

OBJECTIFS

- Connaître quelques exemples d'ondes et leurs caractéristiques.
- Posséder quelques notions d'optique ondulatoire et géométrique.
- Connaître les principes physiques de quelques sources lumineuses.
- Manipuler les grandeurs photométriques d'émission (flux, éclairement ...).
- Décrire les perturbations électromagnétiques.

I- LES ONDES : GÉNÉRALITÉS

1- Définitions

1- Définition d'une onde

Une onde est la propagation d'une perturbation produisant sur son passage une variation réversible de propriétés physiques locales.
L'onde transporte de l'énergie sans transporter de matière.

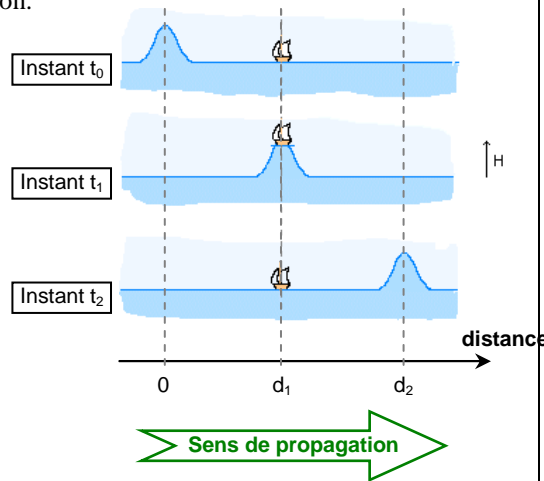
2- Onde transversale

On dira que l'onde est transversale lorsque le phénomène qui se propage est perpendiculaire à la direction de propagation.

Un bon exemple d'onde transversale est la propagation d'une vague (figure ci-contre):

Le phénomène qui se propage ici est un mouvement vertical réversible de l'eau d'une hauteur H.
Ce mouvement vertical est perpendiculaire au déplacement de l'onde (la vague).

La vague transporte une énergie sans transporter de matière.



3- Onde longitudinale

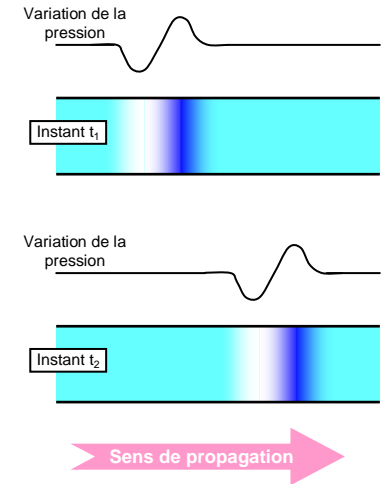
Une onde est longitudinale lorsque le déplacement des points du milieu de propagation s'effectue dans la même direction que celle de la propagation.

Un exemple d'onde longitudinale est la propagation du son dans l'air.

La figure ci-contre représente la propagation du son dans un tube.

Le phénomène qui se propage est une perturbation de la pression (compression puis dilatation).

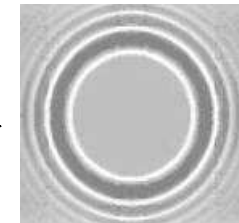
Les molécules d'air effectuent un petit mouvement de va-et-vient dans la direction de propagation.



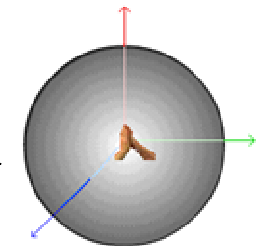
4- Direction de propagation

■ **Onde à une dimension :**
La propagation se fait dans une seule direction. C'est le cas de l'onde se propageant le long d'une corde ou le son dans un tube.

■ **Onde à deux dimensions :**
La propagation se fait dans un plan. C'est le cas de l'onde provoquée par une pierre lancée sur l'eau (photo ci-contre)



■ **Onde à trois dimensions :**
La propagation se fait dans tout l'espace à partir du point de perturbation. C'est le cas du son provoqué par un claquement de main (image ci-contre)



[animation](#)

2- Cas particulier des ondes sinusoïdales entretenues

Lorsque la source responsable de la propagation de l'onde impose une variation sinusoïdale dans le temps, on parle d'**onde sinusoïdale entretenue**.

Donnons quelques exemples :

- Le son d'un diapason (La3 440Hz).
- La lumière monochromatique d'un laser (onde lumineuse électromagnétique).
- La perturbation électromagnétique due au secteur (50Hz).

1- Fréquence

La fréquence **f en Hertz (Hz)** est le nombre de vibrations par seconde générées par la source.

Exemples :

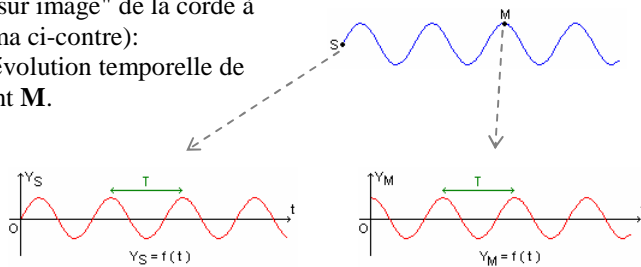
- Onde sonore audible par l'humain : $20\text{Hz} < f < 20\text{kHz}$.
- Lumière visible : $3,7 \cdot 10^{14}\text{Hz}$ (infrarouge) $< f < 7,5 \cdot 10^{14}\text{Hz}$ (ultraviolet).

2- Période temporelle

Considérons une corde vibrante sinusoïdalement.

Observons un "arrêt sur image" de la corde à l'instant $t = 0\text{s}$ (schéma ci-contre):

Observons ensuite l'évolution temporelle de la source **S** et du point **M**.

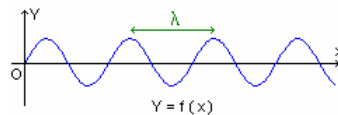


On constate que l'élongation de la source **S** est **périodique de période T**. C'est une fonction sinusoïdale du temps.

L'élongation du point **M** est elle aussi **périodique de même période T**.

3- Période spatiale

L'aspect de la corde à un instant donné (arrêt sur image) est une fonction sinusoïdale de l'abscisse x de chacun des points du milieu.



Définition : On appelle longueur d'onde (notée λ en mètre) la **période spatiale** de l'onde progressive périodique.

4- Célérité de l'onde

On appelle **célérité v** de l'onde la vitesse de propagation de l'onde. C'est le rapport entre la distance d parcourue par l'onde et la durée t du parcours.

$$v = \frac{d}{t} \quad \text{avec : } v \text{ en m.s}^{-1} ; d \text{ en m et } t \text{ en s}$$

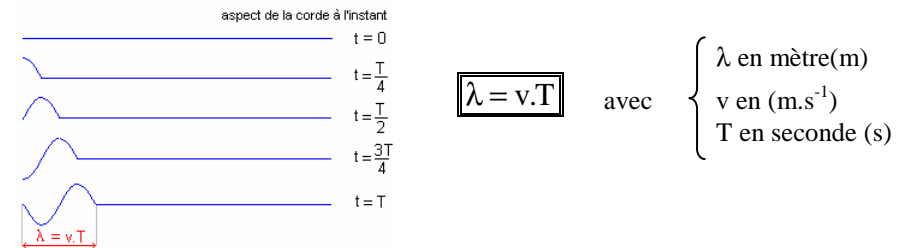
On préfère le mot célérité au mot vitesse auquel est associé la notion de déplacement de matière (vitesse d'une automobile, d'une particule etc...).

