

Chapitre 16 : Ondes

Qu'il s'agisse du son, de la lumière ou des séismes, la modélisation ondulatoire est aujourd'hui utilisée pour décrire de nombreux phénomènes de la vie quotidienne. Certaines de ces modélisations commencent à être bien maîtrisées par les scientifiques tandis que d'autres plus récentes suscitent toujours beaucoup d'interrogations. On peut citer par exemple les ondes de matières au cœur des problèmes quantiques comme les ondes gravitationnelles en jeu dans les interactions décrites par la relativité générale.

Au delà de cette transversalité de la description ondulatoire, l'onde a également une place importante du point de vue épistémologique. En effet, plusieurs grandes confrontations scientifiques ont mis en jeu un modèle ondulatoire *a priori* contre-intuitif qui a finalement rencontré un fort succès. On peut, pour cela, mentionner les deux derniers exemples sus-cités tout comme le grand questionnement sur la lumière opposant notamment les théories de Huygens et Newton aux XVII^e et XVIII^e siècles.

QUESTION

I - Généralités sur les ondes

A Un phénomène transversal

DÉFINITION

Onde :

Remarque : On parle parfois d'information au lieu de perturbation.

CARACTÉRISTIQUES DES ONDES

Onde	Milieu	Perturbation
Élastique		
Acoustique		
Électromagnétique		
Gravitationnelle		

Remarque : La particule associée à la lumière est le photon, c'est cette particule qui est support de l'onde lumineuse et qui permet sa propagation.

B Les ondes acoustiques

La fréquence des ondes acoustiques **audibles** va de quelques dizaines de hertz à une quinzaine de kilohertz. Il est à noter que ces deux limites, et tout particulièrement la plus haute, varient avec l'âge et d'éventuels dommages causés par une exposition à des bruits trop intenses.

En fonction de la qualité requise, des intervalles différents sont retenus pour les multiples applications :

- La norme HiFi (« high fidelity »), qui vise une excellente restitution du son, retient la plage 20 Hz - 20 kHz ;
- En téléphonie mobile, le souhait de limiter la plage allouée à chaque communication en vue d'en transmettre un grand nombre sur les mêmes équipements conduit à restreindre très fortement cette plage : on se

contente couramment d'une plage allant de 300 Hz à 3400 Hz, et même moins en tenant compte des algorithmes de compression ;

- les annonces sonores pré-enregistrées dans les lieux publics exploitent souvent une bande passante encore plus étroite, ce qui permet de diminuer la taille du fichier correspondant à chaque annonce au détriment de la qualité acoustique du message.

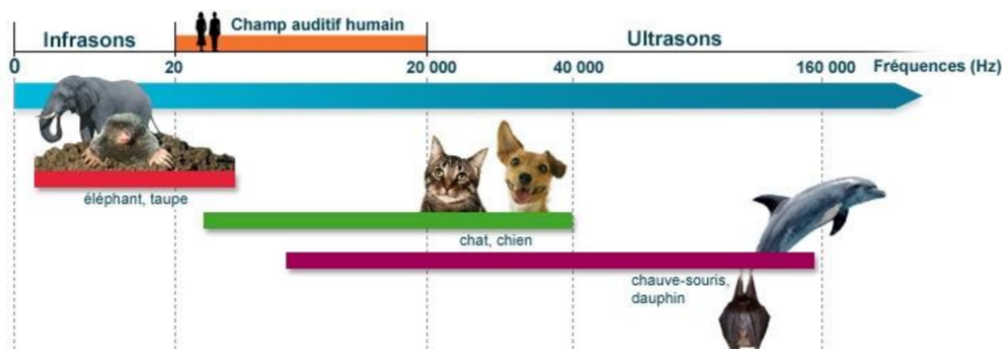


FIGURE 1 : Les fréquences audibles diffèrent d'une espèce animale à une autre.

