



Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM

Propagation des OEM dans le vide illimité



Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM

1

Équations de propagation des OEM dans le vide

Équations de Maxwell dans le vide

Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

.....
.....

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

.....
.....

Équation de
D'Alembert

.....
.....

Structure des
OEM dans le
vide illimité

.....
.....

Polarisation
d'une onde
plane

.....
.....

Aspect
énergétique

.....
.....

Rayonnement
d'une OEM

Équations de propagation du champ électrique

Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

.....
.....

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

.....
.....

Équation de
D'Alembert

.....

Structure des
OEM dans le
vide illimité

.....

Polarisation
d'une onde
plane

.....

Aspect
énergétique

.....

Rayonnement
d'une OEM

.....
.....

Équations de propagation du champ magnétique

Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

.....
.....

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

.....
.....

Équation de
D'Alembert

.....

Structure des
OEM dans le
vide illimité

.....

Polarisation
d'une onde
plane

.....

Aspect
énergétique

.....

Rayonnement
d'une OEM

.....



Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM

2

Équation de D'Alembert



Généralisation

Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

$$\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial t^2}$$

est une équation de D'Alembert à une dimension.

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

On peut la généraliser en 3D :

Équation de
D'Alembert

$$\Delta f(M, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 f(M, t)}{\partial t^2}$$

Structure des
OEM dans le
vide illimité

où Δ représente l'opérateur Laplacien

Polarisation
d'une onde
plane

f peut être une fonction scalaire ou vectorielle

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM

Dans le cas des OEM, $c = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}$, c : célérité des OEM dans le vide

Forme générale des solutions de l'équation de d'Alembert

On considère l'équation de D'Alembert unidirectionnelle .

Montrer que si f est de la forme $f(\underbrace{x + ct}_u)$, alors f est solution de l'équation

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM



Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM

.....

.....

.....

.....

.....

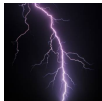
.....

.....

.....

.....

.....



Montrer de même que si f est de la forme $f(\underbrace{x - ct}_v)$, alors f est solution de l'équation

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

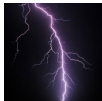
Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM



Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

.....
.....

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

.....
.....

Équation de
D'Alembert

.....
.....

Structure des
OEM dans le
vide illimité

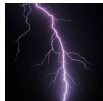
Polarisation
d'une onde
plane

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM

Conclusion → Solution générale de l'équation de D'Alembert :

.....



Signification physique :

$$\text{Si } f(x, t) = f(x - ct) = f\left[0 - c\left(t - \frac{x}{c}\right)\right] = f\left(0, t - \frac{x}{c}\right)$$

.....

$$\text{Si } f(x, t) = f(x + ct) = f\left[0 + c\left(t + \frac{x}{c}\right)\right] = f\left(0, t + \frac{x}{c}\right)$$

.....

Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

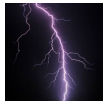
Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM



Solution en ondes planes progressives harmoniques (OPPH)

Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM

Équation de d'Alembert linéaire \Rightarrow Th. superposition utilisable.

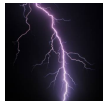
OPPH à une dimension : $f(x, t) = A_0 \cos(\omega t - kx \pm \varphi)$

$\vec{k} = k\vec{u} = \frac{2\pi}{\lambda}\vec{u}$ où \vec{k} est le vecteur d'onde et \vec{u} le vecteur unitaire définissant la direction de propagation (vecteur directeur ici = \vec{u}_x).

$f(x, t) = A_0 \cos[\Psi(x, t) \pm \varphi]$ avec $\Psi(x, t) = \omega t - kx$ (cas 1D)

Surface d'onde :

.....
.....



Vitesse de phase

Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

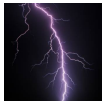
Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM

Pour une surface d'onde, $\Psi = \omega t - kx$, donc $x = \frac{\omega}{k}t - \frac{\Psi}{k}$

On note v_φ et on appelle "vitesse de phase" la vitesse de déplacement d'une surface d'onde.

$$v_\varphi = \frac{\omega}{k}$$



Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM

3

Structure des OEM dans le vide illimité

Notation complexe

Pour une OPPH :

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - \vec{k}_0 \cdot \vec{r} + \varphi_E) \vec{u}_E \Rightarrow \dots\dots\dots$$

$$\vec{B} = B_0 \cos(\omega t - \vec{k}_0 \cdot \vec{r} + \varphi_B) \vec{u}_B \Rightarrow \dots\dots\dots$$

Les équations de Maxwell dans le vide s'écrivent alors :

.....

