Guide d'onde rectangulaire

1. Introduction

Un guide d'onde rectangulaire est un tube métallique creux à l'intérieur. Il possède une section conductrice rectangulaire de longueur a sur l'axe x et de hauteur b sur l'axe y .Il est remplit à l'intérieur par un diélectrique parfait - souvent par l'air-. Il existe d'autres types de guides de section circulaire et elliptique. Lorsqu'une onde électromagnétique se propage à l'intérieur du guide rectangulaire, elle est confinée par les quatre parois métalliques qui sont des conducteurs parfaits (figure1). Il est destiné à la propagation des ondes hertziennes. Les guides d'ondes rectangulaires sont utilisés dans le domaine des télécommunications dans le but de minimiser l'atténuation de l'onde électromagnétique. Pour obtenir des informations sur les champs électriques et magnétiques, il faut résoudre l'équation de l'onde issue des quatre équations de Maxwell en utilisant les conditions aux limites imposées par les parois du guide.

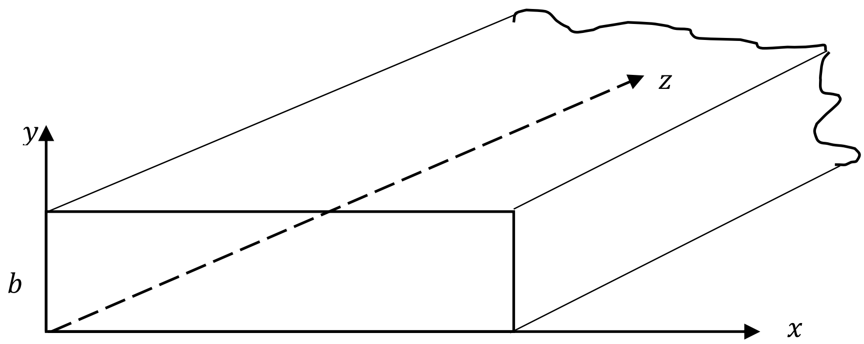


Figure 1 : Représentation d'un guide d'onde rectangulaire de longueur a sur l'axe x et de hauteur b sur l'axe y

Deux modes supérieurs peuvent se propager dans le guide :

Mode TE : E et transverse

$E_z = 0$, $H_z \neq 0$

Mode TM : H et transverse

$E_z \neq 0$ et $H_z = 0$

Les champs $\vec{E}$ et $\vec{H}$ guidés dans le guide métallique à section rectangulaire s'écrivent :

$E_z(x,y,z,t) = E(x,y)e^{j(\omega t-\gamma z)}$

$H_z(x,y,z,t) = H(x,y)e^{j(\omega t-\gamma z)}$

Suivant les équations de Maxwell on a :

$\overrightarrow{rot}\,\vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$, $\overrightarrow{rot}\,\vec{H} = -j\omega\varepsilon_0\vec{E}$, $div\vec{E} = 0$, $div\vec{B} = 0$

On a $\overrightarrow{rot}\overrightarrow{rot}\vec{E} = \overrightarrow{grad(d\imath v\vec{E})} - \Delta E$

$$\overrightarrow{rot}\overrightarrow{rot}\vec{H} = \overrightarrow{grad(d\imath v\vec{H})} - \Delta H$$

$\overrightarrow{rot}\overrightarrow{rot}\vec{E} = \omega^2\varepsilon_0\mu_0 E = -\Delta E \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = -\omega^2\mu_0\varepsilon_0 E$

$\Rightarrow \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \omega^2\mu_0\varepsilon_0 E = 0$…………..(*)

l'équation * est l'équation d'une onde qui se propage dans le guide

Mode TE $\Rightarrow E_z = 0$ et $H_z \neq 0$

Mode TM $\Rightarrow E_z \neq 0$ et $H_z = 0$

<u>En polarisation TM $E_z \neq 0$</u>

H et transverse ⇒ H est dans le plan $(x,y) \perp oz$

$H_z = 0$, $E_z \neq 0$

On a l'équation suivante :

$E(x,y,z,t) = E_z(x,y)e^{-j(\omega t)}e^{-\gamma_z}$

$\Delta E_z + \omega^2\varepsilon_0\mu_0 E_z(x,y) = 0 \qquad \frac{\partial}{\partial z} = -\gamma \qquad \frac{\partial^2}{\partial z^2} = +\gamma^2$

$\frac{\partial^2}{\partial x^2}E + \frac{\partial^2}{\partial y^2}E + (\gamma^2 + \omega^2\varepsilon_0\mu_0)E = 0 \qquad \frac{\partial}{\partial t} = j\omega\,\frac{\partial^2}{\partial t^2} = -\omega^2$

