

## ❑ Objectif de cours circuits et systèmes hyperfréquences:

Présenter les concepts et principes généraux qui permettent de mettre en œuvre des systèmes hyperfréquences.

## ❑ Fonctions essentielles des circuits microondes:

- 1.Composants passifs,
- 2.Composants actifs.

## ❑ Fonctions essentielles des circuits microondes

### **1- Composants passifs:**

- Guidage d'un signal sur une même structure
- Transfert d'une structure de guidage à une autre
- Filtrage
- Répartition entre plusieurs accès

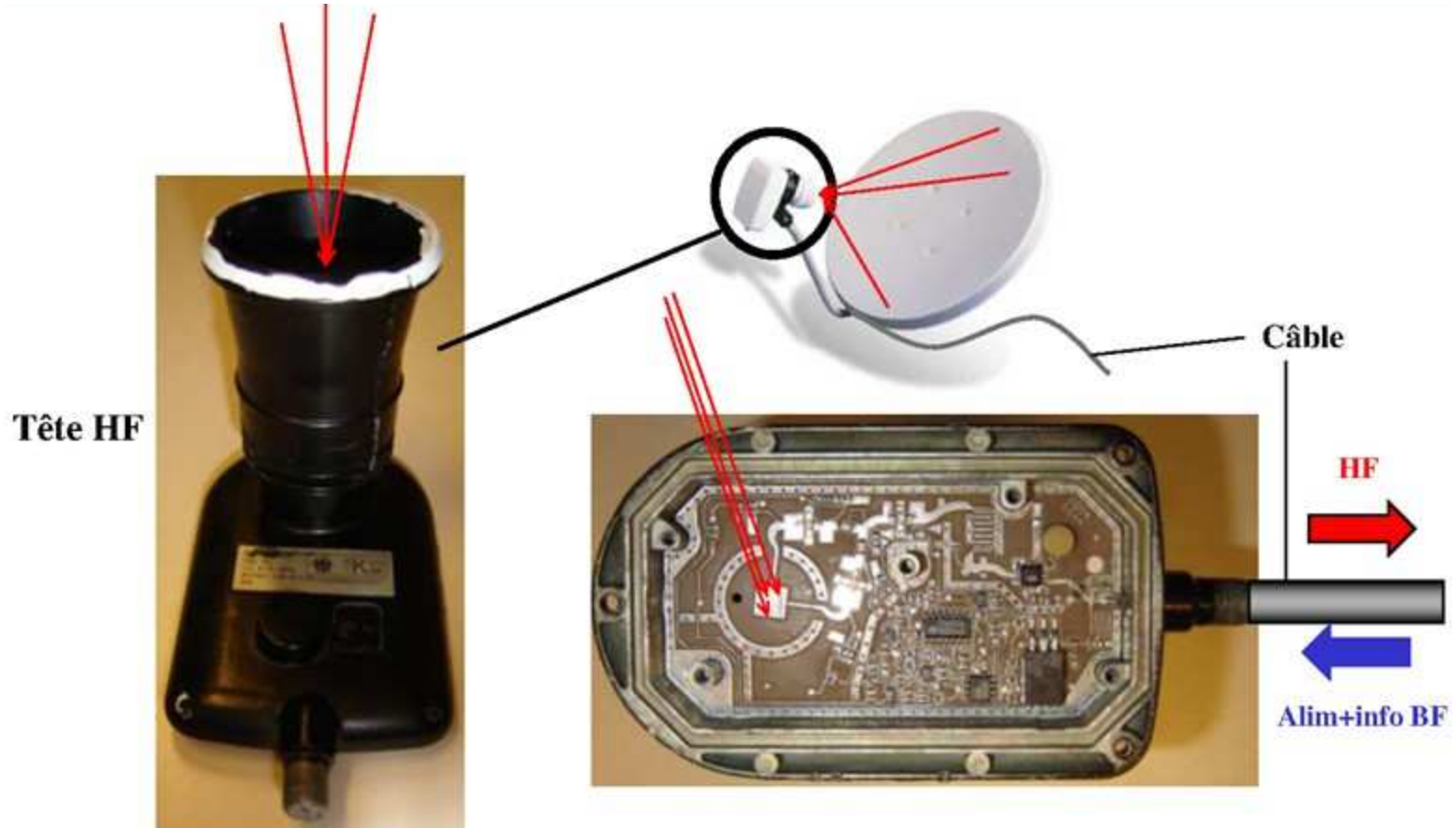
Structures permettant de réaliser ces fonctions:

- le câble coaxial,
- les guides d'ondes,
- les lignes micro rubans.

