I Champs électromagnétiques

DB 2023

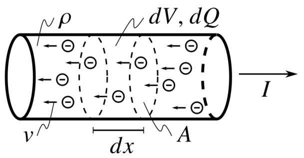
▶ Champ électrique

Charge élémentaire : e $\quad [C = A \cdot s]$ $\quad 1{,}602 \cdot 10^{-19}\, C$

Charge d'un corps : $Q = n \cdot e \quad , n \in \mathbb{Z}^*$

⟨la charge d'un système isolé est tjis conservée⟩

Courant électrique : $I = \dfrac{dQ}{dt} = \rho \cdot A \cdot v$



ρ : densité charge $\frac{C}{m^3}$

A : surface

v : vitesse moyenne

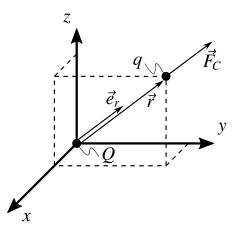
▶ Force Coulomb

Force d'interaction entre charges $\quad \sum \vec{F} = 0$

$$\vec{F}_c = \underbrace{\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}} \frac{qQ}{\vec{r}^{\,2}} \vec{e}_r$$

vecteur unité

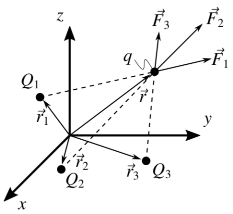
Coulomb constant $= 8{,}99 \cdot 10^9 \dfrac{N \cdot m^2}{C^2}$



Q : charge fixe

q : charge résiduelle

$$\vec{F}_C = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\sum_i Q_i \frac{\vec{r}-\vec{r}_i}{\|\vec{r}-\vec{r}_i\|^3}$$



somme vectorielle

$$\vec{F}_{c_{net}} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \ldots + \vec{F}_{1n}$$

vecteur unité : $\dfrac{\vec{r} - \vec{r}_i}{\|r - r_i\|}$ $\qquad r^2 = \|r - r_i\|^2$

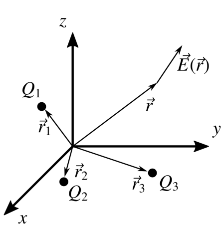
▶ Champ électrique

vecteur va de charge ⊕ à ⊖

Un champ est un espace (2d, 3d) auquel on ajoute une information scalaire ou vectorielle

Champ électrique $\quad \vec{E} = \dfrac{1}{q} \cdot \vec{F}_c$

charge de test



$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_i Q_i \frac{\vec{r}-\vec{r}_i}{\|\vec{r}-\vec{r}_i\|^3}$$

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n$$

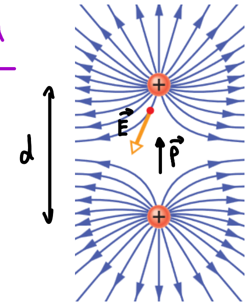
$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_V \rho(\vec{r}\,')\frac{\vec{r}-\vec{r}\,'}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|^3}dV$$

$\rho(\vec{r}\,')$ densité charge spaciale

Amplitude (magnitude) : $E = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{|q|}{r^2} \quad \left[\dfrac{V}{m} = \dfrac{N}{C}\right]$

▶ Champ électrique divers

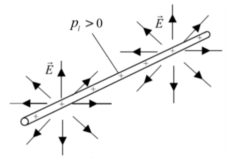
Dipôle : $E = \dfrac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0} \dfrac{q \cdot d}{z^3}$



Moment dipolaire $\vec{p} = Q \cdot \vec{d}$

→ dans un champ électrique si le dipôle n'est pas aligné $\quad \vec{M} = \vec{p} \times \vec{E} \quad E_{pot} = -\vec{p} \cdot \vec{E}$

Le long d'une ligne :



$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\rho_\ell}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{\vec{r}}{r^2}$$

Plaques parallèles : $\vec{E} = \dfrac{Q}{\varepsilon_0} \cdot \dfrac{1}{A}$

▶ Thm Gauss (1ère éq. de Maxwell)

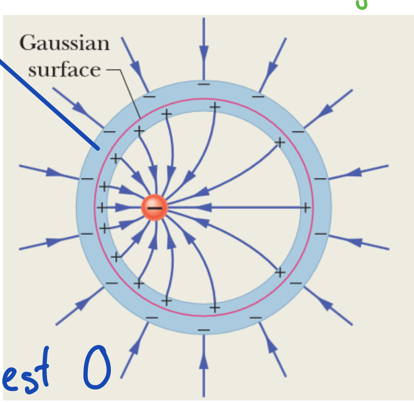
Flux électrique $\quad \phi = \int \vec{E} \cdot d\vec{A} \Rightarrow E \cdot A$

$E \perp A$!

