

4 Ondes et signaux

4.1 Caractériser les phénomènes ondulatoires

4.1.1 Puissance sonore et niveau d'intensité sonore

Pour que l'oreille humaine perçoive un son, dans le domaine des fréquences audibles, la puissance par unité de surface « I » (ou intensité sonore) de ce son doit être telle que :

$$10^{-12} \text{ W.m}^{-2} < I < (1 \text{ à } 100) \text{ W.m}^{-2}$$

où $10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$ (notée I_0) est considéré comme la limite de sensibilité de l'oreille.

La borne supérieure de la puissance sonore par unité de surface correspond à une destruction de l'oreille.

Le niveau d'intensité sonore « L » est lié à la puissance par unité de surface « I » par une échelle logarithmique :

$$L = 10 * \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad [L] = \text{dB (décibel)}$$

I : puissance sonore par unité de surface ; en W.m^{-2}

L : niveau d'intensité sonore ; en décibel (dB)

Remarques lorsque la puissance par unité de surface « I » est multipliée par 2, le niveau d'intensité sonore « L » augmente de 3 dB.

$$I = I_0 * 10^{L/10}$$

4.1.2 Atténuation des ondes sonores

L'atténuation d'un son exprime le rapport des puissances sonores, par unité de surface, entre deux points :

$$A = 10 * \log (I_f / I_i)$$

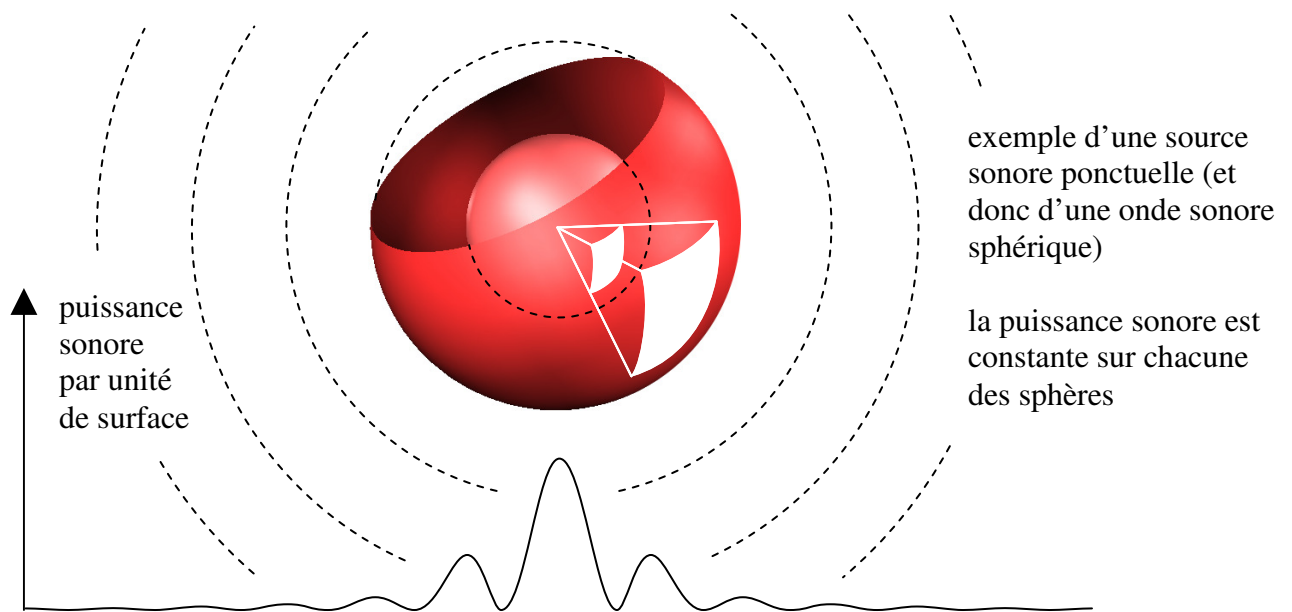
A atténuation du son ; en décibel (dB)

I_f puissance sonore finale par unité de surface ; en $W.m^{-2}$

I_i puissance sonore initiale par unité de surface ; en $W.m^{-2}$

Atténuation géométrique

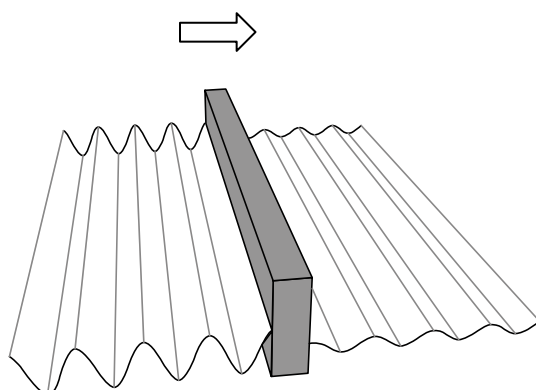
Quand on s'éloigne de la source, la puissance sonore se répartit sur une plus grande surface.



En conséquence, la puissance sonore par unité de surface diminue quand on s'éloigne de la source.

Atténuation par absorption

Lors de son déplacement, l'onde cède une partie de son énergie au milieu de propagation.



exemple d'une source sonore linéique (et donc d'une onde sonore cylindrique non représentée)

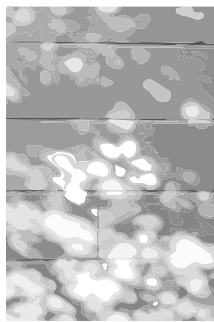
Exemples

l'atténuation d'un mur antibruit routier est de -10 dB

l'atténuation d'un son de fréquence égale à 10 kHz est d'environ -0,3 dB par mètre d'air (air très sec à 25°C)

4.1.3 Diffraction d'une onde par une ouverture

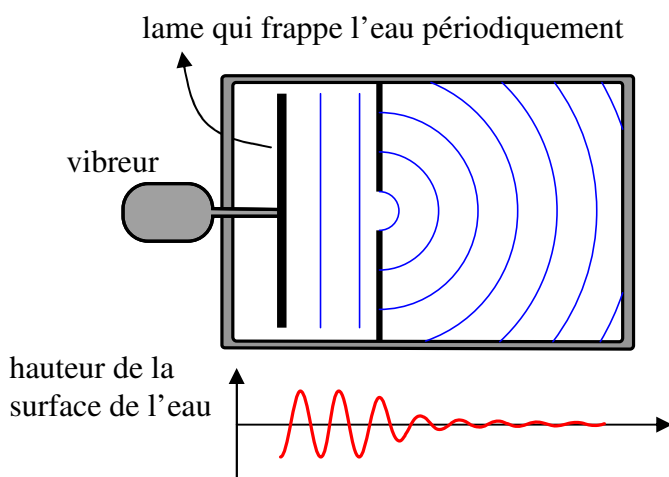
C'est un comportement caractéristique d'une onde.



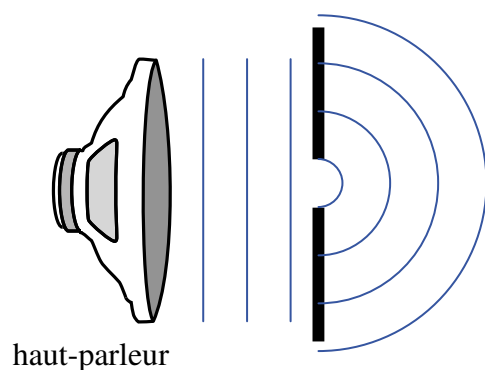
quand on observe l'ombre d'un arbre touffu, on voit des taches circulaires de lumière et pas des feuilles bien dessinées.

Les ouvertures entre les feuilles diffractent la lumière du Soleil. Chaque tache circulaire est une petite image du Soleil.

