

2^{ème} partie : une physique moins immédiatement accessible et demandant plus de réflexion par rapport aux phénomènes constatés ou mesurés. Une physique plus moderne.

Chapitre 4

Ondes

Introduction



Assis sur une grosse pierre, les pieds dans le laka, entre Osses et Suhescun, j'ouvre mon esprit en physicien adulte et moderne et non comme un homme préhistorique.

Je regarde la lumière du Soleil passer entre les feuilles des platanes comprenant que tout ce que je vois trouve son origine dans cette lumière émise par une étoile se trouvant à 150 millions de km : le Soleil.

Cette lumière apparemment unique, puisque provenant d'une seule source, tombe sur tous les objets qui m'entourent et je les vois dans leur diversité. Ils n'utilisent pas la lumière reçue de la même manière !

Arrivent d'autres questions :

- *D'abord sur la nature de la lumière : comment a-t-elle pu franchir une telle distance alors que la mécanique nous a montré tous les problèmes que peuvent rencontrer les objets matériels en mouvement. Les termes « objet matériel » et « mouvement ». sont-ils adaptés pour décrire la lumière ?*
- *En quoi consistent les irisations aperçues entre les feuilles d'arbre ou à la surface de l'eau frémissante, pourquoi ne les observe-t-on qu'aux bords des objets touchés par la lumière ?*
- *Ensuite en généralisant : étant conscients de la présence d'une grande quantité d'objets célestes, nous pouvons imaginer qu'ils produisent toutes sortes de rayonnements, et pas seulement visibles, il n'y a pas de raison...*

Exemple sur mon T-shirt : « 100 consecutive pulses from the pulsar CP 1919 »...

- *Nous revenons finalement à notre position de terriens : la petite couche d'atmosphère, qui est transparente, transparente à la lumière, laisse-t-elle aussi passer tous les autres flux qui traversent l'Univers ?*

A - Propagation d'une onde ; ondes progressives ; ondes périodiques

I - Les ondes, présentation

1) introduction

Reprenons le principe, qu'à priori, nous associons à la notion de mouvement :

Lorsqu'il y a mouvement sous la forme d'un déplacement d'un point à un autre (on marche, on lance un objet, ...), de la matière est transférée, l'état du système observé n'est pas le même avant et après le mouvement (vu qu'il a changé de place...)

Le transfert de matière s'est évidemment accompagné d'un échange d'ÉNERGIE.

On peut souvent (mais pas toujours) observer ces situations en considérant que cette énergie a, elle aussi, été transférée dans l'espace.

2) Des situations vraiment nouvelles

Observons une corde à l'extrémité de laquelle on donne une impulsion (*expérience + schémas de ce qui est observé*)

On peut aussi PARLER et faire constater un résultat analogue : une information (un son) s'est déplacée d'un point à un autre, mais l'état du « système » est inchangé à la suite du phénomène : pas de déplacement de matière.

Il y a déplacement d'une perturbation qui se transmet de proche en proche dans le milieu mais il n'y a pas eu, au final, transfert de matière (tous les points du milieu sont dans le même état avant et après passage de la perturbation)

Il faut inventer un nouveau mot, proposer un nouveau concept :

Une onde s'est propagée.

Nous venons d'observer une **ONDE** (transport d'énergie sans transfert de matière)

PROGRESSIVE (la perturbation se transmet de proche en proche, progresse, d'un point de départ vers un point d'arrivée)

3) Caractéristiques générales des ondes

Lorsqu'un milieu matériel est nécessaire à la propagation d'une onde (ondes sismiques, houle, son, ...) L'onde est dite **mécanique**.

Ces grandeurs sont :

- Le nombre de dimensions spatiales utilisées pour la propagation ;
- le caractère transversal ou longitudinal de l'onde ;
- la célérité ;
- l'amplitude et la durée de la perturbation ;

4) Précisons à l'aide de quelques exemples...

Nombre de dimensions, transversalité/longitudinalité (définitions et exemples)

- Nous avons dans le cas de la corde :
 - une onde à une dimension ;
 - L'onde est dite transversale : la direction de la perturbation est perpendiculaire à la direction de propagation.

