

# Mémento des

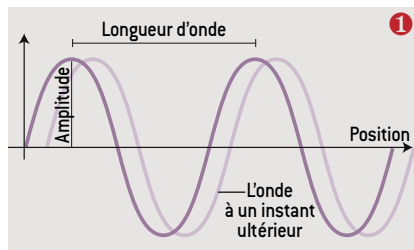
Les ondes, sous leurs nombreuses formes, constituent un aspect essentiel de la réalité physique. En voici les principales notions et un panorama.

# ONDES

## NOTIONS ÉLÉMENTAIRES

Le terme **ONDE** désigne en général la propagation de proche en proche, à une vitesse finie, de la perturbation d'une certaine grandeur physique (déplacement transversal dans le cas d'une corde vibrante, variation de la hauteur de l'eau dans le cas d'une onde à la surface d'un lac, amplitude et direction du vecteur champ électrique ou magnétique dans le cas d'une onde électromagnétique, etc.).

Une situation répandue et importante sur le plan théorique est celle où la grandeur qui se propage oscille de façon sinusoïdale; dans ce cas, on parle d'**ONDE SINUSOÏDALE** ou d'**ONDE MONOCHROMATIQUE**. Une telle onde se caractérise principalement par sa longueur d'onde ou sa fréquence, son amplitude, sa vitesse et sa direction de propagation ❶.



L'**AMPLITUDE**  $A$  de l'onde sinusoïdale est le maximum, en valeur absolue, atteint par la grandeur qui oscille. Selon le contexte, le même terme désigne parfois la valeur algébrique  $a(r, t)$  de cette grandeur à un instant  $t$  et en un point  $r$  donnés.

La **LONGUEUR D'ONDE**  $\lambda$  (lettre grecque *lambda*) est la distance minimale qui sépare, le long de la direction de propagation, deux points se trouvant dans exactement le même état d'oscillation à tout instant.

La **FRÉQUENCE**  $\nu$  (lettre grecque *nu*) est, en chaque point, le nombre de cycles d'oscillation par unité de temps.

La **PULSATION**  $\omega$  (lettre grecque *oméga*) désigne la quantité  $\omega = 2\pi\nu$ ; elle est parfois abusivement appelée aussi fréquence.

La **PÉRIODE**  $T$  est la durée d'un cycle d'oscillation. Fréquence et période sont inverses l'une de l'autre: on a  $\nu = 1/T$ . Et si l'on note  $c$  la vitesse de propagation de l'onde, on a  $\lambda = cT$ .

Le **VECTEUR D'ONDE** est le vecteur  $\mathbf{k}$  qui a pour norme (ou longueur)  $k = 2\pi/\lambda$  et qui est dirigé dans le sens de la propagation. Le **NOMBRE D'ONDE** désigne en général le nombre  $1/\lambda$ , c'est-à-dire le nombre de longueurs d'onde contenues dans une unité de longueur.

À une dimension, on peut représenter une onde sinusoïdale se propageant le long de l'axe  $Ox$ , dans le sens positif de cette direction, par l'expression:

$$a(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \phi).$$

La **PHASE**  $\phi$  (lettre grecque *phi*) est un angle qui caractérise le décalage (dans le temps ou l'espace) des états d'oscillation entre l'onde sinusoïdale considérée et une onde identique, mais qui atteint son amplitude positive maximale à l'instant  $t = 0$  et pour l'abscisse  $x = 0$ . Le décalage entre deux ondes sinusoïdales semblables  $A \cos(\omega t - kx + \phi)$  et  $A' \cos(\omega t - kx + \phi')$  est caractérisé par leur **DÉPHASAGE**  $\Delta\phi = \phi' - \phi$ .

Une onde de forme (spatiale ou temporelle) quelconque peut être assimilée à la somme d'un nombre fini, d'une infinité dénombrable ou d'une infinité continue d'ondes sinusoïdales de fréquences et amplitudes différentes. La composition en fréquences d'une onde, avec les amplitudes respectives, définit son **SPECTRE**.

