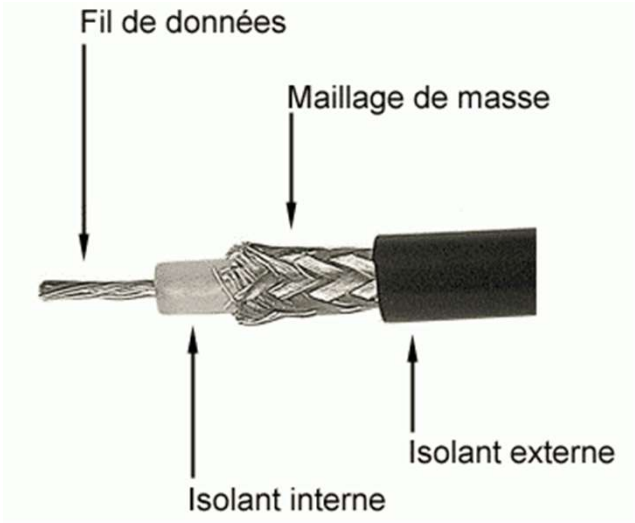


Chapitre 3 : Electromagnétisme

- I) Généralités et révisions
- II) Régime variable
- III) Propagation d'une onde plane monochromatique dans un diélectrique parfait
- IV) L'énergie électromagnétique

- V) Propagation guidée
 - 1) **Généralités**
 - 2) Propagation entre deux plans métalliques (conducteurs parfaits)
 - 3) guide d'onde rectangulaire
 - 4) Fibre optique

Les guides d'ondes sont des dispositifs qui permettent de canaliser et de sécuriser la propagation des ondes. Ils sont constitués de parois métalliques ou de dioptrés (interface entre deux diélectriques), qui servent à confiner les ondes à l'intérieur du guide.



Chapitre 3 : Electromagnétisme

- I) Généralités et révisions
- II) Régime variable
- III) Propagation d'une onde plane monochromatique dans un diélectrique parfait
- IV) L'énergie électromagnétique
- V) Propagation guidée
 - 1) **Généralités**
 - 2) Propagation entre deux plans métalliques (conducteurs parfaits)
 - 3) guide d'onde rectangulaire
 - 4) Fibre optique

Pour une onde sinusoïdale :

$$\begin{aligned}\underline{\underline{\vec{E}}}(\vec{r},t) &= \underline{\underline{\vec{E}_0}} e^{i(\vec{k}.\vec{r}-\omega t)} \\ &= \left[\left(\vec{E}_{0_x}(x,y,z) + \vec{E}_{0_y}(x,y,z) + \vec{E}_{0_z}(x,y,z) \right) e^{i\varphi} \right] e^{i(k_x.x+k_y.y+k_z.z-\omega t)} \\ &= \left[\left(E_{0_x}(x,y,z) \vec{u}_x + E_{0_y}(x,y,z) \vec{u}_y + E_{0_z}(x,y,z) \vec{u}_z \right) e^{i\varphi} \right] e^{i(k_x.x+k_y.y+k_z.z-\omega t)}\end{aligned}$$

Equations de propagation : $\Delta \underline{\underline{\vec{E}}} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \underline{\underline{\vec{E}}}}{\partial t^2} = \vec{0}$ et $\Delta \underline{\underline{\vec{B}}} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \underline{\underline{\vec{B}}}}{\partial t^2} = \vec{0}$

Soit un guide d'onde de direction (Oz) :

On parle d'onde transverse-électrique (onde T.E.) lorsque $E_{0_z} = 0$

On parle d'onde transverse-magnétique (onde T.M.) lorsque $B_{0_z} = 0$

On parle d'onde transverse-électromagnétique (onde T.E.M.) lorsque $E_{0_z} = 0$ et $B_{0_z} = 0$