- Impulsion donnée à un ressort :
 - à 1 dimension ;
 - longitudinale : la direction de la perturbation est parallèle à la direction de propagation ;
 - il s'agit d'une compression unique suivie d'une dilatation unique (c'est à dire un aller-retour) qui se transmet d'une spire à l'autre et se propage le long du ressort.

- La houle (ou un coup de pied dans une flaque) est une onde à la surface d'un liquide : transversale et à 2 dimensions.

Remarque : si la source est ponctuelle : onde circulaire
(discussion, explication : logique l'onde se propage à la même vitesse depuis un point unique dans toutes les dimensions permises d'un milieu à 2 dimensions...)

- **Son (cri bref) : onde 3 D et longitudinale (propagation d'une compression/dilatation de l'air).**

- Tremblement de Terre, ... ou du plancher de la salle de classe !

Pour le cas des séismes, les perturbations peuvent être transversales ou longitudinales, l'onde est à 3D.

Une onde se propage donc dans toutes les dimensions disponibles...

Et la lumière, est-ce une onde ?
(maintenons le suspense)

5) Détail n°1 : Célérité

Lors de la propagation d'une onde on peut distinguer deux types de mouvements qui ne doivent pas être confondus :

- le mouvement d'un point du milieu lorsqu'il est traversé par la perturbation. pendant toute la durée du passage de la perturbation, les points perturbés sont en mouvement, on peut déterminer leurs positions et vitesses instantanées caractéristiques de la perturbation. Nous nous intéresserons à cet aspect du mouvement en considérant essentiellement l'amplitude de l'onde (voir plus loin). Toutefois, on peut aussi considérer la durée de la perturbation d'un point du milieu, avec en particulier un début de perturbation qui peut être vu comme l'arrivée du **front d'onde** sur le point (il faudra retenir ce terme : « front d'onde »). (*schéma*)

- le mouvement de propagation de l'onde pour lequel on détermine plutôt les positions successives, la direction et le sens de la propagation ainsi que la vitesse de déplacement de la perturbation appelée **célérité de l'onde** (**vitesse célérité de propagation**).

(prendre un exemple, faire un schéma)

Notons bien que la célérité d'une onde est une propriété du milieu.

Exemples de modifications du milieu mécanique influençant la célérité :

- tension de la corde ou du ressort,
- profondeur pour la propagation de la houle,
- propagation du son (Hecht p 498)

Voir TP ultrasons première partie : mesure de la célérité des ondes ultra sonores.

(en passant par des mesures de retards)

6) Détail n°2 : notion de retard (cas d'une onde progressive à une dimension, mais on peut aussi se référer à une onde à 2D ou 3D tout en travaillant sur un seul axe de propagation parmi d'autres... Ainsi, on peut évoquer les 2 récepteurs alignés et positionnés en M et M' dans le TP « ultrasons »)

- La perturbation se propage à la célérité v constante (milieu homogène).
- Elle passe par un point M de coordonnée x à la date (l'instant) t .
- Elle passe ensuite par un point M' de coordonnée x' , situé à la distance $d = x' - x$ de M, à la date t' ($x' > x$ et $t' > t$).
- L'écart $t' - t$ est noté τ et est appelé retard au passage de la perturbation en M' (par rapport au passage en M).

$$t = \frac{MM'}{v} = \frac{d}{v}$$

- M' est perturbé à la date t' comme M l'a été à la date t , l'état de M' à la date t' est identique à l'état de M à la date $t' - \tau$ (car $t = t' - \tau$).

7) Détail n°3 : amplitude d'une onde

Introduction

Nous avons conscience que l'amplitude de l'onde est étroitement associée à l'énergie transportée par cette onde.

Evoquer l'énergie, la puissance, l'intensité d'une onde est donc une façon quasi-directe de considérer son amplitude.

L'énergie E (ou W , le travail), c'est en joules (J).

La puissance P , c'est l'énergie par unité de temps en watt (W), $1W = 1 J.s^{-1}$.

L'intensité I , c'est la puissance par unité de surface $I = \frac{P}{S}$, en $W.m^{-2}$.

