les deux cordes au même instant t .

Sur le schéma suivant, on a représenté l'aspect de la corde C_1 à l'instant t . Représentez celui de C_2 .



60 % des 80 étudiants interrogés (E_1) attribuent aux deux signaux des largeurs identiques, alors que la seconde doit être deux fois plus étroite que la première.

Là'encore, les justifications montrent que la bosse est la matérialisation du capital, c'est-à-dire d'un objet créé, et mis en mouvement par la source (4), le milieu n'intervenant absolument pas :

« largeurs identiques si on donne exactement la même impulsion à C_1 et à C_2 »,

« $C_1 = C_2$ la largeur de la bosse dépend de la durée de l'ébranlement initial. »

Un signal est donc caractérisé par une grandeur spatiale, sa largeur, et non par une grandeur temporelle, sa durée puisque cette dernière dépend de la célérité alors que la première n'en dépend pas.

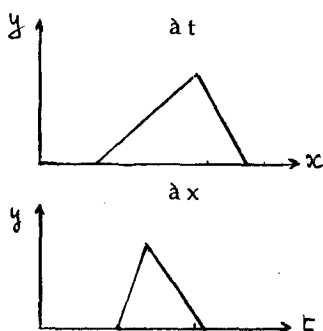
C) Cinématique du signal.

La description spatiotemporelle d'un signal c'est-à-dire l'ensemble de la description spatiale et de la description temporelle constitue ce que nous avons appelé la cinématique du signal. C'est une cinématique de forme étendue analogue à la cinématique de la translation rectiligne à vitesse constante d'un solide, d'une voiture par exemple. Dans le cas d'une voiture, la description spatiale correspond à une photographie de celle-ci (c'est-à-dire une répartition des différents points de la carrosserie) à un instant donné, et la description temporelle à l'altitude des points de la carrosserie que mesure un observateur placé en un point donné X de la route lors du passage de la voiture.

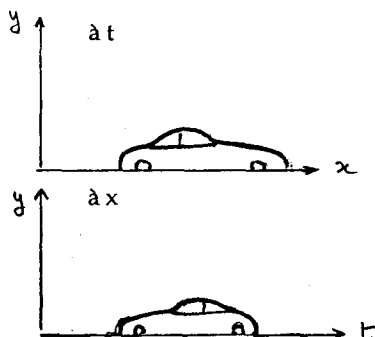
(4) Le rôle moteur de la source est si prégnant pour certains élèves qu'ils en arrivent à *réfuter* l'énoncé en plaçant les deux signaux au même endroit et en disant : « la largeur et la hauteur sont les mêmes pour C_1 et C_2 puisqu'il y a même mouvement. La vitesse de propagation est donnée par l'impulsion d'une main ou d'un instrument ».

Les graphes de la description spatiotemporelle d'un signal sont analogues à ceux d'une voiture en mouvement rectiligne et uniforme :

signal se propageant à la célérité v



voiture se déplaçant à la vitesse v sur une route



Cette cinématique soulève deux difficultés liées à l'étendue de la forme :

- le choix d'une origine spatiotemporelle identique pour tous les points du signal et donc d'une relation $x - x_0 = v(t - t_0)$ aux deux paramètres x_0 et t_0 , caractéristiques de chacun d'entre eux,
- l'inversion de l'ordre spatial et de l'ordre temporel.

La première difficulté se manifeste dès que l'on doit positionner la forme d'un signal à un instant donné. Parmi les nombreux questionnaires la mettant en évidence, nous avons choisi de présenter ici la version quantitative du questionnaire demandant de représenter deux signaux se propageant sur deux cordes différentes obtenus par des mouvements de main identiques.

O₁

O₂

V_1 est représenté par 1 cm/s ; V_2 par le double.

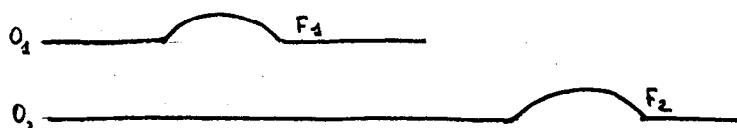
On lève la main en 1 s d'une hauteur de 10 cm et la ramène à sa position initiale en 1 s.

En prenant comme instant origine celui où on commence à bouger la main, représenter la forme des deux cordes à l'instant $t = 4$ s.

Dans cette situation, les élèves doivent construire le premier signal, et pour le deuxième signal, soit utiliser la même méthode que pour le premier, soit se servir du premier schéma obtenu. Seule la méthode utilisée par ceux qui attribuent aux deux signaux des largeurs relatives incorrectes ($L_1 = L_2$) peut être connue : ceux-ci ont construit point par point le premier signal, puis ont dessiné le second sans changer la largeur mais en le plaçant deux fois plus loin que le premier...