Chapitre 3 : Electromagnétisme

I) Généralités et révisions

II) Régime variable

III) Propagation d'une onde plane monochromatique dans un diélectrique parfait

IV) L'énergie électromagnétique

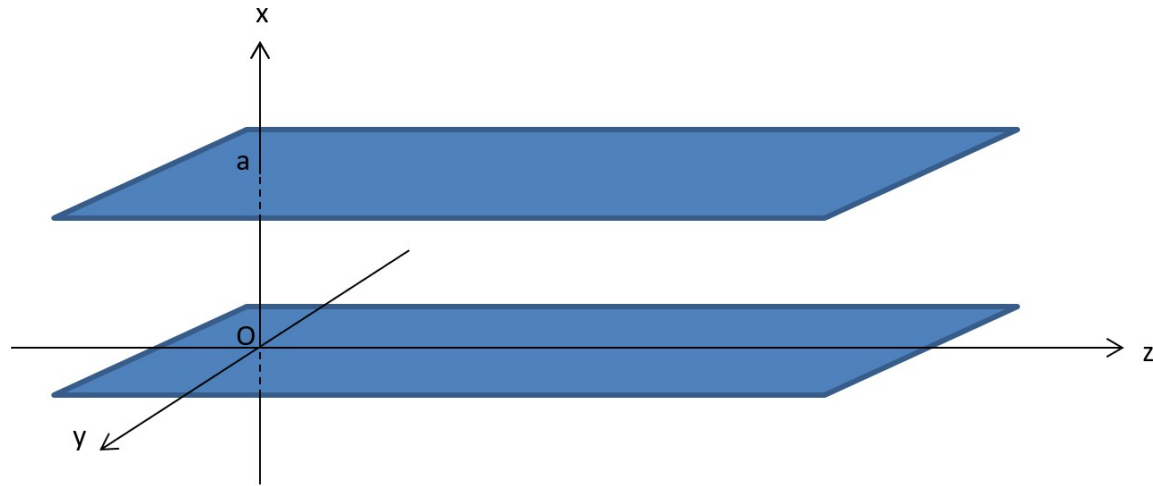
V) Propagation guidée

1) Généralités

2) Propagation entre deux plans métalliques (conducteurs parfaits)

3) guide d'onde rectangulaire

4) Fibre optique



✓ On cherche une solution d'onde T.E. polarisée rectilignement suivant Oy et avec un vecteur d'onde contenu dans le plan xOz : $\underline{E}_0 e^{i(k_x \cdot x + k_y \cdot y + k_z \cdot z - \omega t)} \overrightarrow{u}_y$

✓ Equation de M.G. :

$$\text{div} \overrightarrow{E} = 0 \Rightarrow \left(\frac{\partial}{\partial x} \overrightarrow{u}_x + \frac{\partial}{\partial y} \overrightarrow{u}_y + \frac{\partial}{\partial z} \overrightarrow{u}_z \right) \underline{E}_0 e^{i(k_x \cdot x + k_y \cdot y + k_z \cdot z - \omega t)} \overrightarrow{u}_y = 0$$

$$\frac{\partial \underline{E}_0 e^{i(k_x \cdot x + k_y \cdot y + k_z \cdot z - \omega t)}}{\partial y} = 0 \quad \forall x, y, z, t$$

$$k_y = 0$$

La solution est de la forme : $\underline{E}_0 e^{i(k_x \cdot x + k_z \cdot z - \omega t)} \overrightarrow{u}_y$