Echelles logarithmiques (premier exemple : niveau d'intensité sonore)

L'idée est qu'avec la grandeur logarithmique (notée $y = \log x$), on avance d'une unité lorsqu'avec la grandeur initiale (notée x) on multiplie, par exemple, par 10.

Si x passe de I_0 à $10 \cdot I_0$, alors y passe de y_0 à $y_0 + 1$.

Considérons la relation $x = 10^y$.

Partons de $x_0 = 10^{y_0}$

Si y augmente d'une unité x est bien multiplié par 10 : $x = 10^{(y_0+1)} = 10^{y_0} \cdot 10$.

Nous avons exprimé x en fonction de y .

Nous considérerons la fonction inverse permettant d'exprimer y en fonction de x . Cette fonction est appelée logarithme décimal (\log).

Si $x = 10^y$, alors $y = \log(x)$

Une avancée d'une unité dans cette échelle logarithmique est en fait un saut d'un ordre de grandeur (une multiplication par 10) dans les valeurs de x .

Il existe d'autres fonctions logarithmiques associées à des puissances d'autres nombres que 10...

Prenons maintenant l'exemple des ondes sonores. Il se trouve que les différences d'intensité entre des sons courants (le ronron d'un chat et le moteur d'un avion au décollage) sont immenses. Il est courant de changer la manière de graduer à l'aide d'une **échelle logarithmique**, de manière à se déplacer sur un domaine raisonnable de valeurs (de 0 à 100, par exemple). On définit alors une nouvelle grandeur : le niveau d'intensité sonore L :

$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}, \quad I_0 \text{ étant l'intensité sonore de référence de valeur } 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}.$$

L s'exprime en décibels (dB)

D'après ce que l'on a vu sur la fonction \log , on comprend qu'une augmentation de 1 dB correspond à une intensité (ainsi qu'à une énergie reçue, finalement) 10 fois plus importante.

Nos oreilles reçoivent donc 10^{11} fois plus d'énergie lorsque nous écoutons le décollage d'un avion (125 dB) que lorsque nous écoutons notre chat ronronner (15 dB)... (*nous avons réalisé le calcul ensemble*)

Magnitude d'un séisme

Exercice double page Hachette p 30-31

On note que la formule exacte n'est pas donnée... parce qu'elle est un peu plus compliquée (Elle contient toutefois toujours un terme fondamental de type $\log(A/A_0)$).

6) Conclusions

- Une onde se propage à partir d'une source, dans toutes les directions qui lui sont offertes.
(ex : son, houle, ...) Elle peut être à 1, 2 ou 3 dimensions (*exemples*)
- Une onde consiste en la propagation d'une perturbation qui se transmet de proche en proche, il y a transfert d'énergie sans transfert de matière.
- Deux ondes peuvent se croiser sans se perturber (ex. sur corde, échelle de perroquet, ressort). Toutefois, le temps du croisement, on peut constater que deux perturbations « opposées » s'annulent.

(*schéma*)

- *Les ondes réelles peuvent constituer une combinaison, onde transversale / onde longitudinale, mais si l'on sait bien étudier et caractériser une O.T. ou une O.L., on saura aussi en faire de même pour toute combinaison O.L./O.T.*
C'est un principe assez général : savoir décrire un objet simple et savoir présenter un objet compliqué comme une combinaison plus ou moins complexe d'objets simples connus.

III- Ondes progressives mécaniques périodiques

1) Notion d'onde progressive périodique

a) expériences, principe

On reprend la corde, on reproduit la propagation d'une perturbation transversale de courte durée en mettant clairement en évidence le fait que la zone de la corde traversée par la perturbation prend une forme particulière (pendant une durée correspondant au passage de l'onde).

On impose maintenant à une extrémité de la corde une perturbation permanente consistant en un mouvement périodique d'aller-retour de l'extrémité A de la corde. (*on doit ici rappeler la définition d'un phénomène périodique...*)

Il y a alors deux façons d'observer le phénomène :

- soit on fixe un point de la corde et l'on constate qu'il est le siège d'oscillations périodiques (les mêmes qu'en A, mais avec du retard), il y a donc une périodicité temporelle associée au mouvement d'un point du milieu siège de la propagation d'une onde.