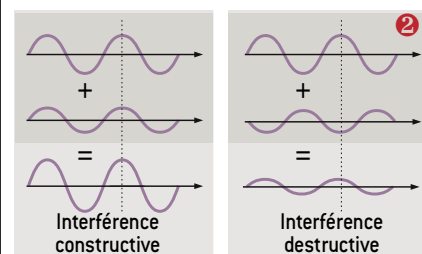
## INTERFÉRENCES ET ONDES STATIONNAIRES

Lorsque deux ondes  $a_1(r, t)$  et  $a_2(r, t)$  se propagent dans une même région de l'espace, leur superposition crée des

**INTERFÉRENCES** ❷. Si les amplitudes des ondes ne sont pas trop élevées, on est dans un régime dit linéaire (cas classique) et les deux ondes s'additionnent: en chaque point  $r$  et à tout instant  $t$ , l'onde résultante  $a(r, t)$  est égale à la somme des deux ondes:

$$a(r, t) = a_1(r, t) + a_2(r, t).$$

C'est le **PRINCIPE DE SUPERPOSITION LINÉAIRE**.



Pour deux ondes sinusoïdales de même fréquence, se propageant à la même vitesse et dans le même sens, on a **INTERFÉRENCE CONSTRUCTIVE** si les deux ondes sont en phase (déphasage nul, les amplitudes s'ajoutent) et **INTERFÉRENCE DESTRUCTIVE** si les deux ondes sont en opposition de phase (déphasage égal à  $\pm\pi$ , les amplitudes se soustraient).

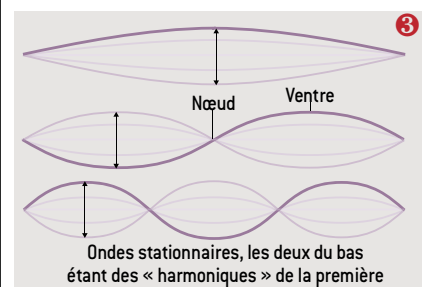
Lorsqu'une onde sinusoïdale s'ajoute à une onde identique, mais se propageant dans le sens opposé, le résultat est une **ONDE STATIONNAIRE** ❸:

$$\text{si } a_1(x, t) = A \cos(\omega t - kx)$$

$$\text{et } a_2(x, t) = A \cos(\omega t + kx),$$

$$\text{alors } a(x, t) = a_1(x, t) + a_2(x, t) =$$

$$2A \cos kx \cos \omega t.$$

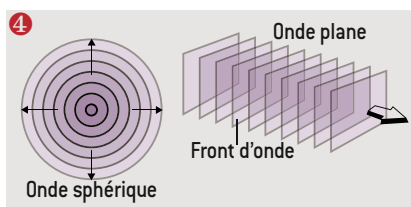


L'amplitude de l'oscillation, égale à  $2A \cos kx$ , varie périodiquement selon la position. Les positions  $x$  pour lesquelles cette amplitude est nulle sont les **NŒUDS** de l'onde stationnaire ou de l'oscillation; les positions  $x$  pour lesquelles l'amplitude est maximale en valeur absolue sont les **VENTRES** de l'onde stationnaire. Par opposition à une onde stationnaire où il n'y a pas de propagation, une onde ordinaire est qualifiée d'**ONDE PROGRESSIVE** ou **PROPAGATIVE**.

Plus généralement, à une ou plusieurs dimensions, une onde stationnaire correspond à une oscillation de la forme  $a(r, t) = A(r)B(t)$ , où  $B$  est une fonction sinusoïdale du temps  $t$ . La fonction  $A(r)$  indique comment l'amplitude de l'oscillation varie dans l'espace. La fréquence d'oscillation et la répartition des nœuds et des ventres, spécifiée par la fonction  $A(r)$ , définissent le **MODE D'OSCILLATION** du système considéré. Une onde stationnaire est en général créée par une onde se propageant dans un espace limité (une cavité par exemple) et qui se réfléchit sur les bords de cet espace.