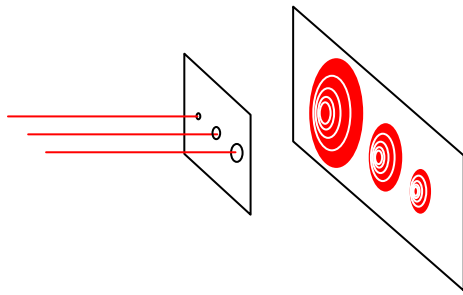
Si une onde passe par une ouverture, tout se passe comme si l'ouverture devenait elle-même une source ponctuelle. On dit que l'onde se diffracte.



diffraction d'une onde à la surface de l'eau



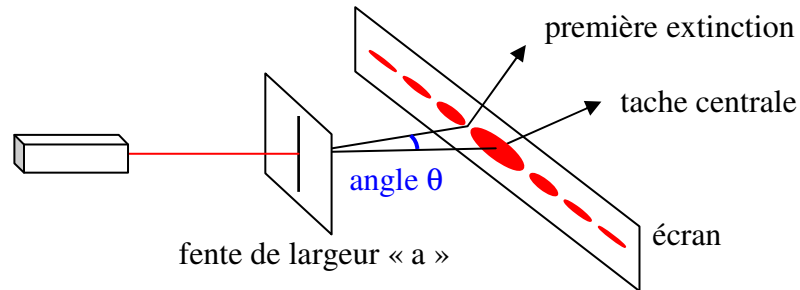
diffraction d'une onde sonore dans l'air



l'importance du phénomène de diffraction est liée à la dimension de l'ouverture et à la longueur d'onde.

le phénomène est plus prononcé lorsque la longueur d'onde est comparable à la dimension de l'ouverture.

diffraction d'une onde lumineuse par des ouvertures circulaires de différentes dimensions



diffraction d'une onde lumineuse par une fente rectangulaire

Dans le cas d'une fente rectangulaire de largeur « a », l'angle entre le milieu de la tache centrale et la première extinction du faisceau diffracté est donné par :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

θ angle (milieu de la tache centrale, 1ère extinction) ; en rad

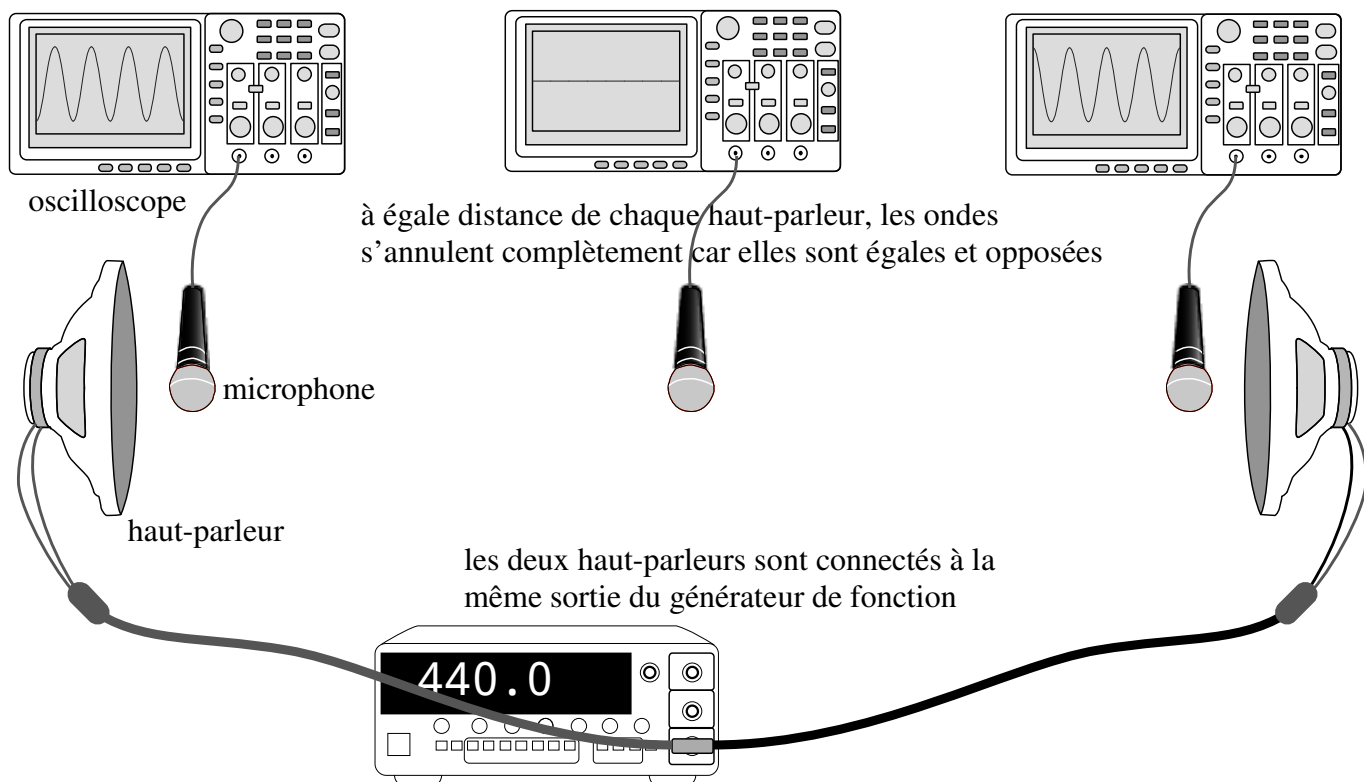
λ longueur d'onde ; en m

a largeur de la fente ; en m

4.1.4 Interférences de deux ondes

C'est aussi un comportement caractéristique d'une onde.

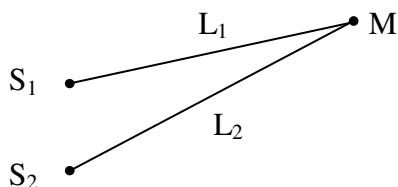
lorsque les ondes sonores issues des deux haut-parleurs se rencontrent, elles provoquent des interférences



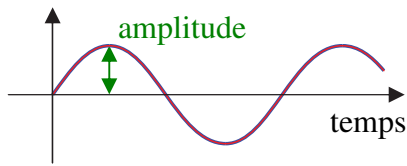
Il y a interférence là où deux ondes « se rencontrent » et si les sources ont mêmes fréquences (sources cohérentes).

Remarque aucun phénomène remarquable ne peut être obtenu avec des sources incohérentes.

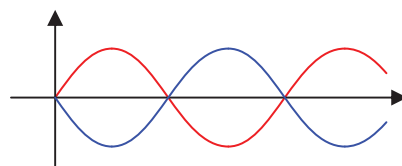
On va établir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles.



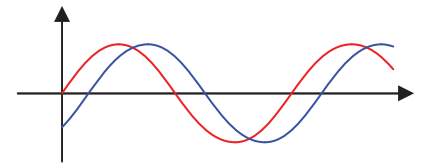
Les sources ponctuelles S_1 et S_2 sont en phase et le milieu de propagation est homogène.



signaux en phase



signaux en opposition de phase



signaux déphasés

L'onde en M est la somme des deux ondes cohérentes ayant parcouru des trajets de longueurs différentes (L_1 et L_2).

L'onde ayant parcouru la plus grande distance est en retard par rapport à l'autre. Suivant la position du point M, ce retard varie.