La célérité de l'onde est une propriété du milieu de propagation et ne dépend pas de la façon dont la source a engendré l'onde. Elle est donc constante dans un milieu donné dans des conditions données.

Par exemple la célérité du son dans l'air dépend de sa température. La célérité d'une onde se propageant sur une corde dépend de sa tension et de sa masse linéique (masse par unité de longueur).

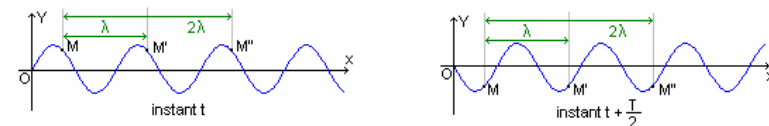
5- Relation entre v ; T et λ

La longueur d'onde est la distance parcourue par l'onde pendant une durée égale à sa période.



$$\lambda = v.T \quad \text{avec } \begin{cases} \lambda \text{ en mètre(m)} \\ v \text{ en (m.s}^{-1}) \\ T \text{ en seconde (s)} \end{cases}$$

Remarque : Les points **M**, **M'** et **M''** conservent la même élongation quelque soit l'instant t . On dit que les points **M**, **M'** et **M''** vibrent en phases.



TD A1-5 exercices 1 à 3

II- NOTIONS D'OPTIQUE ONDULATOIRE

1- Historique

la lumière a vu sa description évoluer au cours des siècles :

- Avant la fin du XVIIème siècle sa description était géométrique : la lumière se compose de rayons lumineux se déplaçant à des vitesses différentes dans les milieux transparents. Les instruments se développent alors que la nature de la lumière est mal comprise (NEWTON n'avait pas compris la nature ondulatoire de la lumière).

Grands Noms : DESCARTES, GALILÉE, NEWTON, SNELL.

- XVIII-XIXème siècle, sa nature ondulatoire commence à convaincre certains scientifiques : la lumière est une onde électromagnétique qui se propage dans le vide à une vitesse constante $c \approx 3.10^8$ m/s

Grands noms : HUYGENS, FRESNEL, MAXWELL et MICHELSON.

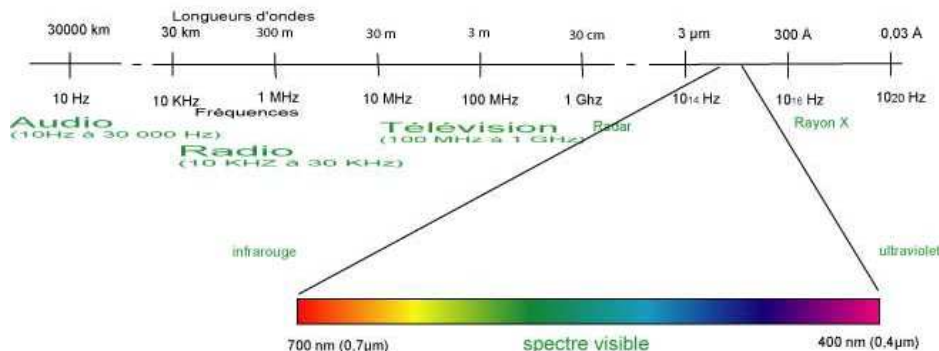
- Au XXème siècle émerge la description quantique : l'aspect corpusculaire est mis en évidence par l'effet photoélectrique (expliqué par A. EINSTEIN dans un de ces célèbres articles de l'année 1905) : la lumière se compose de grains d'énergie : les photons

Grands noms : EINSTEIN, PLANCK, FEYNMAN.

2- Aspect ondulatoire de la lumière

La lumière est une onde électromagnétique qui résulte de la propagation de vibrations simultanées du champ magnétique et du champ électrique.

Du point de vue de la physique, la couleur est associée à la longueur d'onde ou à la fréquence de l'onde produite par une source lumineuse ou réfléchi par un objet. Ce que l'on appelle "lumière visible" est la portion du spectre électromagnétique qui est perçue par un oeil humain normal. Elle s'étend du rouge (longueur d'onde de 750 nm) au violet (longueur d'onde de 400 nm) en passant par toutes les couleurs de l'arc-en-ciel (communément divisé en rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo et violet).



III- NOTIONS D'OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

1- Approximation de l'optique géométrique

La lumière (l'énergie lumineuse) est décrite par un ensemble de *rayons lumineux indépendants*. Ces rayons lumineux se propagent en ligne droite dans tout milieu *homogène* à une vitesse qui dépend du milieu.

2- Indice de réfraction

La vitesse de déplacement de la lumière dépend du milieu dans lequel elle se propage :

- Dans le vide la lumière se propage à la vitesse $c = 299792458$ m/s (constante universelle du Système International).

- Dans un milieu matériel transparent homogène et isotrope, la vitesse v est inférieure à c

et vaut : $v = \frac{c}{n}$ où n est l'indice de réfraction du milieu (sans dimension).

Voici quelques indices de réfraction dans les milieux courants :

milieu	vide	air	eau	verre	diamant
indice	1	1,0003	1,33	1,5 à 1,8	2,42

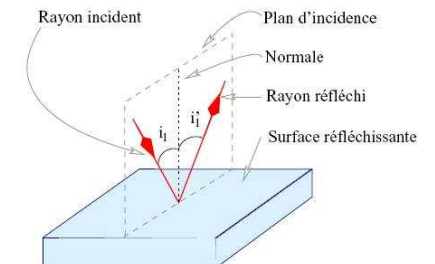
3- Réflexion de la lumière

Lorsqu'un rayon arrive à l'interface entre deux milieux différents, il donne naissance à un rayon réfléchi et à un rayon transmis (réfracté).

On distingue deux types de réflexion :

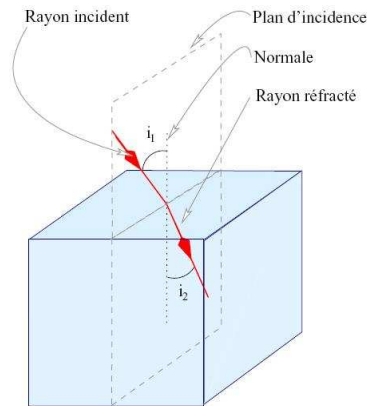
- ① La réflexion diffuse est produite par une surface irrégulière. Elle ne produit pas d'image discernable. C'est cependant cette sorte de réflexion qui nous permet de voir le monde qui nous entoure.
- ② La réflexion spéculaire est produite par une surface très lisse (ex. : miroir ou surface d'eau très calme). Elle produit une image discernable d'un objet.

On définit le plan d'incidence comme le plan contenant le rayon incident et la normale à l'interface (figure ci-contre):



- Lois de la réflexion :**
- ① Le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence.
 - ② Le rayon réfléchi est symétrique du rayon incident par rapport à la normale $\Rightarrow \boxed{i_1 = i_1'}$.

4- Réfraction de la lumière



La réfraction est la déviation de la lumière lorsqu'elle traverse l'interface entre deux milieux transparents d'indices optiques différents (figure ci-contre):

- Lois de la réfraction :**
- ① Le rayon réfracté est dans le plan d'incidence.
 - ② Le rayon réfracté est tel que : $\boxed{n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2}$.

Remarque : tout trajet suivi par la lumière dans un sens peut l'être en sens opposé.