.....

.....

.....

.....

Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM

Transversalité des OEM, relation de structure



Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

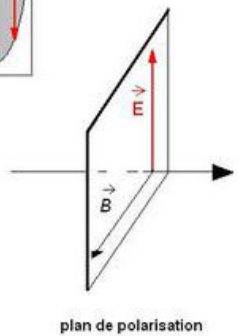
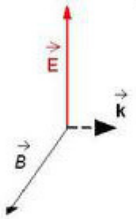
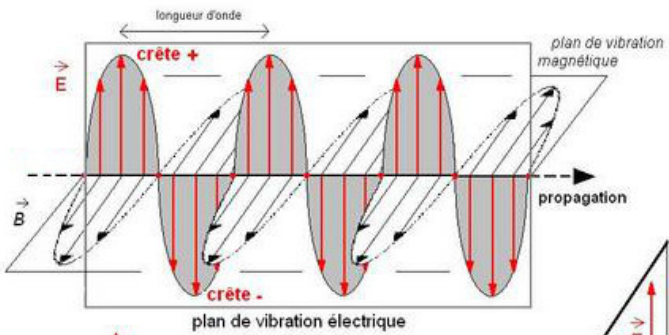
Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM





Relation de dispersion

Propagation des OEM dans le vide illimité

.....
.....

Équations de propagation des OEM dans le vide

.....
.....

Équation de D'Alembert

.....

Structure des OEM dans le vide illimité

.....

Polarisation d'une onde plane

.....

Aspect énergétique

.....

Rayonnement d'une OEM

.....



Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

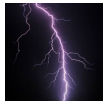
**Polarisation
d'une onde
plane**

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM

4

Polarisation d'une onde plane



Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

Équation de D'Alembert

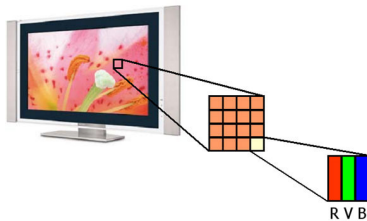
Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM

La polarisation de la lumière intervient dans de nombreux phénomènes et dispositifs technologiques.

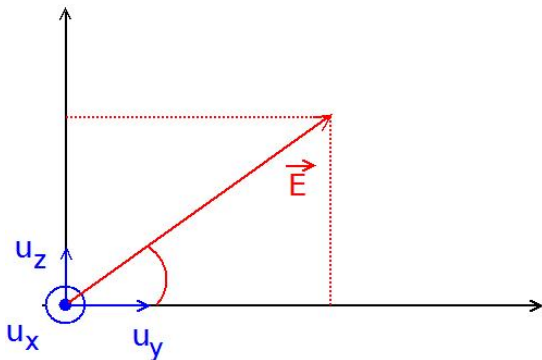


Cinéma 3D, écrans LCD, bleu du ciel...

L'étude de la polarisation de la lumière est l'étude de la direction du champ \vec{E}

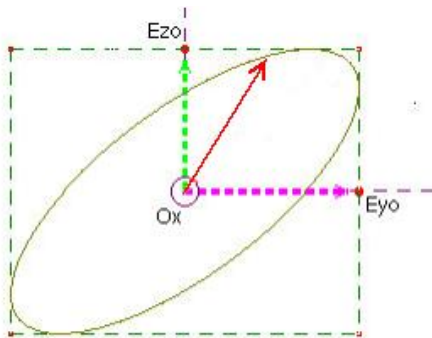
Forme générale

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} 0 \\ E_{0y} \cos(\omega t - kx + \varphi_y) \\ E_{0z} \cos(\omega t - kx + \varphi_z) \end{pmatrix}$$



Rq : \exists de la lumière non polarisée.