1^{er} cas remarquable

Interférence constructive des deux ondes. Leurs amplitudes s'ajoutent. La différence de chemin optique $L_2 - L_1$ est un multiple entier relatif de la longueur d'onde :

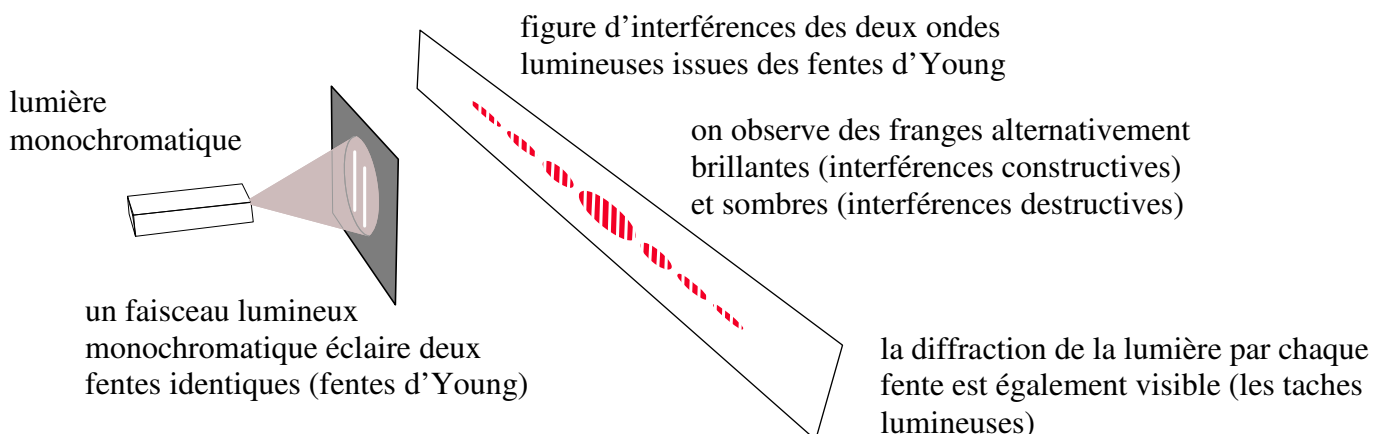
$$L_2 - L_1 = k * \lambda \quad (1)$$

2^{ème} cas remarquable

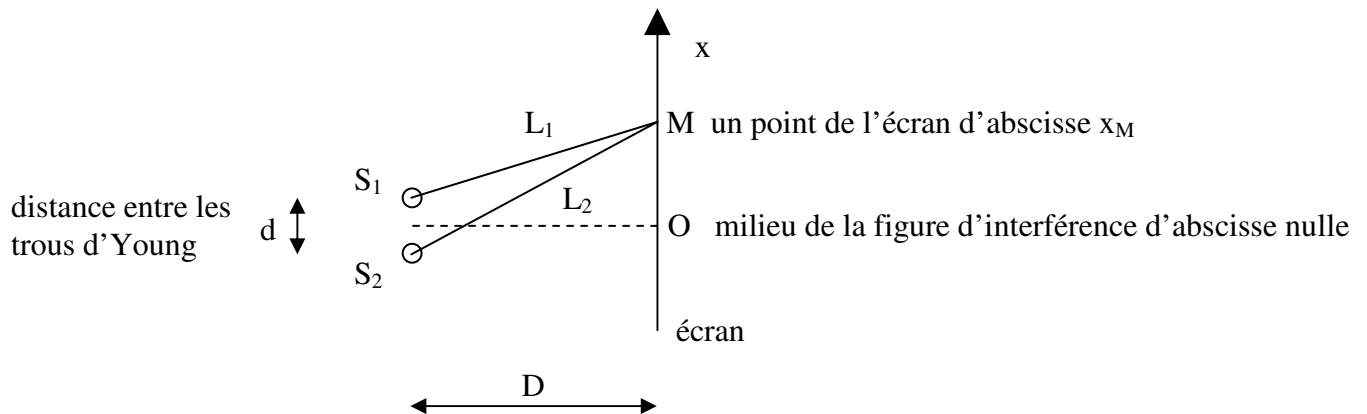
Interférence destructive des deux ondes. Leurs amplitudes se soustraient. Différence de chemin optique :

$$L_2 - L_1 = (k + 1/2) * \lambda \quad (2)$$

Exemple interférences de deux ondes lumineuses



4.1.5 Les trous d'Young



Si $D \gg d$, la différence de chemin optique $L_2 - L_1$ entre les rayons S_1M et S_2M est :

$$L_2 - L_1 = x_M * d / D \quad (3)$$

- L distance entre un trou S et un point M de l'écran ; en m
- x_M abscisse du point M ; en m
- d distance qui sépare les trous d'Young ; en m
- D distance entre l'écran et les fentes ; en m

On a vu précédemment avec l'équation (1) les conditions d'interférences constructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase se propageant dans un milieu de propagation homogène. En associant (1) et (3) on obtient :

$$x_M = k * \lambda * D / d \quad (k \in \mathbb{Z})$$

On a vu précédemment avec l'équation (2) les conditions d'interférences destructives. En associant (2) et (3) on obtient :

$$x_M = (k + 1/2) * \lambda * D / d \quad (k \in \mathbb{Z})$$

4.1.6 Effet Doppler

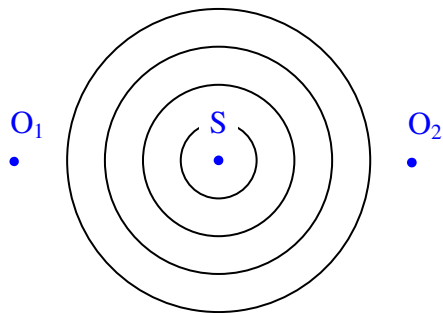
Si la source d'une onde et un observateur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre, l'effet Doppler désigne le décalage de fréquence perçu par l'observateur.

Exemple un observateur immobile le long d'une voie ferrée perçoit un son aigu quand un train approche et un son plus grave lorsque ce train s'éloigne.

Illustration de ce phénomène pour :

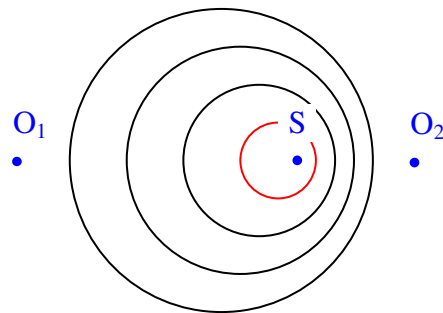
- des observateurs immobiles et une source sonore immobile
- des observateurs immobiles et une source sonore en mouvement

la source S et les observateurs
O₁ et O₂ sont immobiles

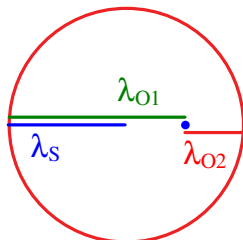


O₁ et O₂ perçoivent des ondes
de même longueur d'onde

la source S se déplace à la vitesse « v_S » vers la
droite ; les observateurs O₁ et O₂ sont immobiles



O₁ perçoit des ondes de longueur
d'onde plus grande que O₂



la longueur d'onde « λ » est la distance parcourue par
l'onde durant la période « T » à la célérité « c » :

$$\lambda_{O_i} = c * T_{O_i} \quad (i = 1 \text{ ou } 2)$$

$$\lambda_S = c * T_S$$

$$\lambda_{O_i} - \lambda_S = c * (T_{O_i} - T_S) \quad (4)$$

On suppose que la célérité de l'onde « c » est supérieure à la vitesse de déplacement de la source « v_S » (c > v_S).