- soit on fixe l'ensemble de la corde et on voit les perturbations se propager sous la forme de **profils** successifs, la déformation de la corde causée par le passage d'une perturbation (**l'onde**) s'observe maintenant à intervalles de distance réguliers, on voit passer une succession de profils séparés par une **distance constante**. C'est normal, **ces profils sont générés à intervalles de temps réguliers (T) et se propagent à vitesse (célérité) constante**. Il y a donc aussi un phénomène qui se répète identique à lui-même dans l'espace, il y a aussi une périodicité spatiale.

Il y a donc une double périodicité.

b) T et λ

Périodicité temporelle

La plus petite durée entre deux passages par un état identique pour un point du milieu : la période T (s).

On utilise aussi la fréquence f ou $n = \frac{1}{T}$ caractérisant le nombre de perturbations passant par un point par unité de temps. Si T est exprimée en seconde, n est exprimée en hertz (Hz).

T : temps nécessaire pour que l'onde retrouve sa configuration initiale en un point donné ;

T : temps qu'il faut à un profil (une perturbation) pour défilier complètement devant un point donné.

n (ou f) : *nombre de profils qui traverse un point donné du milieu en une seconde.*

Périodicité spatiale

la distance entre deux perturbations successives en train de se propager, entre deux fronts d'onde successifs, la longueur d'un motif d'onde entrain de se propager :

C'est la longueur d'onde λ (m)

Si l'on fige l'onde à un instant donné, la distance spatiale sur laquelle l'onde exécute un cycle complet, c'est à dire la longueur d'un cycle (d'une perturbation), est la longueur d'onde λ (m)

(schémas, vidéos, simulations)

Relation entre λ et T :

Un point du milieu qui subit un cycle de perturbation de durée T est aussi traversé par un motif de l'onde de longueur λ . L'onde se propage donc sur une longueur λ pendant la durée T.

On peut donc écrire :

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}$$

Expériences :

- cuve à ondes : pour bien faire sentir l'aspect périodique dans le temps (généré par le mouvement du vibreur) puis pour faire apparaître l'aspect périodique dans l'espace (on utilisera le stroboscope sans trop insister (voir plus loin dans les exos...))

On peut ici se référer à l'activité p 56

Points en phase, points en opposition de phase

On décrit le phénomène (on travaillera sur l'exemple de la corde à l'aide d'une animation ou d'un schéma), on montre ces points.

Au sein du milieu traversé par l'onde périodique, deux points distants de $n \cdot \lambda$ (n entier) sont perturbés en phase.

Au sein du milieu traversé par l'onde périodique, deux points distants de $(2n+1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ (n entier) sont perturbés en opposition de phase.

b) Remarque à propos des ondes progressives sinusoïdales

Une perturbation périodique simple à analyser mathématiquement est l'onde sinusoïdale : elle augmente et diminue au cours du temps comme une fonction sinusoïdale et se propage en faisant apparaître une périodicité spatiale qui est aussi de forme sinusoïdale.

On se demande un peu quel rapport il peut bien y avoir entre un onde réelle et cet objet mathématique qu'est la fonction sinus, il se trouve que toute onde réelle peut être décrite comme une superposition d'ondes sinusoïdales .

Donc, étudier la propagation d'une sinusoïdale est la base fondamentale d'une étude approfondie de toute onde réelle.

2) Cas des ondes sonores (TP)

TP mesures de λ , de T, de v... (ondes ultrasonores)

TP analyse de sons (timbre et intensité) + activité p 67

+ document officiel :

SON

Lorsque nous enregistrons un son simple, c'est à dire une note tenue en ne prononçant qu'une syllabe, nous observons un signal en fonction du temps qui est :

- alternatif et périodique ;
- Souvent plus complexe qu'une simple sinusoïde.

Si nous transformons le signal de manière à observer le spectre en fréquences du son produit, nous constatons plusieurs choses.