Flux électrique traversant surface femée autour de Q $\quad E \cdot A = \dfrac{Q_{enc}}{\varepsilon_0}$

Flux net à travers une surface fermée $\quad \oint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \dfrac{1}{\varepsilon_0} \underbrace{\int_V \rho(\vec{r})\, dV}_{\text{Enclosed charge}}$

Spherical metal shell



→ le métal est neutre ⇒ pas de flux électrique ⇒ charge net à l'intérieur de la surface gaussienne est 0

⇒ les charges extérieurs ⊖ se repoussent et forme un champ uniforme.

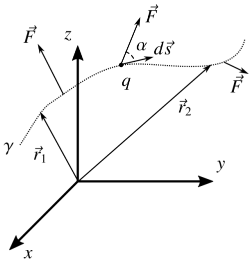
Pour un conducteur isolé : $E = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}$

charge à la surface

Potentiel électrique

Travail, potentiel et champ $dW = \vec F\cdot d\vec s = q\cdot \vec E\cdot d\vec s$

$\varphi = \frac{-W}{q} = \frac{E_{pot}}{q}$



Potentiel : $\varphi(\vec r) = -\int_{\infty}^{\vec r} \vec E\cdot d\vec s$

Champ E depuis potentiel $E = -\frac{d\varphi}{dx}$

Tension champ homogène $U_{12} = \varphi(\vec r_1) - \varphi(\vec r_2) = \int_{\vec r_1}^{\vec r_2} \vec E\cdot d\vec s = \vec E\cdot\vec S$

Energie $E_{cin} = q\cdot U \longrightarrow [eV] = 1{,}6\cdot 10^{-19}\ J$

$E_{pot} = -W$

Conservation $\oint \vec E\cdot d\vec s = 0$

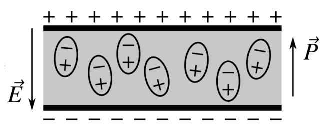
Loi d'Ohm locale

résistivité

$\vec E = \rho_R\cdot\vec J = \rho_R\cdot\frac{dI}{dA}$

Polarisation électrique

Les molécules de la matière se polarisent et ajoute un champ électrique $\vec P$ de polarisation au champ $\vec E$ extérieur.



Champ el. résultant dans la matière $\vec D = \varepsilon_0\cdot\varepsilon_r\cdot\vec E$

effet de la matière à affaiblir le champ $\vec E$

Capacité

$U \propto Q = \int I\,dt$

Capacité $C = \frac{Q}{U} = \frac{\varepsilon_0\cdot\varepsilon_r\oint_A \vec E\cdot d\vec A}{\int \vec E\, d\vec s}$

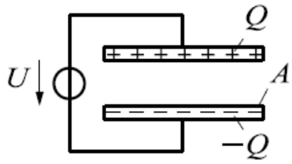
$u(t) = \frac{1}{C}\int i(t)\,dt$

$Z_c = \frac{u(t)}{i(t)} = \frac{1}{j\omega C}$

Divers géometries

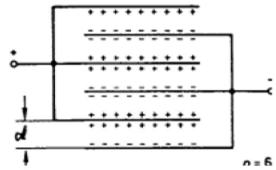
Condensateur plan

$$C = \varepsilon_0\varepsilon_r\frac{A}{d}$$



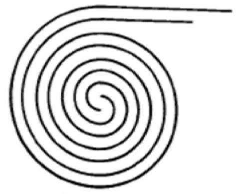
Condensateur multicouches

$$C = (n-1)\varepsilon_0\varepsilon_r\frac{A}{d}$$



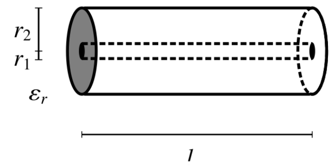
Condensateur enroulé[2-1]

$$C = 2\varepsilon_0\varepsilon_r\frac{A}{d}$$



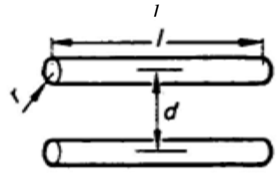
Condensateur cylindrique[2-2]

$$C = \varepsilon_0\varepsilon_r\frac{2\pi l}{\ln\frac{r_2}{r_1}}$$



Double ligne

$$C = \varepsilon_0\varepsilon_r\frac{\pi l}{\ln\frac{d-r}{r}}$$



Condensateur Parallèle / série

$C_{par} = \sum_{i=1}^{N} C_i \qquad \frac{1}{C_{ser}} = \sum_{i=1}^{N}\frac{1}{C_i}$