#### ONDES PLANES OU SPHÉRIQUES

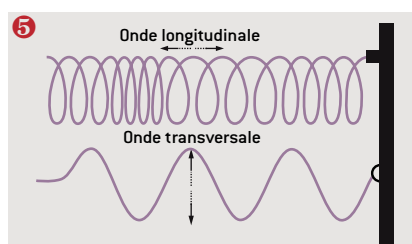
Pour une onde sinusoïdale se propageant dans l'espace à trois dimensions, les **FRONTS D'ONDE** sont les surfaces formées des points où la phase de l'onde est identique. Pour une **ONDE PLANE**, dont les caractéristiques sont les mêmes sur chaque plan perpendiculaire à l'axe de propagation, les fronts d'onde sont des plans. Pour une **ONDE SPHÉRIQUE** émise par un point central, les fronts d'onde sont des sphères centrées sur ce point ④.



#### ONDES TRANSVERSALES ET POLARISATION

On parle d'**ONDES LONGITUDINALES** lorsque la grandeur qui oscille est un vecteur de même direction que l'axe de propagation, et d'**ONDES TRANSVERSALES** quand ce vecteur est perpendiculaire à l'axe de propagation ⑤. Dans le cas d'ondes transversales, la direction du vecteur oscillant définit la **POLARISATION** de l'onde: si ce vecteur a une direction fixe, on a une **POLARISATION LINÉAIRE**; si le vecteur tourne autour de l'axe de propagation, on a une

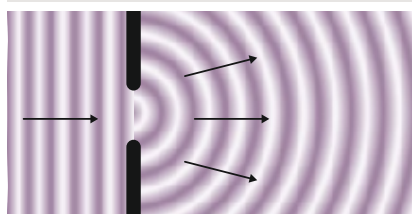
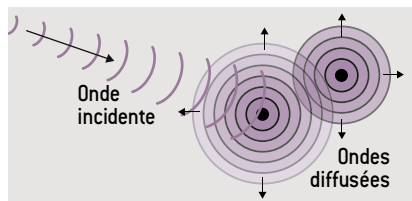
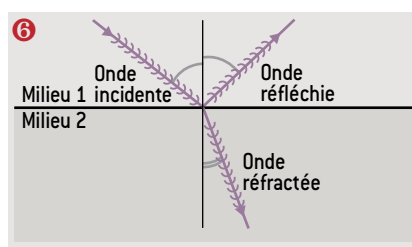
**POLARISATION CIRCULAIRE**, gauche ou droite selon le sens de rotation.



#### RÉFLEXION, RÉFRACTION, DIFFUSION, ETC.

Une onde incidente peut être réfléchie à l'interface de deux milieux différents. Cette **RÉFLEXION** a lieu avec un angle symétrique de l'angle d'incidence et dans le plan contenant l'axe d'incidence et la perpendiculaire à l'interface. L'onde incidente peut aussi traverser l'interface en étant déviée: c'est la **RÉFRACTION** ⑥. L'angle de réfraction dépend de l'angle d'incidence et des indices de réfraction des deux milieux. L'**INDICE DE RÉFRACTION** est le rapport  $c/v$ , où  $c$  est la vitesse de l'onde dans le vide (ou dans l'air) et  $v$  cette vitesse dans le milieu matériel. La vitesse de propagation de l'onde, donc l'indice de réfraction, dépend en général de la fréquence de l'onde. Pour une onde formée de plusieurs composantes monochromatiques, ces dernières se propagent donc à des vitesses différentes; c'est le phénomène de **DISPERSION**.

Lorsqu'une onde rencontre, sans être absorbée, un objet de taille proche de la longueur d'onde ou plus petit, elle est généralement renvoyée dans de multiples di-



rections: c'est la **DIFFUSION**. Une diffusion par un ensemble de particules disposées aléatoirement brouille la cohérence ondulatoire. Dans d'autres cas (diffusion par les atomes ordonnés d'un cristal, diffusion par les bords d'un trou de forme régulière, etc.), cette cohérence se maintient et l'on a alors des interférences bien caractérisées. On parle alors de **DIFFRACTION**.