Lumière polarisée elliptiquement



Exemple :

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} 0 \\ E_{0y} \cos(\omega t - kx + \pi/4) \\ E_{0z} \cos(\omega t - kx) \end{pmatrix}$$

Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

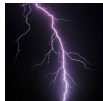
Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM



Polarisation circulaire

Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM

Cas particulier de la polarisation elliptique : Les deux composantes de \vec{E}

- ▶ ont les mêmes amplitudes,
- ▶ sont déphasées de $\pm \frac{\pi}{2}$

Exemple :

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} 0 \\ E_0 \cos(\omega t - kx) \\ E_0 \sin(\omega t - kx) \end{pmatrix}$$

Qu'on peut également écrire en notation complexe :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i\omega t} \begin{pmatrix} 0 \\ e^{-ikx} \\ e^{-i(kx + \frac{\pi}{2})} \end{pmatrix}$$

Polarisation rectiligne

Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

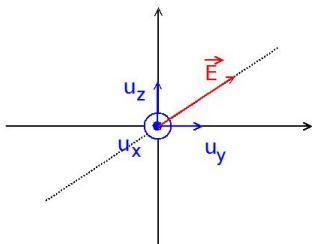
Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

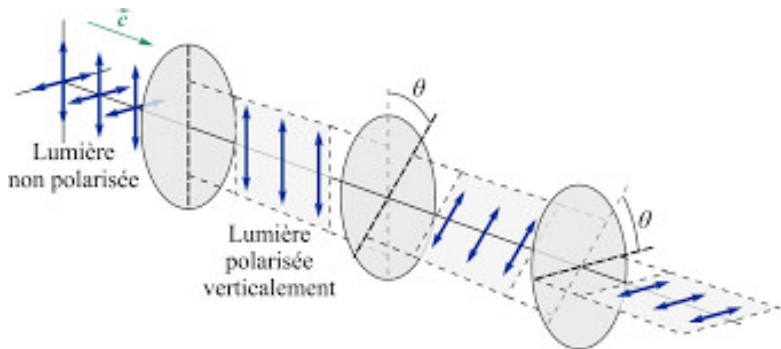
Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM



Effet d'un polariseur sur l'état de polarisation d'un rayonnement



Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM



Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

**Aspect
énergétique**

Rayonnement
d'une OEM

5

Aspect énergétique

Les différents domaines du rayonnement électromagnétique

Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

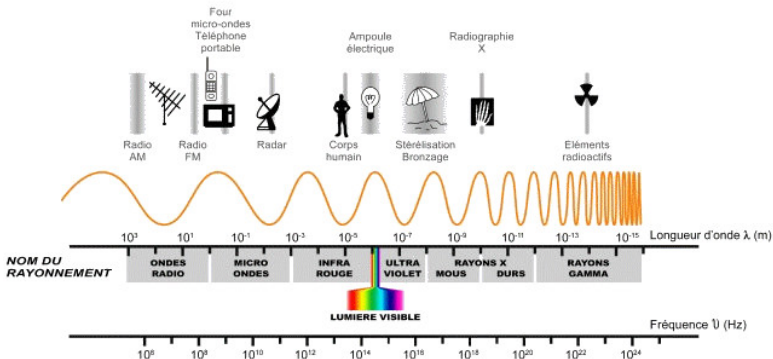
Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM





Vecteur de Poynting

Rappeler l'expression de l'équation locale de Poynting et préciser la signification physique de chacun des termes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM



Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM

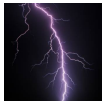
À quoi correspondent la direction et le sens du vecteur de Poynting ?

.....
.....
.....

Exprimer la moyenne temporelle du flux surfacique du vecteur de Poynting pour une onde plane. Quel est le sens physique de cette grandeur ?

(formulaire : $\vec{u} \wedge (\vec{v} \wedge \vec{w}) = (\vec{u} \cdot \vec{w})\vec{v} - (\vec{u} \cdot \vec{v})\vec{w}$)

.....
.....



Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

.....

.....

.....

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

.....

Équation de
D'Alembert

.....

Structure des
OEM dans le
vide illimité

.....

Polarisation
d'une onde
plane

.....

Aspect
énergétique

.....

Rayonnement
d'une OEM

.....