Chapitre 3 : Electromagnétisme

I) Généralités et révisions

II) Régime variable

III) Propagation d'une onde plane monochromatique dans un diélectrique parfait

IV) L'énergie électromagnétique

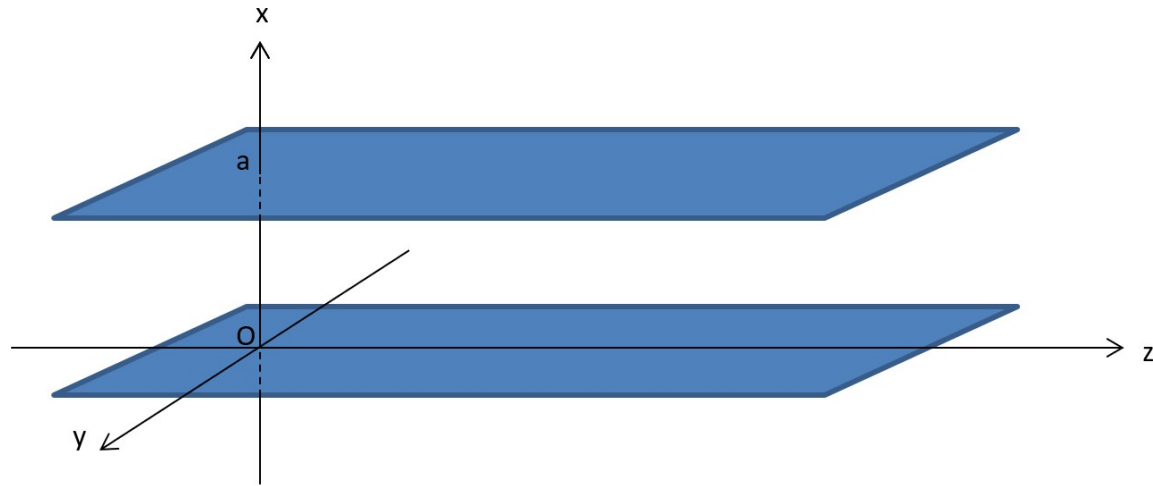
V) Propagation guidée

1) Généralités

2) Propagation entre deux plans métalliques (conducteurs parfaits)

3) guide d'onde rectangulaire

4) Fibre optique



✓ Conditions aux limites : En $x=0$ et $x=a$, nous avons $\vec{E}_{\text{tangential}} = \vec{0}$

$$\underline{E}_0 e^{i(k_x \cdot 0 + k_z \cdot z - \omega t)} \vec{u}_y = \vec{0} \quad \text{et} \quad \underline{E}_0 e^{i(k_x \cdot a + k_z \cdot z - \omega t)} \vec{u}_y = \vec{0} \quad \forall z, t$$

La solution est de la forme : $\underline{E}_0 \sin\left(n \frac{\pi}{a} x\right) e^{i(k_z \cdot z - \omega t)} \vec{u}_y$

Chapitre 3 : Electromagnétisme

I) Généralités et révisions

II) Régime variable

III) Propagation d'une onde plane monochromatique dans un diélectrique parfait

IV) L'énergie électromagnétique

V) Propagation guidée

1) Généralités

2) Propagation entre deux plans métalliques (conducteurs parfaits)

3) guide d'onde rectangulaire

4) Fibre optique

✓ Equation de M.F. :

$$\vec{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \Rightarrow \vec{\text{rot}} \vec{E} = i\omega \vec{B} \Rightarrow \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega B_x \neq 0$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = i\omega B_y = 0$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = i\omega B_z \neq 0$$

$$\Rightarrow B_x = -\frac{1}{i\omega} \times ik_z E_0 \sin\left(n \frac{\pi}{a} x\right) e^{i(k_z z - \omega t)}$$

$$B_y = 0$$

$$B_z = \frac{1}{i\omega} \times n \frac{\pi}{a} E_0 \cos\left(n \frac{\pi}{a} x\right) e^{i(k_z z - \omega t)}$$

$$\Rightarrow B_x = -\frac{k_z}{\omega} E_0 \sin\left(n \frac{\pi}{a} x\right) e^{i(k_z z - \omega t)}$$

$$B_y = 0$$

$$B_z = -i \frac{n\pi}{\omega a} E_0 \cos\left(n \frac{\pi}{a} x\right) e^{i(k_z z - \omega t)}$$