- Nous pouvons associer à la hauteur d'un son une fréquence appelé fréquence fondamentale. Plus le son est aigu, plus cette fréquence est élevée. Sur un spectre en fréquence d'un son, cette fréquence est la plus petite présente sur le spectre. Souvent elle est aussi la fréquence la plus abondante, mais ce n'est pas systématique.
- Si nous produisons la même note avec deux instruments différents, nous obtiendrons deux spectres qui possèdent la même fréquence fondamentale, mais qui diffèrent dans la répartition des signaux caractéristiques des fréquences d'harmoniques supérieurs.
- Qu'est-ce qu'un harmonique ? Lorsqu'un son complexe est produit, il contient un signal fondamental (de fréquence f_1) mais aussi des signaux harmoniques dont les fréquences sont toutes des multiples entiers de f_1 .
- Deux sons de même hauteur peuvent donc différer selon la présence ou l'absence de certains harmoniques ainsi que selon leur répartition. On dit alors que ces deux sons ont des timbres différents.
- Remarque : un son pur est un son qui ne produit que le signal fondamental. Pour un son pur, le signal en fonction du temps est parfaitement sinusoïdal.
- Donc :
 - ° hauteur : valeur de la fréquence fondamentale ;
 - ° timbre : nombre et répartition des harmoniques supérieurs.

IV- Des propriétés essentielles des ondes mécaniques progressives périodiques

(1) et 2) expés prof, 3) tout en TP)

0) Introduction : la cuve à ondes

Ce dispositif permet de visualiser clairement des ondes à la surface d'un liquide frappé périodiquement par une tige vibrante.

Ces ondes sont transversales.

L'onde est dite **circulaire** si la source de la perturbation est assimilable à un point, les **fronts d'ondes** qui se propagent sont alors des arcs de cercle qui vont s'agrandissant et qui se suivent séparés par la longueur d'onde λ .

L'onde est dite **plane** si la source de la perturbation est une tige rectiligne, les fronts d'ondes successifs sont alors des lignes parallèles entre elles.

L'observation de la propagation de ces ondes gagne en confort si elle se fait en lumière stroboscopique (lumière discontinue sous la forme d'un flash périodique) dont la fréquence est proche ou égale à la fréquence de l'onde étudiée.

Observer et noter les différentes expériences de présentation réalisées.

1) Diffraction

Expérience à l'aide de la cuve à onde : on produit une onde plane qui se propage vers une ouverture entre deux obstacles. L'expérience est réalisée avec une ouverture large puis étroite.

Des schémas sont réalisés pour rendre compte de ce que l'on a observé (penser à légender ces schémas avec les mots "onde incidente", onde transmise", "onde diffractée", "front d'onde", etc.)

Conclusion : lorsqu'une onde périodique de longueur d'onde λ rencontre un obstacle (ou le contraire : un passage) dont la dimension est de l'ordre de grandeur de λ , cette onde subit une modification, elle ne poursuit pas son chemin dans le même état : elle est diffractée.

Remarque : si l'obstacle (le passage) est de dimension largement supérieur à λ , la diffraction s'observe aussi, mais à proximité des bords de l'obstacle (du passage).

Notez bien : l'onde diffractée garde une caractéristique de l'onde incidente : la fréquence (et la longueur d'onde vu qu'il n'y a pas changement de milieu)

Y a-t-il diffraction des ondes sonores dans notre quotidien ?

(discussions...)

Diffractions par la digue de Sainte Barbe et par la roche percée...

2) Interférences

A l'aide de la cuve à onde, on réalise la plus basique des expériences d'interférence : deux sources ponctuelles frappent périodiquement et en phase la surface de l'eau. Deux séries d'ondes circulaires sont donc générées en permanence. On constate que, même en éclairage naturel, certains points semblent se trouver dans un état fixe de vibration, certains, en particulier, semblent immobiles, d'autres, au contraire semblent osciller en permanence à une amplitude (deux fois) plus importante que s'ils n'étaient atteints que par une seule des deux ondes.

Chaque point M du milieu est perturbé en même temps par les deux ondes. La perturbation résultante sera en permanence constituée de l'addition des perturbations provenant de S_1 et de S_2 .

Il est possible que les ondes parviennent en M en permanence en opposition de phase... M va alors rester immobile en permanence, il y aura en M interférences destructives entre les deux ondes.