Réflexion totale : Lorsque le milieu 2 est moins réfringent que le milieu 1 (c'est-à-dire $n_2 < n_1$), le rayon réfracté s'éloigne de la normale. Il existe alors un angle limite d'incidence i_{1R} tel que $i_2 = \pi/2$

$$\Rightarrow n_1 \sin i_{1R} = n_2 \sin \frac{\pi}{2} \Rightarrow \boxed{\sin i_{1R} = \frac{n_2}{n_1}}$$

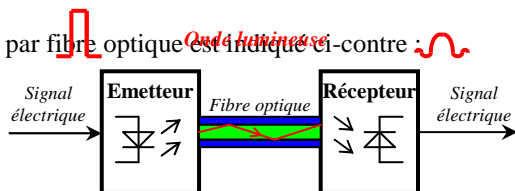
Si $i > i_{1R}$ le rayon réfracté disparaît ; seul le rayon réfléchi existe : on parle alors de **réflexion totale** car toute l'énergie se retrouve dans le rayon réfléchi.

[animation](#)

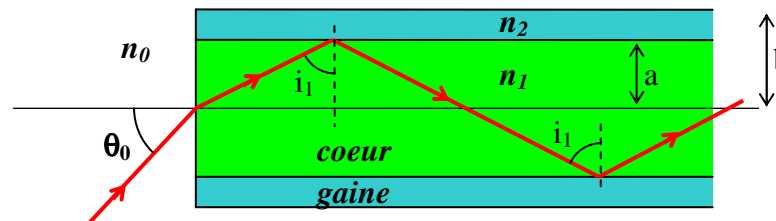
5- La fibre optique

La fibre optique est très utilisée pour la transmission d'informations sur de longues distances mais aussi en "local" entre deux bâtiments par exemple.

Le schéma général d'une transmission par fibre optique est indiqué ci-contre :



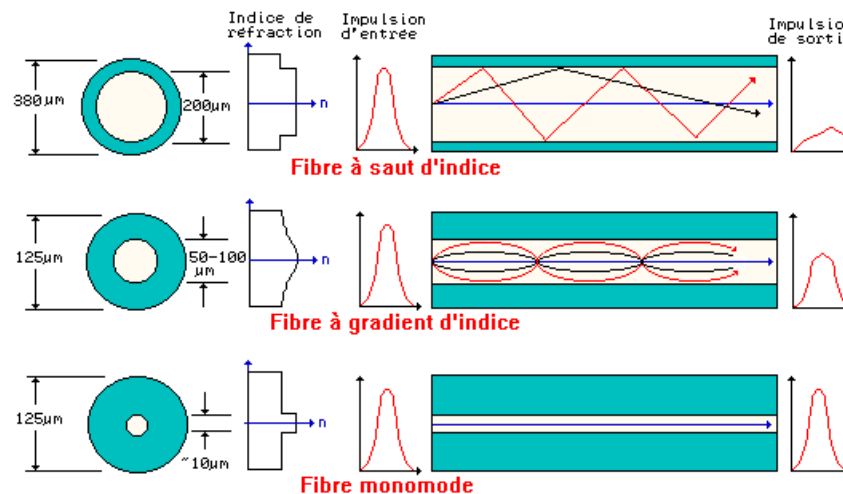
Une fibre optique est constituée par un premier milieu d'indice n_1 (cœur) entouré par un second milieu d'indice n_2 (gaine ou manteau). L'indice n_1 est supérieur à l'indice n_2 . Lorsque la lumière est injectée dans le cœur elle se propage, soit en ligne droite (monomode), soit par une succession de réflexions internes (multimode) comme l'illustre le schéma suivant :



[animation1](#)

[animation2](#)

La figure ci-dessous représente les trois principaux types de fibres :



■ Les fibres multimodes à saut d'indice :

- Diamètre du cœur : 100 à 600 μm .
- Bande passante : 10 à 50 MHz.km.
- Affaiblissement à 850 nm : $\leq 5 \text{ dB / km}$. (affaiblissement = $10 \text{ Log}(P_s/P_e)$)

\Rightarrow Utilisée pour des liaisons jusqu'à 2 km, avec un débit maximal de 50 M bits/s .

■ Les fibres multimodes à gradient d'indice :

- Diamètre du cœur : 100 μm .
- Bande passante : 500 MHz.km.
- Affaiblissement à 850 nm : < 5 dB / km.

⇒ Utilisée pour des liaisons longues, avec un grand débit : 150 M bits/s .

■ Les fibres monomodes :

- Diamètre du cœur : 10 μm .
- Bande passante : plusieurs GHz.km.
- Affaiblissement à 850 nm : 2 dB / km.

⇒ Utilisée pour des liaisons très longues, avec un haut débit : 500 M bits/s.

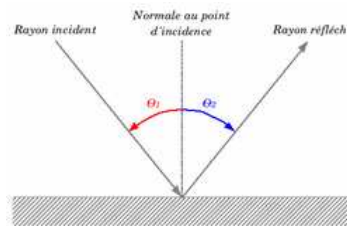
Avantages de la fibre optique :

La fibre optique est très utilisée pour la transmission d'information ses avantages sont :

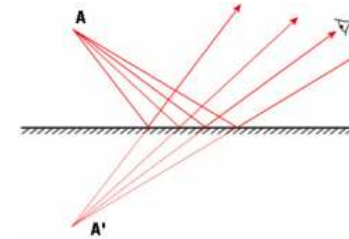
- **perte de signal** sur une grande distance **bien plus faible** que lors d'une transmission électrique dans un conducteur métallique,
- **vitesses** de transmission très **élevées**,
- **poids** au mètre **faible** (c'est important, aussi bien pour réduire le poids qu'exercent les installations complexes dans les bâtiments, que pour réduire la traction des longs câbles à leurs extrémités),
- **insensibilité aux interférences** extérieures (proximité d'un néon ou d'un câble à haute tension, par exemple),
- **pas d'échauffement** (à haute fréquence le cuivre chauffe, il faut le refroidir pour obtenir des débits très élevés).

6- Le miroir plan

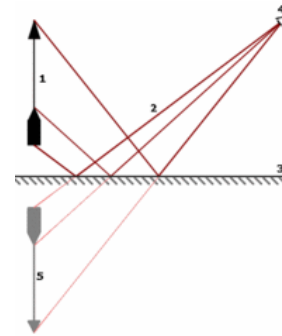
Le type le plus simple de miroirs est le miroir plan. D'après les lois de Snell-Descartes, les rayons sont réfléchis de façon symétrique à la normale au plan (image ci-contre).



Que se passe-t-il si la source de lumière est un point (un objet A) ? Où est son image ? Sur le schéma ci-dessous, on remarque que les rayons ne se croisent pas après avoir été réfléchis, mais leurs prolongements se croisent de l'autre côté du miroir. On a donc une image virtuelle notée A'.



On peut remarquer que A et A' sont symétriques par rapport au miroir. Et étant donné que l'observateur ne peut voir qu'un petit faisceau de ces rayons, on peut choisir de ne représenter que celui-ci. C'est ce que l'on fait dans l'image suivante (à gauche) : on y a aussi rajouté un plus grand nombre de points objets formant une figure de flèche.

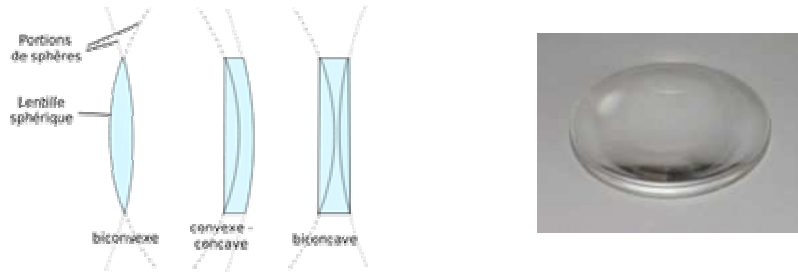


Les rayons parvenant à l'œil (4) semblent provenir de l'image virtuelle de la flèche qui est symétrique à l'objet réel. Cela explique pourquoi on voit, dans l'image de droite, une image virtuelle de la montagne sous le miroir formé par le lac.