Chapitre 3 : Electromagnétisme

I) Généralités et révisions

II) Régime variable

III) Propagation d'une onde plane monochromatique dans un diélectrique parfait

IV) L'énergie électromagnétique

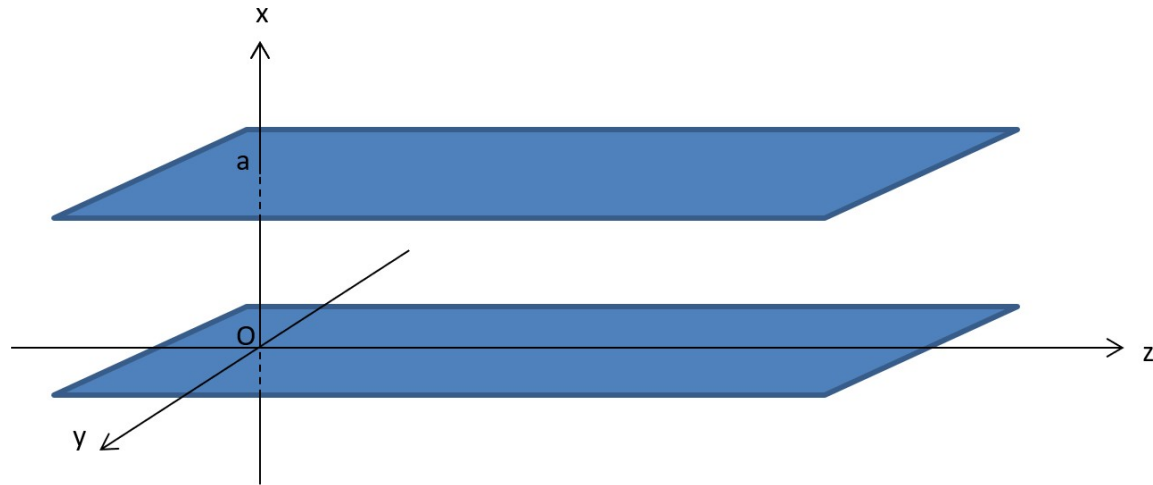
V) Propagation guidée

1) Généralités

2) Propagation entre deux plans métalliques (conducteurs parfaits)

3) guide d'onde rectangulaire

4) Fibre optique



✓ **Vérifions** l'équation de M.Flux. :

$$\begin{aligned} \text{div} \vec{B} &= \left(\frac{\partial}{\partial x} \vec{u}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{u}_y + \frac{\partial}{\partial z} \vec{u}_z \right) \cdot \left(-\frac{k_z}{\omega} E_0 \sin \left(n \frac{\pi}{a} .x \right) e^{i(k_z .z - \omega t)} \vec{u}_x - i \frac{n\pi}{\omega a} E_0 \cos \left(n \frac{\pi}{a} .x \right) e^{i(k_z .z - \omega t)} \vec{u}_z \right) \\ &= -\frac{k_z}{\omega} n \frac{\pi}{a} E_0 \cos \left(n \frac{\pi}{a} .x \right) e^{i(k_z .z - \omega t)} + \frac{n\pi}{\omega a} k_z E_0 \cos \left(n \frac{\pi}{a} .x \right) e^{i(k_z .z - \omega t)} \\ &= 0 \quad \text{ouf ! Tout va bien !} \end{aligned}$$

Chapitre 3 : Electromagnétisme

I) Généralités et révisions

II) Régime variable

III) Propagation d'une onde plane monochromatique dans un diélectrique parfait

IV) L'énergie électromagnétique

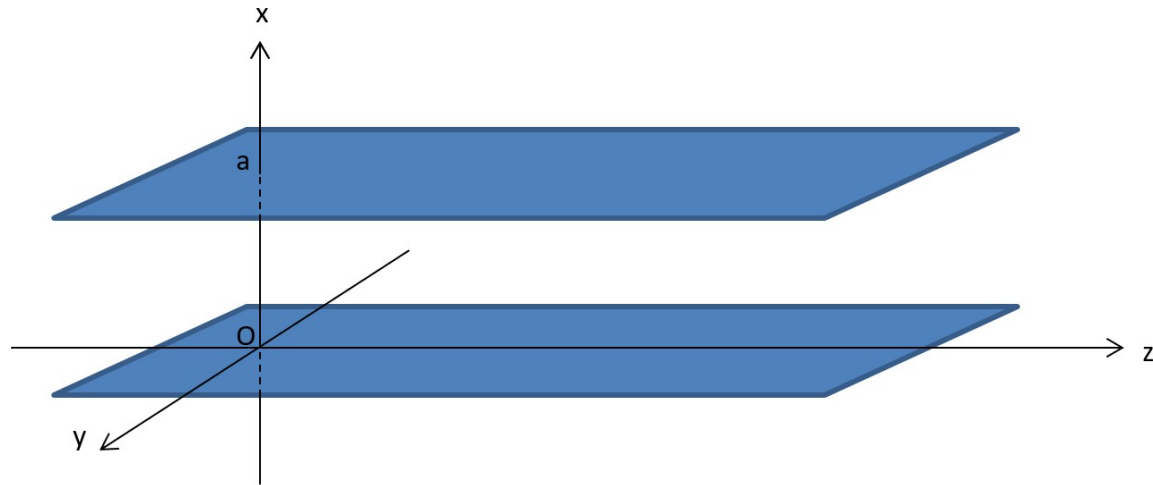
V) Propagation guidée

1) Généralités

2) Propagation entre deux plans métalliques (conducteurs parfaits)