Au contraire, si les deux ondes arrivent en M en permanence en phase, l'amplitude d'oscillation sera augmentée (doublée), il y aura interférences constructives.

Est-il possible de prévoir, selon la position du point M par rapport à S_1 et S_2 , s'il y aura en ce point interférences destructives ou constructives ?

La réponse est oui

Au travail :

Présenter un schéma illustrant la situation :

- S_1 et S_2 sont distantes de a , les ondes qui sont produites au niveau de ces deux sources restent cohérentes (même fréquence, amplitudes constante) et sont produites en phase.
- Non seulement nous cherchons à présenter avec précision les conditions pour qu'il y ait interférences destructives/constructives en un point, mais nous cherchons aussi à exprimer une distance appelée interfrange : la distance sur une droite parallèle au segment S_1S_2 et située à la distance D de S_1S_2 entre deux points successifs immobiles (recevant en permanence des ondes provenant de S_1 et S_2 en opposition de phase) ou entre deux points successifs en oscillations d'amplitude maximale.

Cet interfrange, noté i dépendra de a , de D et probablement de λ .

Piste pour la solution :

- Tracer les droites S_1M et S_2M qui nous permettront de comparer les distances parcourues par les deux ondes pour atteindre M .
- Présenter sur le graphe la différence δ de marche entre les deux distances parcourues.

- *Conclure : si les interférences sont constructives en M alors les deux ondes arrivent en phase en M, ce qui signifie que la différence de marche vaut un nombre entier de longueurs d'onde $\delta = n\lambda$.*
- *Conclure : si les interférences sont destructives en M alors les deux ondes arrivent en opposition de phase en M, ce qui signifie que la différence de marche vaut $\delta = n\lambda + \frac{1}{2}\lambda = (2n+1)\lambda/2$*
- *Pour une détermination aisée de i , l'interfrange, nous allons considérer deux points M_0 et M_1 deux points successifs d'amplitude maximale avec en plus un choix particulier pour M_0 : en M_0 $\delta = 0$. On en déduit qu'en M_1 , $\delta = \lambda$.*
- *Tracer, en plus de des droites S_1M_1 et S_2M_1 , la droite joignant le milieu de S_1S_2 au point M_1 .*
- *Annoter le schéma obtenu, c'est à dire indiquer les distances, i , D , δ et a .*
- *Proposer une condition permettant une approximation qui mène directement à la relation :*

$$\lambda/a = i/D \quad \text{soit} \quad i = \frac{\lambda D}{a}$$

Remarques :

- Si les ondes sont produites en opposition de phase en S_1 et S_2 , l'interfrange est inchangé, mais les conditions sur δ pour décider s'il y a interférences destructives ou constructives sont inversées.
- un essai, plutôt concluant, d'interférences sonores a été réalisé.
- On peut aussi répondre aux questions a), b) c) et d) de l'activité p 79

8) Effet Doppler (voir doc. « séance Doppler »)

a) Activité : discussions autour du simulateur + calculs officiel

b) TP + exos

... Et la lumière ? Comment sait-on que c'est une onde ?

On y arrive enfin.

IV- La lumière, modèle ondulatoire

Voir : « séance ondes lumineuses »

+ une conclusion à distribuer (photocopies)

à faire...

Caractéristiques des ondes lumineuses

- La lumière est donc une onde "électromagnétique" qui n'a pas besoin de milieu pour se propager mais qui se propage aussi dans n'importe quel milieu transparent.
- Célérité dans le vide $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- La lumière peut être constituée de plusieurs radiations de différentes fréquences, elle est dite polychromatique. Le domaine de la lumière blanche visible va d'environ 400 nm (violet) à 800 nm (rouge). On dit aussi que le spectre de la lumière visible s'étend (de façon continue) de 400 à 800 nm. Pour $\lambda < 400 \text{ nm}$ c'est le domaine des radiations UV, pour $\lambda > 800 \text{ nm}$ c'est le domaine des IR. (calcul des fréquences correspondantes)

Une lumière constituée de radiation correspondant à une seule fréquence est dite monochromatique (la plus courante : celle du LASER).