Si la source s'éloigne de l'obs. : $\lambda_{O1} - \lambda_S = v_S * T_S$ (5)

Si la source se rapproche de l'obs. : $\lambda_S - \lambda_{O2} = v_S * T_S$ (6)

S s'éloigne de O₁, (4) et (5) : $f_{O1} = \frac{f_S}{1 + \frac{v_S}{c}}$ ($f_{O1} < f$)

S se rapproche de O₂, (4) et (6) : $f_{O2} = \frac{f_S}{1 - \frac{v_S}{c}}$ ($f_{O2} > f$)

c célérité ou vitesse de propagation de l'onde ; en $m.s^{-1}$

v_S vitesse de déplacement de la source des ondes ; en $m.s^{-1}$

f_S fréquence de l'onde perçue par l'observateur quand la source est immobile ; en Hz

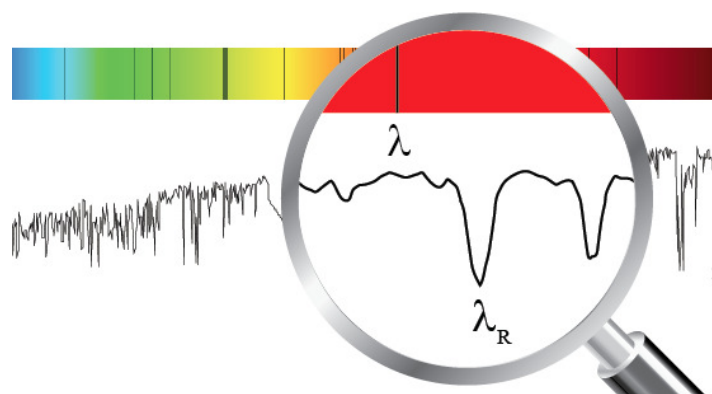
f_O fréquence de l'onde perçue par l'observateur quand la source est en déplacement ; en Hz

Exemple

Si une étoile s'éloigne de la Terre, la longueur d'onde des raies d'absorption du spectre de sa lumière est décalée vers le rouge par rapport aux mêmes raies mesurées sur Terre. On peut en déduire la vitesse à laquelle l'étoile s'éloigne de la Terre.

spectre d'absorption d'un élément chimique réalisé sur Terre

courbe du spectre d'une étoile

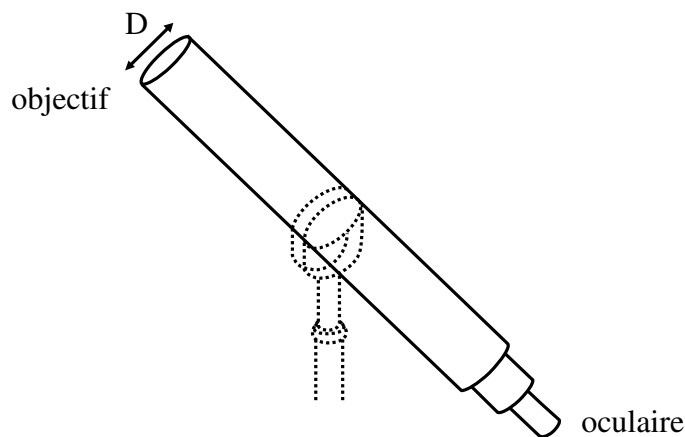


4.2 Former des images

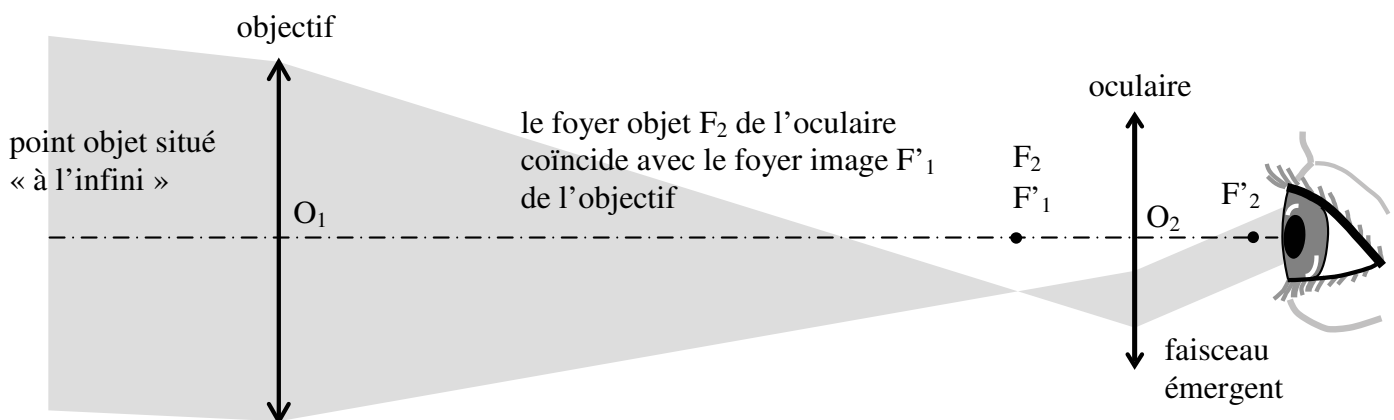
Une lunette astronomique comprend deux systèmes optiques convergents de même axe : un objectif et un oculaire.

L'objectif peut être assimilé à une lentille mince convergente de grand diamètre D (entre 20 cm et 1 m) et de grande distance focale (15 à 20 fois le diamètre D).

L'oculaire, assimilé à une lentille mince convergente, joue le rôle d'une loupe dans l'examen de l'image fournie par l'objectif.

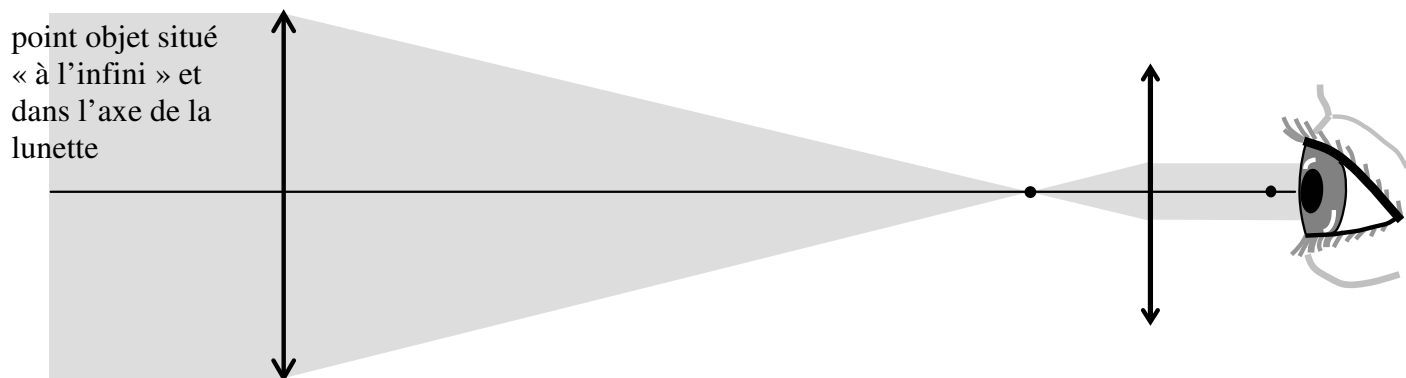


On peut modéliser la lunette astronomique par un système afocal de deux lentilles minces convergentes.

