Ondes électromagnétiques dans le vide

HA8402H – Physique et sciences de l'ingénieur 4

Kenneth MAUSSANG

Université de Montpellier

Polytech Montpellier — PeiP

2021 – 2022

Objectifs du chapitre

- O3.1 Établir une équation d'onde à partir des équations de Maxwell dans le vide.
- O3.2 Connaître les caractéristiques structurelles et les propriétés des ondes électromagnétiques.
- O3.3 Introduire la notion d'onde plane, d'onde progressive et d'onde plane progressive monochromatique.
- O3.4 Caractériser l'état de polarisation d'une onde électromagnétique.
- O3.5 Effectuer un bilan local d'énergie (vecteur de Pyonting).

Ondes électromagnétiques dans le vide

1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique

3 Structure de l'onde plane

4 Polarisation des ondes

5 Énergie d'une onde électromagnétique

1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique

3 Structure de l'onde plane

4 Polarisation des ondes

5 Énergie d'une onde électromagnétique

1. Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

On a l'équation de Maxwell-Ampère

$$\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}.$$

Dans le vide,

$$\vec{j} = \vec{0} \;\text{ et }\; \rho = 0.$$

Et compte-tenu de la relation $\varepsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$,

$$\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}.$$

À partir de l'équation de Maxwell-Faraday

$$\overrightarrow{\mathrm{rot}}\ \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \Rightarrow \overrightarrow{\mathrm{rot}}\ \left(\overrightarrow{\mathrm{rot}}\ \vec{E}\right) = -\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.$$

Or, on a la relation suivante pour tout champ vectoriel $\vec{a}$

$$\overrightarrow{\mathrm{rot}}\ \left(\overrightarrow{\mathrm{rot}}\ \vec{a}\right) = -\Delta\vec{a} + \overrightarrow{\mathrm{grad}}\ (\mathrm{div}\ \vec{a})\,.$$

De plus, d'après l'équation de Maxwell-Gauss

$$\mathrm{div}\ \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0},$$

donc

$$\overrightarrow{\mathrm{rot}}\ \left(\overrightarrow{\mathrm{rot}}\ \vec{E}\right) = -\Delta\vec{a} + \underbrace{\overrightarrow{\mathrm{grad}}\ (\mathrm{div}\ \vec{a})}_{=\vec{0}}.$$

On obtient alors l'équation de D'Alembert

$$\boxed{\Delta\vec{E} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0}}.$$

Il s'agit d'une équation d'onde.

Remarque 1 :
Ici il s'agit d'un opérateur Laplacien vectoriel. En cartésiennes, chaque composante vérifie l'équation de D'Alembert :

$$\Delta E_i - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 E_i}{\partial t^2} = 0.$$

Attention, dans les autres systèmes de coordonnées, ce n'est pas vrai, il faut expliciter l'expression du Laplacien vectoriel.

Remarque 2 : À partir d'une équation couplant champ magnétique et champ électrique, on a éliminé le champ magnétique. On peut faire l'inverse pour obtenir une équation sur le champ magnétique.

$$\boxed{\Delta\vec{B} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{B}}{\partial t^2} = \vec{0}}.$$

Champs électrique et magnétique vérifient la même équation d'onde. Ils sont couplés par les équations de Maxwell. On parle d'**ondes électromagnétiques**.

1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique
- Définition
- Aspect ondulatoire, propagation
- Généralisation

3 Structure de l'onde plane

4 Polarisation des ondes

5 Énergie d'une onde électromagnétique

1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique
- Définition
- Aspect ondulatoire, propagation
- Généralisation

3 Structure de l'onde plane

4 Polarisation des ondes

5 Énergie d'une onde électromagnétique

2.1. Définition

On a l'équation d'onde

$$\boxed{\Delta\vec{E} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0}}.$$

On cherche un ensemble de solutions à cette équation d'onde sous la forme

$$\vec{E}(\vec{r},t) = \vec{E}_0 e^{j(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r})},$$

où $\vec{k}$ est le vecteur d'onde, ω est la pulsation de l'onde, $\vec{E}_0$ est l'amplitude (vectorielle) complexe de l'onde.

Relation de dispersion
Quelle relation entre $\vec{k}$ et ω doit-on satisfaire pour que l'équation d'onde soit vérifiée ?

En injectant dans l'équation d'onde, on obtient (pour $k > 0$ et $\omega > 0$)

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda},$$

avec λ la longueur d'onde. C'est la **relation de dispersion** des ondes électromagnétiques dans le vide.

2.1. Définition

Dépendance temporelle :
l'onde oscille à une seule pulsation ω, il s'agit d'une **onde monochromatique**.

Dépendance spatiale :
on considère un vecteur d'onde selon une direction notée $\vec{u}_z$

$$\vec{k} = k\vec{u}_z \Rightarrow \vec{k} \cdot \vec{r} = kz.$$

À un instant donné, l'amplitude de l'onde est constante dans tout plan à z=Cte : il s'agit d'une **onde plane**.