#### ONDES ÉLASTIQUES DANS UN FLUIDE

Si, dans un milieu matériel, les atomes ou molécules soumis à un déplacement subissent une force qui les ramène vers leur position d'équilibre, on parle d'élasticité. Une **ONDE ÉLASTIQUE** se propageant dans un liquide ou un gaz correspond à la propagation d'une variation locale de pression; on la qualifie d'**ONDE ACOUSTIQUE**. C'est une onde longitudinale: l'oscillation des atomes ou molécules autour de leurs positions d'équilibre s'effectue dans la direction de propagation. Les ondes acoustiques perçues par l'oreille humaine sont les **ONDES SONORES**; leurs fréquences vont de 20 à 20 000 hertz environ. Les **ULTRASONS** ont des fréquences supérieures, les **INFRASONS** des fréquences inférieures. Les **HYPERSONS** ont une fréquence supérieure au gigahertz. Le *la* du diapason correspond à une fréquence de 440 hertz; les sons graves vont jusqu'à 500 hertz environ, les sons aigus commencent à quelque 4 000 hertz.

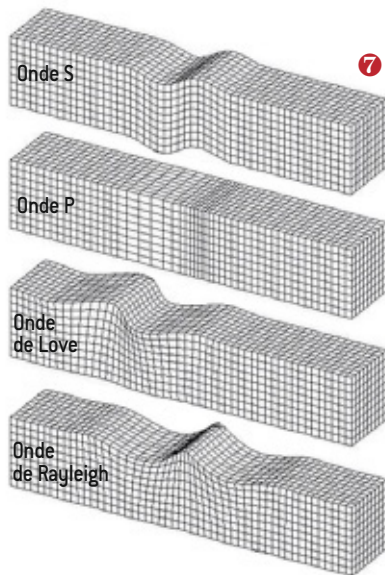
#### ONDES ÉLASTIQUES DANS UN SOLIDE

Dans un solide, une onde élastique est en général à la fois une **ONDE DE COMPRESSION** et une **ONDE DE CISAILEMENT** (le cisaillement est une force tangentielle qui s'exerce entre deux surfaces solides ou liquides en déplacement relatif). Dans le contexte géologique, une onde élastique est appelée **ONDE SISMIQUE**.

Il existe plusieurs types d'ondes sismiques ⑦. Elles se propagent à des vitesses de quelques kilomètres par seconde, qui dépendent du milieu traversé et du type d'onde. Celles qui se propagent dans le volume de la Terre sont dites **ONDES DE VOLUME**. Il s'agit des ondes P et des ondes S: les **ONDES P** (pour *primaires*) sont les ondes de compression, les **ONDES S** (pour *secondaires*) les ondes de cisaillement. Les **ONDES DE SURFACE** se propagent uniquement à la surface de la Terre. Elles regroupent les **ONDES L** et les **ONDES R**. Les ondes L, ou **ONDES DE LOVE**, sont des ondulations horizontales

du sol. Les ondes R, ou **ONDES DE RAYLEIGH**, sont des ondulations verticales.

Les **ONDES DE LAMB** sont des ondes qui se propagent dans des plaques solides, dont la matière effectue un mouvement soit perpendiculaire à la plaque, soit dans la direction de la propagation.



## ONDES OCÉANIQUES ET ATMOSPHÉRIQUES

Une **ONDE DE GRAVITÉ** est une onde à la surface d'un fluide soumis à la gravité, où le fluide oscille verticalement. Les vagues à la surface de l'eau sont des ondes de gravité.

En météorologie, les **ONDES DE GRAVITÉ (ATMOSPHÉRIQUES)** sont des ondes de densité ou de pression créées par la poussée d'Archimède, qui tend à soulever les masses d'air moins denses. Les **ONDES DE ROSSBY** et les **ONDES DE KELVIN** sont deux types d'ondes de gravité (océaniques ou atmosphériques) d'échelle planétaire, où intervient la force de Coriolis due à la rotation de la Terre.