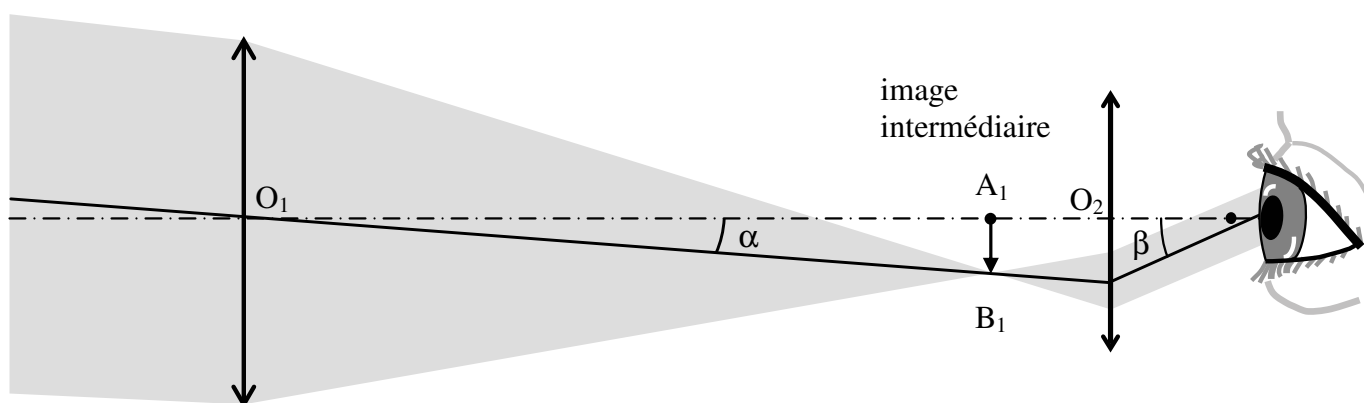


le système est afocal : des rayons qui sont parallèles en entrant par l'objectif ressortent parallèles en sortant de l'oculaire ; ceci permet d'éviter la fatigue de l'accommodation de l'œil de l'observateur

L'image finale est renversée par rapport à l'objet.



Le grossissement de la lunette astronomique



Le grossissement G d'une lunette est défini par :

$$G = \frac{\beta}{\alpha}$$

Dans le cas de la lunette afocale , on a :

$$\beta \cong \tan(\beta) \cong \frac{A_1B_1}{O_2F_2'} = \frac{A_1B_1}{f_2} \quad (7)$$

$$\alpha \cong \tan(\alpha) = \frac{A_1B_1}{O_1A_1} = \frac{A_1B_1}{f_1} \quad (8)$$

(7) et (8) : $G = \frac{f_1}{f_2}$

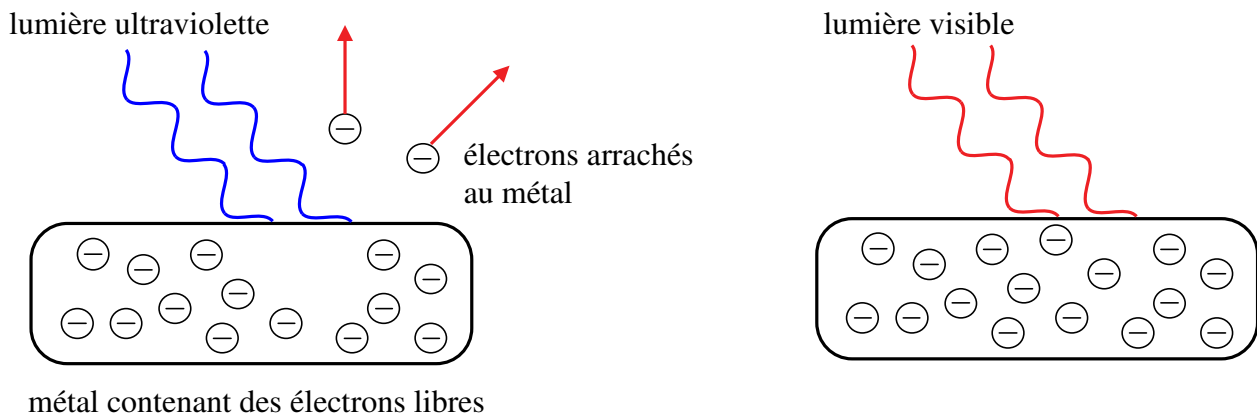
4.3 Décrire la lumière par un flux de photons

4.3.1 L'effet photoélectrique

Les ondes électromagnétiques, comme toute onde, transportent de l'énergie.

Un métal soumis à un rayonnement lumineux riche en ultraviolets peut perdre des électrons. C'est l'effet photoélectrique.

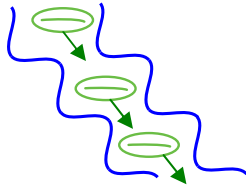
Si la lumière qui arrive sur le métal ne contient pas d'ultraviolets, l'effet photoélectrique ne se manifeste pas.



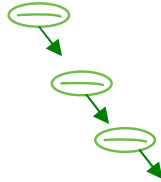
Même une exposition prolongée à une lumière dépourvue d'ultraviolets ne permet pas d'arracher des électrons au métal. Par analogie avec d'autres phénomènes macroscopiques, on pourrait penser que cette exposition prolongée permettrait un apport continu d'énergie au métal et que finalement l'énergie accumulée serait suffisante pour arracher l'électron.

Il n'en est rien. Au niveau microscopique, l'échange d'énergie entre le métal et la lumière ne se fait pas de façon continue. Elle se fait donc de manière discontinue.

On doit alors postuler, comme Plank en 1900, que l'énergie est transportée par la lumière sous forme discontinue (comme des grains transportés par un liquide). Le grain a une énergie suffisante pour arracher un électron (cas du grain d'une lumière ultraviolette) ou le grain a une énergie insuffisante (cas du grain d'une lumière visible) pour arracher un électron et rien ne se passe (l'échange d'énergie n'a pas lieu).



Einstein, en 1905, postula que les grains d'énergie seuls (nommés plus tard photons) constituaient la lumière (modèle particulaire de la lumière).



La lumière se comporte à la fois comme une onde et un flux de photons.

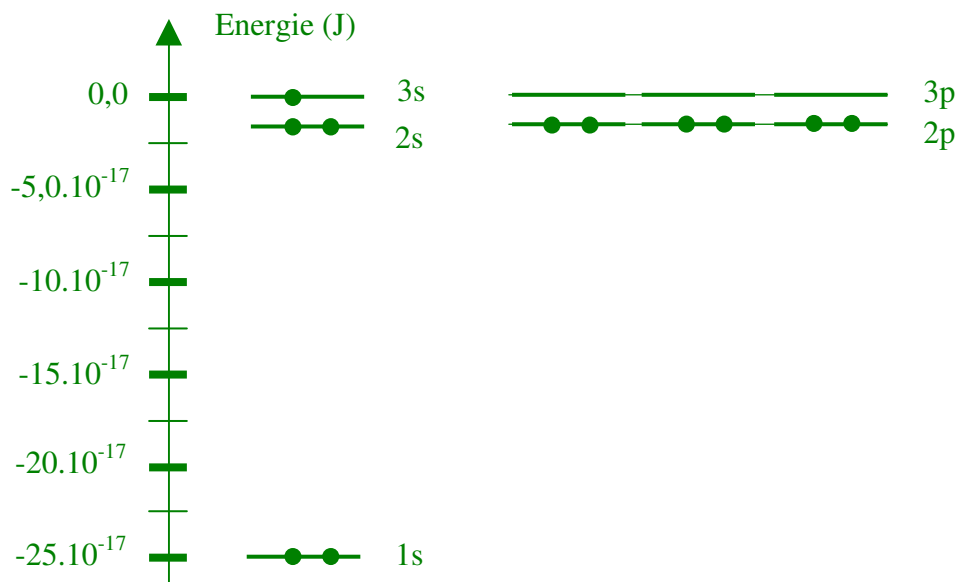
4.3.2 Energie cinétique des électrons arrachés

Au sein de l'atome, les électrons sont répartis en niveaux d'énergie. L'énergie d'un niveau mesure l'énergie d'interaction électromagnétique entre l'électron et l'atome (et en particulier son noyau).

Quand cette énergie est nulle, il n'y a plus d'interaction électromagnétique entre l'électron et l'atome dont il est issu. On dit que l'électron a été extrait de l'atome.