Dans le domaine des **ultrasons**, on peut distinguer deux applications notables :

- L'échographie, utilisant des ondes de fréquences comprises entre 1,5 MHz et 5 MHz pour les structures les plus grandes (abdomen ou cœur d'un enfant par exemple) comme des ondes de fréquences proches de la dizaine de mégahertz pour de plus petits éléments de l'organisme (artères ou veines par exemple).
- Le sonar (SOund Navigation And Ranging) exploite des ondes de fréquences allant de quelques kilohertz pour la détection d'objets très volumineux à très grande distance (on reste ici dans le domaine audible) jusqu'à des centaines de kilohertz pour une détection très précise d'objets de petite tailles placés à faible profondeur.

Le domaine des **infrasons** n'a pas connu d'utilisations remarquables jusqu'à son exploitation lors de la première guerre mondiale et la détection de l'artillerie ennemie. Les véhicules motorisés sont en effet d'excellentes sources d'ondes infrasonores caractéristiques par leur très grande portée. Cette utilisation guerrière a permis le développement de nouvelles techniques de détection de phénomènes naturels (tsunamis ou éruptions volcaniques par exemple) ou humains (bang sonique d'avions ou essais nucléaires notamment).

C Les ondes électromagnétiques

Les fréquences rencontrées pour les ondes électromagnétiques s'étalent sur une plage très grande, allant usuellement des ondes radiophoniques de basse fréquence jusqu'aux rayons gamma de haute fréquence. Les bandes de fréquences attribuées à de nouveaux dispositifs de communication doivent prendre en compte les bandes de fréquences des dispositifs existants ainsi que des contraintes techniques associées à ces fréquences. Cet aspect technique sera notamment traité plus en profondeur en deuxième année.

Retenons quelques bandes de fréquences de dispositifs utilisés quotidiennement :

- le transport des ondes radiophoniques utilise les **ondes radio**, dont la fréquence porteuse est de l'ordre de la centaine de mégahertz pour la bande FM usuellement utilisée. Par exemple, la fréquence « 107,7 » de Radio VINCI Autoroute indique une fréquence de porteuse de 107,7 MHz ;
- La TNT exploite un domaine spectral de fréquences supérieures, comprises entre 470 et 790 MHz ;
- La téléphonie mobile utilise des ondes de fréquences encore plus élevées, de l'ordre du gigahertz (10^9 Hz), il s'agit ainsi de **micro-ondes** ;
- Le réseau WiFi (« wireless fidelity », par analogie avec HiFi) repose lui sur l'utilisation de deux bandes de fréquences, la première autour de 2,4 GHz et la deuxième à un peu plus de 5 GHz.

Dans le domaine médical, des ondes de hautes fréquences sont souvent utilisées :

- La radiographie utilise des ondes dont les fréquences sont comprises entre 10^{16} Hz et 10^{20} Hz, les **rayons X**. Son principe se base sur le noircissement d'une plaque photographique par ces rayons X. Le squelette est souvent imagé par cette technique pour sa forte absorption des rayons X qui produit une image blanche sur le cliché.