Energie du condensateur

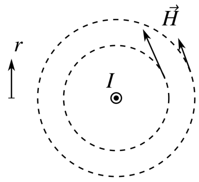
$dW = dQ\cdot\vec E\cdot d\vec s \rightarrow W_E = \frac{1}{2}C\cdot U^2$

Force entre plaques condensateurs plan

Décaler les plaques de dx $F = \frac{dW_E}{dx} = \frac{1}{2}U^2\frac{dC}{dx}$

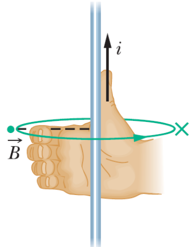
▶ Champ magnétique

→ Courant stationnaire ⇒ champ magn.



Intensité champ du conducteur: $H = \frac{I}{2\pi r}$ } = circ $\left[\frac{A}{m}\right]$

"Force du champ à un point de l'espace"

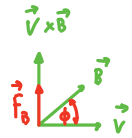


Densité flux magnétique $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$ $\left[T = \frac{N}{A\cdot m}\right]$

"Force des lignes de champ dans l'espace" $\vec{B} = \frac{1}{I \cdot \ell} \cdot \vec{F}$

Une particule chargée en mouvement dans un champ magn. subit une force F.

$$\vec{F}_B = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

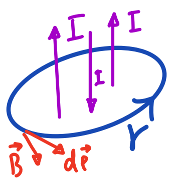


Amplitude: $B = \frac{F_B}{|q| \cdot v}$ $\quad F_B = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin\phi$

▶ Théorème d'Ampère

Thm ampère:

$$\oint_{\gamma} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \cdot I_{enclosed}$$



⚠ Mais il y a bien champ si $I_{enclosed} = 0$

▶ Loi de Biot-Savart

Loi générale champ magn. produit par élément de courant dans un conducteur

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i\,d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2}$$

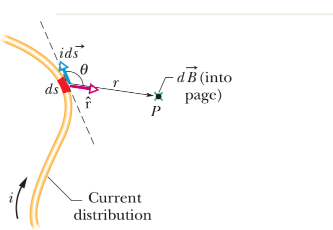


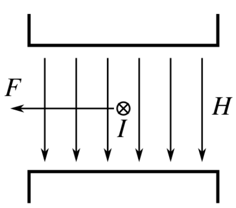
Figure 29-1 A current-length element $i\,d\vec{s}$ produces a differential magnetic field $d\vec{B}$ at point P. The green × (the tail of an arrow) at the dot for point P indicates that $d\vec{B}$ is directed *into* the page there.

▶ Force dans un champ magnétique

Sur conducteur

longueur du conducteur

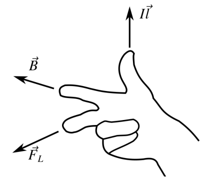
$$F \propto I \cdot H \cdot \ell$$



$$F_{Lorentz} = I(\vec{\ell} \times \vec{B})$$

Sur une charge en mouvement

$$\vec{F}_L = Q(\vec{v} \times \vec{B})$$



▶ Densité flux du solénoïde

Bobine $\quad B = \mu_0 \cdot I \cdot N$

Tore $\quad B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{2\pi} \frac{1}{r}$

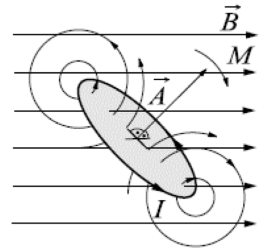
▶ Dipôle magnétique

Comme dans le cas du dipôle électrique (voir chap.1.4.2), le moment magnétique

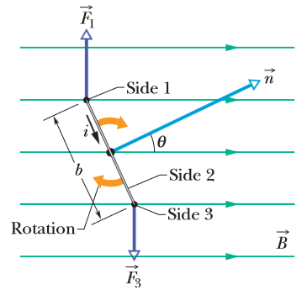
$$\vec{p}_m = I\vec{A} \qquad (3.34)$$

est défini et, de ce fait, le moment de force sur la boucle conductrice plate de forme quelconque est donné par