Exemple

l'atome de sodium Na possède 11 électrons



Un rayonnement de fréquence ν arrache un électron au métal.
L'échange d'énergie entre le photon et l'électron obéit à la loi de conservation de l'énergie :

$$h * \nu = W_e + E_c$$

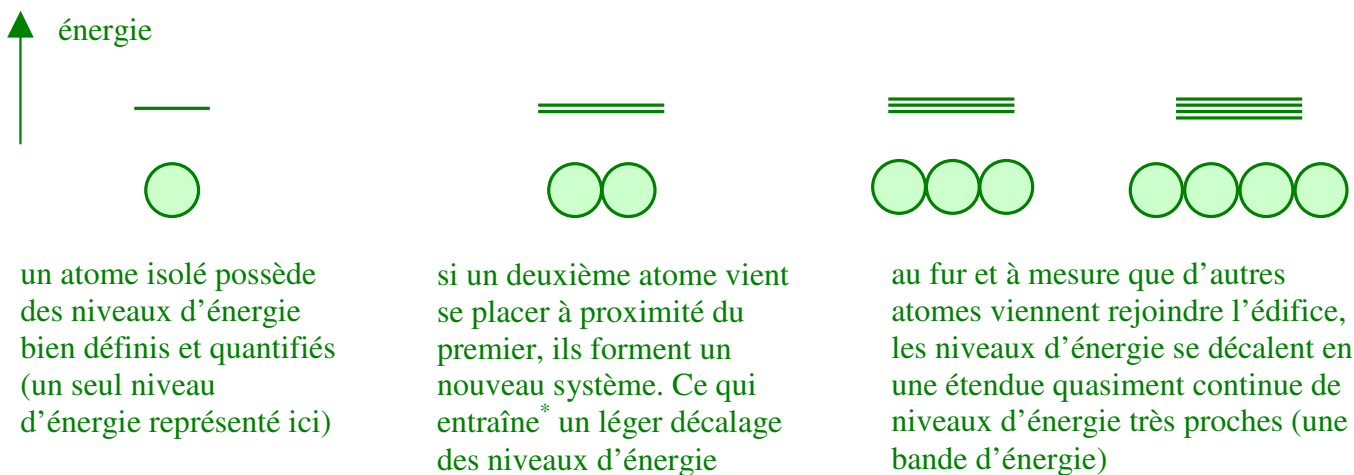
$h * \nu$ quanta d'énergie du photon incident ; en J
 W_e travail d'extraction de l'électron ; en J
 E_c énergie cinétique de l'électron arraché ; en J

La vitesse des électrons émis par effet photoélectrique augmente avec la fréquence de la radiation incidente, mais ne dépend pas de l'intensité lumineuse de cette dernière.

4.3.3 Effet photoélectrique dans les semi-conducteurs

Dans un matériau, les électrons sont répartis en bandes d'énergie.

Explication formation des bandes d'énergie dans un solide

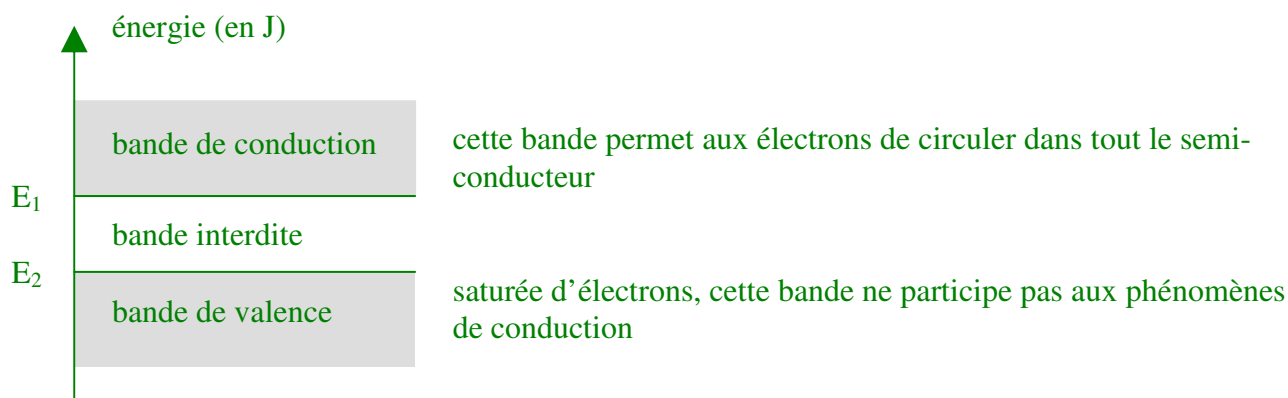


* le principe d'exclusion de Pauli interdit à deux électrons d'un même système, d'avoir le même état quantique. Ce principe d'exclusion entraîne un léger décalage des niveaux d'énergie de chaque atome (le premier atome isolé possédait des électrons dans le même état quantique que le deuxième atome isolé ; ce qui n'est pas le cas du nouveau système formé par ces deux atomes si les niveaux d'énergie se décalent).

La dernière bande d'énergie saturée d'électrons est nommée bande de valence.

La bande de conduction suit la bande de valence ; elle peut être vide ou partiellement remplie d'électrons.

L'énergie qui sépare la bande de valence de la bande de conduction est appelée le « gap ».



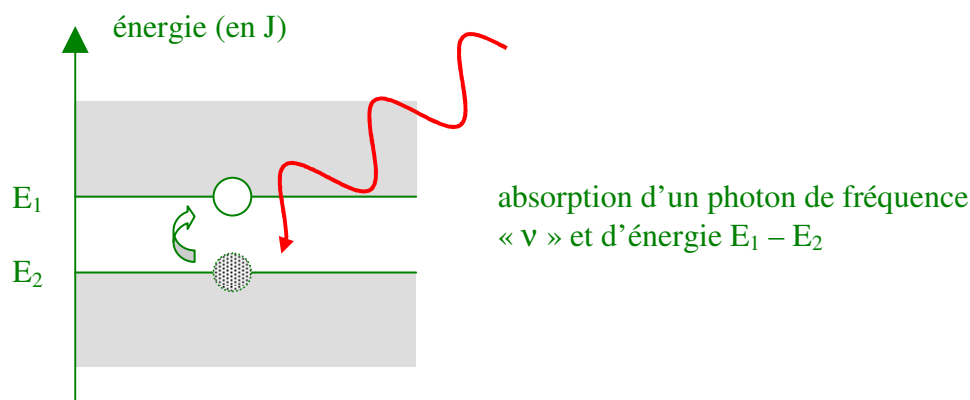
Pour un isolant électrique, le « gap » est très important.

Pour un conducteur électrique, il n'y a pas de « gap » : les bandes de valence et de conduction se chevauchent.

Pour un semi-conducteur, la bande de valence et la bande de conduction sont séparées par un gap voisin de 1 eV ($= 1,602 \cdot 10^{-19}$ J) .

Exemple

Un électron d'un matériau semi-conducteur peut passer de la bande de valence à la bande de conduction si on lui fournit de l'énergie (par exemple sous forme de lumière).

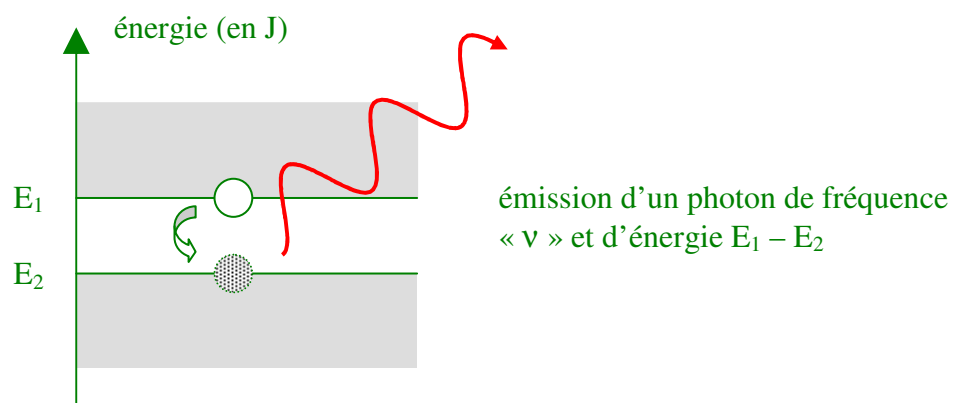


La présence de cet électron dans la bande de conduction (en provenance de la bande de valence) donne lieu, généralement, à un courant électrique dans le matériaux semi-conducteur.