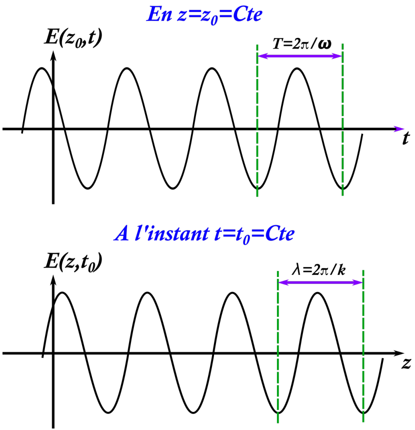
1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique
- Définition
- Aspect ondulatoire, propagation
- Généralisation

3 Structure de l'onde plane

4 Polarisation des ondes

5 Énergie d'une onde électromagnétique



Périodicité temporelle et spatiale d'une onde.

En notation réelle

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_0 \cos\left(\omega t - kz\right).$$

On introduit la célérité de l'onde $c = \frac{\omega}{k}$. On a alors

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}(z - ct, 0) = \vec{E}\left(0, t - \frac{z}{c}\right).$$

L'onde se propage à la vitesse c.

1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique
- Définition
- Aspect ondulatoire, propagation
- Généralisation

3 Structure de l'onde plane

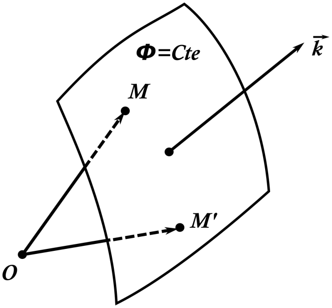
4 Polarisation des ondes

5 Énergie d'une onde électromagnétique

On considère une onde en notation complexe

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{j\left(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r}\right)}.$$

On définit la phase $\Phi = \omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}$. Les plans équiphases (ou plans d'onde) sont définis par la relation Φ =Cte.



Notion de surface d'onde.

À un instant t donné, $\vec{k} \cdot \vec{r}$ =Cte sur une surface d'onde. Soient M et M' deux points de l'espace appartenant à la même surface d'onde

$$\vec{k} \cdot \overrightarrow{OM} = \vec{k} \cdot \overrightarrow{OM'} = \vec{k} \cdot \left(\overrightarrow{OM} + \overrightarrow{MM'}\right),$$

donc, pour Σ une surface d'onde,

$$\boxed{\forall (M, M') \in \Sigma, \quad \vec{k} \cdot \overrightarrow{MM'} = 0}.$$

Le vecteur d'onde est localement perpendiculaire aux surfaces d'onde (Φ =Cte).

Remarque : on a adopté ici la notation complexe pour décrire le champ électrique

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \mathrm{Re}\left(\vec{E}_0 e^{j\left(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r}\right)}\right).$$

Cette notation complexe va permettre de "simplifier" les équations de Maxwell.

1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique

3 Structure de l'onde plane
- Équations de Maxwell
- Structure spatio-temporelle de l'onde

4 Polarisation des ondes

5 Énergie d'une onde électromagnétique

1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique

3 Structure de l'onde plane
- Équations de Maxwell
- Structure spatio-temporelle de l'onde

4 Polarisation des ondes

5 Énergie d'une onde électromagnétique

On considère un champ complexe vectoriel $\vec{a}(\vec{r}, t)$ et un champ complexe scalaire $U(\vec{r}, t)$ d'expressions

$$\vec{a}(\vec{r}, t) = \vec{a}_0 e^{j\left(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r}\right)} \quad \text{et} \quad U(\vec{r}, t) = U_0 e^{j\left(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r}\right)}.$$

On a alors

$$\boxed{\operatorname{div}\vec{a} = -j\vec{k}\cdot\vec{a} \;\; ; \;\; \overrightarrow{\operatorname{rot}}\,\vec{a} = -j\vec{k}\wedge\vec{a} \;\; ; \;\; \frac{\partial\vec{a}}{\partial t} = j\omega\vec{a}}.$$

$$\boxed{\overrightarrow{\operatorname{grad}}\,U = -j\vec{k}U \;\; ; \;\; \frac{\partial U}{\partial t} = j\omega U}.$$

On considère un champ électromagnétique monochromatique, progressif, de vecteur d'onde local $\vec{k}$. Au voisinage d'un point d'une surface d'onde, on peut considérer localement une structure d'Onde Plane Progressive Monochromatique (OPPM).

$$\vec{E}(\vec{r},t) = \vec{E}_0 e^{j(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r})} \quad \text{et} \quad \vec{B}(\vec{r},t) = \vec{B}_0 e^{j(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r})}$$

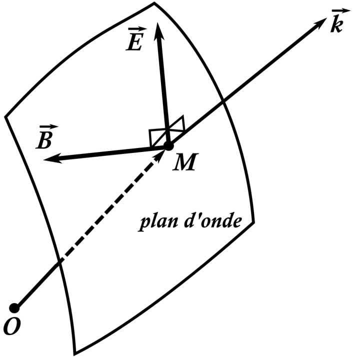
En complexe, les équations de Maxwell deviennent

$$\vec{k}\cdot\vec{B} = 0,$$

$$\vec{k}\wedge\vec{E} = \omega\vec{B},$$

$$\vec{k}\cdot\vec{E} = 0,$$

$$\vec{k}\wedge\vec{B} = -\frac{\omega}{c^2}\vec{E}.$$



$$\vec{E} \perp \vec{k}$$

$$\vec{B} \perp \vec{k}$$

$$\vec{B} = \frac{\vec{k} \wedge \vec{E}}{\omega}$$

$$\|\vec{B}\| = \frac{\|\vec{E}\|}{c}.$$

Structure locale d'onde plane.

