Ondes progressives, ondes stationnaires

Niveau : PC ou 2eme année CPGE (à vérifier)
(en 1ère année PCSI ils ont vu la forme d'une onde progressive f(x-ct) et stationnaire f(x)g(t) et relation dispersion ck=w mais pas D'Alembert ni dans les différents milieux)

Pré-requis :

- Mécanique du point
- Signaux
- Electrocinétique

Bibliographie :

- Physique Tout en un PC-PC*, Dunod
- H-prépa Ondes, Hachette supérieur
- .

Introduction

Les phénomènes d'ondes interviennent dans tous les domaines de la physique. On s'intéresse ici aux ondes facile à créer, voir ou entendre : vagues des océans, notes de musique, ou celles avec lesquelles on vit : les battements du coeur. Voyons donc les concepts fondamentaux pour décrire ces ondes et comment les mettre en équation.

1. Équation d'onde

A. Rappels

Onde : C'est une perturbation apparaissant à l'intérieur d'un milieu dans un domaine donné se propage vers d'autres domaines avec une vitesse bien définie en chaque point (OProg) à chaque instant ou se maintient dans le domaine initial (OStat).
La déformation peut être de nature mécanique (ont besoin d'un milieu matériel) ou électromagnétique (pas besoin de milieu pour se propager). Elle peut se déformer ou même s'atténuer avec le temps s'il y a dissipation d'énergie.
L'onde peut être transversale ou longitudinale (perturbation ⊥ ou // à la direction de propagation).
Le son dans l'air est une onde longitudinale. Les ondes sismiques P sont longitudinales, les ondes S sont transversales

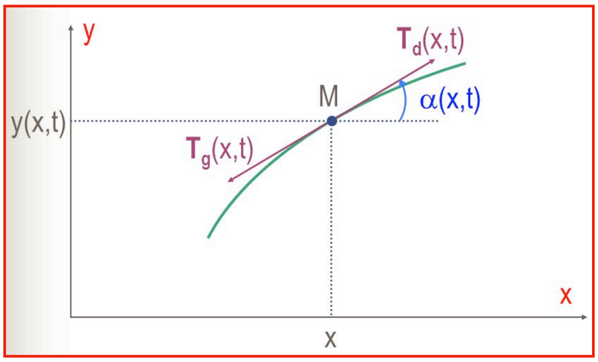
Site “ Animation corde onde progressive PhET ”

https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-on-a-string/latest/wave-on-a-string_all.html?locale=fr
On trouve phénomène de propagation d'onde = propagation des déformations le long de la corde.
Le déplacement de la corde est perpendiculaire à cette direction de propagation. Il s'agit alors d'ondes transverses

B. Équation de d'Alembert : exemple de la corde vibrante

Considérons une corde de longueur L homogène souple donc sans raideur (n'a aucune résistance à la déformation) de masse linéique μ.
Si elle a une raideur donc elle est rigide (comme la règle métallique) donc il y aura des $\overrightarrow{F}$ de rappel supplémentaires et la tension n'est plus nécessairement tangente à la corde.
On aura donc : $\dfrac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \alpha \dfrac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0$ avec $\alpha = \dfrac{EI}{\mu}$ tel que E = module de Young / I = moment quadratique (lié à la géométrie de la section). C'est l'équation des poutres d'Euler-Bernoulli

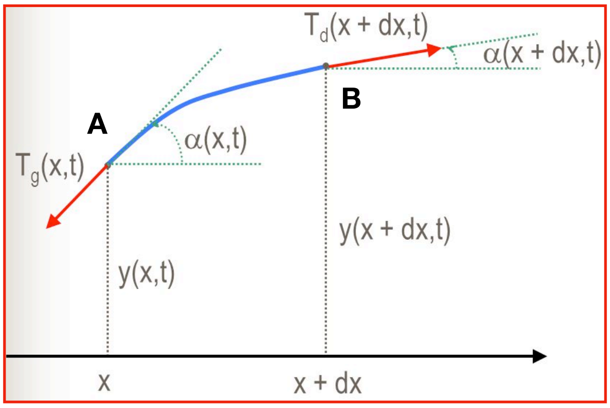
Au repos la corde est tendue avec la tension T_0 et on néglige l'effet de la pesanteur devant la tension.
On s'intéresse aux petits mouvement transversaux donc $\perp$ à la direction initiale de la corde. Alors le point de la corde situé à l'abscisse x au repos, se déplace à l'instant t de $y(x,t)$ selon l'axe Oy.
On appelle $\alpha(x,t)$ l'angle que fait la tangente à la corde au point x à l'instant t avec l'axe horizontal Ox.