**2- Composants actifs:** Ces composants actifs (diodes, transistors,...) sont souvent associés à des composants passifs pour réaliser d'autres fonctions comme le mélange, l'amplification, la détection, la multiplication, l'atténuation, ...

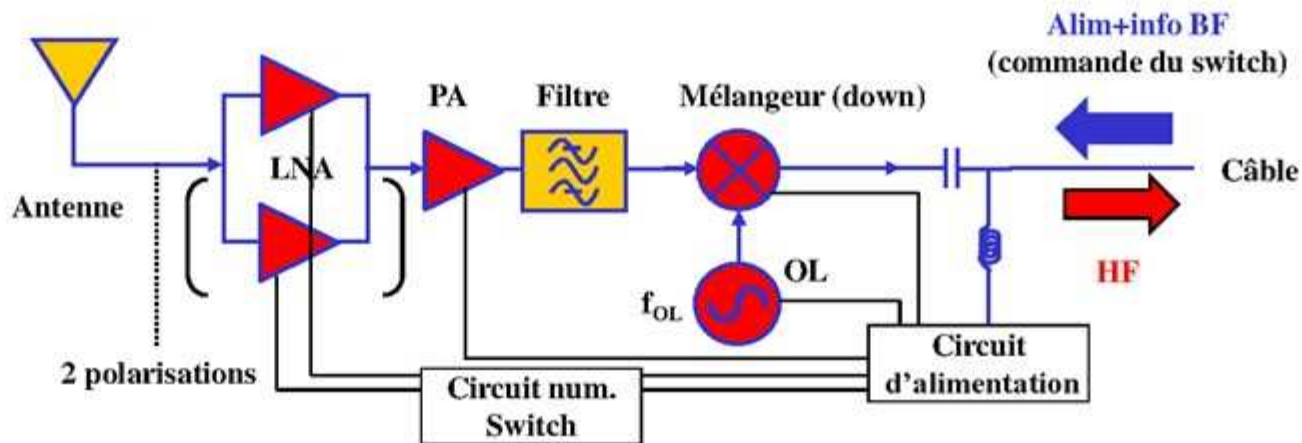
# Objectif des techniques microondes

## ❑ Exemple de circuits hyperfréquences: tête de récepteur satellite



# Objectif des techniques microondes

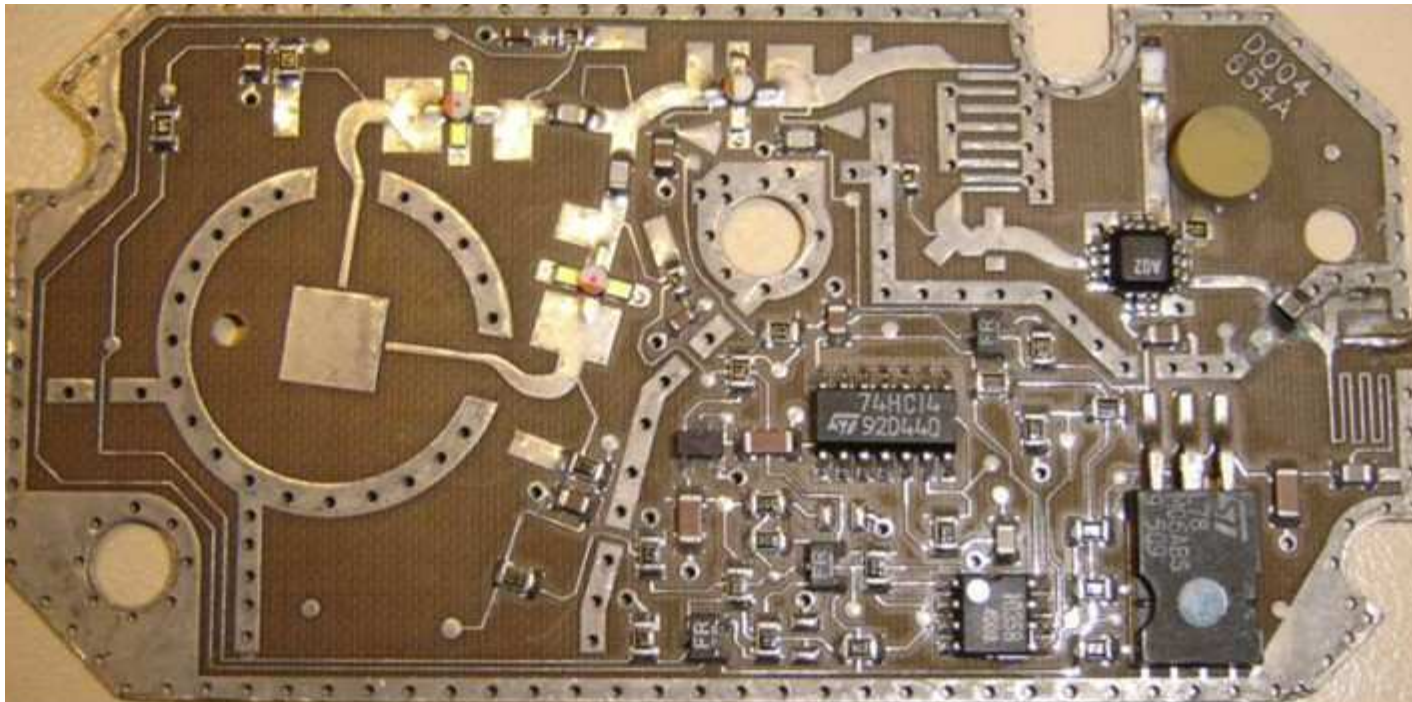
## ❑ Exemple de circuits hyperfréquences: tête de récepteur satellite