$\vec{k}$, $\vec{E}$ et $\vec{B}$ forment un trièdre direct ; $\vec{B}$ et $\vec{E}$ sont orthogonaux à $\vec{k}$.

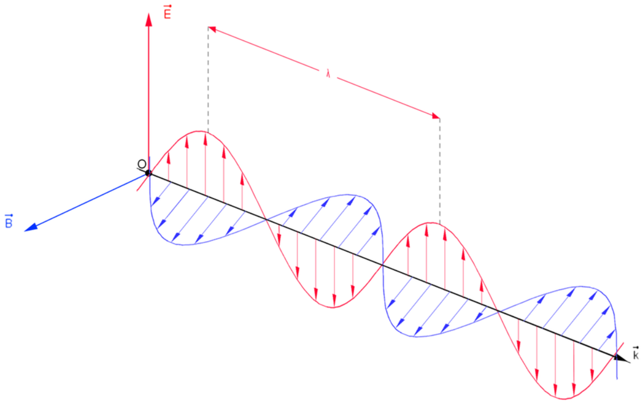
1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique

3 Structure de l'onde plane
- Équations de Maxwell
- Structure spatio-temporelle de l'onde

4 Polarisation des ondes

5 Énergie d'une onde électromagnétique



Structure spatio-temporelle d'une onde plane.

https://fr.wikiversity.org/wiki/Notions_de_base_d'optique_ondulatoire/La_lumière,_une_onde_électromagnétique

1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique

3 Structure de l'onde plane

4 Polarisation des ondes
- Définition
- Polarisation rectiligne
- Polarisation circulaire droite - circulaire gauche
- Polarisation elliptique
- Polariseur

5 Énergie d'une onde électromagnétique

1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique

3 Structure de l'onde plane

4 Polarisation des ondes
- Définition
- Polarisation rectiligne
- Polarisation circulaire droite - circulaire gauche
- Polarisation elliptique
- Polariseur

5 Énergie d'une onde électromagnétique

4.1. Définition

Une onde électromagnétique est une onde **vectorielle**. On considère une OPPM se propageant selon les $z > 0$

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{j\left(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r}\right)},$$

avec

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda}\vec{u}_z, \quad \vec{E}_0 = \|\vec{E}_0\|\vec{u} \text{ avec } \|\vec{u}\| = 1.$$

Le vecteur unitaire $\vec{u}$ caractérise uniquement l'aspect vectoriel de l'onde ou **l'état de polarisation de l'onde**. Le vecteur $\vec{u}$ est orthogonal au vecteur d'onde $\vec{k}$. Dans le cas considéré, $\vec{u} = \alpha\vec{u}_x + \beta\vec{u}_y$.

La lumière naturelle est dite **non polarisée** : la direction du champ électrique varie de façon aléatoire au cours du temps.

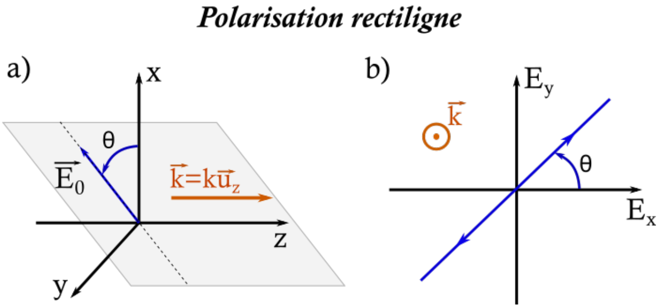
1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique

3 Structure de l'onde plane

4 Polarisation des ondes
- Définition
- Polarisation rectiligne
- Polarisation circulaire droite - circulaire gauche
- Polarisation elliptique
- Polariseur

5 Énergie d'une onde électromagnétique

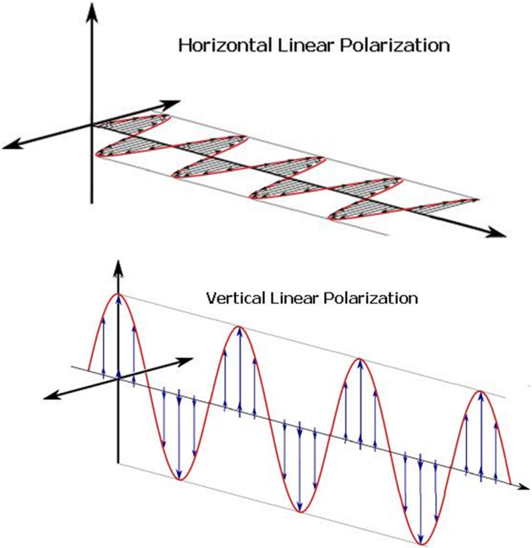


On parle de polarisation rectiligne quand la direction de polarisation $\vec{u}$ est constante dans le temps. Ce vecteur définit alors la direction de polarisation via l'angle θ entre $\vec{u}_x$ et $\vec{u}$. On a alors

$$\vec{E}_0 = \begin{pmatrix} E_0 \cos\theta \\ E_0 \sin\theta \end{pmatrix}.$$

Illustration : `https://www.geogebra.org/m/lAYD1Kob`.