Les mouvements sont petits donc $|y(x,t)| \ll L$ et $|\alpha(x,t)| \ll 1$ donc $tan(\alpha) \approx \alpha = \dfrac{\partial y}{\partial x}$

Considérons un élément de corde AB compris entre x et x+dx. Sa longueur est $ds = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2}$ de masse $dm = \mu ds$. Il est soumis à :

- La tension de la portion du fil située à droite de B : $\overrightarrow{T}(x+dx,t)$
- La tension à gauche de A : $-\overrightarrow{T}(x,t)$



PFD sur l'élément de la corde : $dm \dfrac{\partial^2 y}{\partial t^2} \overrightarrow{ey} = \overrightarrow{T}(x+dx,t) - \overrightarrow{T}(x,t)$

<u>En projettant sur Ox</u> (et par $cos(\alpha) \approx 1$) : "On trouve que la tension ne dépend pas de x"

$0 = (Tcos\alpha)(x+dx,t) - (Tcos\alpha)(x,t) \approx T(x+dx,t) - T(x,t) = \dfrac{\partial T}{\partial x}dx$ donc $T(x) = T_0$

<u>Sur Oy</u> : $dm \dfrac{\partial^2 y}{\partial t^2} = (Tsin\alpha)(x+dx,t) - (Tsin\alpha)(x,t) \approx (T\alpha)(x+dx,t) - (T\alpha)(x,t)$

Et par $dm = \mu dx \sqrt{1 + \left(\dfrac{dy}{dx}\right)^2}$ et au 1er ordre $dm = \mu dx$: $\mu dx \dfrac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \dfrac{\partial (T\alpha)}{\partial x} dx = T \dfrac{\partial \alpha}{\partial x} dx$

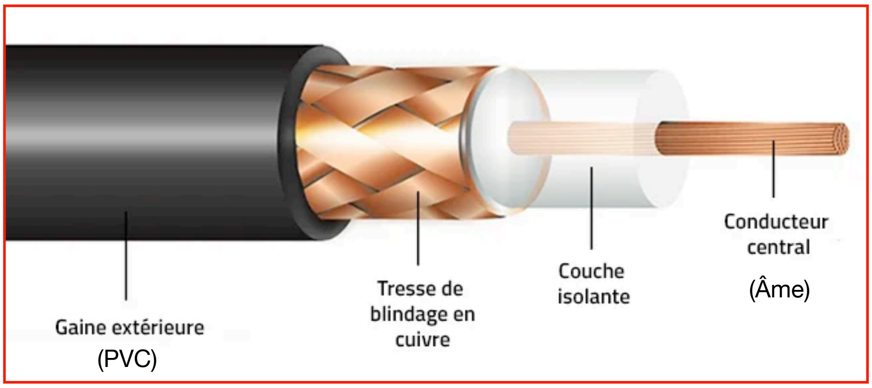
Donc : $\mu \dfrac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T \dfrac{\partial^2 y}{\partial x^2}$

L'élongation $y(x,t)$ vérifie alors **l'équation d'onde de d'Alembert** : $\dfrac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \dfrac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ tq $c = \sqrt{\dfrac{T}{\mu}}$

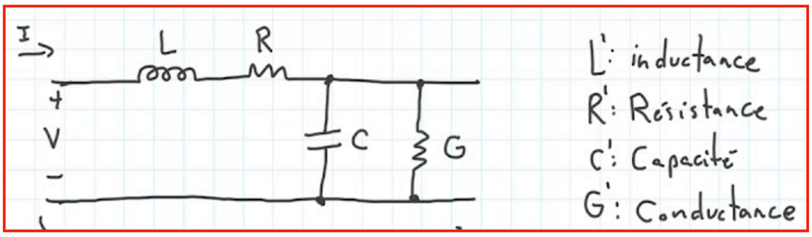
"c a la dimension d'une vitesse" .
De nombreux phénomènes physiques satisfont à une équation identique. Exemple le câble coaxial.

C. Équation de d'Alembert pour le câble coaxial

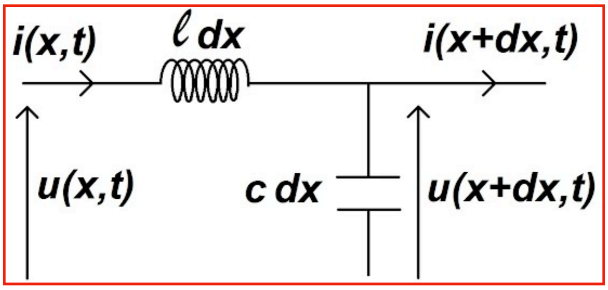
Les câbles coaxiaux sont couramment utilisés dans la vie de tous les jours comme câble d'antenne de télévision par exemple.