Ce courant électrique est utilisé dans des détecteurs (photodiodes, phototransistor, ...) ou pour fournir de l'électricité (cellule photovoltaïque).

Exemple

Un électron d'un matériau semi-conducteur peut passer de la bande de conduction à la bande de valence en libérant de l'énergie sous forme de lumière (la lumière émise par une diode électroluminescente par exemple).



4.4 Dynamique d'un système électrique

4.4.1 Intensité d'un courant électrique en régime variable

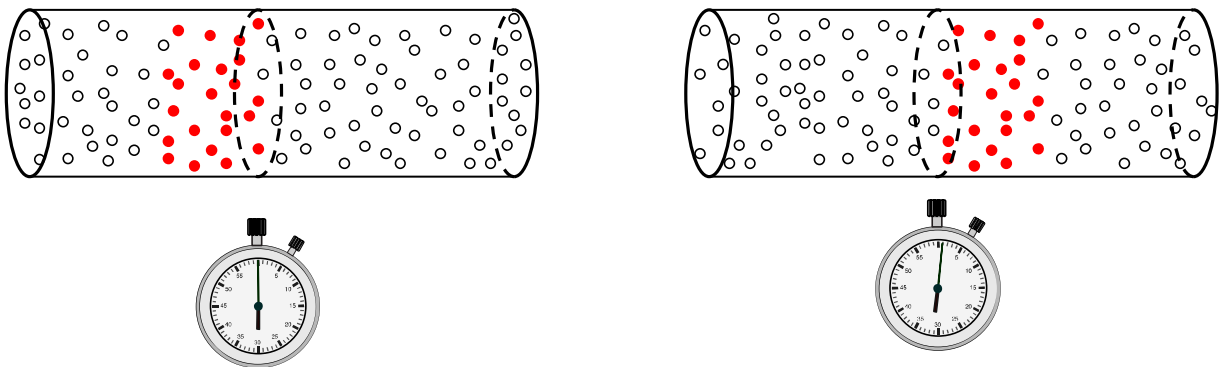
Un courant électrique est un mouvement d'ensemble de particules (des ions ou des électrons) transportant une charge électrique.

L'intensité « i » d'un courant électrique mesure la charge électrique « dq » qui traverse une surface durant l'intervalle de temps « dt ».

$$i = \frac{dq}{dt}$$

i intensité du courant électrique ; en A
 dq quantité d'électricité* ; en C (Coulomb)
 dt durée d'observation ; en s

* somme des charges électriques transportées par les particules à travers la surface

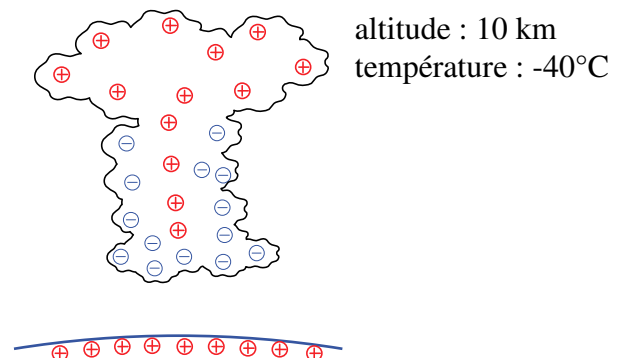


4.4.2 Modèle du condensateur

lors d'un orage, le nuage (un cumulonimbus) est chargé électriquement par électrisation : l'air chaud qui monte et l'air froid qui descend sont chargés de gouttes d'eau et de cristaux de glace qui se frottent.

En dessous du nuage, le sol est électrisé positivement par influence.

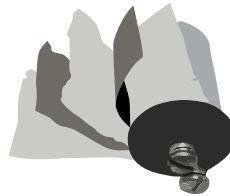
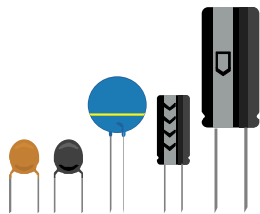
il y a donc accumulation de charges de signes opposés sur deux surfaces en regard : le sol et la base du nuage.



Un condensateur est constitué de deux surfaces conductrices séparées par un isolant. Les surfaces conductrices sont les armatures ; l'isolant est le diélectrique.

Exemple

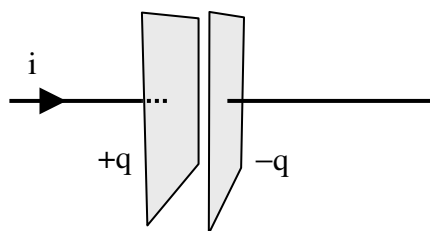
aspect de quelques condensateurs du commerce



intérieur d'un condensateur électrolytique
les armatures et les isolants sont des feuilles souples enroulées en cylindre

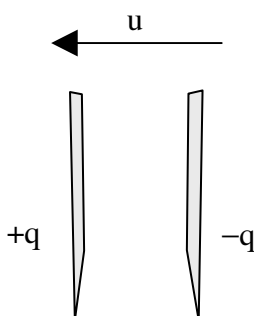
Le condensateur peut stocker des charges électriques sur ses armatures (on dit que le condensateur se charge).

Les charges électriques apportées par un courant sur une des armatures induisent, par influence, la présence de charges de signe opposé sur l'autre armature.



+q est la charge électrique de l'armature qui reçoit le courant électrique d'intensité i (l'autre armature porte la charge $-q$)

Les charges de signes opposés sur les armatures du condensateur induisent l'existence d'un champ électrique entre les armatures.



la tension électrique entre les armatures du condensateur représente le travail qui devrait être fait contre le champ électrique pour déplacer une particule chargée d'une armature à l'autre, divisé par la valeur de la charge de cette particule. Elle est mesurée en $J.C^{-1}$ (ou V).

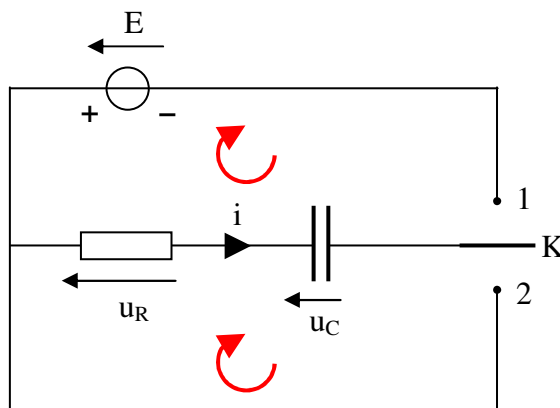
La relation entre la charge électrique « q » d'une armature et la tension « u » est :

$$q = C * u$$

- q charge électrique d'une armature ; en C
- u tension électrique entre les armatures ; en V
- C capacité du condensateur ; en Faraday (F)