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B} \quad . \qquad (3.35)$$



Moment de force sur une boucle



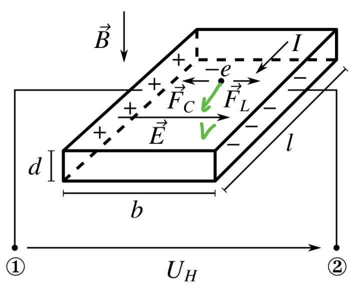
$$\vec{M} = i\underbrace{A\vec{n}}_{\vec{p}_m \text{ dipôle magn}}\times\vec{B}$$

▶ Effet Hall

Un courant circule dans un conducteur qui se trouve dans un champ $\vec{B}$. Les charges sont déviées par $F_{Lorentz}$. La densité de charge sur les bords augmente et crée un champ électrique ⇒ équilibre

Une tension apparait (tension de Hall)

$$U_H = E \cdot b = vBb = \frac{1}{-ne} \frac{I}{d} \cdot B$$



constante Hall $\quad A_H = \frac{1}{-ne}$

n densité charge

Polarisation magnétique

Les dipôles élementaires dans un morceau de matière s'alignent et modifient le champ dans la matière

Dans matière : $\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}$

- $\mu_r < 1$: Matériaux diamagnétiques
- $\mu_r > 1$: Matériaux paramagnétiques
- $\mu_r \gg 1$: Matériaux ferromagnétiques

Loi Gauss flux magnétique

$\phi_B = \oint \vec{B}\, d\vec{A} = 0 \quad \left[Wb = V \cdot s = \frac{T}{m^2} \right]$

$= B \cdot A \cdot \cos\theta$

Champs non stationnaire

Loi d'induction de Faraday

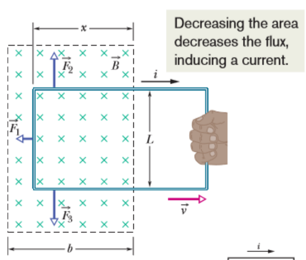
Changement de ϕ_B induit une tension dans la bobine (closed conducting loop)

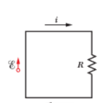
$$u_{induite} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

Général : (Loi Faraday)

$$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

EMF $\hat{=}$ tension induite





Fluss : $\phi_B = B \cdot A = BLx$

Emf : $\mathfrak{E} = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} BLx = BLv$

Kräfte: $\vec{F}_1 = i\vec{L}\times\vec{B}$; $\vec{F}_{2,3} = \pm i\vec{x}\times\vec{B}$

Arbeit: $dW = \vec{F} \cdot d\vec{x}$

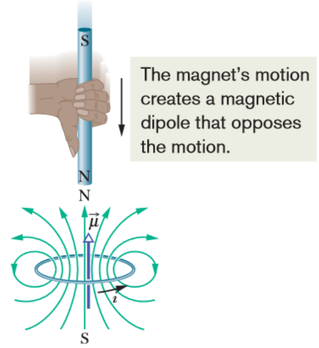
Strom: $i = \frac{\mathfrak{E}}{R} = \frac{BLv}{R}$

Kraft: $F = \frac{B^2L^2v}{R}$

Leistung: $P = \vec{F} \cdot \vec{v} = R\, i^2 = \frac{B^2L^2v^2}{R}$

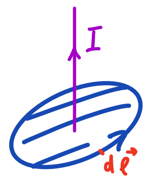
$$P = R\, i^2 = \frac{B^2L^2v^2}{R}$$

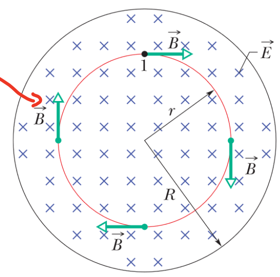
Loi Lenz

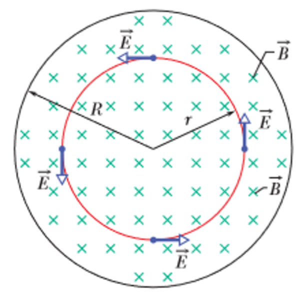


Loi de Maxwell-Ampère

$$\underbrace{\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell}}_{\text{champ magnétique induit}} = \underbrace{\varepsilon_0 \cdot \frac{d\phi_E}{dt}}_{\text{Changing electric flux}} + \underbrace{\mu_0 I_{enc}}_{\text{enclosed current}}$$







champ $\vec{E}$ induit (Faraday)

Constantes

A.1 Constantes physiques

Les symboles ne sont pas normalisés et peuvent être choisis librement. trois chiffres, sauf s'il sont fixées.