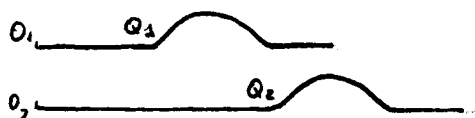
Sur les 47 % des 73 étudiants interrogés (E_1) qui attribuent aux deux signaux des largeurs relatives incorrectes :

- 35 % choisissent de doubler la distance extrémité O_1 -front F_1 pour placer le front F_2 ,

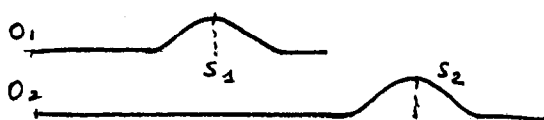


- 62 % choisissent de doubler une autre distance. Elle peut être par exemple :

la distance extrémité O_1 -queue Q_1 :



la distance extrémité O_1 -sommet S_1 :



Une majorité d'élèves utilise la relation $x = vt$ pour un autre point que le front du signal alors que cette relation, compte tenu de l'origine des temps, ne peut s'appliquer qu'au seul front. Les étudiants traitent ainsi la forme étendue du signal comme un ensemble de points équivalents, autrement dit comme un point.

La deuxième difficulté se manifeste lors du passage de la description spatiale à la description temporelle et *vice versa*. Illustrons-là grâce à deux questions, où une situation de référence étant donnée, il est demandé de tracer la forme du signal correspondant à un mouvement de main dissymétrique (la durée de la levée est différente de celle de la descente) et d'un double mouvement de main d'amplitude différente.

O

On lève la main en 1 s d'une hauteur de 10 cm et la ramène à sa position initiale en 1 s. L'instant où commence le mouvement de main est pris comme origine des temps. La corde a la forme suivante à l'instant $t = 8$ s :

O



Questions :

Représentez la forme de la corde à l'instant $t = 8$ s pour les deux situations suivantes :

- 1) On lève la main en 1,5 s d'une hauteur de 10 cm et la ramène à sa position initiale en 0,5 s.
- 2) On effectue deux mouvements l'un à la suite de l'autre :
 - 1^{er} mouvement : durée totale de l'aller et retour 1,5 s et amplitude 20 cm,
 - 2^e mouvement : durée totale de l'aller et retour 0,5 s et amplitude 10 cm.

Les résultats sont regroupés dans le tableau 2 :

Tableau 2

Population	question	Réponse correcte Ordre spatial et temporel inversés	Réponse fausse Ordre spatial et temporel identiques
E ₁ (N=36)	1 bosse dissym.	61%	39%
E ₁ (N=55)	2 bosses d'amplitude différente	80%	16%

Si, pour les deux types de signaux, la réponse correcte est majoritaire après enseignement, il subsiste plus de difficultés pour un signal dissymétrique à une bosse que pour un signal à deux bosses d'amplitude différente. Ce fait rejoint ce que nous avons vu en dynamique spontanée du signal, à savoir que les élèves traitent la forme d'un signal comme celle d'un objet. Le mouvement d'un objet étant habituellement décrit à l'aide d'une description spatiale (succession de photographies), il est compréhensible que la description temporelle et la description spatiale

ne soient pas différenciées (et donc les ordres inversés) et qu'il soit plus facile d'intervertir l'ordre de deux objets différents (les deux bosses d'amplitude différente) que de déformer un objet (une bosse dissymétrique).

D) Rôle du milieu.

La mécanique spontanée du signal précédemment développée montre que la propagation d'un signal n'est pas comprise comme la réponse d'un milieu élastique à une perturbation transversale créée au point source. Le milieu n'a que le rôle limité de support passif sur lequel se propage une déformation dont toutes les caractéristiques (mouvement et forme) dépendent de la source.

Le milieu n'est jamais mentionné avant enseignement et très peu après. Lorsqu'il l'est, on peut parfois lire :

— à la question demandant si on peut atteindre le fil rouge plus tôt :

« il faut donner une impulsion plus forte en O, de manière à augmenter la tension T en O et ainsi augmenter la célérité de la déformation ;

— à celle demandant si la vitesse d'une bosse qui disparaît est constante :

« la bosse s'atténue, donc la tension de la corde diminue ainsi que la vitesse de propagation du milieu. »

Même si ces élèves savent que la célérité dépend de la tension de la corde, celle qu'ils font intervenir présente les mêmes caractéristiques que celles du CAPITAL : elle n'existe que là où se trouve le signal (en O ou bien à l'endroit de la bosse) elle peut diminuer ; d'elle dépend l'amplitude du signal.