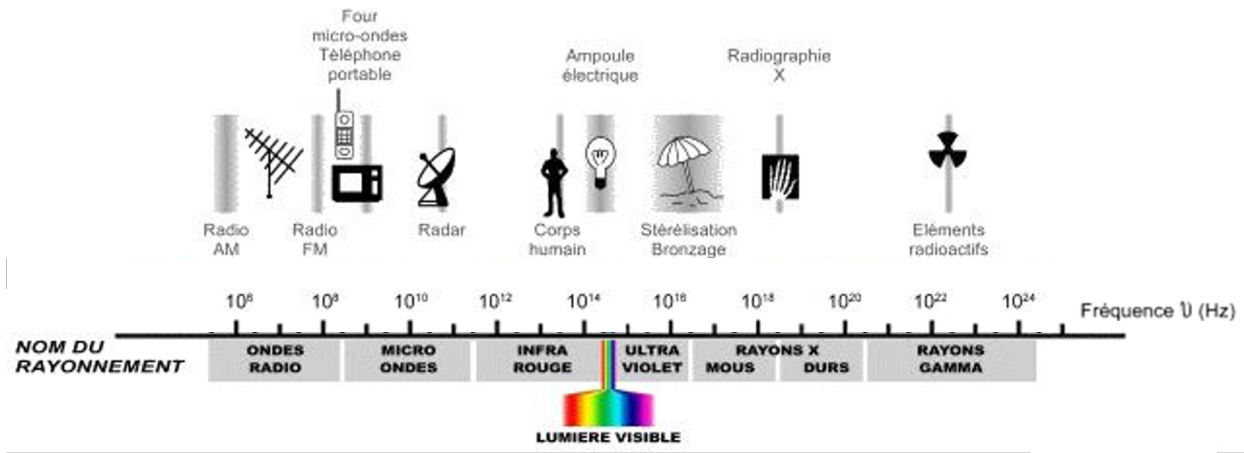


FIGURE 2 : Les principales applications des ondes électromagnétiques utilisent une bande de fréquences allant du mégahertz au yottahertz

- Le scanner utilise également des rayons X mais son utilisation, couplée à l'injection de produits absorbants, est généralement plus lourde pour le patient. En effet, cette technique permet une imagerie en coupe d'organes du corps et permet ainsi une plus grande précision de diagnostic qu'une radiographie par exemple.
- Certaines techniques de tomographie reposent sur l'injection dans l'organisme de molécules marquées par des isotopes radioactifs. Ceux-ci émettent alors des ondes de haute fréquence appelées **rayons gamma** qui sont capturées par des caméras adaptées.

II - Propagation des ondes

A Modélisation de la propagation d'une onde

1 Modèle de l'onde progressive

VITESSE DE PROPAGATION

Une onde étant caractérisée par une émission et une réception, on définit une vitesse de propagation appelée **célérité**, qu'on note usuellement c .

Données : Quelques valeurs de célérités à retenir :

- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,0 \cdot 10^8$ m · s
- Célérité du son dans l'air : $c = 340$ m · s
- Célérité du son dans l'eau : $c = 1480$ m · s

DÉFINITION

Onde progressive :

On la décrit par une fonction $s(M, t)$ dépendant de l'espace et du temps et on lui associe une célérité c .

Onde progressive à une dimension :

On la notera (Ox) , ainsi :

$$s(M, t) = s(x, t)$$

2 Première expression de l'onde progressive**EXPRESSION D'UNE ONDE PROGRESSIVE DANS LE SENS DES x CROISSANTS**

Une onde progressive se propageant à la célérité c dans la direction de l'axe (Ox) , dans le sens positif de cet axe, est décrite par un signal s de la forme mathématique suivante :

Ici, f est une fonction quelconque dont l'argument a la dimension d'une durée.

EXPRESSION D'UNE ONDE PROGRESSIVE DANS LE SENS DES x DÉCROISSANTS

Une onde progressive se propageant à la célérité c dans la direction de l'axe (Ox) , dans le sens négatif de cet axe, est décrite par un signal s de la forme mathématique suivante :

Ici, g est une fonction quelconque dont l'argument a la dimension d'une durée.

Remarques :

3 Deuxième expression de l'onde progressive

EXPRESSION D'UNE ONDE PROGRESSIVE DANS LE SENS DES x CROISSANTS

Une onde progressive se propageant à la célérité c dans la direction de l'axe (Ox) , dans le sens positif de cet axe, est décrite par un signal s de la forme mathématique suivante :

Ici, F est une fonction quelconque dont l'argument a la dimension d'une longueur.

EXPRESSION D'UNE ONDE PROGRESSIVE DANS LE SENS DES x DÉCROISSANTS

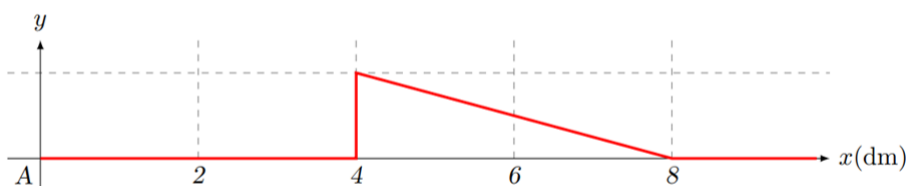
Une onde progressive se propageant à la célérité c dans la direction de l'axe (Ox) , dans le sens négatif de cet axe, est décrite par un signal s de la forme mathématique suivante :

Ici, G est une fonction quelconque dont l'argument a la dimension d'une longueur.