Les ondes de gravité ne doivent pas être confondues avec les **ONDES GRAVITATIONNELLES** : ces dernières sont, d'après la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui identifie la gravitation à une courbure de l'espace-temps, des ondes de déformation de l'espace-temps. On attend toujours leur découverte directe.

Les **ONDES DE KELVIN-HELMHOLTZ** sont des ondulations qui se forment à la surface

de contact de deux couches de fluide en mouvement à des vitesses suffisamment différentes.

Le mouvement de la marée le long des mers peut être décrit comme une somme de nombreuses ondes périodiques, nommées **ONDES DE MARÉE**.

## LES ONDES EN PHYSIQUE QUANTIQUE

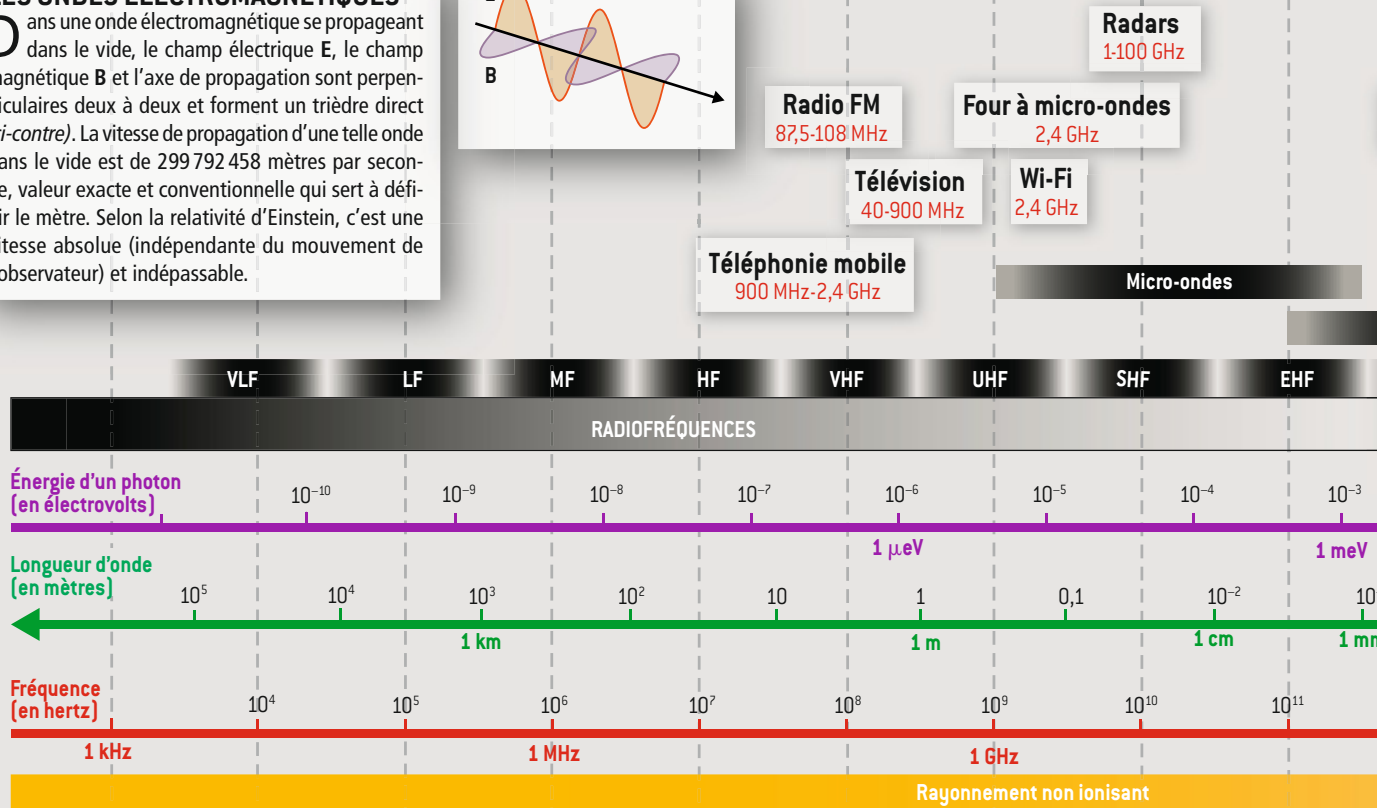
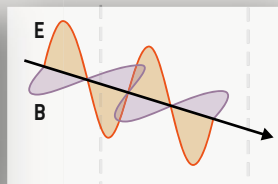
La mécanique quantique attribue à toute particule libre une longueur d'onde égale à  $h/p$ , où  $h$  est la constante de Planck et  $p$  la quantité de mouvement (produit de la masse par la vitesse) de la particule. Cette **LONGUEUR D'ONDE DE BROGLIE** confère à la matière des propriétés ondulatoires, d'où la notion d'**ONDES DE MATIÈRE**.