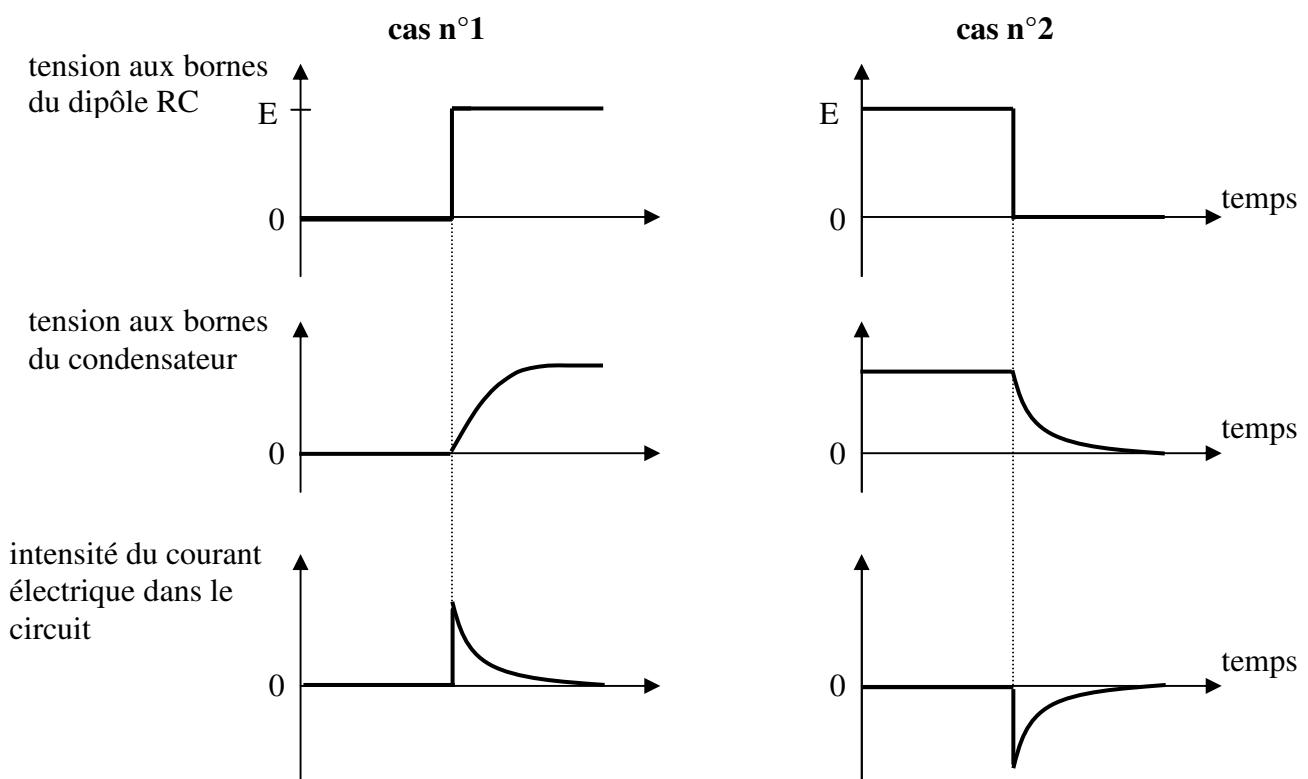
4.4.3 Le dipôle RC série

Un générateur de tension (source idéale dont la tension est constante) soumet un circuit RC série à un échelon de tension.



en pratique, on bascule l'interrupteur K en position 1 pour un échelon montant et en position 2 pour un échelon descendant

On suit les évolutions de la tension électrique aux bornes du condensateur et de l'intensité du courant dans le circuit :



On va établir l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur dans le cas de sa charge par le générateur de tension (cas n°1) :

loi des mailles

$$- E + u_R + u_C = 0 \quad (1)$$

loi d'Ohm aux bornes du dipôle ohmique de résistance R

$$u_R = R * i \quad (2)$$

définition de l'intensité d'un courant électrique

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (3)$$

relation entre la charge du condensateur et la tension à ses bornes

$$q = C * u \quad (4)$$

(1), (2), (3) et (4) :

$$E = R * C * \frac{du_C}{dt} + u_C \quad (5)$$

On va résoudre l'équation différentielle (5) vérifiée par la tension aux bornes du condensateur dans le cas de sa charge par le générateur de tension (cas n°1) :

On cherche une solution de la forme :

$$u_C(t) = A * \exp\left(-\frac{t}{R * C}\right) + B$$

Mathématiquement on a :

$$u_C(t = 0) = A + B \quad (6)$$

$$u_C(t = \infty) = B \quad (7)$$

Les valeurs des constantes réelles A et B sont déterminées par les conditions de l'expérience :

- avant le basculement de l'interrupteur à $t = 0$, le condensateur est déchargé : $u_C (t = 0) = 0 \text{ V}$

$$(6) \quad A + B = 0 \text{ V}$$

- après le basculement de l'interrupteur quand $t \rightarrow \infty$, (7) montre que la tension est constante et donc que $\frac{du_C}{dt} (t = \infty) = 0$

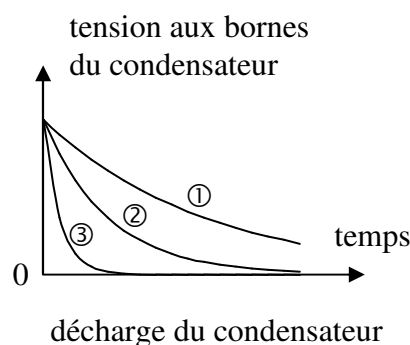
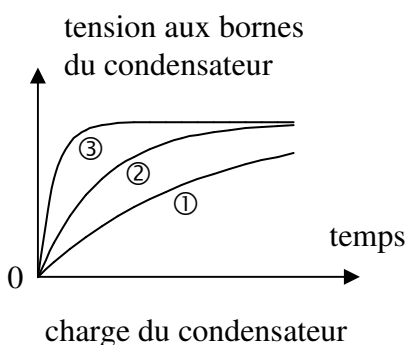
$$(5) \quad u_C (t = \infty) = E$$

$$(7) \quad B = E$$

On en déduit :
$$u_C = E * \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{R * C}\right) \right) \quad (\text{cas n}^\circ 1)$$

de la même manière :
$$u_C = E * \exp\left(-\frac{t}{R * C}\right) \quad (\text{cas n}^\circ 2)$$

Les équations ci-dessus montrent le temps de charge et de décharge du condensateur dépend de la valeur de $R * C$:

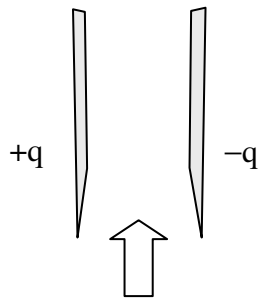


$$R_1 * C_1 > R_2 * C_2 > R_3 * C_3$$

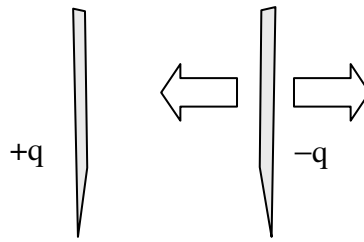
4.4.4 Capteurs capacitifs

On utilise des capteurs capacitifs pour détecter ou mesurer les grandeurs : distance (et en conséquence pression, force et accélération), humidité, niveau d'un fluide, ...

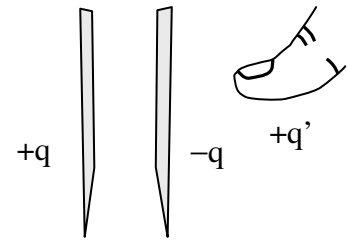
Principes



tout corps (liquide, solide ou gaz) ayant une constante diélectrique différente de celle de l'air va provoquer un changement de la valeur de la capacité du condensateur lors de son déplacement entre les armatures du condensateur



le déplacement d'une armature par rapport à l'autre va provoquer un changement de la valeur de la capacité du condensateur



la proximité d'une autre capacité (le corps humain a une capacité d'environ 100 pF) va modifier la valeur de la capacité du condensateur (association de condensateurs en série)