3) guide d'onde rectangulaire

4) Fibre optique



✓ Equation de M.A. :

$$\vec{\text{rot}} \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \Rightarrow \vec{\text{rot}} \vec{E} = -i\omega \vec{B} \Rightarrow \begin{aligned} \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} &= -i\mu_0 \varepsilon_0 \omega E_x \\ \frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} &= -i\mu_0 \varepsilon_0 \omega E_y \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} &= -i\mu_0 \varepsilon_0 \omega E_z \end{aligned}$$

$$\Rightarrow -i \frac{k_z^2}{\omega} \underline{E_0} \cos\left(n \frac{\pi}{a} x\right) e^{i(k_z z - \omega t)} - i \frac{1}{\omega} \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 \underline{E_0} \cos\left(n \frac{\pi}{a} x\right) e^{i(k_z z - \omega t)} = -i\mu_0 \varepsilon_0 \omega \underline{E_0} \cos\left(n \frac{\pi}{a} x\right) e^{i(k_z z - \omega t)}$$

$$\Rightarrow \frac{k_z^2}{\omega} + \frac{1}{\omega} \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 = \mu_0 \varepsilon_0 \omega \Rightarrow k_z^2 = \mu_0 \varepsilon_0 \omega^2 - \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 \Rightarrow k_z^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2$$

Chapitre 3 : Electromagnétisme

I) Généralités et révisions

II) Régime variable

III) Propagation d'une onde plane monochromatique dans un diélectrique parfait

IV) L'énergie électromagnétique

V) Propagation guidée

1) Généralités

2) Propagation entre deux plans métalliques (conducteurs parfaits)

3) guide d'onde rectangulaire

4) Fibre optique

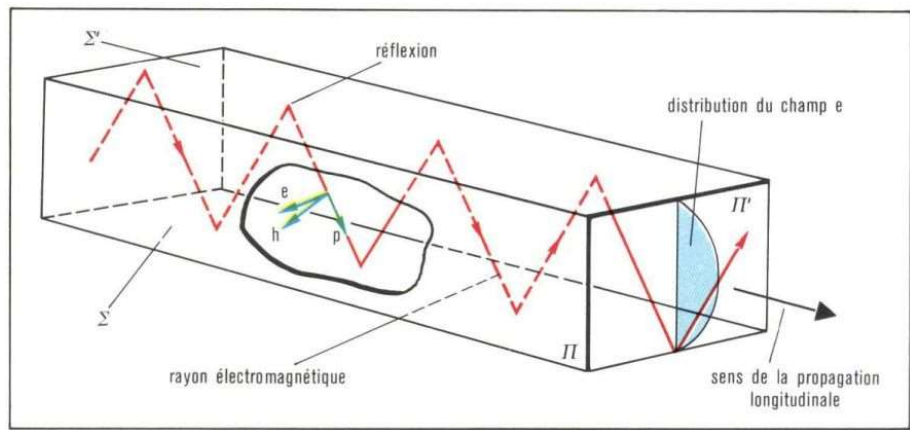
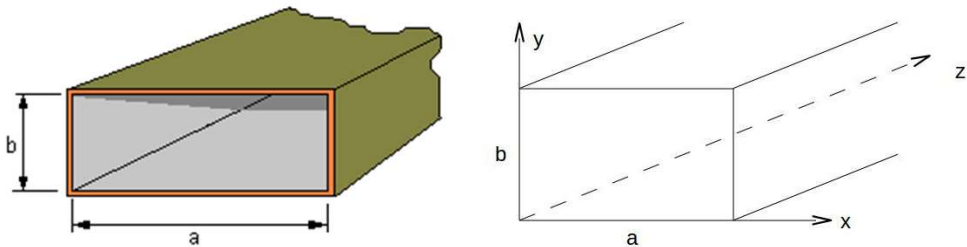
$$\Rightarrow k_z^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2$$

L'onde se propage suivant z si $\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 > \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 = \left(\frac{\omega_c}{c}\right)^2$. Il existe donc une fréquence de coupure

$\nu_c = \frac{n}{2a}c$ au-dessous de laquelle l'onde ne peut pas se propager.