On sait que: $\gamma^2 + \omega^2\varepsilon_0\mu_0 = k^2$

$E = X.Y$

$\frac{1}{X}\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{1}{Y}\frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + k^2 \neq 0 \qquad on\ pose\ k^2 = A^2 + B^2$

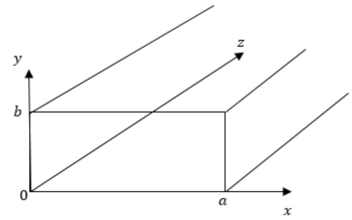
$$\frac{1}{X}\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + A^2 = 0 \qquad \Rightarrow \qquad \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + A^2 X = 0$$

$$\frac{1}{Y}\frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + B^2 = 0 \qquad \Rightarrow \qquad \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + B^2 Y = 0$$

La solution est de la forme :

$$X = c_1 \cos A_x + c_2 \sin A_x$$

$$Y = c_3 \cos B_y + c_4 \sin B_y$$



Condition aux limites : pour $x = 0, \; E = 0$

Pour $x = a \quad E = 0$

$$\begin{cases} 0 = c_1 + 0 \\ 0 = c_3 + 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_1 = 0 \\ c_3 = 0 \end{cases} \quad pour \begin{cases} y = b \\ x = a \end{cases} \Rightarrow E = 0$$

$$0 = c_2 \sin Aa \quad \Rightarrow Aa = m\pi \quad \Rightarrow A = \frac{m\pi}{a}$$

$$0 = c_4 \sin Bb \quad \Rightarrow Bb = n\pi \quad \Rightarrow B = \frac{n\pi}{b}$$

$$E = X.Y = c_2 c_4 \sin Ax \sin By \, e^{j((\omega t) - \gamma z)}$$

$$E = E_0 \sin\frac{m\pi}{a} x \sin\frac{n\pi}{b} y \, e^{-\gamma z}$$

$$\overrightarrow{rot}\vec{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} H$$

$$\begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -j\omega\mu H_x \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu H_z \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial y} + \gamma E_y = -j\omega\mu H_x \\ -\gamma E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

Et on a

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = +j\omega\varepsilon E_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\varepsilon E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\varepsilon E_z \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} +\gamma H_y = +j\omega\varepsilon E_x \\ -\gamma H_x = +j\omega\varepsilon E_y \end{cases}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = \frac{n\pi}{b} E_0 \sin\frac{m\pi}{a} x \cos\frac{n\pi}{b} y = \left[+j\omega\mu\left(\frac{j\omega\varepsilon}{\gamma}\right) - \gamma\right] E_y$$

$$\frac{-\mu\varepsilon\omega^2-\gamma^2}{\gamma}E_y=\frac{\partial E_z}{\partial y}\Rightarrow E_y=\frac{-\gamma E_0}{k^2}\frac{n\pi}{b}\sin\frac{m\pi}{a}x\cos\frac{n\pi}{b}y$$

On a :

$$-\gamma^2=+{k_g}^2$$

De la même manière on cherche E_x

On a les équations suivantes:

$$-\gamma E_x-\frac{\partial E_z}{\partial x}=-j\omega\mu\left(\frac{j\omega\varepsilon}{\gamma}\right)E_x$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x}=\left(\frac{j^2\omega^2\mu\varepsilon-\gamma^2}{\gamma}\right)E_x=-\left(\frac{k^2}{\gamma}\right)E_x$$

$$E_x=\frac{-\gamma}{k^2}\left(+\frac{m\pi}{a}E_0\cos\frac{m\pi}{a}x\sin\frac{n\pi}{b}y\right)e^{-\gamma x}e^{j\omega t}$$

$$E_x=\left(\frac{-\gamma}{k^2}\frac{m\pi}{a}E_0\cos\frac{m\pi}{a}x\sin\frac{n\pi}{b}y\right)e^{-\gamma x}e^{j\omega t}$$

$$\gamma=jk_g$$

$$\begin{cases}E_x=\dfrac{-jk_g}{k^2}\dfrac{m\pi}{a}E_0\cos\dfrac{m\pi}{a}x\sin\dfrac{n\pi}{b}y\,e^{-jk_gz}\\ E_y=\dfrac{-jk_g}{k^2}\dfrac{n\pi}{b}E_0\sin\dfrac{m\pi}{a}x\cos\dfrac{n\pi}{b}y\,e^{-jk_gz}\\ E_z=E_0\sin\dfrac{m\pi}{a}x\sin\dfrac{n\pi}{b}y\end{cases}$$