L'âme est un cylindre conducteur en cuivre. Le conducteur extérieur est constitué d'une tresse de fils de cuivre très fins. Ces 2 conducteurs sont séparés par un isolant (diélectrique). La tresse extérieure est reliée à la masse du réseau et l'âme reçoit le signal. La gaine extérieure (souvent en PVC) sert de protection mécanique et isolation.



R : pertes ohmiques dans le conducteur
L : stockage de l'énergie magnétique
C : entre le fil central et la tresse
G : pertes dans le diélectrique
Là on suppose que les conducteurs sont très peu résistifs (Cu de haute qualité) et que le diélectrique est parfait (faible G). Donc la propagation est sans atténuation et pas de dissipation d'énergie.



Un signal (courant ou tension) ne se propage pas instantanément : il avance progressivement le long de la ligne, en subissant des effets résistifs, capacitifs, et inductifs à chaque petit segment.
On modélise là un tronçon de câble compris entre x et x+dx. C'est le modèle des constantes réparties. l et c sont respectivement l'inductance linéique et la capacité linéique. $u(x,t)$ la différence de potentiel entre l'âme et la gaine et $i(x,t)$ l'intensité du courant dans l'âme (à x et t). On choisit dx petit devant la distance caractéristique de variation de $u(x,t)$ et $i(x,t)$.

<u>Les lois de l'électrocinétique :</u>

Loi des mailles : $u(x,t) = l\,dx\,\dfrac{\partial i(x,t)}{\partial t} + u(x+dx,t)$

Loi des noeuds : $i(x,t) = c\,dx\,\dfrac{\partial u(x+dx,t)}{\partial t} + i(x+dx,t)$

Au 1er ordre en dx : $\dfrac{-\partial u(x,t)}{\partial x} = l\,\dfrac{\partial i(x,t)}{\partial t}$ et $\dfrac{-\partial i(x,t)}{\partial x} = c\,\dfrac{\partial u(x,t)}{\partial t}$

En dérivant la 1ère par rapport à t (ou x) et la 2e par rapport à x (ou t) et par théorème Schwarz :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{lc}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \text{ou} \quad \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} = \frac{1}{lc}\frac{\partial^2 i}{\partial x^2}$$

Donc u et i vérifient l'équation de d'Alembert avec $c = \sqrt{\dfrac{1}{lc}}$ avec $[l] = \mathrm{H\,.\,m^{-1}}$ et $[c] = \mathrm{F\,.\,m^{-1}}$

Et le produit LC est τ donc $[lc] = HFm^{-2} = s^2m^{-2}$ homogène à l'inverse d'une vitesse au carré.

D. Récapitulation

L'équation d'onde de d'Alembert unidimensionnelle pour une grandeur physique scalaire $s(x,t)$:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 s}{\partial x^2}$$

Le cas général tridimensionnel pour une grandeur vectorielle : $\frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = c^2 \Delta \vec{u}$

Où c a les dimensions d'une vitesse.

2. Solutions de l'équation de d'Alembert unidimensionnelle

C'est une équation linéaire donc toute combinaison linéaire de solutions de cette équation est une nouvelle solution. Je vais vous présenter les familles de solutions à partir desquelles nous pourrons construire n'importe quelle solution.

P.531

A. Ondes progressives

Perturbation créée localement se propage dans une direction donnée sans se déformer
Forme générale des ondes progressives

On cherche une solution sous la forme s(x,t) = A cos(wt – kx + phi)
Calcul pour déterminer la relation de dispersion : k = w/c (on injecte l'expression de s dans l'équation de d'Alembert)
Définition des périodes temporelle et spatiale

B. Ondes stationnaires

Simulation qui présente une onde stationnaire à partir de la somme de deux ondes progressives :
https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/ondes_stationnaires/stationnaires.php

s(x,t) = g(t) f(x)
On injecte dans d'Alembert ce qui donne finalement g''(t) = cte x g(t)
Etude des possibilités selon le signe de la cte.
On fait pareil avec f(t) et on trouve finalement que s(x,t) = s_0 cos(wt + phi) cos(wt – psi)

Illustration avec la corde de Melde :
Schéma expliquant le principe
Conditions aux limites : y(x=0, t) = 0 et y(x=L, t) = 0
Recherche des constantes (on cherche s(x,t) = A cos(wt + phi) sin(kx + psi))

Conclusion

Titre : On1 : Ondes progressives et ondes stationnaires

Présentée par : Anouk Perreau **Rapport écrit par** : Marie-Louise Communal

Correcteur : Arnaud Raoux **Date** :20/09/2025

Bibliographie		
Titre	**Auteurs**	**Éditeur**
Physique tout-en-un PCSI	**B. Salamito**	**Dunod**
Physique tout-en-un PC/PC*	M.-N. Sanz	Dunod
Physique des ondes 2ème année PC-PC*-PSI-PSI*	C. Frère, P. Krempf	ellipses