constante	symbole	valeur
vitesse de la lumière	c_0	$299\,792\,458\ \mathrm{m\,s^{-1}}$
constante gravitationnelle	G	$6.67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{m^3\,kg^{-1}s^{-2}}$
constante de Planck	h	$6.62 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{Js}$
constante de Boltzmann	k_B	$1.38 \cdot 10^{-23}\ \mathrm{J\,K^{-1}}$
constante de Stefan-Boltzmann	σ	$5.67 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{W\,m^{-2}K^{-4}}$
charge élémentaire	e	$1.60 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$
masse de l'électron	m_e	$9.11 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}$
constante électrique	ε_0	$8.85 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{As\,V^{-1}m^{-1}} = \frac{F}{m}$
constante magnétique	μ_0	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}\ \frac{H}{m}$

A.3 Permittivité relative ε_r

Les valeurs sont indicatives et s'appliquent à des conditions normales (25°C).

substance (de)	substance (fr)	ε_r
Luft	air	1.006
Transformatoröl	huile de transformateur	2.5
Kondensatorpapier	papier de condensateur	4 … 64
Porzellan	porcelaine	4.5 … 6.5
Glimmer	mica	4 … 10
Glas	verre	5 … 74
Tantaloxid	oxyde de tantale	27
Wasser	eau	81
Bariumtitanat	titanate de baryum	1000 … 4000

II Ondes

Equation et fonction

Paquet d'onde

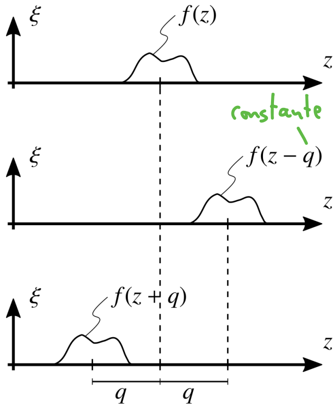
↓ remplacé q par c·t

Fonction d'onde

$$\boxed{\xi(z,t) = f(z - c\cdot t)}$$

axe — vitesse — temps

Décrit position spatiale et temporelle



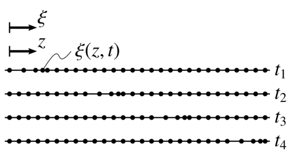
Toute fonction d'onde satisfait

$$\boxed{\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2}}$$

c vitesse propagation (parfois on met $\frac{1}{c^2}$?)

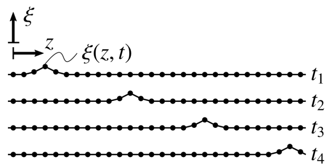
Onde longitudinale

Perturbation dans la direction de propagation



Onde transversale

Perturbation perpendiculaire



$$\boxed{\text{Toute onde peut être représentée par superposition de sinus}}$$

Onde sinusoïdale stimulée

spatiale — temporelle — déphasage

$$\xi(z,t) = \hat{\xi} \sin(kz - \omega t + \varphi_0)$$

nombre d'onde "pulsation spatiale" $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

pulsation $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$

vitesse propagation $c = \frac{\omega}{k} = f\cdot\lambda$

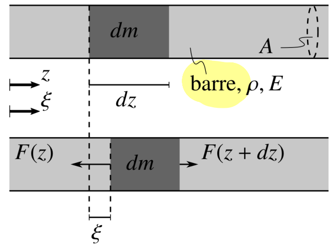
$\underline{\xi}(z,t) = \underline{\hat{\xi}}\, e^{j(kz-\omega t)}$ $\quad \underline{\hat{\xi}} = \hat{\xi}\, e^{j\varphi_0}$

Onde mécanique

Déviations élastique des éléments de masse (matière)

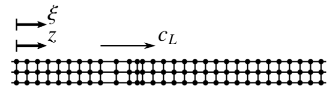
$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2}$$

élasticité — déplacement longitudinal

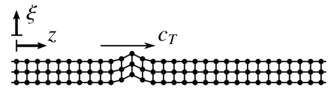


Vitesse propagation barre

$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ — module élasticité

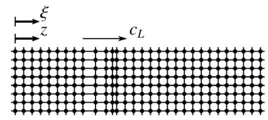


$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ — cisaillement

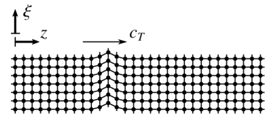


Dans un solide

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$
$$E = 2(1+\nu)G$$



$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

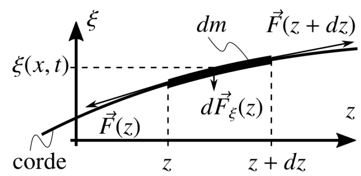


Dans un fluide

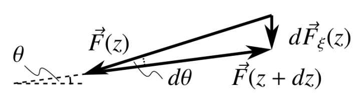
$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ — module compression