4.2. Polarisation rectiligne



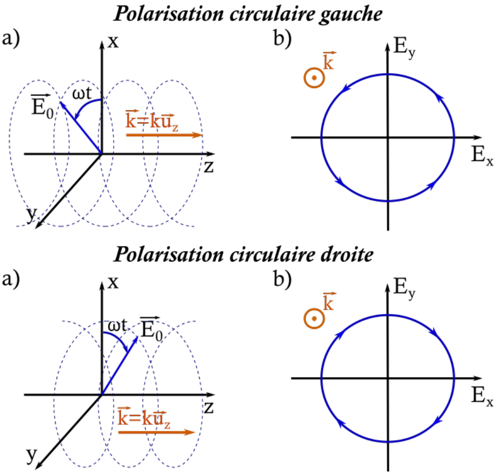
1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique

3 Structure de l'onde plane

4 Polarisation des ondes
- Définition
- Polarisation rectiligne
- Polarisation circulaire droite - circulaire gauche
- Polarisation elliptique
- Polariseur

5 Énergie d'une onde électromagnétique



Circulaire gauche

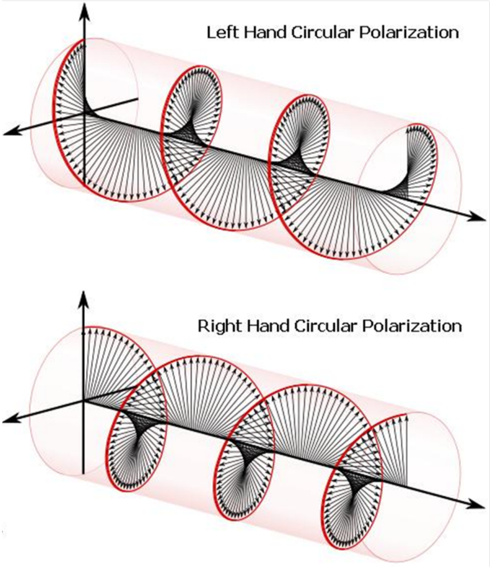
$$\vec{E}_0^g = \begin{pmatrix} E_0 \cos\left(\omega t - kz\right) \\ E_0 \sin\left(\omega t - kz\right) \end{pmatrix}.$$

Circulaire droite

$$\vec{E}_0^d = \begin{pmatrix} E_0 \cos\left(\omega t - kz\right) \\ -E_0 \sin\left(\omega t - kz\right) \end{pmatrix}.$$

Illustration : https://www.geogebra.org/m/hfQUjqXm.

4.3. Polarisation circulaire droite - circulaire gauche



1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique

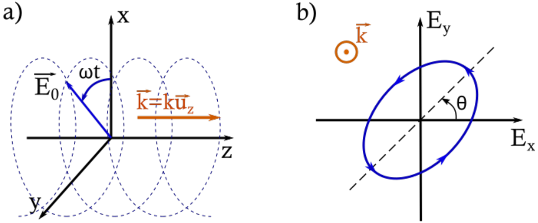
3 Structure de l'onde plane

4 Polarisation des ondes
- Définition
- Polarisation rectiligne
- Polarisation circulaire droite - circulaire gauche
- Polarisation elliptique
- Polariseur

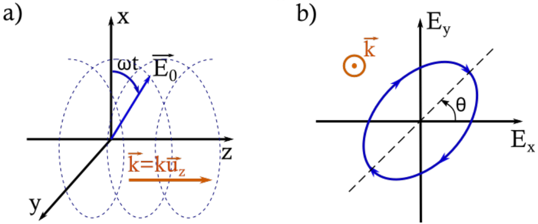
5 Énergie d'une onde électromagnétique

https://www.geogebra.org/m/hfQUjqXm

Polarisation elliptique gauche



Polarisation elliptique droite



1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

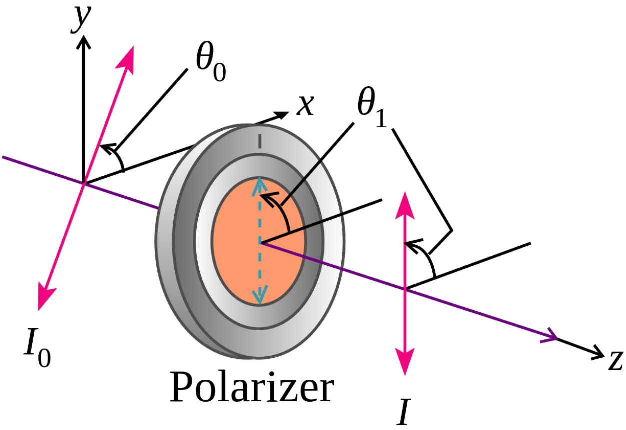
2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique

3 Structure de l'onde plane

4 Polarisation des ondes
- Définition
- Polarisation rectiligne
- Polarisation circulaire droite - circulaire gauche
- Polarisation elliptique
- Polariseur

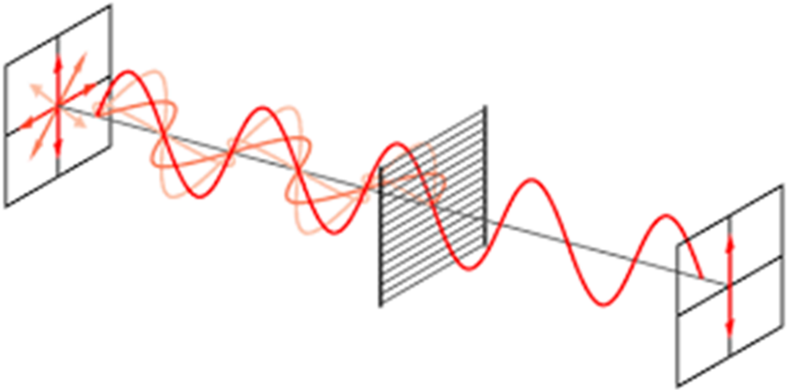
5 Énergie d'une onde électromagnétique

Un polariseur est un filtre qui laisse passer une polarisation rectiligne le long d'un axe défini.

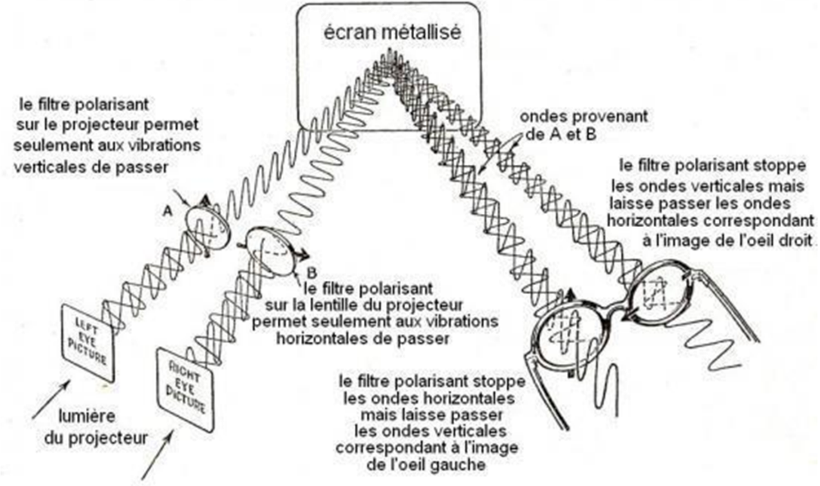


https://en.wikipedia.org/wiki/Polarizer

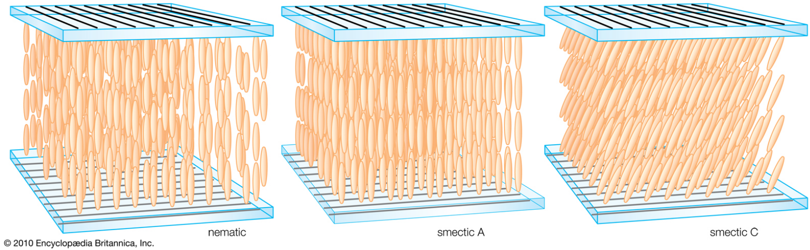
Un polariseur est un filtre qui laisse passer une polarisation rectiligne le long d'un axe défini.



Application : le cinéma 3D

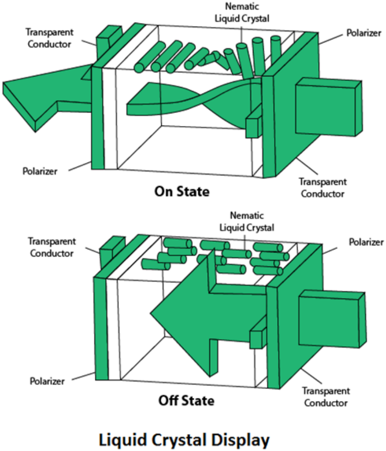


Écran LCD



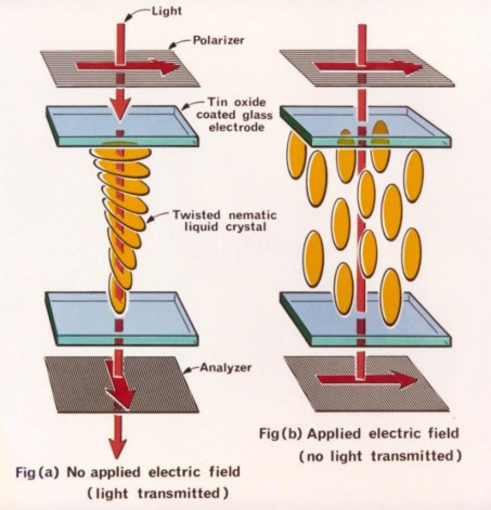
`https://www.britannica.com/technology/liquid-crystal-display/Supertwisted-nematic-displays`