[animation](#)

7- Les lentilles minces

Les lentilles sphériques sont souvent formées d'un morceau de verre taillé comportant deux faces étant soit planes soit sphériques. Selon qu'il y ait une ou deux surfaces sphériques, elles sont appelées plan-convexe, plan-concave, biconvexe, biconcave, ...



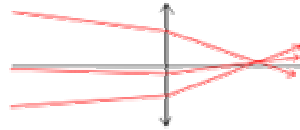
■ Définition :

Une lentille sphérique est dite mince si les rayons de courbure de ses deux faces sphériques sont beaucoup plus grands que l'épaisseur de la lentille.

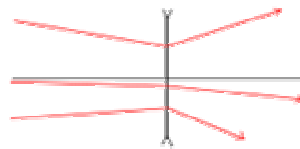
■ Lentilles convergentes et lentilles divergentes

Selon la forme de la lentille, celle-ci peut dévier les rayons différemment. On distingue deux sortes générales de lentilles, dont les schémas sont donnés ci-dessous :

Une lentille **convergente** a tendance à rapprocher les rayons de l'axe optique.

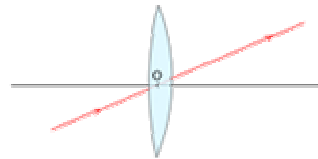


Une lentille **divergente** a tendance à éloigner les rayons de l'axe optique.



■ Centre et foyers

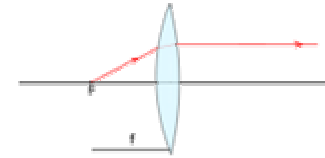
Le **centre** optique d'une lentille, généralement appelé O, est le point d'intersection entre le plan de la lentille et l'axe optique : un rayon passant par ce point garde la même direction.



Le foyer objet F est le point de l'axe optique tel que tout rayon passant par F sorte parallèle à l'axe optique.

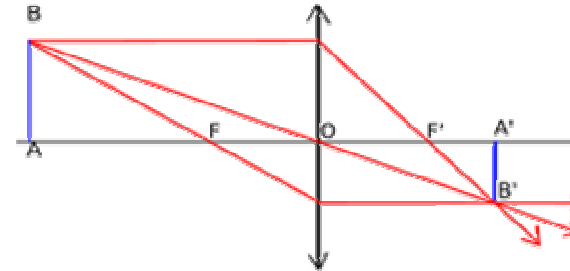
Le foyer image F' est le point de l'axe optique tel que tout rayon passant par F' vienne d'un rayon incident parallèle à l'axe optique.

On donne (image de droite) un exemple du foyer objet d'une lentille convergente, où f est la distance focale, c'est-à-dire la distance entre F et O.



■ Relations de conjugaison et détermination d'images

On considère un objet AB dont l'image A'B' est formée grâce à une lentille de distance focale f, comme l'indique le schéma ci-dessous (dans le cas d'une lentille convergente et d'un objet réel).



Connaissant la distance de l'objet à la lentille, on est capable de déterminer l'endroit où va se former l'image grâce à la relation suivante:

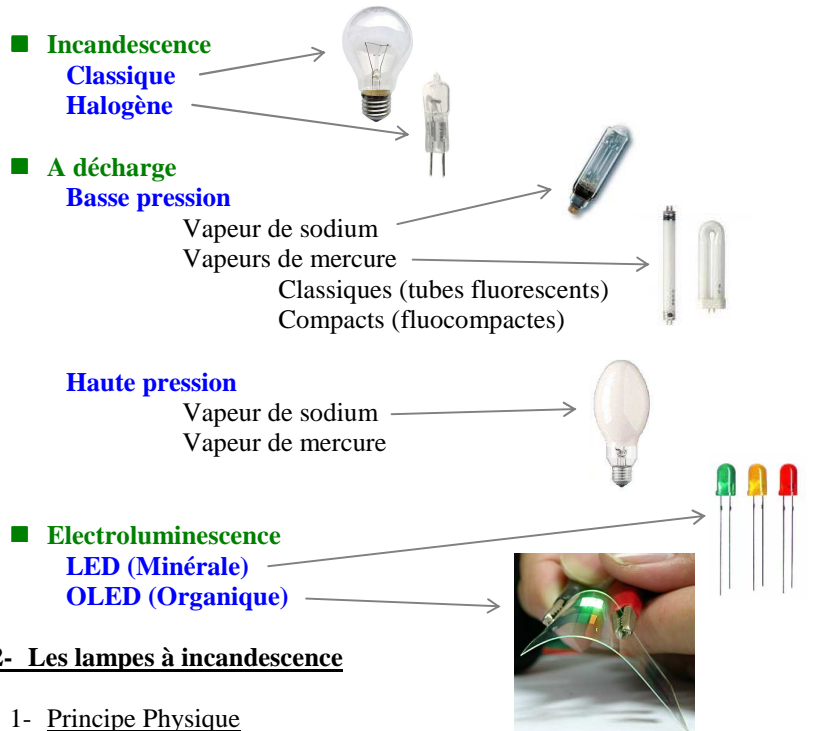
$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f}$$

[animation](#)

TD A1-5 exercices 4 à 8

IV- PRINCIPES PHYSIQUES DES SOURCES LUMINEUSES

1- Répartition des différentes familles de sources d'éclairage électrique



2- Les lampes à incandescence

1- Principe Physique

Le courant qui traverse le filament le fait chauffer par effet joule $P=RI^2$. Il en résulte de la chaleur mais également de la lumière. Cette dernière est due au filament qui est incandescent (lampe à incandescence)

Les lampes à incandescence sont raccordables à un rhéostat ou un gradateur (variateur d'énergie) qui permet de faire varier l'intensité lumineuse.

2- Lampe à incandescence "classique"

Le filament de tungstène est amené à une température aux alentours de 2500°C (2773 K).

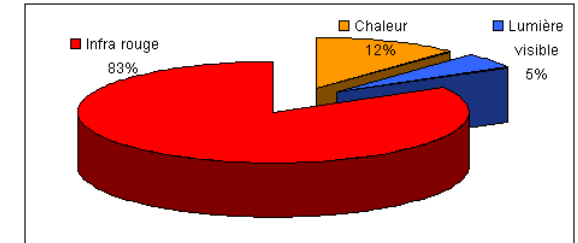
Ce dernier est inclus dans une ampoule remplie d'un gaz inerte (argon, krypton...) pour protéger le filament et ainsi augmenter sa durée de vie.

Le rendement, exprimé en lm/w , est assez faible car le spectre d'émission "déborde" dans l'infrarouge. Ce dernier est assez proche de celui du soleil, ce qui profère aux lampes à incandescence classique un bon confort visuel.

Caractéristiques:

- Prix 0.5 à 1 euro
- Rendement 12 à 20 lm/W
- Durée de vie 1000 h
- Remarque(s) : Excellent rendu des couleurs

La figure ci-contre nous montre que la lampe à incandescence a un très mauvais rendement énergétique.



3- Lampes halogènes

Une lampe à halogène est une lampe à incandescence à laquelle on incorpore un gaz possédant des halogénés (17° colonne du tableau périodique des éléments). Par exemple du I_2 , CH_3Br ou encore du CH_2Br_2 .

Ce gaz régénère le filament, augmentant la durée de vie.