Onde sur une corde

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \underbrace{\frac{F}{\rho A}}_{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2}$$



vitesse propagation : $c = \sqrt{\frac{F}{\rho A}} = \sqrt{\frac{\text{élastic property}}{\text{inertia property}}}$

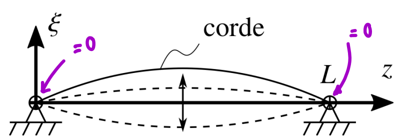


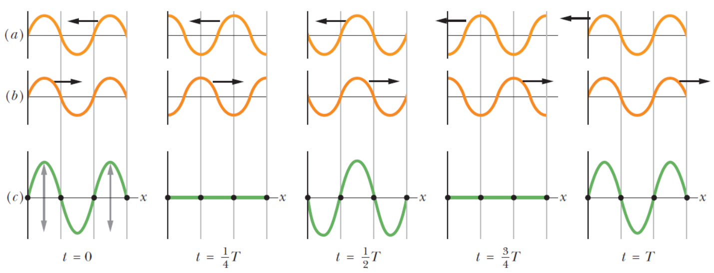
$\rho A : \frac{m}{\ell} = \mu$

Puissance moyenne : $P_{avg} = \frac{1}{2}\mu c \omega^2 \hat{\xi}^2$

Onde stationnaire

$$\xi(z,t) = \hat{\xi}\sin(kz)\sin(\omega t)$$





Deux sinus de même amplitude mais direction opposé s'additionnent et font une onde stationnaire

$$\xi(z,t) = \hat{\xi}\sin(kz)\cos(\omega t) \quad . \tag{2.34}$$

Cette fonction d'onde peut être réécrite avec les théorèmes d'addition trigonométriques en

$$\xi(x,t) = \frac{1}{2}\hat{\xi}\sin(kz-\omega t) + \frac{1}{2}\hat{\xi}\sin(kz+\omega t) \quad . \tag{2.35}$$

Ainsi, une onde stationnaire peut également être considérée comme la superposition de deux ondes sinusoïdales de même fréquence et de même amplitude se propageant en sens contraire.

▶ Oscillation fondamental et harmoniques

Longueurs d'ondes possible de l'onde stationnaire :

$$\lambda_n = \frac{2}{n} L \qquad n = 1, 2, 3, \dots$$

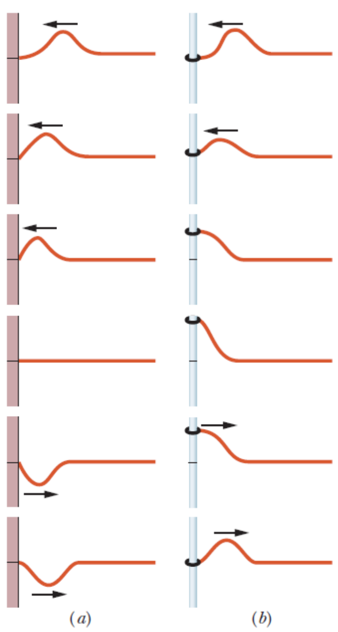
$$f_n = \frac{c}{\lambda_n} = \frac{n \cdot c}{2 \cdot L}$$

$n = 1$, fréquence fondamentale
$n > 1$, harmonique

Types de reflexion

a) réflexion rigide

b) souple



▶ Ondes sonores (onde mécanique dans gaz)

Transformations adiabatiques $\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}$

vitesse : $\boxed{c = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}}} = \sqrt{\kappa R_s T}$

κ indice adiabatique

pression : $p(z,t) = p_m + \underbrace{\hat{p}\sin(kz - \omega t)}_{\to \Delta P\,!}$

$\xi(z,t) = \hat{\xi}\cos(kz - \omega t)$ $\boxed{\hat{p} = \omega \rho c \hat{\xi}}$

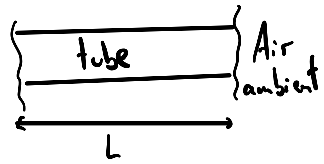
La pression est en retard de 90° du déplacement longitudinal ξ.