Écran LCD



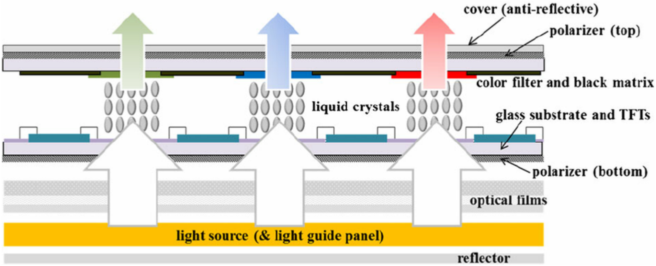
https://www.javatpoint.com/computer-graphics-flat-panel-display

Écran LCD



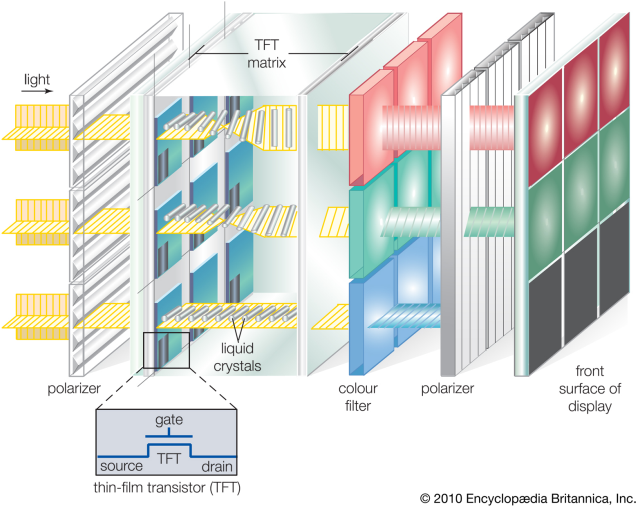
http://www.scifun.org/chemweek/LCD/LCDs2019.html

Écran LCD



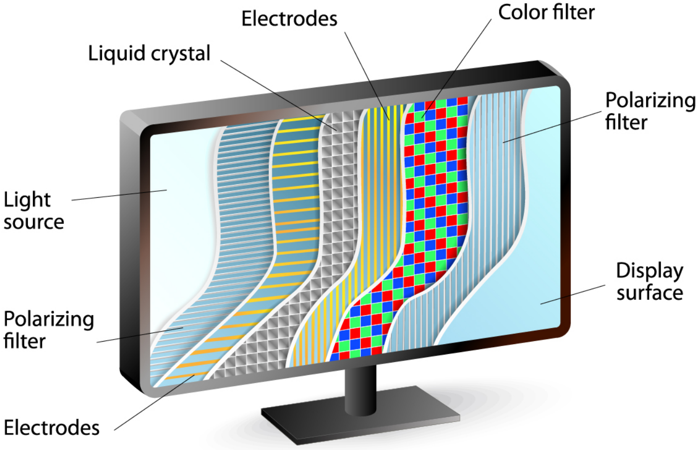
https://www.researchgate.net/figure/Typical-structure-of-a-liquid-crystal-display-LCD_fig7_257768333

Écran LCD



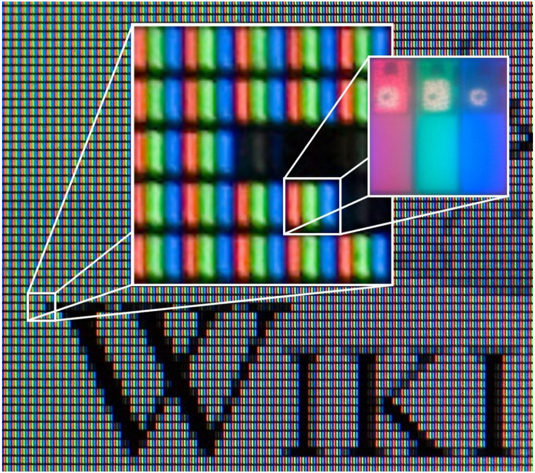
https://www.britannica.com/technology/liquid-crystal-display/

Écran LCD



https://www.flexenable.com/blog/how-lcds-work/

Écran LCD



https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89cran_%C3%A0_cristaux_liquides

1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique

3 Structure de l'onde plane

4 Polarisation des ondes

5 Énergie d'une onde électromagnétique
- Conservation de l'énergie électromagnétique
- Flux lumineux et vecteur de Poynting
- Interprétation corpusculaire

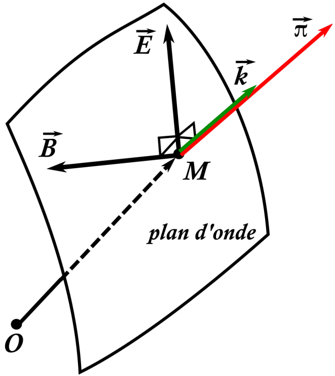
1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique

3 Structure de l'onde plane

4 Polarisation des ondes

5 Énergie d'une onde électromagnétique
- Conservation de l'énergie électromagnétique
- Flux lumineux et vecteur de Poynting
- Interprétation corpusculaire



Définition : Vecteur de Poynting $\vec{\Pi}$.