La température de fonctionnement est de 2900°C (3173 K). Cette plus grande température qu'une ampoule classique demande que l'enveloppe qui constitue l'ampoule soit constituée de matériaux spéciaux : quartz, verres spéciaux...

En outre, cela provoque l'émission d'un rayonnement ultraviolet, lequel est absorbé par le verre placé devant. (C'est la raison de l'existence d'une petite fenêtre de verre ou de plastique transparent devant l'ampoule des lampes à bureau).

Caractéristiques:

- Prix 5 à 20 euros
- Rendement 15 à 30 lm/W
- Durée de vie 2000 à 4000h
- Remarque(s) Excellent rendu des couleurs

2- Les lampes à décharge

1- Principe Physique

Une lampe à décharge fonctionne sur le principe de la luminescence. Une décharge électrique est créée entre deux électrodes placées dans un brûleur rempli de gaz rare, de vapeurs métalliques (Na, Hg) et de terres rares. La décharge excite les atomes (les ionise) et génère un arc électrique.

Généralement la décharge fait émettre à du mercure un rayonnement ultraviolet qui excite une substance fluorescente qui est déposée sur la surface intérieure du verre. Cette substance alors émet de la lumière blanche en transformant le spectre du

rayonnement qu'il reçoit (il décale les longueurs d'onde vers les plus grandes longueurs d'ondes).

Les lampes à décharge ne peuvent pas être raccordées à un rhéostat ou un gradateur.

2- Lampes à décharge basse pression

■ Les tubes fluorescents

Les tubes fluorescents sont couramment appelés "Néons". Le gaz contenu dans le verre est composé d'argon et de vapeur de mercure (très peu) à basse pression.

Il existe différentes sortes de ces lampes

- Linéaire : néon classique
- Compacte : ce sont les lampes à économie d'énergie. (A noter qu'elles perturbent le réseau électrique). Elles ne doivent pas être éteintes et allumées régulièrement sous peine d'une usure prématurée.

En outre, elles mettent un certain laps de temps avant d'atteindre leur maximum de luminosité.

- Circulaires ou en forme de U c'est un néon "tordu"

Leur durée de vie est inférieure à celle d'un néon (6.000 à 15.000 heures).

Caractéristiques:

- Prix 5 à 35 euros
- Rendement 50 à 80 lm/W
- Durée de vie 10.000 à 20.000 h
- Remarque(s) Le rendu des couleurs est de mauvais à bon. Le blanc émis est froid.

■ Les lampes à vapeur de sodium basse pression

Elles sont souvent préférées aux lampes à vapeur de mercure (tubes fluorescents) car elles présentent un meilleur rendement.

L'ampoule est remplie d'un gaz composé de néon, d'argon et d'un peu de sodium.

Le spectre d'émission est monochromatique (589nm=jaune orangée). Cela a pour conséquence que le rendu des couleurs est mauvais.

Elles sont donc utilisées lorsque le rendu des couleurs est secondaire (stades, routes, tunnels ...)

Mais cette monochromaticité est aisément filtrée. C'est pour cette raison que les sites astronomiques imposent cette technologie aux alentours de ce dernier.

Caractéristiques:

- Prix ? euros
- Rendement 140 à 180 lm/W
- Durée de vie 16.000 h
- Remarque(s) Le rendu de couleurs est très mauvais et la lumière émise est jaune orangée.

3- Lampes à décharge haute pression

■ Lampes à vapeur de mercure haute pression

Elles ont une pression 500 fois supérieure à celle des "néons".

L'émission d'ultraviolets est réduite par cette haute pression.

Caractéristiques

- Prix ? euros
- Rendement 50 à 70 lm/W
- Durée de vie 16.000 à 20.000 h
- Le rendu des couleurs est de mauvais à bon. La lumière émise est bleutée.

■ Lampes à vapeur de sodium haute pression

Elles sont souvent préférées aux lampes à vapeur de mercure car elles présentent un meilleur rendement.

La lumière émise est plus éblouissante que les lampes à vapeur de mercure basse pression et possède un meilleur rendu des couleurs. Cela explique qu'elles soient beaucoup utilisées pour l'éclairage public.

Cependant, son spectre (rayonnement en bande spectrale) est plus difficile à filtrer pour les observatoires astronomiques.

Caractéristiques:

- Prix 25 à 30 euros
- Rendement 100 à 130 lm/W
- Durée de vie 12.000 à 22.000h
- Remarque(s) Le rendu des couleurs est mauvais. La couleur émise est orangée.

3- L'éclairage électroluminescent

1- Principe Physique

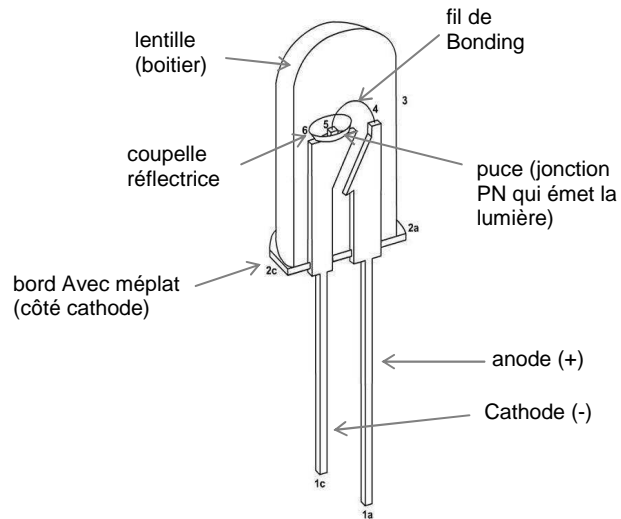
L'électroluminescence est le résultat de la recombinaison des électrons et des trous électroniques dans un matériau (généralement un semi-conducteur).

Les électrons excités libèrent leur énergie sous forme de photons (c'est-à-dire de lumière). Avant recombinaison, les électrons et les trous sont séparés dans le matériau pour former une jonction : jonction PN dans les DEL.

2- Les LED ou DEL

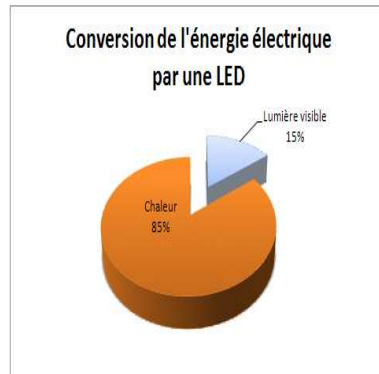
Une diode électroluminescente (abrégée en DEL), également appelée LED (*light-emitting diode*) est une diode capable d'émettre de la lumière lorsqu'elle est parcourue par un courant électrique.

La constitution interne d'une LED est schématisée ci-dessous :



Caractéristiques:

- Prix 0.1 à 2 euros
- Rendement 12 à 60 lm/W



- Durée de vie 50.000 à 100.000h
- Remarque(s) Le rendu des couleurs est bon. Le coût de la lumière blanche est prohibitif (plusieurs dizaines d'euros pour une LED blanche d'une puissance lumineuse équivalente à une ampoule classique de 100W).

3- Les LED organiques : les OLED

La diode électroluminescente organique (**Organic Light-Emitting Diode**) est une technologie d'affichage lumineux dont le premier brevet est sorti en 1987 (société Kodak) et la première application commerciale est apparue vers 1997.

Cette technologie a vocation à remplacer peu à peu les affichages à cristaux liquides (LCD), d'abord dans les applications de petites dimensions tels que téléphones mobiles,

écran d'appareils numériques. Quand le développement sera mieux maîtrisé, les OLED devraient se substituer aux LCD et autres technologies plasma pour les écrans de grande taille.