H_x?H_y?

$$H_x=-j\frac{\omega\varepsilon}{\gamma}E_y=\frac{-j\omega\varepsilon}{jk_g}E_y$$

$$H_x=\frac{-\omega\varepsilon}{k_g}\left(-j\frac{k_g}{k^2}\right)\frac{n\pi}{b}E_0\sin\frac{m\pi}{a}x\cos\frac{n\pi}{b}y\,e^{-jk_gz}$$

$$H_x=j\frac{\omega\varepsilon}{k^2}\frac{n\pi}{b}E_0\sin\frac{m\pi}{a}x\cos\frac{n\pi}{b}y\,e^{-jk_gz}$$

$$H_y=\frac{j\omega\varepsilon}{\gamma}E_x=\frac{j\omega\varepsilon}{jk_g}E_x$$

$$H_y=\frac{\omega\varepsilon}{k_g}\left(\frac{-jk_g}{k^2}\right)\frac{m\pi}{a}E_0\cos\frac{m\pi}{a}x\sin\frac{n\pi}{b}y\,e^{-jk_gz}$$

$$H_y=\frac{-j\omega\varepsilon}{k^2}\frac{m\pi}{a}E_0\cos\frac{m\pi}{a}x\sin\frac{n\pi}{b}y\,e^{-jk_gz}$$

$$H_z=0$$

On trouve :

$$\begin{cases} H_x = j\dfrac{\omega\varepsilon}{k^2}\dfrac{n\pi}{b}E_0 \sin\dfrac{m\pi}{a}x \cos\dfrac{n\pi}{b}y\, e^{-jk_g z} \\ H_y = \dfrac{-j\omega\varepsilon}{k^2}\dfrac{m\pi}{a}E_0 \cos\dfrac{m\pi}{a}x \sin\dfrac{n\pi}{b}y\, e^{-jk_g z} \\ H_z = 0 \end{cases}$$

La fréquence de coupure :

$$\gamma^2 + \omega^2\varepsilon_0\mu_0 = A^2 + B^2$$

$$\gamma^2 + \omega^2\varepsilon_0\mu_0 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$$

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \omega^2\varepsilon_0\mu_0}$$

$$\gamma > 0 \quad \Rightarrow \quad \gamma = \alpha \quad \Rightarrow \quad pas\ de\ solution\ \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 > \omega^2\varepsilon_0\mu_0$$

$$\gamma < 0 \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 < \omega^2\varepsilon_0\mu_0$$

La fréquence de coupure est calculée f_c quand on a l'égalité suivante :

$$\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 = \omega_c^2\varepsilon_0\mu_0$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi}c\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

<u>Mode TE</u> : E et transverse ⇒ E est dans le plan $(x, y) \perp oz$

$E_z = 0$, $H_z \neq 0$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \overbrace{(\gamma^2 + k_g^2)}^{A^2+B^2} H_z(x, y) = 0$$

On suppose que $H_z(x, y) = X.Y \Rightarrow$

$$\frac{\partial^2 X.Y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X.Y}{\partial y^2} + (A^2 + B^2)X.Y = 0 \qquad on\ divise\ sur\ X.Y$$

On obtient :

$$\frac{1}{X}\frac{\partial^2 X.}{\partial x^2}+\ \frac{1}{Y}\frac{\partial^2 Y}{\partial y^2}+(A^2+B^2)=0\begin{cases}\dfrac{\partial^2 X.}{\partial x^2}+A^2X=0\\ \dfrac{\partial^2 Y}{\partial y^2}+B^2Y=0\end{cases}$$

$X=c_1\cos A_x+c_2\sin A_x$

$Y=c_3\cos B_y+c_4\sin B_y$

Conditions aux limites $x=0\ \Rightarrow$ Ey $=0$ $x=a\ \Rightarrow$ Ey $=0$

$y=0\Rightarrow$ E$x=0$, $y=b\ E_x=0$

On a d'après les équations de Maxwell.