# Objectif des techniques microondes

---

- ❑ Exemple de circuits hyperfréquences: tête de récepteur satellite



- ❑ Un guide d'onde transporte une onde entre deux points distincts, utilisé généralement pour des ondes à fréquences très élevées,
- ❑ Propagation guidée = imposer à l'onde de se propager dans un espace limité,
- ❑ Les paramètres du guide:
  - Impédance
  - Atténuation
  - Fréquence de coupure
- ❑ Calculs basés sur les équations des champs.

## □ Les modes de propagation:

- Il existe plusieurs solutions aux équations de Maxwell pour les guides d'onde.
- Chaque solution représente un mode de propagation
- La propagation se fait selon 4 types :
  - TEM :  $E_z = 0$ ,  $H_z = 0$
  - TE :  $E_z = 0$
  - TM :  $H_z = 0$
  - Hybride : E et H en toutes directions



## □ Les modes de propagation:

Pourquoi est-il important connaître les modes qui se propagent ?

- S'il y a plus d'un mode, l'information est distribuée entre les ondes de différente fréquence. Il y a dispersion, et possibilité de perte d'information,
- Les modes supérieures peuvent contenir de l'énergie que le récepteur ne peut pas capter.

Il est important, autant que possible, d'avoir un seul mode qui se propage dans un guide.



Etudier un guide d'onde c'est déterminer la façon dont se propage l'énergie. En hyperfréquences (la longueur d'onde est de l'ordre du cm ou du mm) les dimensions du guide sont choisies de façon à ce que, dans la bande de fréquence utilisée, l'énergie n'ait qu'une seule façon (mode de propagation) de se propager.

Dans ce cas le guide est monomode.

**Le caractère monomode d'un guide dépend du rapport entre ses dimensions physiques et la longueur d'onde propagée.**

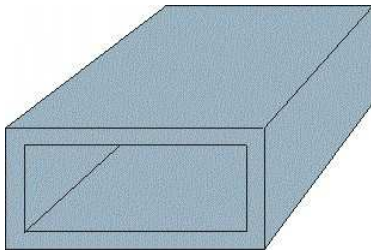
**Un mode est caractérisé par une configuration géométrique (orientation) de propagation du champ (  $E$ ,  $H$  ), associée à un couple ( $\omega$ ,  $\beta$ ).**

**4 familles de modes: tout mode est soit hybride, soit TE, soit TM, soit TEM**

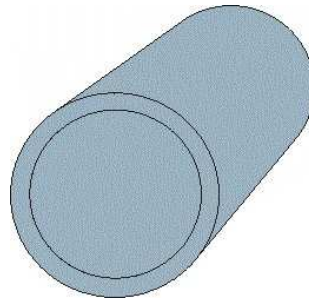
- 1- Les modes hybrides HE ou EH ayant simultanément des composantes longitudinales  $E_z$  et  $H_z$ .
- 2- Les modes TE (Transverse Electrique) où  $E_z = 0$ .
- 3- Les modes TM (Transverse Magnétique) où  $H_z = 0$ .
- 4- Les modes TEM (Transverse Electro-Magnétique) avec  $E_z = H_z = 0$ .