Chaque diode, dont l'épaisseur ne dépasse pas le millimètre, est composée de trois couches d'un **semi-conducteur organique** (des atomes de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote) entourées par une cathode métallique (charges négatives) et une anode transparente (charges positives). Chaque pixel d'un écran OLED est constitué de trois diodes électroluminescentes juxtaposées (Rouge, Verte et Bleue), produisant leur propre lumière lorsqu'elles sont soumises à une tension électrique. L'ensemble repose sur un « substrat » transparent, en verre ou en matière plastique.

Les applications :

- Lecteurs MP3
- Téléphones portables (les petits écrans auxiliaires)
- Appareils photo numériques
- Autoradios
- Tableaux de bord de voiture
- Ecrans transparents : les LED transparentes ne sont plus un rêve.
 - Informations sur les pare brises des véhicules (voitures, avions...)
 - Ajout d'une couche d'information supplémentaire sur les écrans LCD (pour gagner en luminosité ou en quantité informations).



4- Tableau comparatif

	LED	Lampe classique à incandescence	Lampe à fluorescence	Lampe au sodium (BP*)	Lampe au sodium (HP*)	Halogène	Mercure (HP*)
Prix	Moyen à Élevé	Faible	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen
Durée de vie (h)	50.000 à 100.000	1.000	10.000 à 20.000	16.000	12.000 à 22.000	2.000 à 4.000	16.000 à 20.000
Échauffement	Inexistant	Important	?	?	?	Élevé	?
Solidité	Très bonne	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise
lm/Watt	12 à 60	12 à 20	50 à 80	140 à 180	100 à 130	15 à 30	50 à 70
Flux lumineux (lm)	5 à 20	Plusieurs centaines					
Taille	Faible	Petite à Moyenne	Moyenne à grande			Petite à Moyenne	Moyenne à grande
Rendu des couleurs (IRC)	Moyen à Bon	Excellent	Mauvais à bon	Très mauvais	Mauvais	Excellent	Mauvais à bon
Utilisation	Voyants	Éclairage domestique	Éclairage public et domestique	Éclairage urbain		Éclairage domestique	Éclairage urbain

V- LES GRANDEURS PHOTOMÉTRIQUES D'EMISSION

1- Introduction

Tous les paramètres qui définissent les notions liées à la vision des objets sont directement conditionnés par le récepteur qu'est l'oeil humain.

Conséquences :

- La définition d'une grandeur énergétique ne suffit pas.
- Il faut définir une grandeur qui soit basée sur l'étude des SENSATIONS OCULAIRES

La difficulté consiste dans le fait que les sensations oculaires dépendent de la couleur et de l'intensité lumineuse (vision nocturne ou diurne) ; de plus elles varient d'un individu à l'autre.

On définit donc ce qu'on appelle une VISION PHOTOPIQUE : c'est la vision diurne d'un observateur moyen normal.

Comme toute grandeur Physique, la lumière (vision photopique) possède ses unités de mesure.

Examinons les caractéristiques de quelques appareils ou composants électriques :

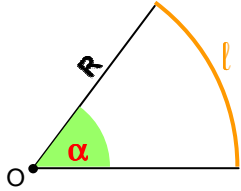
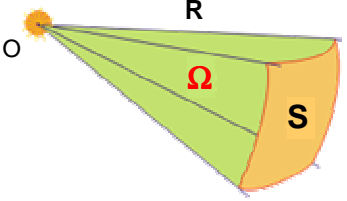
- LED haute luminosité : intensité de 140 mcd (140 millicandela).
- Vidéoprojecteur : flux de 2000 lm (2000 lumen).
- Ecran TFT : luminance de 260 cd/m² (260 candela par mètre carré).
- Eclairage d'un stade : éclairage de 1500 lx (1500 lux).

La lumière visible est caractérisée par plusieurs unités suivant qu'on s'intéresse à l'émission de la source, à l'énergie reçue, à la réémission de lumière par un corps...

2- L'angle solide Ω

Avant d'aborder les différentes unités, il est nécessaire d'introduire la notion d'angle solide. Il s'agit d'un angle "volumique" qui se définit de la même manière que l'angle plan.

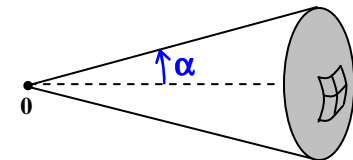
Le tableau ci-dessous fait le parallèle entre l'angle plan et l'angle solide :

Angle plan α (radian)	Angle solide Ω
<p>L'angle α en radian (rad) est défini sur le cercle par la longueur de l'arc ℓ divisé par le rayon R :</p> $\alpha = \frac{\ell}{R}$ 	<p>L'angle Ω en stéradian (st) est défini sur la sphère par la surface sphérique S divisée par le rayon au carré :</p> $\Omega = \frac{S}{R^2}$ 
<p><u>Définition du radian :</u> Un angle de 1 radian correspond à une longueur d'arc ℓ égale au rayon R.</p>	<p><u>Définition du stéradian :</u> Un angle solide de 1 stéradian correspond à une surface S sphérique égale au rayon au carré R^2.</p>
<p><u>Remarques :</u> ① Le cercle complet correspond à</p> $\alpha_{\text{cercle}} = \frac{2\pi R}{R} \text{ soit } \alpha_{\text{cercle}} = 2\pi \text{ rad}$	<p><u>Remarques :</u> ① La sphère complète correspond à</p> $\Omega_{\text{sphère}} = \frac{4\pi R^2}{R^2} \text{ soit } \Omega_{\text{sphère}} = 4\pi \text{ st}$

Angle solide limité par un cône :

Un cône de demi ouverture α définit

un angle solide $\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha)$



3- L'intensité lumineuse I

On considère ici "l'éclat" de la source primaire ponctuelle (soleil, filament d'une ampoule, chandelle ...).

L'unité d'intensité lumineuse I est la candela (cd).

Le dernier étalon défini en 1979 donne la définition de la candela :

La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 54.10^{12} hertz (vert-jaune) et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.

Quelques exemples :

Source	Intensité
Bougie standard	≈ 1 cd
LED blanche 10mm haute luminosité	140 000 mcd (angle de 10°)
Ampoule 100W	≈ 120 cd
Soleil	≈ 2,2.10 ²⁸ cd

4- Le flux lumineux

On considère ici la "puissance" émise dans un angle solide donné.

Le lumen (lm) est l'unité de flux lumineux correspondant au flux émis par une source ponctuelle uniforme d'une intensité de 1 candela située au sommet de l'angle solide de 1 stéradian.