4 Équivalence des deux expressions

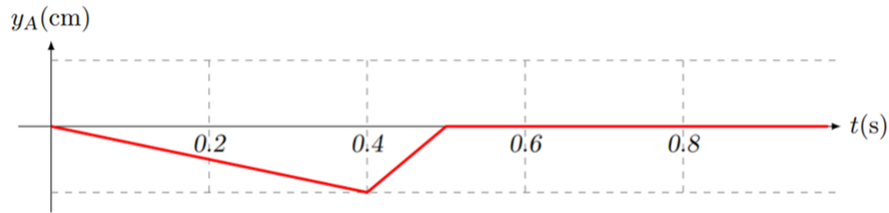
APPLICATION DIRECTE N°1

Une onde progressive se propage le long d'une corde à la célérité $c = 100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ vers les x croissants. À $t = 0$, le signal créé au point A débute. En utilisant la figure, déterminer l'instant correspondant à l'image et la durée de la perturbation. Tracer ensuite $y_A(t)$ puis représenter la corde à $t = 1 \text{ s}$.



APPLICATION DIRECTE N°2

Une onde progressive se propage le long d'une corde à la célérité $c = 10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ vers les x croissants. En $x = 0$ (point A de la corde), on crée le signal représenté sur le schéma. Déterminer la durée et la longueur de la perturbation. Tracer ensuite $y(x)$ à $t = 1 \text{ s}$ puis tracer $y_M(t)$ avec $AM = 3 \text{ cm}$.



B Ondes progressives sinusoïdales

① Définition

On considèrera ici une onde progressive unidimensionnelle se propageant dans le sens des x croissants.

DÉFINITION

Onde progressive harmonique :

où $A(x)$ est l'amplitude de l'onde au point d'abscisse x et $\varphi(x)$ la phase initiale de l'onde en cette abscisse.

② Lien spatio-temporel

DOUBLE PÉRIODICITÉ SPATIO-TEMPORELLE

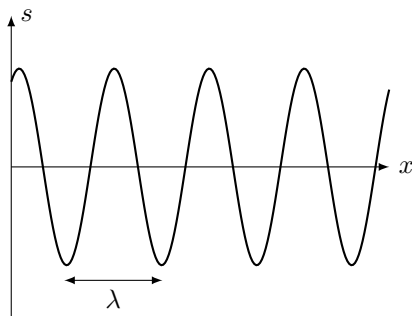
Une **onde progressive harmonique** de pulsation ω se propageant dans le sens des x croissants à la vitesse c est décrite par le signal suivant :

On peut définir ainsi les grandeurs suivantes relatives aux périodicités spatiales et temporelles :

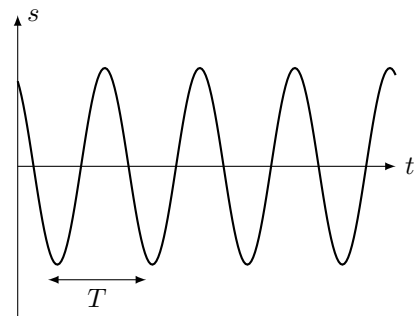
	Fréquence	Période	Pulsation
Temps			
Espace			

⚠ Remarque importante :

On peut donc représenter graphiquement l'onde au cours du temps et dans l'espace :



Évolution du signal en fonction de l'espace à un instant donné t_0



Évolution du signal en fonction du temps à une position donnée x_0

C Vitesse de phase et milieux dispersifs

VITESSE DE PHASE



DÉFINITION

Milieu dispersif :