# Théorie générale des ondes guidées

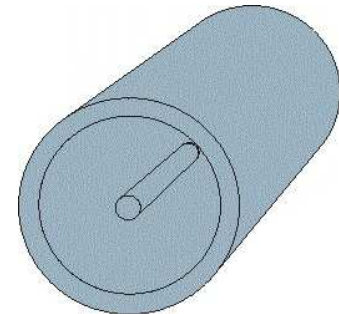
Solutions générales des équations de Maxwell pour la propagation des ondes TEM, TE et TM dans les guides d'ondes et les lignes de transmission planaires



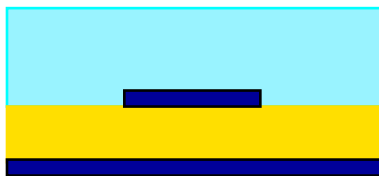
Guide rectangulaire



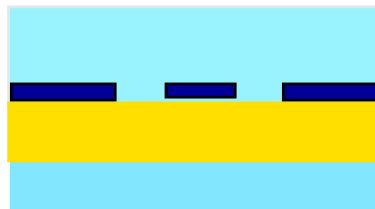
Guide circulaire



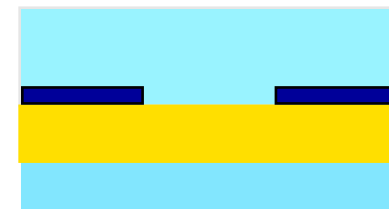
Câble coaxial



Ligne microruban



Guide coplanaire



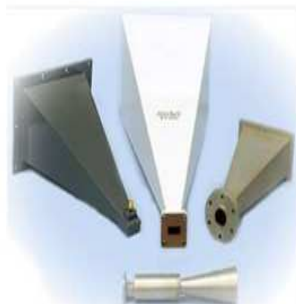
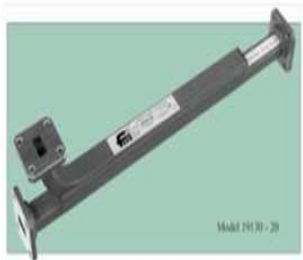
Ligne à fente

■ métal ■ air ■ substrat planaire

## ❑ Comparaison guide et lignes:

### Guides métalliques

- Forte puissance
- Faibles pertes
- Dispersifs
- Fréquence de coupure  $f_c$
- Volume, poids



### Lignes

- Faible puissance (microruban)
- Pertes
- Non dispersives
- Pas de  $f_c$



Faible coût  
Compacité des structures



**Rappel : Un guide d'onde est une structure invariante par translation le long d'un axe Oz.**

## **Hypothèse 1 : Régime harmonique**

Un guide sert à transporter une information entre deux points distincts. Cette information peut être décomposée en intégrales de Fourier c.a.d. en une somme de signaux sinusoïdaux.

Nous nous placerons donc toujours en régime harmonique.

Ceci se traduit **mathématiquement** par une **variation temporelle en  $e^{j\omega t}$** .

## Hypothèse 2 : Invariance selon z

L'invariance par translation du guide le long d'un axe Oz implique que

$$\begin{cases} \vec{E} = \vec{E}_0 . e^{j\omega t} . e^{-\gamma z} \\ \vec{H} = \vec{H}_0 . e^{j\omega t} . e^{-\gamma z} \end{cases}$$

$E_0$  et  $H_0$  ne dépendent que des coordonnées transversales (pas de  $z$ ).

( $E_0$  et  $H_0$  ne sont pas fonction de la variable  $z$  mais ces vecteurs peuvent avoir une composante selon cet axe).

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

**$\beta$**  Constante de phase ou **constante de propagation**, représente le déphasage de l'onde par unité de longueur le long de Oz).

**$\alpha$**  Représente **l'atténuation** par unité de longueur (due aux pertes métalliques et diélectriques).

## Hypothèse 3 : On néglige les pertes

### Cas d'un guide parfait:

$\sigma = 0$  dans les isolants  $\sigma = \infty$  dans les conducteurs  
 $\alpha = 0$

### Cas d'un guide à pertes

tenir compte de (pertes dans les isolants) et de la conductivité non infinie dans les métaux  $\sigma \neq \infty$ .