$\overrightarrow{rot}\,\vec{H}=-j\omega\varepsilon\vec{E}$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y}-\frac{\partial H_y}{\partial z}=\frac{\partial H_z}{\partial y}+\gamma H_y=j\omega\varepsilon E_x \qquad (1)$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial H_z}{\partial y}-\dfrac{\partial H_y}{\partial z}=j\omega\varepsilon E_x\\ \dfrac{\partial H_x}{\partial z}-\dfrac{\partial H_z}{\partial x}=j\omega\varepsilon E_y\\ \dfrac{\partial H_y}{\partial x}-\dfrac{\partial H_x}{\partial y}=0\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}\dfrac{\partial H_z}{\partial y}+\gamma H_y=j\omega\varepsilon E_x\ \dots\dots\dots\dots\dots(1)\\ -\gamma H_x-\dfrac{\partial H_z}{\partial x}=j\omega\varepsilon E_y\ \dots\dots\dots\dots\dots(2)\\ \dfrac{\partial H_y}{\partial x}-\dfrac{\partial H_x}{\partial y}=0\ \dots\dots\dots..\dots\dots\dots.(3)\end{cases}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y}+\gamma H_y=j\omega\varepsilon E_x \qquad (1)$$

$$-\gamma H_x-\frac{\partial H_z}{\partial x}=j\varepsilon\omega E_y \qquad (2)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x}=\frac{\partial H_x}{\partial y} \qquad (3)$$

$$\overrightarrow{rot}\,\vec{E}=-\mu\frac{\partial H_x}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y}-\frac{\partial E_y}{\partial z}=-\mu\frac{\partial H_x}{\partial t}\Rightarrow\ \ 0-\left(-\gamma E_y\right)=-j\mu\omega H_x$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z}-\frac{\partial E_z}{\partial x}=-\mu\frac{\partial H_y}{\partial t}\Rightarrow\ \ -\gamma E_x-0=-j\mu\omega H_y$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x}-\frac{\partial E_x}{\partial y}=-\mu\frac{\partial H_z}{\partial t}\Rightarrow\ \ \frac{\partial E_y}{\partial x}-\frac{\partial E_x}{\partial y}=-j\mu\omega H_z$$

$$+\gamma E_y = -j\mu\omega H_x \dots\dots\dots\dots\dots\dots (4)$$

$$-\gamma E_x = -j\mu\omega H_y \dots\dots\dots \quad \dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\mu\omega\ H_z \dots \quad \dots\dots (6)$$

Les équations (1) et (5) donnent :

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + \gamma H_y = j\varepsilon\omega E_x$$

On a d'après (5)

$$H_y = \frac{\gamma}{j\mu\omega} E_x$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + \frac{\gamma^2}{j\mu\omega} E_x = j\varepsilon\omega E_x \Rightarrow \quad E(x)\left(j\varepsilon\omega - \frac{\gamma^2}{j\mu\omega}\right) = \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

$$E_x\left(\frac{-\omega^2\varepsilon\mu - \gamma^2}{j\mu\omega}\right) = \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

On a $\gamma = jk_g \Rightarrow \gamma^2 = \left(jk_g\right)^2 = -{k_g}^2$

$$\left(\frac{\gamma^2 - \omega^2\varepsilon\mu}{j\mu\omega}\right) E_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} \Rightarrow \qquad \boxed{E_x = \frac{-j\mu\omega}{\gamma^2 + \mu\varepsilon\omega^2}\frac{\partial H_z}{\partial y}}$$

Les équations (2) et (4) donnent

$$-\gamma H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\varepsilon\omega E_y \quad avec\ H_x = -\frac{\gamma}{j\mu\omega} E_y$$

$$+\frac{\gamma^2}{j\mu\omega} E_y - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\varepsilon\omega E_y \Rightarrow \qquad E_y\left(j\varepsilon\omega - \frac{\gamma^2}{j\mu\omega}\right) = -\frac{\partial H_z}{\partial x}$$

$$E_y\left(\frac{\gamma^2}{j\mu\omega} - j\varepsilon\omega\right) = \frac{\partial H_z}{\partial x} \qquad \Rightarrow \qquad E_y\left(\frac{\gamma^2 + \varepsilon\mu\omega^2}{j\mu\omega}\right) = \frac{\partial H_z}{\partial x}$$

$$\boxed{E_y = \frac{j\mu\omega}{\gamma^2 + \mu\varepsilon\omega^2}\frac{\partial H_z}{\partial x}}$$