Compte-rendu détaillé de la leçon

Niveau choisi pour la leçon **: CPGE 2ème année PC**

Pré-requis **:**
Ondes (PCSI)
Calcul d'incertitudes (PCSI)
Onde acoustique dans un solide élastique – équation de d'Alembert (PC)

I / Généralités sur les ondes

A] Rappel

Onde : phénomène physique dans lequel une perturbation locale se propage sans déplacement net de matière ou de charge. [je ne suis pas fan de cette définition qui parle de propagation alors qu'il existe des ondes stationnaires. « Perturbation d'un état d'équilibre » me semble plus général]

B] Équation de d'Alembert

C'est un exemple d'équation d'onde.
Énoncé de l'équation
Quelles solutions à cette équation ?

II / Ondes progressives

A] Définition

Forme générale des ondes progressives (propagation selon l'axe Ox à la vitesse c, dans le sens des x croissants) : s(x,t) = f(t-x/c)
Démonstration que c est bien la vitesse de propagation de l'onde en considérant l'onde à deux instants t et t + dt

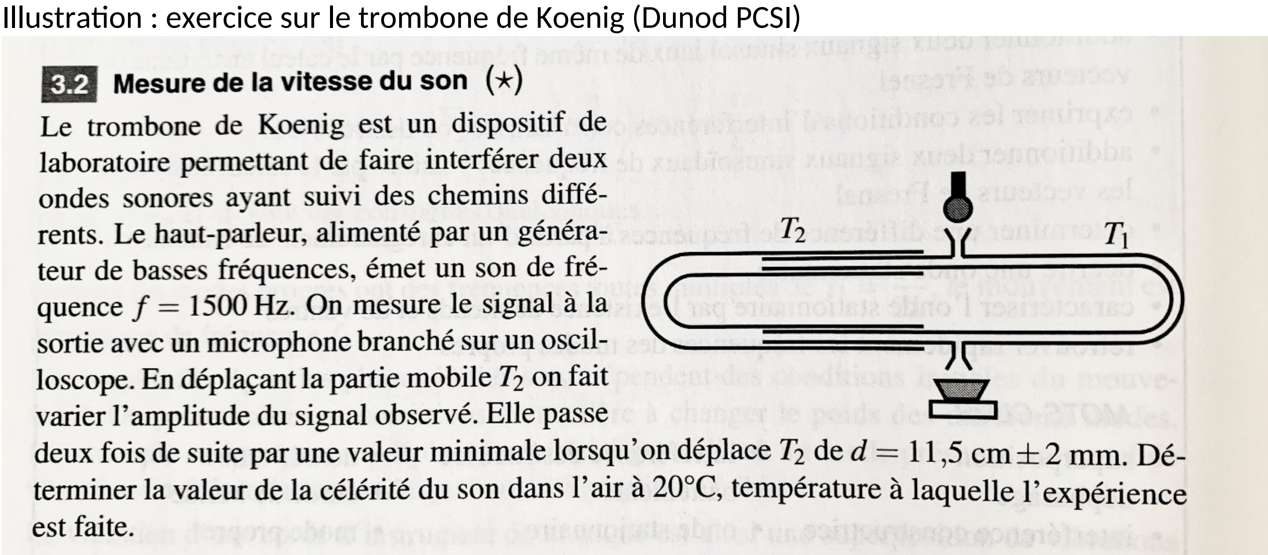
B] Onde progressive sinusoïdale

On cherche une solution sous la forme s(x,t) = A cos(wt – kx + phi)
Calcul pour déterminer la relation de dispersion : k = w/c (on injecte l'expression de s dans l'équation de d'Alembert)
Définition des périodes temporelle et spatiale

C] Principe de superposition Interférences : exercice sur le trombone de Koenig (passage imposé)

Énoncé du principe : quand au moins deux ondes se rencontrent en un point de l'espace, la perturbation résultante en ce point est la somme des amplitudes des deux ondes.

Illustration : exercice sur le trombone de Koenig (Dunod PCSI)



3.2 Mesure de la vitesse du son (⋆)

Le trombone de Koenig est un dispositif de laboratoire permettant de faire interférer deux ondes sonores ayant suivi des chemins différents. Le haut-parleur, alimenté par un générateur de basses fréquences, émet un son de fréquence $f = 1500$ Hz. On mesure le signal à la sortie avec un microphone branché sur un oscilloscope. En déplaçant la partie mobile T_2 on fait varier l'amplitude du signal observé. Elle passe deux fois de suite par une valeur minimale lorsqu'on déplace T_2 de $d = 11{,}5\ \text{cm} \pm 2$ mm. Déterminer la valeur de la célérité du son dans l'air à 20°C, température à laquelle l'expérience est faite.