$$\boxed{\vec{\Pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0}}.$$

Le flux du vecteur de Poynting à travers une surface est égal à la puissance véhiculée par l'onde à travers cette surface.

$$\varphi_E = \iint_{\Sigma} \vec{\Pi} \cdot \mathrm{d}\vec{\Sigma}.$$

On a

$$\operatorname{div}\vec{\Pi} = \frac{1}{\mu_0}\operatorname{div}\vec{E}\wedge\vec{B}.$$

Or, on a la relation d'analyse vectorielle suivante

$$\operatorname{div}\vec{a}\wedge\vec{b} = \vec{b}\cdot\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\vec{a} - \vec{a}\cdot\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\vec{b},$$

soit

$$\operatorname{div}\vec{\Pi} = \frac{1}{\mu_0}\vec{B}\cdot\underbrace{\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\vec{E}}_{=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}} - \frac{1}{\mu_0}\vec{E}\cdot\underbrace{\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\vec{B}}_{=\mu_0\varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}}.$$

On en déduit alors

$$\operatorname{div}\vec{\Pi} = -\frac{1}{\mu_0}\vec{B}\cdot\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} - \varepsilon_0\vec{E}\cdot\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} = -\frac{1}{2\mu_0}\frac{\partial B^2}{\partial t} - \frac{\varepsilon_0}{2}\frac{\partial E^2}{\partial t}.$$

On introduit la **densité volumique d'énergie électromagnétique** u (unité SI : J/m^3) selon

$$\boxed{u = \frac{B^2}{2\mu_0} + \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}}.$$

On obtient alors l'équation locale de conservation de l'énergie électromagnétique

$$\boxed{\operatorname{div}\vec{\Pi} + \frac{\partial u}{\partial t} = 0}.$$

En intégrant cette dernière sur un volume V

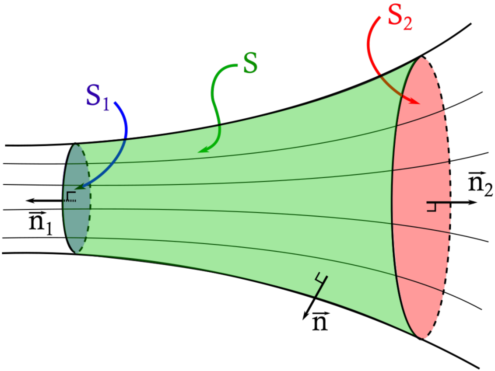
$$\iiint_V \left(\operatorname{div} \vec{\Pi} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) \mathrm{d}V = 0.$$

Soit Σ la surface orientée délimitant le volume V. En appliquant le théorème de Green-Ostrogradsky au champ de vecteur $\vec{\Pi}$ sur la surface Σ, on obtient

$$\iiint_V \operatorname{div} \vec{\Pi} \, \mathrm{d}V = \iint_\Sigma \vec{\Pi} \cdot \mathrm{d}\vec{\Sigma}.$$

Considérons le volume délimité par un tube de lignes de champs de vecteur de Pyonting $\vec{\Pi}$ de surface latérale S, fermée par des sections S_1 et S_2. On a alors

$$\Sigma = S_1 \bigcup S \bigcup S_2.$$



On note E l'énergie électromagnétique contenue dans le volume V délimité par la surface fermée Σ, et ϕ_i le flux à travers la surface S_i de la gauche vers la droite.

$$E = \iiint_V u \mathrm{d}V,$$

$$\iint_{S_1} \vec{\Pi} \cdot \vec{n}_1 \,\mathrm{d}\Sigma_1 + \underbrace{\iint_{S} \vec{\Pi} \cdot \vec{n} \,\mathrm{d}\Sigma}_{=0} + \iint_{S_2} \vec{\Pi} \cdot \vec{n}_2 \,\mathrm{d}\Sigma_2 + \frac{\partial E}{\partial t} = 0.$$

On obtient alors la relation suivante entre l'énergie entrant en S_1 (ϕ_1), l'énergie sortant en S_2 (ϕ_2) et la variation d'énergie dans le volume V ($\frac{\partial E}{\partial t}$)

$$\boxed{\phi_1 - \phi_2 = \frac{\partial E}{\partial t}}.$$

1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique

3 Structure de l'onde plane

4 Polarisation des ondes

5 Énergie d'une onde électromagnétique
- Conservation de l'énergie électromagnétique
- Flux lumineux et vecteur de Poynting
- Interprétation corpusculaire

5.2. Flux lumineux et vecteur de Poynting

Le flux lumineux est le flux du vecteur de Poynting, c'est-à-dire le flux d'énergie électromagnétique. L'unité SI du vecteur de Poynting est le W/m^2. L'unité SI du flux lumineux est le watt W.

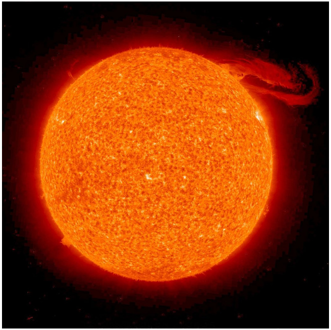
Exemple : rayonnement solaire sur la Terre.

La puissance surfacique reçue est $\|\vec{\Pi}\| = 1$ kW/m^2, et la puissance intégrée reçue est de $\|\vec{\Pi}\| \times$ surface utile.