Loi de Malus

Propagation des OEM dans le vide illimité

.....
.....

Équations de propagation des OEM dans le vide

.....
.....

Équation de D'Alembert

.....

Structure des OEM dans le vide illimité

.....

Polarisation d'une onde plane

.....

Aspect énergétique

.....

Rayonnement d'une OEM

.....



Vitesse d'énergie

Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

.....
.....

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

.....
.....

Équation de
D'Alembert

.....

Structure des
OEM dans le
vide illimité

.....

Polarisation
d'une onde
plane

.....

Aspect
énergétique

.....

Rayonnement
d'une OEM

.....

Lien avec la relation de Plack-Einstein

Un laser Hélium-Néon point vers le centre d'un écran situé à 1 m du laser environ.



Estimer le nombre de photons qui arrivent sur l'écran par unité de temps.

.....

.....

Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM



Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

Aspect
énergétique

**Rayonnement
d'une OEM**

6

Rayonnement d'une OEM

Modèle du dipôle oscillant

Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

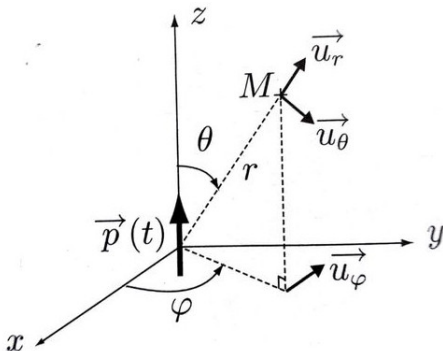
Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM



$$\vec{p}(t) = qN\vec{P}(t)$$

Pour un dipôle oscillant sinusoidalement,

$$\vec{p}(t) = \vec{p}_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

Rappel : Définition d'un dipôle électrique

.....

.....

.....



Phénomènes modélisés

Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM

- ▶ Émission d'une OEM par une antenne.
- ▶ Émission de la lumière par un atome dans une lampe spectrale.
- ▶ Diffusion élastique de la lumière (diffusion de Reyleigh) :

La diffusion de Reyleigh est un modèle permettant de traduire quantitativement l'interaction entre un champ électromagnétique et des particules de petites tailles ($\ll \lambda$). ex : atome

Sous l'effet du champ électromagnétique, le nuage électronique se déplace formant ainsi un dipôle induit de moment $\vec{p}(t)$

Approximation du dipôle non relativiste

Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

.....
.....

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

.....
.....

Équation de
D'Alembert

.....

Structure des
OEM dans le
vide illimité

.....

Polarisation
d'une onde
plane

.....

Aspect
énergétique

.....

Rayonnement
d'une OEM

.....



Zone de rayonnement

Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

.....
.....

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

.....
.....

Équation de
D'Alembert

.....

Structure des
OEM dans le
vide illimité

.....

Polarisation
d'une onde
plane

.....

Aspect
énergétique

.....

Rayonnement
d'une OEM

.....

Expression du champ électromagnétique rayonné

Étude des symétries et invariances des sources de champ électromagnétique :

-
-
-
-
-
-
-
-

- Propagation des OEM dans le vide illimité
- Équations de propagation des OEM dans le vide
- Équation de D'Alembert
- Structure des OEM dans le vide illimité
- Polarisation d'une onde plane
- Aspect énergétique
- Rayonnement d'une OEM



Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

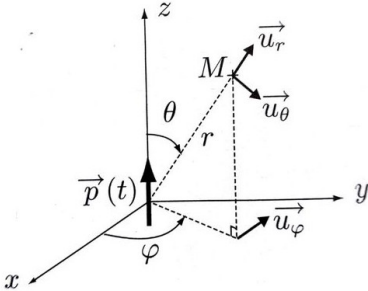
Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM

Dans la zone de rayonnement et dans l'approximation d'un dipôle non relativiste,

$$\vec{E}(M, t) = \frac{\mu_0 \sin \theta}{4\pi r} \ddot{\vec{p}} \left(t - \frac{r}{c} \right) \vec{u}_\theta$$

$$\vec{B}(M, t) = \frac{\mu_0 \sin \theta}{4\pi r c} \ddot{\vec{p}} \left(t - \frac{r}{c} \right) \vec{u}_\varphi$$





Propriétés du champ rayonné

Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

.....