▶ Onde stationnaire in pipes

Comme avec le fil tendu

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{n \cdot c}{2 \cdot L}$$

$c \to$ vitesse son



▶ Ouïe humaine 20 Hz - 20 kHz

fréquence résonance tympan : 3,4 Hz

L'oreille humaine perçoit les sons de manière logarithmique dans un domaine de 12 décades en W/m^2

niveau sonore $L = 10 \log_{10} \frac{J}{J_0}$ [dB]

$J_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$

▶ Transport d'énergie

Oscillation entre énergie cin et pot.

Energie élement masse $dW = \frac{1}{2}\rho\omega^2\hat{\xi}^2 dV$

Densité énergétique $w_{mec} = \frac{dW}{dV} = \frac{1}{2}\rho\omega^2 \cdot \hat{\xi}^2$

Intensité (densité flux énergétique) $J = w_{mec} \cdot c = \frac{\text{"}P\text{"}}{A}$

"P" puissance

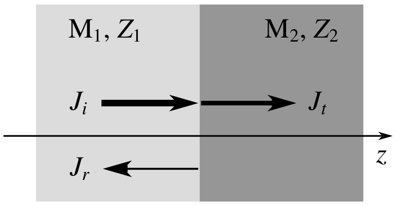
Pour onde sonore $J = \frac{1}{2}\frac{1}{\rho \cdot c}\hat{p}^2$

$p_{eff} = \frac{\hat{p}}{\sqrt{2}} \Rightarrow J = \frac{1}{\rho c} p_{eff}^2$

Impédance d'onde $Z = \rho c$

▶ Transmission et réflexion

Changement d'interface une partie de l'onde est toujours réfléchie



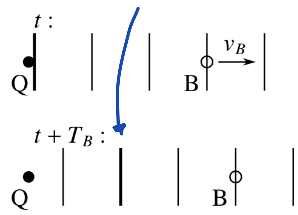
Coefficient réflexion $r = \frac{\xi_r}{\xi_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$

▶ Effet Doppler

Source ou recepteur de l'onde en mouvement dans le milieu

front d'onde

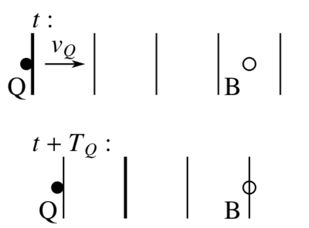
Source repos, observateur mouvement



$f_B = \frac{1}{T_B} = \frac{c - v_B}{\lambda_Q} = f_Q\left(1 - \frac{v_B}{c}\right)$

↳ période vue par B

Q mouvement, B repos



$f_B = \frac{c}{\lambda_B} = f_Q \frac{1}{1 - \frac{v_Q}{c}}$

$\lambda_B = \lambda_Q - v_Q T_Q$

Q et B en mouvement

$f_B = f_Q \frac{c - v_B}{c - v_Q}$

▶ Battement (beats)

Battement se passe quand deux ondes de fréquences légèrement différentes s'additionne.

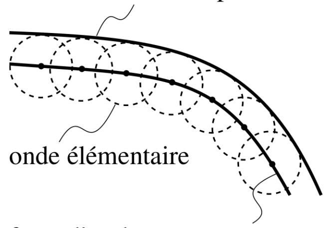
$f_{beat} = f_1 - f_2$

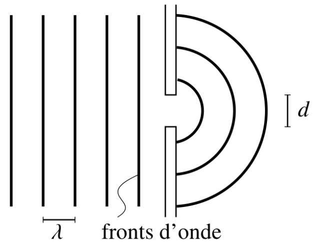
▶ Interférence et superposition

Principe superposition

$$\xi(z,t) = \sum_{i=1}^{N} a_i \xi_i(z,t) = \sum_{i=1}^{N} f_i(z \pm ct)$$

($\Rightarrow$ analyse de Fourier)





Diffraction

changement direction onde

$d \cong \lambda$

▶ Interférence 2 ondes planes

$$\xi(z,t) = \hat{\xi}_1 \sin(kz - \omega t) + \hat{\xi}_2 \sin(kz - \omega t + \Delta\varphi).$$

intensité: $J(\Delta\varphi) = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2}\cos\Delta\varphi$