Schéma du trombone de Koenig (slide), principe de fonctionnement
Calcul de la célérité du son dans l'air à partir de la distance de coulissement entre 2 minimums d'amplitude en sortie
AN : c = 345 m/s
Calcul d'incertitudes sur la valeur obtenue.

III / Ondes stationnaires

A] Exemple : somme de 2 ondes progressives

Simulation qui présente une onde stationnaire à partir de la somme de deux ondes progressives : https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/ondes_stationnaires/stationnaires.php

Calcul de la somme de 2 ondes progressives de même fréquence se déplaçant en sens opposés -> on trouve expression finale où la variation en temps et en espace sont découplées.

B] Forme générale

s(x,t) = g(t) f(x)
On injecte dans d'Alembert ce qui donne finalement g''(t) = cte x g(t)
Etude des possibilités selon le signe de la cte.
On fait pareil avec f(t) et on trouve finalement que s(x,t) = s_0 cos(wt + phi) cos(wt – psi)

C] Propriétés

Illustration avec la corde de Melde :
Schéma expliquant le principe
Conditions aux limites : y(x=0, t) = 0 et y(x=L, t) = 0
Recherche des constantes (on cherche s(x,t) = A cos(wt + phi) sin(kx + psi))

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

Retour sur l'introduction : photo de la houle, que cherche-t-on à montrer avec ?

Système qui répond à une excitation avec des modes propres

Définition de la surface d'onde ?

Surface sur laquelle la phase de l'onde est identique en chaque point.

Comment montrer à partir de l'expression s(x, t) = cos(wt – kx + phi) que les surfaces d'onde de s sont des plans ?

Il faut à t fixé que kx -wt = cte => surface d'équation x=cte

Quelle autre caractéristique de l'onde que décrit la houle (à part progressive et plane)

C'est une onde qui a l'air harmonique aussi.

Quelle différence entre un violon et une guitare ? Comment expliquer qu'il y a une différence entre le son d'une guitare et le son d'un violon alors que la fréquence (la note) est la même ?

La différence de son s'appelle le timbre de l'instrument. Le timbre est l'amplitude relative des harmoniques. Celui-ci dépend de l'instrument, et de la façon d'exciter la corde qui a un impact direct sur les modes excités et donc sur le son produit (même si la fréquence fondamentale ne change pas).

Comment faire rentrer les ondes stationnaires dans la définition des ondes donnée au début de la leçon ?

Il vaut mieux ne pas parler de propagation lorsqu'on définit une onde.

Peut-on généraliser l'équation de d'Alembert ? Trouve-t-on les mêmes solutions ou cela modifie-t-il le résultat ?

Oui (on introduit le laplacien).

Toutes les solutions de l'équation de d'Alembert sont-elles des ondes progressives ? Ou peuvent-elles toutes s'écrire comme la somme d'ondes progressives ?

On peut toutes les écrire comme somme d'ondes progressives (mais les solutions peuvent être stationnaires)

Réexpliquer le dispositif du trombone de Koenig. Ondes progressives ou stationnaires dans le trombone ? Pourquoi l'onde sonore ferait-elle des virages dans le tube du trombone ?

Explication du trombone de Koenig : https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://materiel-physique.ens-lyon.fr/Notices/P72.2_Trombone%2520de%2520K%25C3%25B6ening_MATLABO.pdf&ved=2ahUKEwjR5rbNoNeIAxXJVaQEHcraJlQQFnoECBMQAQ&usg=AOvVaw0hIcWii_4zg5y6GnmDBrIl

On peut voir les ondes dans le trombone soit comme des ondes progressives qui interfèrent à la sortie du tube, soit comme des ondes stationnaires qui ont un nœud là où on observe un minimum d'intensité sonore.

Quelle est la longueur d'onde de l'onde qu'on envoie dans le tube ?

Lambda ~ 20 cm. Il n'y a qu'un seul mode possible qui se propage dans le trombone.

Quelle vitesse a-t-on calculé ? Vitesse de phase, de groupe ?

Ici, vitesse de phase mais qui correspond aussi à la célérité car on s'intéresse à une onde harmonique.

L'incertitude sur le calcul de la célérité du son dans l'air est-elle satisfaisante ? Est-il pertinent de présenter cette méthode à des élèves pour calculer la célérité du son dans l'air ?

L'incertitude est satisfaisante pour la méthode utilisée. Au-delà du calcul de la célérité, cette méthode a l'intérêt de présenter un phénomène d'interférences aux élèves.

Quelle relation entre lambda et la longueur de la corde (corde de Melde) ?

L = p * lambda/2

Commentaires lors de la correction de la leçon

Bonne structure de la leçon. Néanmoins le contenu manque un peu d'applications. S'autoriser à sortir des applications basiques pour aller chercher des domaines de la physique plus variés, des expériences plus récentes.
Exemples : interférences, effet Doppler, sonar, échographie, musique (spectre), laser, quantique, etc.