Chapitre 3 : Electromagnétisme

- I) Généralités et révisions
- II) Régime variable
- III) Propagation d'une onde plane monochromatique dans un diélectrique parfait
- IV) L'énergie électromagnétique
- V) Propagation guidée
 - 1) Généralités
 - 2) Propagation entre deux plans métalliques (conducteurs parfaits)
 - 3) guide d'onde rectangulaire
 - 4) Fibre optique



$$\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 = k_z^2 + \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 = k_z^2 + \left(\frac{\omega_c}{c}\right)^2 \quad \text{relation de dispersion}$$

$$\omega_c = c \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad \text{filtre passe haut}$$

Chapitre 3 : Electromagnétisme

I) Généralités et révisions

II) Régime variable

III) Propagation d'une onde plane monochromatique dans un diélectrique parfait

IV) L'énergie électromagnétique

V) Propagation guidée

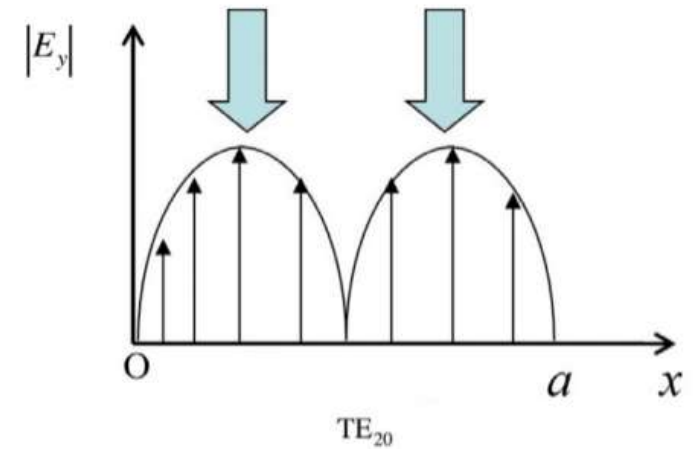
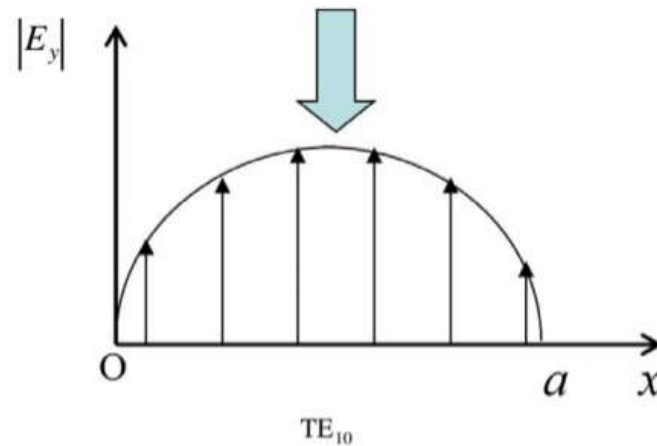
1) Généralités

2) Propagation entre deux plans métalliques (conducteurs parfaits)

3) guide d'onde rectangulaire

4) Fibre optique

mode $TE_{1,0}$ ($m=1$ et $n=0$) :
$$\vec{E} = \underline{E}_0 \sin\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) e^{i(k_z \cdot z - \omega t)} \vec{u}_y$$



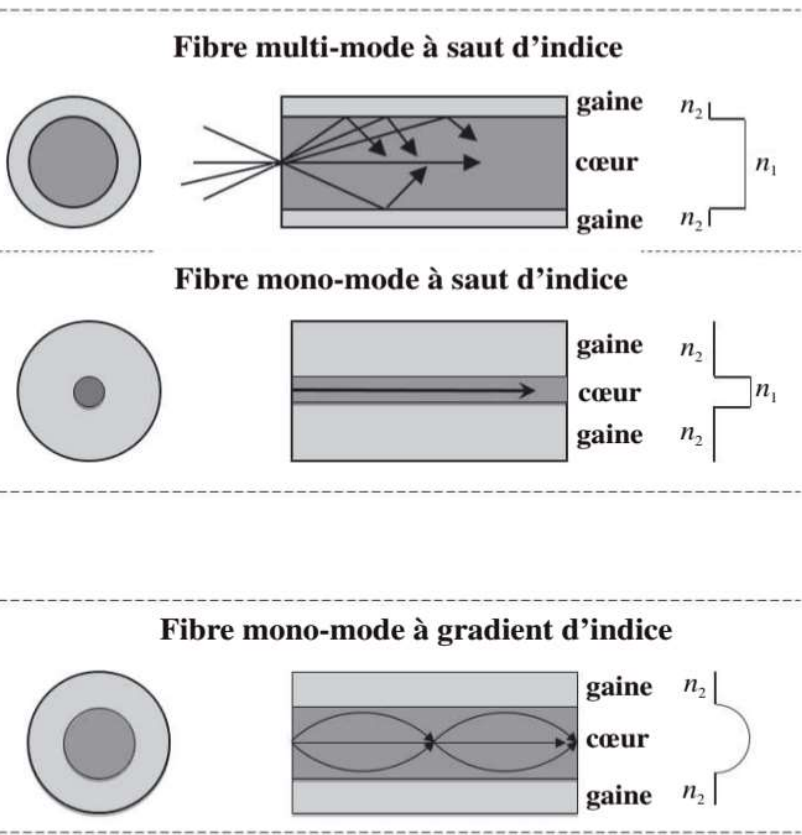
De manière générale, dans le mode TE_{mn} , on trouve m maxima de champ E dans la direction Ox et n maxima suivant Oy .