Le milieu de propagation d'un guide (vide ou diélectrique) présente en général de faibles pertes aux fréquences d'utilisation.

**On pourra considérer ces pertes comme une faible perturbation.**

**Dans ce cours nous nous limiterons à l'hypothèse d'un guide parfait.**

# Longueur d'onde, vitesse de phase, vitesse de groupe, dispersion

**Longueur d'onde guidée  $\lambda_g$**  : C'est la plus petite distance séparant deux endroits du guide qui sont dans le même état électromagnétique.

$$\begin{cases} \vec{E}(t, z) = \vec{E}(t, z + \lambda_g) \\ \vec{H}(t, z) = \vec{H}(t, z + \lambda_g) \end{cases} \Leftrightarrow e^{-\beta z} = e^{-\beta(z + \lambda_g)} \\ \Leftrightarrow \lambda_g = \frac{2\pi}{\beta}$$

Longueur d'onde guidée

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



# Longueur d'onde, vitesse de phase, vitesse de groupe, dispersion

**Vitesse de phase :** la vitesse des surfaces équiphasse.

Soit le champ électrique  $\vec{E}(t, z) = \vec{E}(x, y, z).e^{j(\omega t - \beta z)}$

En un certain point spatio-temporel  $(t+dt, z+dz)$  le champ  $E(t, z) = E(t+dt, z+dz)$

$$\Leftrightarrow \omega t - \beta z = \omega.(t + dt) - \beta.(z + dz)$$

$$\Leftrightarrow \omega.dt = \beta.dz$$

On définit la vitesse de phase par

$$v_{\phi} = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{\beta}$$

Vitesse de phase

$$v_{\phi} = \frac{\omega}{\beta}$$

La vitesse de phase peut être supérieure à c.

## Vitesse de groupe :

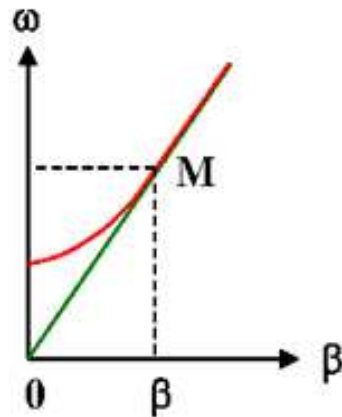
Cette notion correspond à un déplacement effectif d'énergie. La vitesse de groupe est la vitesse de déplacement de l'amplitude du signal qui est la vitesse de déplacement de l'énergie.

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial \beta}$$

# Longueur d'onde, vitesse de phase, vitesse de groupe, dispersion

## Diagramme de dispersion :

Le diagramme de dispersion est le diagramme  $(\omega, \beta)$ .



La relation  $\beta(\omega)$  dépend du guide d'onde considéré.

$$v_\phi = \frac{\omega}{\beta} \quad \text{est la pente de la droite OM}$$

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial \beta} \quad \text{est la tangente en M}$$