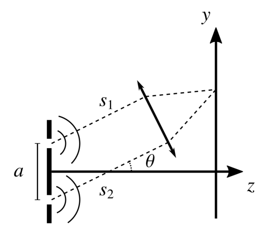
constructif (maxima) si : $\Delta\varphi = 2 \cdot n \cdot \pi$, $n = 0, 1, 2, \ldots$

destructif (0) si : $\Delta\varphi = (2n+1)\pi$

Pour deux sources ponctuelles

constructif $y_{max} = \frac{z}{a}\lambda n$

destructif $y_{min} = \frac{z}{a}\lambda\left(n + \frac{1}{2}\right)$

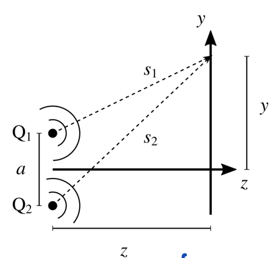


Pour deux "fentes"

but: faire apparaître la figure d'interférence sur l'écran Y

constructif $\sin\theta_{max} = \frac{\lambda}{a} n$

destructif $\sin\theta_{min} = \frac{\lambda}{a}\left(n + \frac{1}{2}\right)$



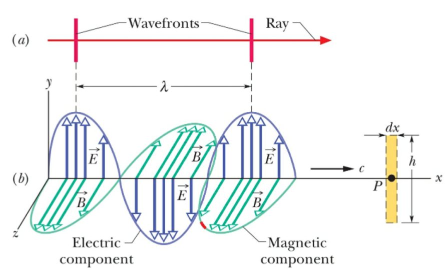
$\Rightarrow$ spectromètres

▶ Ondes électromagnétiques

vitesse dans vide $c = 299\,792\,458$ m/s $\quad c = \frac{E}{B} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}}$

Energy flow (poynting vector)

$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\vec{E} \times \vec{B}$



A.5 Module de compression K

Les valeurs sont indicatives et s'appliquent à des conditions normales (20°C, 101 325 Pa).

matériau (de)	matériau (fr)	K / Pa
Luft	air	$1.41 \cdot 10^5$
Schmieröl	lubrifiant	$1.00 \cdot 10^9$
Wasser	eau	$2.08 \cdot 10^9$
Quecksilber	mercure	$2.85 \cdot 10^{10}$

A.6 Constante spécifique du gaz R_s et indice adiabatique κ

Les valeurs sont indicatives et s'appliquent à des conditions normales (20°C).

substance (de)	substance (fr)	symbole chim.	R_s / J kg^{-1}K^{-1}	κ / 1
Kohlendioxid	dioxyde de carbone	CO_2	189	1.29
Argon	argon	Ar	208	1.67
Sauerstoff	oxygène	O_2	260	1.40
Luft	air		287	1.40
Stickstoff	azote	N_2	297	1.40
Wasserstoff	hydrogène	H_2	4 124	1.41

Constant	Symbol	Computational Value
Speed of light in a vacuum	c	3.00×10^8 m/s
Elementary charge	e	1.60×10^{-19} C
Gravitational constant	G	6.67×10^{-11} m^3/s$^2 \cdot$kg
Universal gas constant	R	8.31 J/mol$\cdot$K
Avogadro constant	N_A	6.02×10^{23} mol^{-1}
Boltzmann constant	k	1.38×10^{-23} J/K
Stefan–Boltzmann constant	σ	5.67×10^{-8} W/m$^2 \cdot$K^4
Molar volume of ideal gas at STP[d]	V_m	2.27×10^{-2} m^3/mol
Permittivity constant	ϵ_0	8.85×10^{-12} F/m
Permeability constant	μ_0	1.26×10^{-6} H/m
Planck constant	h	6.63×10^{-34} J$\cdot$s
Electron mass[c]	m_e	9.11×10^{-31} kg
		5.49×10^{-4} u
Proton mass[c]	m_p	1.67×10^{-27} kg
		1.0073 u
Ratio of proton mass to electron mass	m_p/m_e	1840
Electron charge-to-mass ratio	e/m_e	1.76×10^{11} C/kg
Neutron mass[c]	m_n	1.68×10^{-27} kg
		1.0087 u
Hydrogen atom mass[c]	$m_{^1H}$	1.0078 u
Deuterium atom mass[c]	$m_{^2H}$	2.0136 u
Helium atom mass[c]	$m_{^4He}$	4.0026 u
Muon mass	m_μ	1.88×10^{-28} kg
Electron magnetic moment	μ_e	9.28×10^{-24} J/T
Proton magnetic moment	μ_p	1.41×10^{-26} J/T
Bohr magneton	μ_B	9.27×10^{-24} J/T
Nuclear magneton	μ_N	5.05×10^{-27} J/T
Bohr radius	a	5.29×10^{-11} m
Rydberg constant	R	1.10×10^7 m^{-1}
Electron Compton wavelength	λ_C	2.43×10^{-12} m