Intensité totale du Soleil

La puissance surfacique du Soleil au niveau de la Terre est de 1 kW/m^2. La distance Terre-Soleil est de $(150 \cdot 10^6$ km$)$. On peut estimer la puissance lumineuse totale émise par le Soleil P_{Soleil}. On trouve alors

$$P_{\text{Soleil}} = 3 \cdot 10^{26} \text{W}.$$

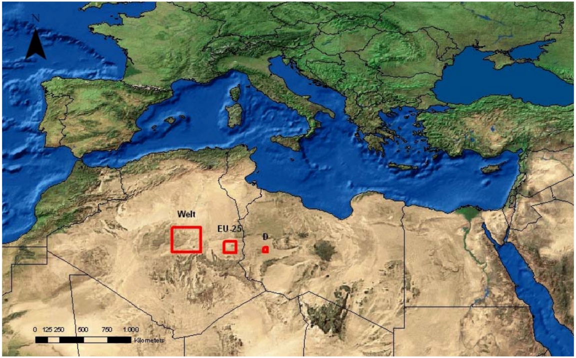


https://fr.wikipedia.org/wiki/Soleil

Application : **les panneaux solaires.**

a) Parc de centrales photvoltaïques de la Colle des Mées (Alpes-de-Haute-Provence). b) Toiture photovoltaïque de 1MW à Hanovre (Allemagne).

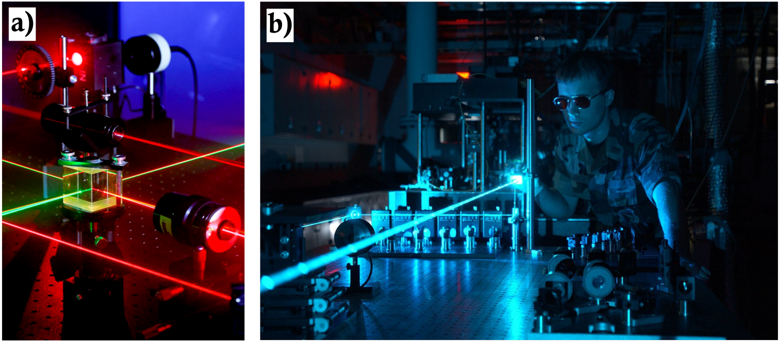
https://fr.wikipedia.org/wiki/Panneau_solaire



Surfaces utiles nécessaires pour réaliser une centrale solaire permettant de produire l'énergie nécessaire au monde entier (carré rouge de gauche), pour l'Europe (carré rouge au milieu) et pour l'Allemagne (carré de droite). Source : Diploma Thesis de Nadine May, *Eco-balance of a Solar Electricity Transmission from North Africa to Europe*, Technical Universiy of Braunschweig (Allemagne).

5.2. Flux lumineux et vecteur de Poynting

Une source lumineuse peut être directive (ex. le laser). Dans ce cas, l'intensité lumineuse est une grandeur plus adaptée.



a) Alignement d'un système laser au Naval Surface Warfare Centre (NSWC) - US Navy. b) Scientifique militaire alignant un laser sur un banc de test, United states Air Force Research Laboratory (AFRL)
https://www.navy.mil/view_image.asp?id=100735
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Military_laser_experiment.jpg

5.2. Flux lumineux et vecteur de Poynting

Applications industrielles des lasers (document CEA).

http://www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/livrets-thematiques/le-laser.aspx

Disponible sur la page Moodle du HLPH412.

1 Des équations de Maxwell à l'équation de D'Alembert

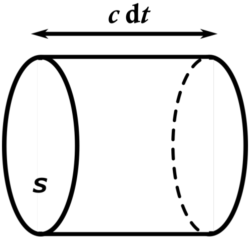
2 L'Onde Plane Progressive Monochromatique

3 Structure de l'onde plane

4 Polarisation des ondes

5 Énergie d'une onde électromagnétique
- Conservation de l'énergie électromagnétique
- Flux lumineux et vecteur de Poynting
- Interprétation corpusculaire

5.3. Interprétation corpusculaire



On considère une surface S traversée par un flux lumineux pendant un intervalle de temps dt. On considère un rayonnement de fréquence ν. L'énergie qui a traversé la section S pendant dt est

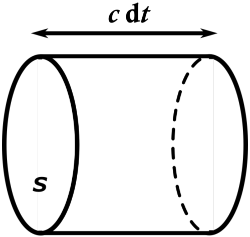
$$\|\vec{\Pi}\| \times S \times \mathrm{d}t.$$

Cette énergie est contenue dans le cylindre de longueur cdt et de section S. Soit n la densité de photons à la fréquence ν. L'énergie dans le cylindre est alors également

$$n \times S \times c\mathrm{d}t \times h\nu.$$

Donc

$$\|\vec{\Pi}\| S\mathrm{d}t = nSch\nu\mathrm{d}t.$$



Or, la densité d'énergie électromagnétique est directement liée à la densité de photons

$$u = nh\nu.$$

On obtient finalement la relation

$$\boxed{\|\vec{\Pi}\| = uc}.$$