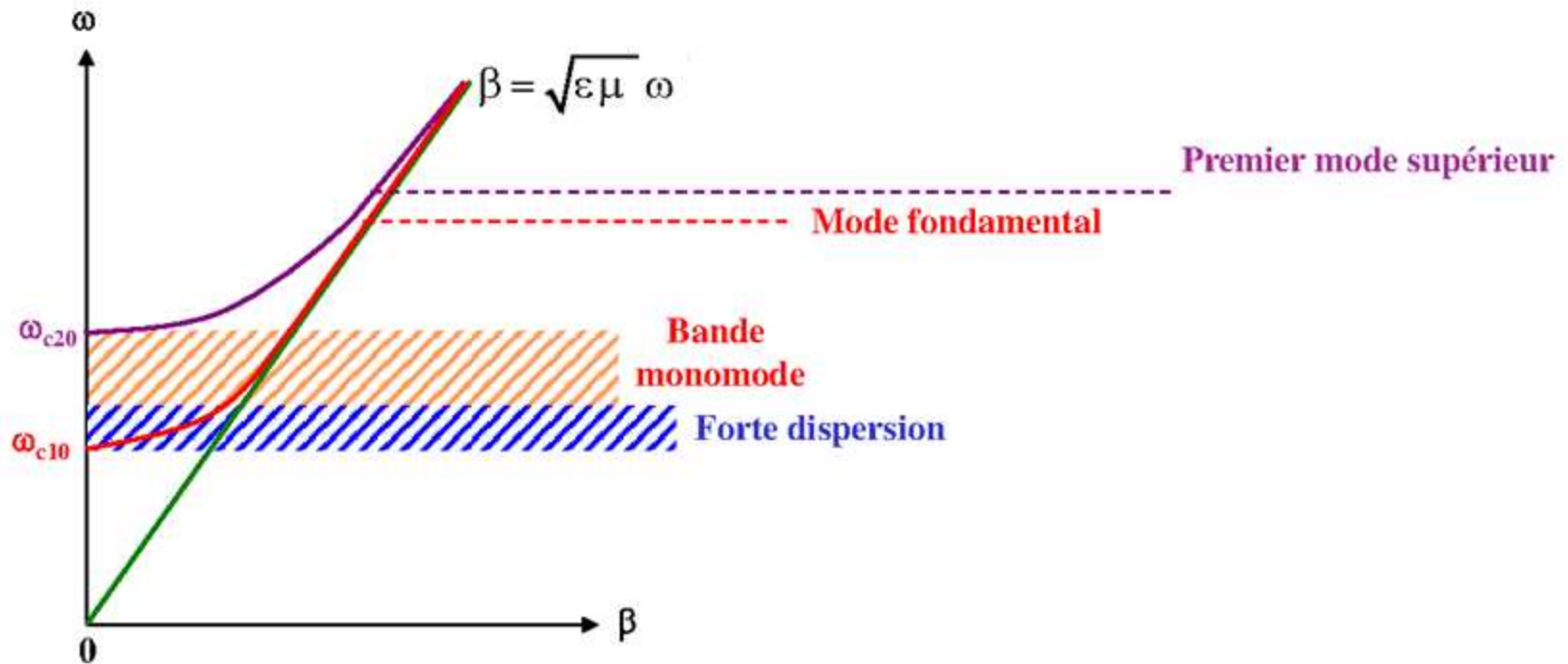
Un guide est dit dispersif lorsque  $\beta(\omega)$  est non linéaire

$v_g$  dépend alors de la fréquence et les différentes composantes du spectre se propagent dans le guide à des vitesses différentes. Le signal subit donc une distorsion au cours de sa propagation dans le guide.

- Dans un guide non TEM  $\beta(\omega)$  est non-linéaire, il est donc dispersif.
- Dans une ligne (guide TEM)  $\beta(\omega) = C^{te} \cdot \omega$ , une ligne n'est pas dispersive.

# Longueur d'onde, vitesse de phase, vitesse de groupe, dispersion

## Diagramme de dispersion :



# Rappel des conditions aux limites des champs

Les équations de Maxwell sont valables dans un milieu donné, or les structures guidantes comportent parfois plusieurs milieux et en général des parois. Pour étudier la propagation des ondes il faut tenir compte de ce qui se passe aux interfaces des milieux.

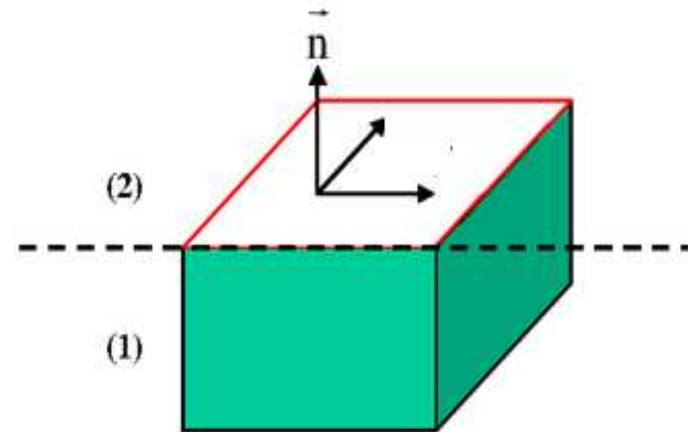
En appliquant les lois de Maxwell sur un contour et un volume infinitésimaux entourant un point situé à l'interface de deux milieux il vient :

$$\vec{n} \wedge (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0$$

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{J}_s$$

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_s$$

$$\vec{n} \cdot (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = 0$$



Ces relations impliquent la **continuité** des **composantes tangentielles de E** et des **composantes normales de H**

**Rque :** La continuité de la composante normale de D dépend de l'existence de  $\rho_s$ , celle de la composante tangentielle de H dépend de l'existence de  $J_s$ .