Plus généralement, en mécanique quantique non relativiste, un système physique est décrit par une **FONCTION D'ONDE**, solution de l'équation dite de Schrödinger ; cette fonction de la position et du temps détermine, en termes probabilistes, le comportement du système (par exemple la densité de probabilité de présence d'un électron dans un atome).

## LE SPECTRE

### LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Dans une onde électromagnétique se propageant dans le vide, le champ électrique **E**, le champ magnétique **B** et l'axe de propagation sont perpendiculaires deux à deux et forment un trièdre direct (*ci-contre*). La vitesse de propagation d'une telle onde dans le vide est de 299 792 458 mètres par seconde, valeur exacte et conventionnelle qui sert à définir le mètre. Selon la relativité d'Einstein, c'est une vitesse absolue (indépendante du mouvement de l'observateur) et indépassable.



En théorie quantique des champs, qui intègre la théorie de la relativité restreinte, les entités fondamentales sont les **CHAMPS QUANTIQUES**, objets mathématiques définis partout et à tout instant, et obéissant à des équations analogues à celles des ondes classiques. Un champ quantique transporte de l'énergie et de la quantité de mouvement par quantités bien définies appelées **QUANTA**. Ainsi, les quanta du champ électromagnétique sont les **PHOTONS**. Les électrons et les positrons sont les quanta d'un autre type de champ, etc.

De façon analogue, les **PHONONS** sont les quanta des **ONDES DE VIBRATION** qui se propagent dans un réseau cristallin, et les **MAGNONS** sont les quanta des **ONDES DE SPIN** (ondes où la grandeur qui change est l'orientation du spin ou moment magnétique des atomes).

### LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Dans les **ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES**, dont font partie les **ONDES LUMINEUSES**, c'est la combinaison d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui se propage (voir ci-dessous).

### LES ONDES DU CERVEAU

On peut enregistrer à la surface du cerveau des différences de potentiel variant de quelques microvolts à plusieurs millivolts. Ces variations résultent de la présence d'ondes électriques qui naissent et se propagent dans le cerveau. En effet, de minuscules courants électriques se créent dans les neurones, dus à la circulation d'ions entre l'intérieur et l'extérieur de ces cellules, au niveau des synapses (les connexions entre neurones). Les courants individuels sont infimes,

mais, parce que les prolongements des neurones où ils se déplacent sont parallèles, la somme d'innombrables courants infimes donne un courant macroscopique, à l'origine des ondes électriques cérébrales.

Le tracé d'un électroencéphalogramme, EEG, est extrêmement compliqué, mais il est possible de le décomposer en types d'ondes particuliers que l'on sait associer aux différentes phases de vigilance de l'individu : éveil (au repos, en activité, méditation, etc.), sommeil (sommeil lent profond ou paradoxal) ou encore absence de conscience, par exemple coma. Chacun de ces types d'ondes présente une bande de fréquences caractéristique ⑧.

Les données enregistrées sur un EEG varient selon l'emplacement des électrodes sur le cuir chevelu. C'est l'analyse de toutes les composantes d'un EEG qui donnent accès en temps réel aux processus cognitifs en cours, normaux ou pathologiques. Les EEG ont une précision temporelle (une milliseconde) supérieure à celle qu'offrent les autres méthodes d'investigation de l'activité cérébrale.