.....

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

.....

.....

Équation de
D'Alembert

.....

Structure des
OEM dans le
vide illimité

.....

Polarisation
d'une onde
plane

.....

Aspect
énergétique

.....

Rayonnement
d'une OEM

.....

Puissance rayonnée

Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

.....
.....

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

.....
.....

Équation de
D'Alembert

.....

Structure des
OEM dans le
vide illimité

.....

Polarisation
d'une onde
plane

.....

Aspect
énergétique

.....

Rayonnement
d'une OEM

.....



Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Conséquence de la Diffusion de Reyleigh

Propagation
des OEM
dans le vide
illimité

Équations de
propagation
des OEM
dans le vide

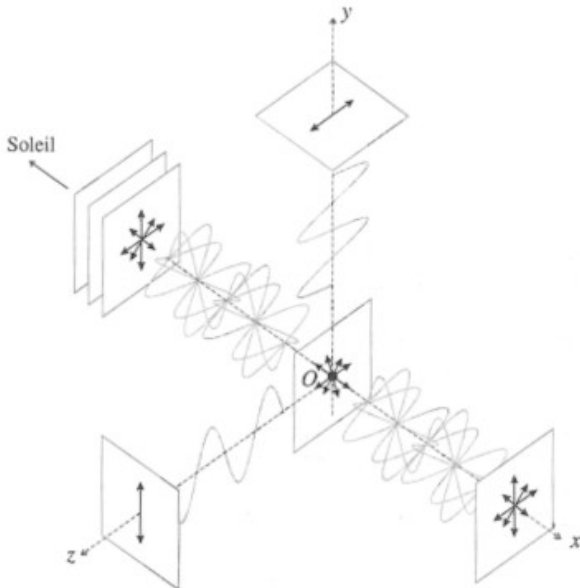
Équation de
D'Alembert

Structure des
OEM dans le
vide illimité

Polarisation
d'une onde
plane

Aspect
énergétique

Rayonnement
d'une OEM





Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

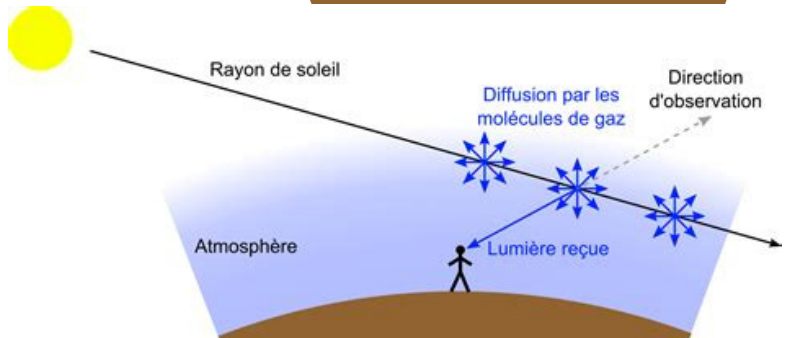
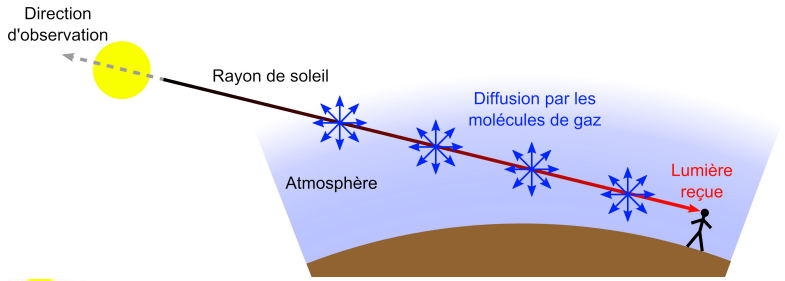
Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM





Propagation des OEM dans le vide illimité

Équations de propagation des OEM dans le vide

Équation de D'Alembert

Structure des OEM dans le vide illimité

Polarisation d'une onde plane

Aspect énergétique

Rayonnement d'une OEM