- La 1ère partie très courte n'était peut-être pas nécessaire (mettre le contenu dans l'introduction).
- Attention à la définition de l'onde. Aller voir dans un dictionnaire de physique pour avoir une définition.
- C'est bien de se placer en PC pour pouvoir mettre l'équation de d'Alembert, mais le reste du contenu est plutôt PCSI. Ça reste néanmoins justifiable de se placer en PC pour avoir un formalisme un peu plus général que celui qu'on aurait en PCSI.
- On aurait pu démontrer que les ondes progressives sont une base de solution de l'équation de d'Alembert.
- On aurait pu faire le lien entre le trombone de Koenig et les ondes stationnaires pour introduire la partie suivante.
- La partie III.3 s'est limitée aux conditions aux limites ce qui est dommage. Attention aussi à ne pas changer la forme générale de l'onde stationnaire entre 2 sous-parties
- Si on parle de la corde de Melde, alors faire l'expérience devant le jury !
- Mieux développer sur les modes : milieu confiné => quantification de l'énergie et énergie minimale (comme en mécanique quantique).

Remarques de forme :
C'est mieux de ne pas écrire le plan au tableau au début pour éviter de se faire avoir par le temps et de sauter une partie alors qu'elle est écrite au tableau.

Exemples de « passages obligés » sur cette leçon

Présenter un exercice sur le trombone de Koenig

Exploiter expérimentalement le dispositif du trombone de Koenig

Illustrer expérimentalement les modes propres avec la corde de Melde

Exploiter expérimentalement le dispositif du tube de Kundt

Titre : **Ondes progressives, Ondes stationnaires**

Présentée par : Maxime Castello **Rapport écrit par** : Elric Sivierou

Correcteur : Jules Fillette **Date** : 9 septembre

Bibliographie		
Titre	**Auteurs**	**Éditeur**
Dunod tout en un PC/PC*		

Attention, bibliographie un peu légère. Même si l'ouvrage cité fait référence sur les programme de CPGE il ne doit pas priver de diversifier les ouvrages de prépa dont on se sert (voir par exemple le H-Prépa sur les ondes !) et les polycopiés de cours notamment celui d'E. Thibierge sur les ondes, ancien AGPR à Lyon : http://www.etienne-thibierge.fr/agreg/ondes_poly_2015.pdf

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE
Prérequis : Electromagnétisme dans le vide, opérateurs différentiels

I. Exemple de l'onde Electromagnétique

a) Couplage et relations de structure

La première chose à invoquer est le couplage entre deux grandeurs via deux équations les reliant par l'espace et le temps. Dans le cas de la lumière on va avoir un couplage entre le champ électrique et l'agitation magnétique via les équations de maxwell dans le vide :

On observe nettement le couplage une variation temporelle de H induit une variation spatiale de B et vice versa. On appelle les équations de couplages les relations de structure de l'onde.

3'10

b) Relations de d'Alembert

En jouant un peu avec ces équations on va pouvoir obtenir l'équation caractéristique des ondes en propagation libre non dispersive : l'Équation de d'Alembert.

Obtention de l'équation de d'Alembert pour le champ électrique.

En analysant un peu l'équation on constate le couplage spatial et temporel, plus important encore sa linéarité qui nous permettra l'étude a l'aide des nombres complexes ou encore le fait qu'elle fait apparaître une grandeur caractéristique de l'onde qu'est sa célérité. En effet on constate par une analyse dimensionnelle que la constante $1/\varepsilon_0\mu_0$ doit être homogène au carré d'une vitesse et cette vitesse on la connait c'est la vitesse de la lumière dans le vide.

7'15

II. Solutions de l'équation de d'Alembert

L'équation de d'Alembert peut difficilement se résoudre en toute généralité et dans le cadre de ce cours on va se placer dans une situation de surface d'onde "gentille" pour résoudre une équation de d'Alembert unidimensionnelle. On rappellera que sur une surface d'onde le champ ou le signal à la même valeur.

a) Surface d'onde plane

Les surfaces d'onde plane symbolisent les ondes se propageant dans une seule direction on a alors des plans d'onde verticaux, et cela simplifie le traitement de l'équation de d'Alembert. Imaginons une onde se propageant vers les x croissants

La démonstration de la solution de l'équation de d'Alembert n'est pas exigible mais elle nous permettrait d'obtenir les solutions générales comme :

$$s(x,t) = f\left(t - \frac{x}{c}\right) + g\left(t + \frac{x}{c}\right) = F(x - ct) + G(x + ct)$$

Comme son nom l'indique l'onde stationnaire n'affiche pas de propagation apparente mais elle cache en fait la somme de deux ondes progressives sinusoïdales de même fréquence mais de sens opposé

Exemple : Ondes acoustiques et OPPH

On peut s'arrêter sur l'expression de l'onde progressive sinusoïdale. On notera la périodicité spatiale et temporelle de l'onde. En effet si on se place à un x fixé on verra le signal osciller à la pulsation ω et si on observe la trace du signal après un temps t on identifiera une périodicité spatiale de longueur d'onde 2π/k.