Les conditions auxlimites

$$\begin{cases} E_x = 0 \\ y = 0, y = b \end{cases} \Rightarrow \quad \frac{\partial H_z}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = 0 \quad \Rightarrow \quad c_3 \cos B_{x0} + c_4 \sin B_{x0} = 0 \quad \Rightarrow$$

$$Bc_3 \sin B_y + Bc_4 \cos B_y = 0 \quad \Rightarrow \quad c_4 = 0$$

$$y = b \;\Rightarrow\; \frac{\partial H_z}{\partial y} = 0 \quad \Rightarrow \quad Bc_3 \sin Bb = 0 \Rightarrow \qquad B = \frac{n\pi}{b}$$

$$y = c_3 \cos \frac{n\pi}{b}$$

De la même manière

On a :

$$E_y = \frac{j\mu\omega}{\gamma^2 + \varepsilon\mu\omega^2} \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

$$X = c_1 \cos A_x + c_2 \sin A_x$$

$$\frac{dX}{dx} = -Ac_1 \sin A_x + Ac_2 \cos A_x$$

$$x = 0 \quad \Rightarrow \quad E_y = 0, \quad x = a \;\Rightarrow\; E_y = 0$$

$$-Ac_1.\ 0 + A\,c_2 \cos A_x = 0 \;\Rightarrow\; c_2 = 0$$

$$x = a \quad \Rightarrow \quad E = 0 \quad \Rightarrow \quad A\,c_2 \cos A_x = 0 \quad \Rightarrow \quad A.a = n\pi$$

$$A = \frac{n\pi}{a}$$

$$H_z = X.Y = c_1 c_2 \cos \frac{m\pi}{a} \cos \frac{n\pi}{b}$$

$$H_z = H_0 \cos \frac{m\pi}{a} \cos \frac{n\pi}{b} e^{j(\omega t - k_z)}$$

$$\gamma = jk_g \;\Rightarrow\; \gamma^2 = -k_g^2 \;\Rightarrow\; \gamma^2 + k_0^2 = k^2$$

$$-k_g^2 + \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 = k^2 \;\Rightarrow\; k^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 - k_g^2$$

$$k^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 - k_g^2$$

Fréquence de coupure :

$en\ espace\ libre\ k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{2\pi f}{c}$

$k_g = \frac{2\pi}{\lambda_g}$

On a $A^2 + B^2 = \gamma^2 + k_0^2 = k^2$

$\gamma^2 = k^2 - k_0^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0$

Ce qui donne :

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0}$$

On va discuter la propagation dans le guide suivant γ

Si $\gamma > 0 \quad \Rightarrow \ \alpha = \gamma \quad \Rightarrow \ pertes\ dans\ le\ guide\ ce\ n'est\ pas\ le\ cas$

$\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 > \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0\ ce\ n'est\ pas\ la\ solution$

Si $\gamma < 0 \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 > \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \gamma \quad (sans\ pertes)$

$\omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 > \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad est\ la\ solution$

Pour $\omega_c^2 \varepsilon_0 \mu_0 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$ donc ω_c est la fréquence de coupure

$$\omega_c^2 = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \Rightarrow \omega_c = c\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

$$\Rightarrow \ f_c = \frac{1}{2\pi} c \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi} c \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

$$f < \frac{1}{2\pi} c \sqrt{\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad l'onde\ est\ evanesante$$

Donc en mode $TE_{\ m,n}$ la propagation ne peut se faire que pour $f > f_c$

Avant de trouver les modes on doit d'abord calculer E_x, E_y, E_z

$$E_x = \frac{j\mu\omega}{k_g^2 - \omega^2\varepsilon\mu}\left(-H_0 \frac{n\pi}{b} \cos\frac{m\pi}{a} x \sin\frac{n\pi}{b} y\right) e^{-jk_g z}$$

$$E_x = \frac{j\mu\omega}{j\left(\omega^2\varepsilon\mu - k_g^2\right)} H_0 \frac{n\pi}{b} \cos\frac{m\pi}{a} x \sin\frac{n\pi}{b} y\, e^{-jk_g z}$$

$$E_y = \frac{j\mu\omega}{\gamma^2 + \omega^2\varepsilon\mu}\left[-H_0 \frac{m\pi}{a} \sin\frac{m\pi}{a} x \cos\frac{n\pi}{b} y\right] e^{-jk_g z}$$

$$E_y = \frac{j\mu\omega}{-k_g^2 + \omega^2\varepsilon\mu}\left[-H_0 \frac{m\pi}{a} \sin\frac{m\pi}{a} x \cos\frac{n\pi}{b} y\right] e^{-jk_g z}$$

$$E_y = \frac{j\mu\omega}{k^2} H_0 \frac{m\pi}{a} \sin\frac{m\pi}{a} x \cos\frac{n\pi}{b} y\, e^{-jk_g z}$$

$$E_z = 0$$

Le mode $TE_{0,0}$ n'existe pas