Pour se propager dans un guide d'ondes, la lumière adopte certaines formes particulières de répartition de l'intensité lumineuse de la section transverse du guide, qui dépendent de la fréquence du champ électromagnétique. On les appelle modes de propagation.

Chapitre 3 : Electromagnétisme

- I) Généralités et révisions
- II) Régime variable
- III) Propagation d'une onde plane monochromatique dans un diélectrique parfait
- IV) L'énergie électromagnétique
- V) Propagation guidée
 - 1) Généralités
 - 2) Propagation entre deux plans métalliques (conducteurs parfaits)
 - 3) guide d'onde rectangulaire
 - 4) Fibre optique

La fibre optique standard est un fil de verre très fin de forme cylindrique, constitué d'une région centrale, le cœur, d'environ 10 microns de diamètre, entouré d'une gaine d'environ 125 microns de diamètre. Le cœur et la gaine sont constitués d'un même verre de silice, mais où des dopants sont incorporés de telle sorte que l'indice de réfraction du cœur soit légèrement supérieur à celui de la gaine. Le tout est finalement protégé par une gaine protectrice en matière plastique.



Les fibres à saut d'indice se divisent en deux catégories: les fibres à saut d'indice multi-modes (utilisées principalement pour des transmissions à courtes distances, de l'ordre de quelques mètres jusqu'à une centaine de kilomètres) et les fibres à saut d'indice monomodes (que l'on utilise pour les communications à longue distance, de l'ordre d'une centaine de kilomètres jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres).

Les fibres à gradient d'indice sont principalement utilisées pour des transmissions à moyenne portée, correspondant à une situation intermédiaire entre les domaines respectifs d'utilisation de la fibre à saut d'indice multi-mode et de la fibre à saut d'indice monomode.

Chapitre 3 : Electromagnétisme

I) Généralités et révisions

II) Régime variable

III) Propagation d'une onde plane monochromatique dans un diélectrique parfait

IV) L'énergie électromagnétique

V) Propagation guidée

1) Généralités

2) Propagation entre deux plans métalliques (conducteurs parfaits)

3) guide d'onde rectangulaire

4) Fibre optique

Par rapport aux autres guides d'ondes, La fibre optique atténue très faiblement les ondes électromagnétiques. C'est pour cette raison qu'actuellement, elle est systématiquement utilisée pour transmettre des informations sur de très longues distances.

la fibre optique est la très large bande passante: elle peut transmettre simultanément une plus grande quantité d'informations que tout autre système de transmission existant (câble coaxial, ligne bifilaire, etc.).

la fibre optique possède une très large bande passante et peut transmettre simultanément une plus grande quantité d'informations que tout autre système de transmission existant (câble coaxial, ligne bifilaire, etc.).

À basse fréquence le seul mode qui peut se propager est un mode dont l'intensité lumineuse est maximum au centre du cœur de la fibre et décroît régulièrement jusqu'à s'annuler dans la gaine. C'est le mode fondamental de propagation.

À partir d'une certaine fréquence, d'autres modes (d'ordre supérieur) peuvent se propager en même temps que le mode fondamental. Dans le cas des modes d'ordre supérieur, la lumière s'éteint et se rallume au moins une fois lorsqu'on se déplace du cœur vers la gaine, ou lorsqu'on tourne autour de l'axe de la fibre.