18'

III. Le cas de l'onde stationnaire

Comme son nom l'indique l'onde stationnaire n'affiche pas de propagation apparente mais elle cache en fait la somme de deux ondes progressives sinusoïdales de même fréquence mais de sens opposé. Découplage temps et espace

Exemple : corde de guitare - Conditions aux limites, pulsations propres et modes propres.

27'

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

- Précision sur le programme année : PC - Tout est inclus ? oui

Le niveau ne posait effectivement pas problème à part l'incursion de l'agitation magnétique $\vec{H}$ qui n'est pas au programme de prépa (et qui d'ailleurs n'était pas utile ici).

- Prérequis annoncés est-ce qu'ils suffisent ?

Non, il fallait ici avoir des notions de mécanique pour la corde et d'acoustique. C'est normal, mais il faut le préciser.

- Est-ce que tu vois d'autres types d'ondes que celles présentées qui respectent les équations ? Toutes les ondes respectent-elles l'équation de d'Alembert ?

Non, évidemment (voir électromag, câble coax, ondes de surface, etc…) mais ici il est légitime de se placer dans un cas simple avant d'étudier les subtilités dans la suite du cours (Belle ouverture !)

- C'est quoi une onde ? Entre son et lumière liste brève qui les réunis et qui fait d'elles des ondes ?

Champs propagé pas identique, milieu de propagation qui change. Perturbation locale qui se déplace sans déplacer de matière en moyenne.

Si on décide de placer ce chapitre comme une introduction à la physique des ondes il faut forcément discuter de ce qu'est une onde en prérequis. N'essayez pas d'en faire une définition synthétique en 2 phrases c'est impossible, mais on peut tirer des éléments communs à toutes les ondes qui permettent de définir les contours du phénomène : propagation (le fait qu'on retrouve en un point le signal qui était en un autre point un instant avant) et avec elle la notion de source et de célérité, déplacement d'énergie dans l'espace, couplage entre deux champs vectoriels et/ou scalaire ($\vec{E}$ et $\vec{B}$, p et $\vec{v}$, …) qui cache la notion d'impédance. Périodicité spatiale et temporelle.

Mais il faut aussi avoir en tête ce qui différencie les ondes entres elles : domaines fréquentiels, nécessité d'un milieu matériel, vitesse de propagation, relation de dispersion, …

- Si on prend les ondes de surfaces est-ce qu'elles transportent de la matière ?

Si, le transport de matière est possible lorsqu'on sort de l'approximation linéaire (dérive de Stokes au premier ordre).

- Est-ce qu'on peut penser à des ondes électromagnétiques stationnaire et sonore progressive ?

Le laser est un bon exemple d'onde stationnaire électromagnétique. *On trouve des ondes sonores stationnaires dans les instruments de musique. Voir à ce sujet la compo 2009.*
Ma question visait surtout à soulever le fait qu'ici un message parasite est passé, que les ondes progressives sont électromagnétiques ou sonores, et que les ondes sur une corde sont stationnaire. C'est évidemment complètement absurde et il faut faire attention à ne pas le laisser penser naïvement aux élèves.

- Couplage entre H et E est-ce qu'il est quantifié ?

Oui, par l'impédance propagative qui est le coefficient de proportionnalité entre « l'effet » et « la cause » de l'onde (i.e. les deux grandeurs couplées). *Elle ne dépend que du milieu (considérant aussi le vide) de propagation.*

- Pourquoi avoir opter pour l'utilisation du vecteur nabla ? Est-ce qu'on y perd quelque chose ?

Pour rendre plus simple les démonstrations. On perd un peu d'aspect pédagogique car les termes comme divergence ont une définition.
C'est légitime, sauf qu'on perd effectivement assez vite le fil de quel opérateur on utilise quand, qui s'applique à un scalaire/un vecteur, on perd aussi le sens physique de la divergence et du rotationnel. Pédagogiquement c'est un choix qui n'est pas rédhibitoire mais discutable. Réfléchissez-y, il n'est pas anodin.

- Equation de maxwell qu'est-ce qu'elles retranscrivent ?

Maxwell Gauss donne le théorème de gauss. Max-Flux donne que pas de divergence locale du champ $\vec{B}$ *– aussi résumé « le champ magnétique est à flux conservatif ». Max-Ampère redonne le théorème d'Ampère (en statique) et Max-Faraday mène aux lois de l'induction.*

- Relation de structure c'est quoi pour une onde EM ? C'est quoi la structure du champ sur une onde propagative ? C'est quoi structure du champ ?