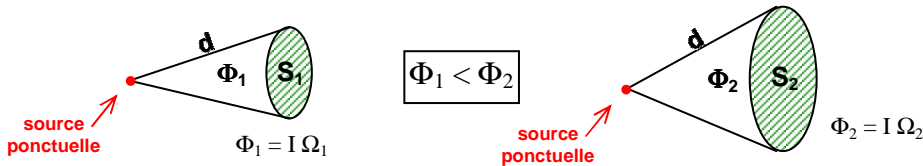
Pour une source ponctuelle uniforme on a :

$$\Phi = I \cdot \Omega$$

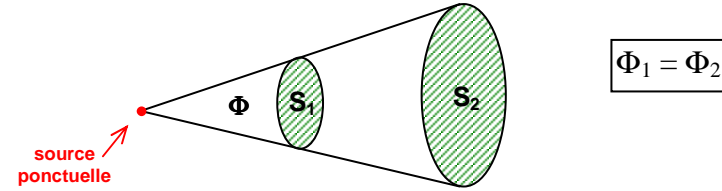
lm cd st

Remarques :

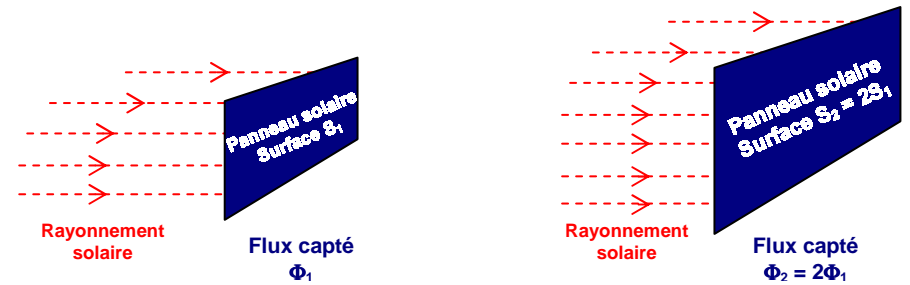
① Le flux correspond à un angle solide éclairé par la source. A une même distance **d** de la source, le flux augmentera avec la surface éclairée (schéma ci-dessous) :



② Dans l'exemple schématisé ci-dessous, le flux Φ est le même pour les deux surfaces S_1 et S_2 (même angle solide) :



③ Pour des surfaces très éloignées de la source, les rayons lumineux seront quasi-parallèles. Le flux sera alors proportionnel à la surface éclairée (schéma ci-dessous):



Quelques exemples (flux total émis):

Source	Flux
OLED 1W électrique	90 lm
LED OSRAM 15W électrique	420 lm
Vidéoprojecteur	de 1000 à 2500 lm
Ampoule halogène 60W	1350 lm

VI- LES PERTURBATIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

1- Introduction

Les équipements électriques doivent supporter mutuellement leurs perturbations électromagnétiques. Ce concept se nomme **CEM** : Compatibilité ElectroMagnétique.

Définition officielle :

La CEM est la capacité d'un dispositif, équipement ou système, à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans introduire lui-même de perturbations électromagnétiques de nature à créer des troubles susceptibles de nuire au bon fonctionnement des appareils ou des systèmes situés dans son environnement.

L'importance de la CEM est liée aux facteurs suivants :

- perturbations de plus en plus importantes liées à l'augmentation de la tension et de l'intensité (électronique de puissance, transport de l'électricité ...)
- circuits à niveau d'énergie de plus en plus faible, donc de plus en plus sensibles
- distances entre les circuits sensibles (souvent électroniques) et les circuits perturbateurs (souvent de puissance) qui se réduisent
- explosion du nombre des matériels de télécommunication (liaisons numériques à haut débit).

2- Généralités sur les perturbations électromagnétiques

Une perturbation électromagnétique se traduit par l'apparition d'un signal électrique indésirable venant s'ajouter au signal utile. C'est ce signal importun qui peut dégrader le fonctionnement d'un équipement.

Les sources des émissions électromagnétiques peuvent être d'origine :

- naturelle : atmosphériques, galactiques, solaires, bruit thermique terrestre, ...
- artificielle. Parmi ces sources, certaines sont :
 - **intentionnelles** : émetteurs radioélectriques, fours micro-ondes, fours à induction, ...
 - **non intentionnelles** : systèmes d'allumage des moteurs à explosion, tous les systèmes d'enclenchement et de coupure d'un signal électrique, lampes à décharge, horloge des systèmes informatiques, ...

Les perturbations électromagnétiques peuvent également être classées selon la valeur de la fréquence du signal perturbateur :

- Perturbations basse et moyenne fréquence (< 5 MHz). Ces perturbations se propagent essentiellement sous forme conduite par les câbles. Elles sont souvent longues (quelques dizaines de ms), voire permanentes dans le cas d'harmoniques. L'énergie conduite peut être importante, se traduisant en plus du dysfonctionnement par un risque de destruction du matériel.
- Perturbations haute fréquence (> 30 MHz). Ces perturbations se propagent essentiellement dans l'air sous forme rayonnée. Elles sont caractérisées par un front de montée très court (< 10 ns), elles peuvent être permanentes dans le cas du redressement ou de signaux d'horloge. L'énergie conduite est faible et se traduit par le risque de dysfonctionnement du matériel environnant.

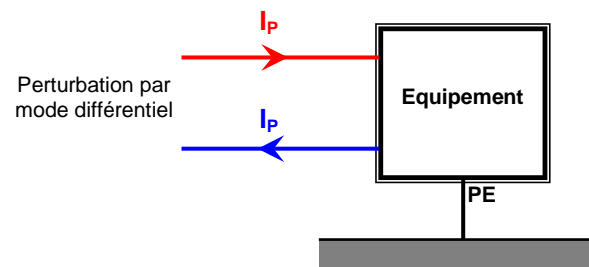
3- Les perturbations par conduction

Les perturbations conduites sont transmises par câble (lignes d'alimentation, bus de transmission de données, câbles de masses, terre, capacités parasites, ...).

Sur une liaison bifilaire, le signal perturbateur peut se déplacer soit par mode différentiel soit par mode commun.

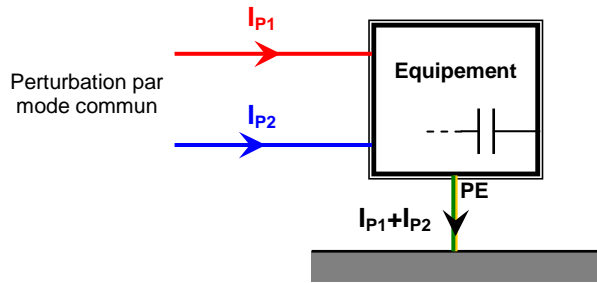
1- Le mode différentiel

La propagation s'effectue en mode différentiel lorsque la perturbation est transmise à un seul des conducteurs actifs. Le courant de mode différentiel se propage sur l'un des conducteurs, passe à travers l'équipement et revient par un autre conducteur.



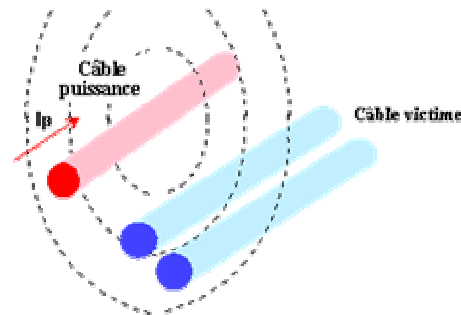
2- Le mode commun

La propagation s'effectue en mode commun lorsque la perturbation est transmise à l'ensemble des conducteurs actifs. Le courant de mode commun se propage sur tous les conducteurs dans le même sens et revient par la masse à travers les capacités parasites.



4- Perturbation par rayonnement inductif (champ magnétique)

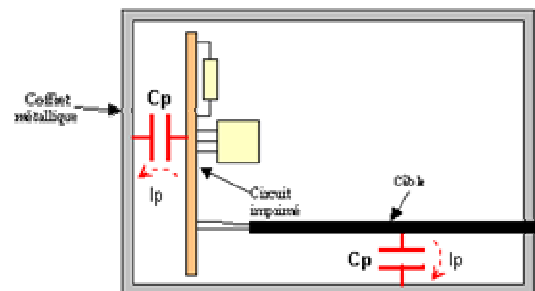
Une variation de courant dans un conducteur crée un champ magnétique qui rayonne autour de ce conducteur. Un circuit voisin peut alors voir apparaître une tension induite perturbatrice si la variation de courant est importante.