III. SUGGESTIONS PEDAGOGIQUES ET CONCLUSION.

1) Quelques remarques sur l'évolution des réponses avec l'enseignement.

Baucoup de questionnaires ont été posés à des étudiants de niveaux d'enseignement différents (populations E_0 , E_1 , E_2). Ceci n'est pas une étude précise sur l'évolution des raisonnements mais apporte quelques éléments de réflexion sur la nature et la résistance de certains obstacles.

Trois obstacles majeurs dont les deux derniers sont liés à une incompréhension des phénomènes de propagation sont apparus :

- la nécessité d'utiliser une description spatiotemporelle de forme étendue en mouvement rectiligne et uniforme ;
- un signal n'est pas un objet fabriqué par la source et ayant des caractéristiques intrinsèques (une largeur et n'exister qu'entièrement formé) ;
- il n'y a pas interdépendance entre la direction de propagation et le mouvement d'un point du milieu.

En ce qui concerne le premier obstacle, nous constatons que nous le rencontrons à tous les niveaux, comme le montre le tableau 3 :

Tableau 3

population	ordre spatial = ordre temporel	L ne dépend pas de v (2 signaux sur 2 cordes différentes)	signal toujours entière- ment formé (signal à tracer pendant la pério- de de formation.)
E ₀	56% (N = 32)		
E ₁	28% (N = 39)	60% (N = 80)	53% (N = 47)
E ₂	21% (N = 21)	33% (N = 21)	29% (N = 21)

En revanche, en ce qui concerne le troisième obstacle, certains aspects disparaissent rapidement, d'autres non :

- la population E₀, et elle seule, établit une liaison entre d'une part, l'amplitude du mouvement de main et la largeur du signal, et d'autre part, la durée du mouvement de main et l'amplitude du signal ;
- les populations E₀ et E₁ considèrent que la vitesse de propagation dépend de la source et varie avec l'amplitude du signal (cf. le tableau 4) et que la durée du mouvement d'un point du milieu dépend de cette vitesse.

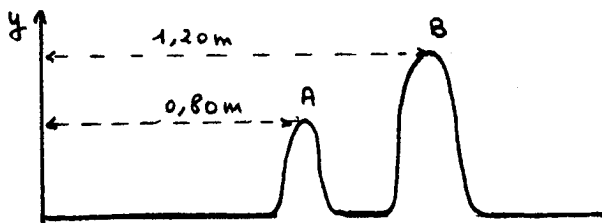
Tableau 4

Population	v dépend de la source (fil rouge)	v varie avec t (bosse qui dis- paraît)	v dépend de la forme(trois bosses =)	T =
E ₀	60% (N=42)	68% (N=56)	87% (N=93)	
E ₁	75% (N=16)	55% (N=42)	41% (N= 27)	48%(N=46)
E ₂	10% (N=21)	5% (N=21)	10% (N=21)	14%(N=21)

Ceci laisserait penser que cet obstacle est surmonté par la population E₂ ; les réponses à la question suivante montrent que ce n'est pas le cas.

O

A l'instant $t = 0$, on commence à bouger la main. On forme une bosse, puis une autre et on immobilise la main. A l'instant $t = 4$ s, on photographie la corde et on observe deux bosses de hauteur différente : le sommet (A) de la petite bosse est à une distance de Oy égale à 0,80 m, le sommet (B) de la grande bosse est à 1,20 m de Oy.



A quelle distance de Oy se trouveront les sommets de chacune des deux bosses à l'instant $t = 5$ s. Justifier votre résultat.

38 % des 21 élèves interrogés (E_2) calculent une *vitesse différente* pour chacune des deux bosses : ils utilisent, pour chaque bosse, la relation $x = vt$, considérant ainsi que les deux bosses sont formées simultanément à l'instant $t = 0$ et obtiennent deux valeurs différentes pour la vitesse, alors que dans les autres questionnaires, ils déclarent que des signaux de forme différente se déplacent à la même vitesse.

2) Suggestions pédagogiques.