La relation de structure donne l'orientation relation des champs couplés et de la direction de propagation. Si on la lit correctement (voir ouvrages de CPGE) elle nous dit que $\vec{k}, \vec{E}$ et $\vec{B}$ forment un trièdre direct.

- Comment savoir si sortir un moins ou pas avec k et ω quand on dérive en complexe ?

Ça dépend de la convention utilisée. *Absolument, donc ce n'est pas inutile d'une part de préciser la convention utilisée et d'appuyer sur le fait que c'est un choix et qu'on pourra trouver des exos/sujets dans lesquels un choix différent est fait.*

- Solutions de d'Alembert, c'est quoi une surface d'onde ?

Surface sur laquelle le champ est constant. *Là encore si c'est la première fois qu'on rencontre cette notion (et c'est le cas ici vu les prérequis) il faut s'arrêter un peu dessus, la définir proprement (**écrire** la définition) faire au moins un schéma.*

- Qu'est-ce qu'on entend par surface d'onde gentille ?

Solution facile à trouver. *Attention à ce terme de vocabulaire pas très officiel !*

- On a fait un graphe avec le pic qui se déplace, on peut dire quoi de son amplitude ? Dans la deuxième solution (sphérique) il y a absorption ?

Dans un milieu qui n'absorbe pas c'est la même partout. Non c'est que l'énergie est conservée dans le cercle. *Attention à ne pas confondre **absorption** (l'énergie de l'onde décroît car elle est transférée au milieu) et **atténuation** (l'énergie de l'onde décroît du fait de la géométrie de la propagation).*

- On a sorti des solutions non dispersives, prouver qu'elles sont solution de D'Alembert.
- On a pris ensuite l'exemple des ondes acoustique, elle vient d'où D'Alembert ?

On l'obtient en combinant l'équation de conservation de la masse, celle d'Euler et le lien thermodynamique entre ρ et P via le coefficient de compressibilité isentropique. *Les trois étant linéarisées.*

- Pourquoi avoir choisi de chercher la pression sous la forme d'un cosinus ? Tous les sons qu'on émet sont des $a * \cos(\dots)$?

C'est fondamental par décomposition en série (pour les signaux périodiques) ou transformée (pour les signaux quelconque) de Fourier !!! Il faudra rapidement être au clair là-dessus !

- Pédago : Comment est-ce qu'on aurait pu introduire ce nouveau type d'onde (stationnaire) ?

J'aurais pu faire l'expérience de la corde de melde.

- Qu'advient-il de l'énergie dans tout ce problème ? Dans le cas des ondes progressive et stationnaire ?

Dans le cas progressif elle se propage dans le sens de l'onde *et à la même vitesse. Dans le cas stationnaire elle reste coincée entre deux nœuds. Elle est maximale sur les ventres. D'ailleurs, elle s'établit nécessairement pendant un régime transitoire.*

Commentaires lors de la correction de la leçon

Présentation très positive dans la forme, avec une bonne aisance. Aspect très détaché des notes c'est très bien, Bon équilibre entre écris au tableau et note.

Il a manqué 3 trucs essentiels :

- Une Manip – *Ici elle est possible et le rapport précise bien que lorsque c'est possible ne pas en faire mène à une minoration de la note.*
- Ecrire des mots clefs ou des phrases – *Il faut avoir en tête que l'élève ne garera comme trace pérenne du cours que ce qui était au tableau et qu'il a recopié (au mieux…) il faut donc que les définitions, les théorèmes et les mots clefs y apparaissent en toute lettres.*
- Plus de schémas – *Cela a d'autant plus manqué ici que c'est une leçon très graphique avec des ondes progressives, des surfaces d'onde, des ondes stationnaires etc… Des schémas auraient très clairement aider à appuyer les raisonnements.*

Il vaut mieux faire très proprement des notions pas très dures. Le sens physique est préféré aux mathématiques. Il faut être affuté, définir les quantités qu'on utilise, tout le sens physique qui se cache derrière.

Faire attention à la gestion des tableaux (ne pas effacer ce qu'on vient d'écrire). *On peut s'entraîner pendant l'année à se limiter à un seul des tableaux coulissants car il est probable de n'avoir pas autant de place le jour J !*

Il faut faire une introduction plus précise qu'une simple phrase. Il faut réfléchir au message qu'on veut faire passer aux élèves.

Titre parfaitement respecté. Il sert de base. Il faut définir les termes du sujet.

Dans l'introduction on peut dire ce que les élèves doivent retenir. 2-3 min conclusion une mise en perspective et apprécié.