Ce type de perturbation est principalement généré par des circuits "puissances".

5- Perturbation par rayonnement capacitif (champ électrique)

Il existe toujours une capacité non nulle entre deux éléments conducteurs. Toute différence de potentiel entre ces deux éléments va générer la circulation d'un courant électrique au travers de cette capacité parasite.



Ce courant parasite sera d'autant plus élevé que la tension et la fréquence sont élevées.

6- Les remèdes

Pour assurer la compatibilité électromagnétique CEM nous allons trouver des règles pratiques d'installation et de câblage :

① Le choix des câbles :

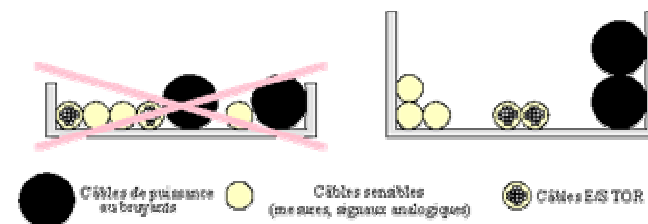
Pour améliorer l'immunité des signaux de faible niveau et pour éviter les effets des circuits perturbateurs, le bon choix des câbles est un des premiers moyens à considérer.

Parmi les câbles compatibles avec les considérations CEM, citons :

- Les paires torsadées : le conducteur aller et le conducteur retour sont torsadés afin que les effets d'un champ magnétique sur les deux conducteurs s'annulent.
- Les câbles blindés : un écran (tresse, feuillard) autour du câble permet d'atténuer l'influence des perturbations HF.
- Les paires torsadées blindées.
- Les câbles blindés avec deux écrans ferrite (élastomère chargé de poudre de ferrite) :
 - un écran ferrite extérieur efficace sur les perturbations HF.
 - un écran classique interne chargé d'arrêter les perturbations BF.

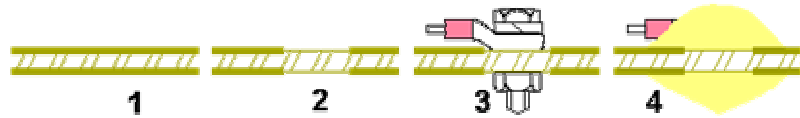
② Cheminement de câbles

La répartition des câbles sur les tablettes métalliques se fera en prenant en compte les groupes de signaux. Les câbles pollueurs et les câbles sensibles seront implantés dans les zones protégées afin de ne pas polluer ou être pollués. Il faut veiller à ce que la hauteur des parois soit supérieure à la hauteur des câbles.

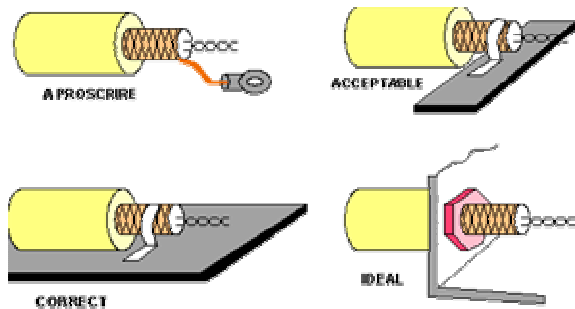


③ Les connexions

La réalisation des connexions lors du raccordement des masses sur tôles peintes (1) doit être particulièrement soignée. Il est impératif d'éliminer la peinture (2), d'assurer un important serrage par un système "vis - écrou - rondelles" (3) et d'assurer la qualité du contact dans le temps en appliquant après serrage une peinture ou une graisse contre la corrosion (4).

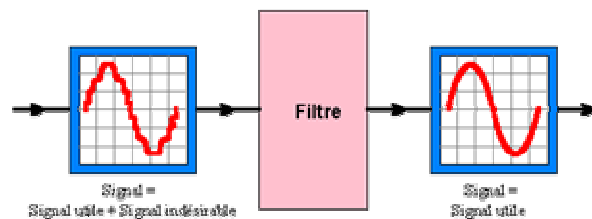


Le blindage des câbles doit être raccordé soigneusement à la masse, sinon il agirait lui même comme une source de perturbation en captant et en émettant des signaux parasites. Le raccordement idéal se fait à l'aide d'un presse étoupe métallique en traversée de cloison afin d'obtenir un contact circonférentiel.

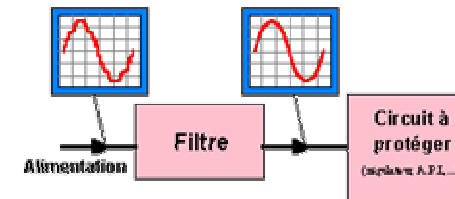


④ Le filtrage

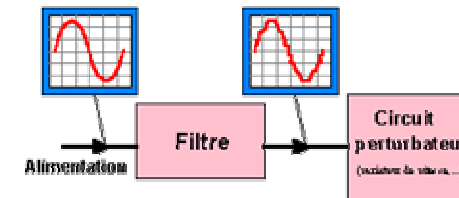
Les filtres ont pour fonction de laisser passer les signaux utiles et de supprimer la partie indésirable du signal transmis.



- Le filtre peut être placé à l'entrée afin de protéger un circuit sensible aux perturbations venant du réseau.



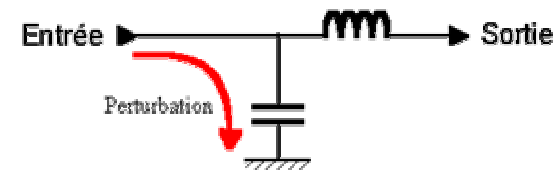
- Toujours en étant placé à l'entrée, il peut protéger le réseau des perturbations générées par un équipement.



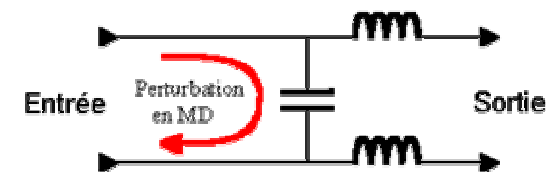
Le filtrage le plus utilisé est le filtrage passif (condensateurs et inductances)

L'inductance placée en série "bloquera" les courants de haute fréquence ($Z_L = L\omega$)

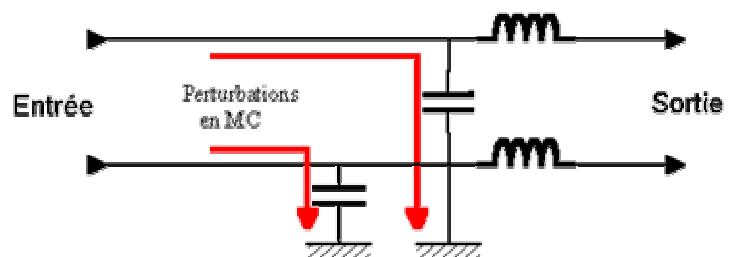
Le condensateur en parallèle "absorbera" les courants haute fréquence ($Z_C = \frac{1}{C\omega}$)



- Exemple de filtrage en mode différentiel :



■ Exemple de filtrage en mode commun :



⑤ Utilisation des ferrites

Les tores en ferrite sont aujourd'hui très utilisés pour la protection du matériel électronique.

En présentant une perméabilité magnétique importante aux hautes fréquences, les ferrites absorbent par effet Joule dans le matériau magnétique les perturbations jusqu'à quelques dizaines de MHz.



Quelque soit le type de problème, perturbation ou sensibilité, la ferrite doit être placée au plus près de l'appareil concerné.