La connaissance de la nature des obstacles sur lesquels butent nos étudiants permet de faire des choix pédagogiques, et suggère quelques méthodes pour atteindre les objectifs ainsi définis.

a) L'étude de la cinématique d'une forme étendue telle celle d'un signal, serait facilitée si, au lieu de passer directement de celle du point (aperçue en Seconde) à celle du signal (Première), on s'intéresserait aussi à celle du solide. Des questions portant sur le mouvement d'un train [4] de longueur donnée, des voitures ponctuelles de couleur différente partant à des intervalles de temps égaux de la ligne de départ et roulant à la même vitesse [4] pourraient être proposées. Ceci permettrait de montrer que la cinématique d'une forme étendue n'est pas le propre d'un signal et d'éviter l'usage d'un dispositif de simulation [5] ne pouvant que renforcer le raisonnement spontané des élèves (la planche à clous sur lesquels passe une corde, planche déplacée

par l'opérateur). Notons par ailleurs que pour faciliter la compréhension de l'inversion de l'ordre spatiotemporel il y aurait tout lieu de commencer par l'étude d'un signal à deux bosses d'amplitude différente avant d'aborder celle d'un signal à une bosse dissymétrique.

b) Il est manifestement insuffisant d'affirmer aux élèves que la célérité 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 en leur proposant des questions qualitatives telles celles présentées ici, en leur faisant manipuler des cordes tout en leur demandant auparavant des prévisions afin de leur permettre de confronter leur « intuition » à l'expérience.

L'obstacle majeur ici est celui que l'on retrouve chez nos ancêtres : ainsi DERHAM [6] (fin XVIII^e) mesure la vitesse du son et montre qu'elle est indépendante de son intensité. En 1808, POISSON [7] écrit dans l'introduction de son mémoire sur la théorie du son :

« dans le calcul de la vitesse du son, on suppose que les vitesses des molécules sont petites. EULER a voulu en tenir compte et a regardé la propagation du son sur une ligne droite sans négliger aucun terme. En supposant que v_{mol} est juste inférieure à la vitesse du son, un calcul montre que la vitesse du son est indépendante de la vitesse des molécules d'air et donc *de la cause qui a produit le son.* »

Plus tard, FRESNEL [8] dans son traité « de la lumière » traite sur le même plan les ondes sur l'eau, les ondes sonores et la lumière (cette dernière ayant besoin d'un milieu matériel, l'éther, pour se propager). Il insiste beaucoup sur le fait que la vitesse de propagation est indépendante de la vitesse des molécules du milieu de propagation.

« Il ne faut pas confondre cette vitesse absolue des molécules du fluide avec la vitesse de propagation de l'ébranlement. La première varie selon l'amplitude des oscillations ; la seconde, qui n'est autre chose que la promptitude avec laquelle le mouvement se communique d'une tranche à une autre est indépendante de l'intensité des vibrations... ».

Cet obstacle, nous l'avons vu, est très difficile à surmonter ; mais il est encore plus difficile lorsque l'onde est longitudinale : quel enseignant de l'université n'a pas eu à répéter, en acoustique, que la célérité de l'onde sonore n'est pas la vitesse d'une particule !

c) Une comparaison explicite par ressemblances et différences entre le mouvement d'un solide et celui d'un signal devrait permettre de mieux appréhender ce qui caractérise chacun.

En particulier, certaines précautions devraient être prises afin d'éviter de renforcer l'assimilation signal objet que font les élèves. Ainsi, sur cette page extraite de ALONSO et FINN [9], on constate que les auteurs représentent sur les schémas du haut un signal incident de *même largeur* que le signal transmis, contredisant de ce fait la série de photographies qui suit.

On peut alors se demander s'il est préférable de débiter l'étude de la propagation par celle d'un signal (programme actuel) ou par celle d'une onde progressive (ancien programme). Ce travail ne permet pas de donner une réponse définitive mais indique tout de même qu'il est plus facile d'illustrer, par des manipulations et des exercices, certaines propriétés des phénomènes ondulatoires en étudiant la propagation d'un ébranlement ou d'un paquet d'ondes que par l'étude d'une onde progressive : la propagation commence dès que la source commence à bouger et non lorsque « l'objet » signal est fini d'être fabriqué, la vitesse de propagation à tension et masse linéique constantes, reste constante au cours du temps, même si l'amplitude du signal varie ; la largeur d'un signal, ou encore la longueur d'onde, dépend non seulement de ce que fait la source mais aussi du milieu par l'intermédiaire de la célérité. Notons que les étudiants de la faculté agronomique de Gembloux (qui ont reçu un enseignement correspondant à nos anciens programmes) n'ont pas obtenu (loin de là) de meilleurs résultats que les autres.

De toutes façons, quelle que soit la présentation choisie, il importe qu'elle soit accompagnée d'un choix de situations physiques qui mettent en lumière les propriétés déjà citées, les différences avec le mouvement d'un solide, les invariances... beaucoup de travail en perspective !