# Rappel des conditions aux limites des champs

---

Comportement de l'onde à l'interface diélectrique/conducteur:

## 1- Conditions de continuité

- Il y a continuité de la composante tangentielle de champ électrique  $E$ .

$$\vec{E}_{T_2} = \vec{E}_{T_1}$$

$\vec{E}_T$  désigne la projection de  $\vec{E}$  sur l'interface.

- Il y a continuité de la composante normale de champ magnétique  $H$ .

$$\vec{H}_{N_2} = \vec{H}_{N_1}$$

## 2- Conditions de discontinuité

- Il y a discontinuité de la composante normale de champ électrique  $E$  et de la composante tangentielle de  $H$ .

$$D_{N_2} - D_{N_1} = \rho_s$$

$$H_{T_2} - H_{T_1} = j_s$$

$D_N$ : induction électrique normale

$\rho_s$ : densité superficielle de charges

$j_s$ : densité superficielle de courant

# Equations de Maxwell

En résumé, les quatre équations de Maxwell *dynamiques* relient *localement* les divergences et rotationnels des champs électrique et magnétique aux champs électrique et magnétique eux-mêmes, ainsi qu'aux sources de charges et de courants statiques ou dynamiques:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\mu \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j} + \epsilon \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

(1) Maxwell-Gauss

(2) Maxwell flux magnétique

(3) Maxwell-Faraday

(4) Maxwell- Ampère

Sachant que:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$$

milieux

isotropes

$\vec{E}, \vec{H}$  dépendent de la position :  $\vec{E}(x, y, z), \vec{H}(x, y, z)$



# Equations de Maxwell

---

En l'absence de charge et courant :

$$\rho = 0$$

$$\vec{j} = \vec{0}$$

Les équations de maxwell dans le vide :

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (1) \quad \nabla \wedge \vec{E} = -\mu \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (3)$$

(1) Maxwell-Gauss

(2) Maxwell flux magnétique

(3) Maxwell-Faraday

(4) Maxwell- Ampère

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2) \quad \nabla \wedge \vec{H} = \varepsilon \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

# Equations de Maxwell en régime harmonique

$$\vec{E}(t) = \text{Re}(\vec{E} e^{j\omega t})$$

$$\vec{H}(t) = \text{Re}(\vec{H} e^{j\omega t})$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad \nabla \cdot \vec{E} = 0$$

$$\nabla \times \vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E} \quad \nabla \cdot \vec{H} = 0$$

Hypothèses:  $\vec{B} = \mu \vec{H}$   $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  milieux isotropes  
 $\vec{E}, \vec{H}$  dépendent de la position :  $\vec{E}(x, y, z), \vec{H}(x, y, z)$

si pas de pertes ( $\sigma = 0$ ):

Définition de variables:  $jk = j\omega\sqrt{\epsilon\mu}$   $k^2 = \omega^2 \cdot \epsilon \cdot \mu$

⇒ réécriture des équations de Maxwell

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \\ \nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} \end{cases}$$

# Equation de l'onde

En absence de charge et de courant (isolant/ diélectrique /vide):

$$\left\{ \begin{array}{ll} \nabla \times \vec{E} = -j.\omega.\mu.\vec{H} & \nabla \cdot \vec{E} = 0 \\ \nabla \times \vec{H} = j.\omega.\varepsilon.\vec{E} & \nabla \cdot \vec{H} = 0 \end{array} \right.$$

On peut obtenir les 2 équations suivantes

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{E} + \omega^2 .\varepsilon.\mu.\vec{E} &= 0 \\ \nabla^2 \vec{H} + \omega^2 .\varepsilon.\mu.\vec{H} &= 0 \end{aligned}$$

**Equation de l'onde  
(régime harmonique)**

## Rappels:

Laplacien vectoriel:  $\nabla^2 \vec{A} = \nabla.(\nabla.\vec{A}) - \nabla \times (\nabla \times \vec{A})$

Laplacien scalaire:  $\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}$

Si  $\nabla \cdot \vec{A} = 0$  alors  $\nabla^2 \vec{A} = -\nabla \times (\nabla \times \vec{A})$

# Rappel: operateur divergence et rotationnel

---

En coordonnées cartésienne  $(x, y, z)$ :

Soit

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix}$$

$$\nabla \cdot \vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

$$\nabla \times \vec{A} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \\ \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \\ \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \end{bmatrix}$$