(20.6)

Compléments sur les lois de la réflexion et de la réfraction

381

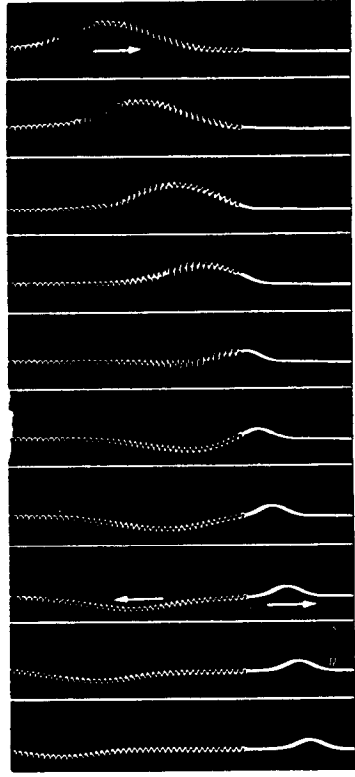
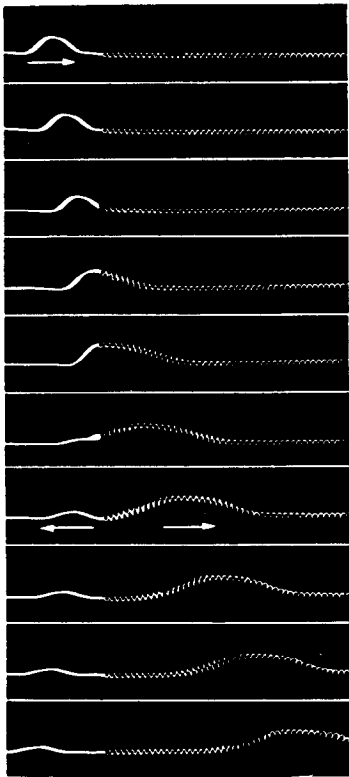
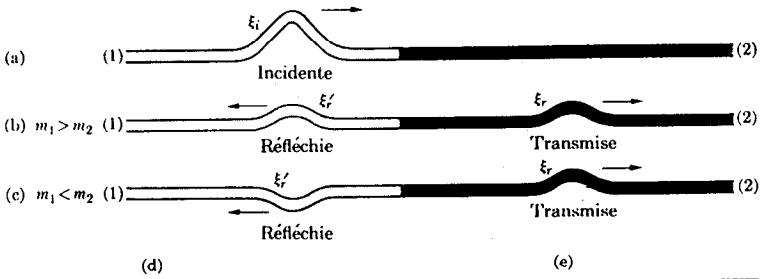


Fig. 20-16. Ondes incidente, réfléchie et transmise le long de deux cordes de densité linéaire différente attachées ensemble. En (b) et (d) la corde qui transporte l'onde incidente est plus lourde; en (c) et (e) la corde à gauche est plus légère. (Photographies tirées de *Physics*; Boston: D. C. Heath, 1960.)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] L. MAURINES : « *Premières notions sur la propagation de signaux mécaniques : analyse des difficultés des étudiants* ». Congrès S.F.P. Strasbourg, juillet 1987.
 - [2] E. SALTIEL, J. L. MALGRANGE : « Les raisonnements naturels en cinématique élémentaire », B.U.P. n° 616, 1979.
 - [3] L. VIENNOT : « *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire* ». Ed. Hermann, 1979.
 - [4] L. MAURINES : « *Premières notions sur la propagation des signaux mécaniques : étude des difficultés des étudiants* ». Nouvelle thèse, septembre 1986, Paris 7.
 - [5] *Physique de Première S* : J. LACOURT, A. COLIN.
P. MARTIN : *Enregistrement du mouvement d'un point affecté par un ébranlement transversal*. B.U.P. n° 652, 1983.
Lohsen Papers waves Physics Teacher, nov. 1983.
 - [6] DERHAM cité par V. RONCHI : *Histoire de la lumière*, A. Colin, 1956.
 - [7] S. D. POISSON : *Mémoire sur la théorie de son Ecole Polytechnique*, 7, 319, 1808.
 - [8] A. FRESNEL : *Théorie de la lumière*, 3^e section. Œuvres complètes publiées par H. DE SÉNARMONT, E. VERDET, L. FRESNEL. Paris Imprimerie Impériale 1866-1870.
 - [9] ALONSO et FINN : *Physique générale*, volume 2. *Champs et Ondes*. InterEditions, 1977.
-