



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

# OEM dans les conducteurs ohmiques



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

1

# Propriétés des conducteurs ohmiques

# Neutralité des conducteurs ohmiques



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

.....

.....

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

.....

.....

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

.....

Propagation  
guidée

.....

.....

.....

.....



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

.....

.....

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

.....

.....

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

.....

Propagation  
guidée

.....

.....

.....

.....

# Équations de Maxwell dans les « bons conducteurs » (et dans l'ARQS)



OEM dans les conducteurs ohmiques

.....  
.....

Propriétés des conducteurs ohmiques

.....  
.....

Réflexion d'une OEM sur un métal

.....

Propagation guidée

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

# Propagation des OEM dans les conducteurs ?



OEM dans les conducteurs ohmiques

.....

.....

Propriétés des conducteurs ohmiques

.....

.....

Réflexion d'une OEM sur un métal

.....

Propagation guidée

.....

.....

.....

.....

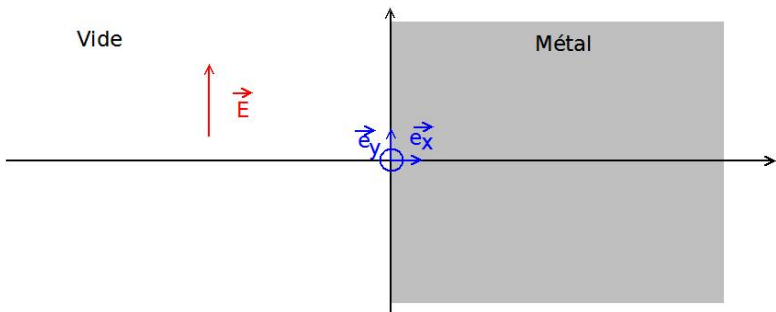
# Effet de peau

OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée



$$\vec{E}_i(x < 0, t) = E_0 \cos(\omega t - k_0 x) \vec{e}_y$$

On cherche alors un champ  $\vec{E}$  dans le métal de la forme

$$\vec{E}(x > 0, t) = E_0 \exp[j(\omega t - \underline{k}x + \varphi)] \vec{e}_y$$



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....





OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

# Commentaires



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

Pour un métal, conducteur ohmique,  $\vec{j} = \gamma \vec{E}$ , les courants sont donc localisés en surface.

En particulier l'épaisseur de peau diminue quand la fréquence du champ électromagnétique augmente. Quelques ordres de grandeur pour le cuivre :

▶  $f = 50 \text{ Hz} \rightarrow \delta \sim \dots\dots\dots$

▶  $f = 50 \text{ MHz} \rightarrow \delta \sim \dots\dots\dots$

$\Rightarrow$

.....  
.....

# Modèle du conducteur parfait



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

.....  
.....

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

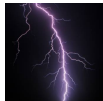
.....  
.....

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

.....

Propagation  
guidée

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



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

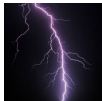
Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

2

Réflexion d'une OEM sur un métal



## Relations de passage

Traduction des relations de Maxwell au niveau d'un dioptre :

$$\vec{E}_2 - \vec{E}_1 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \vec{n}_{1-2}$$

$$\vec{B}_2 - \vec{B}_1 = \mu_0 \vec{j}_s \wedge \vec{n}_{1-2}$$

On peut décliner ces relations pour les composantes normale et tangentielle :

.....

.....

.....

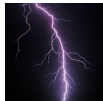
.....

OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée



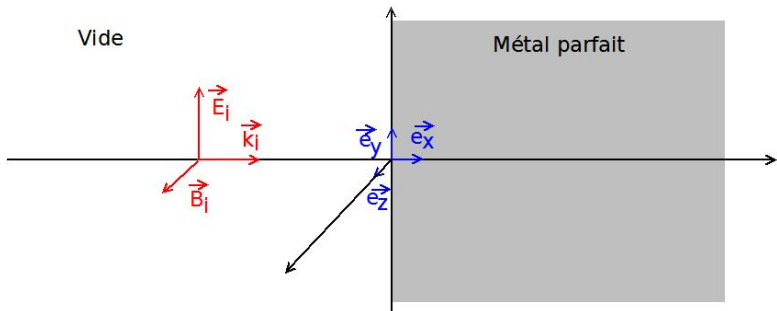
## Réflexion d'une OEM sur un conducteur parfait

OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée



Champ électrique incident :  $\vec{E}_i(x, t) = E_0 \cos(\omega t - k_0 x) \vec{e}_y$

Justifier qu'il existe nécessairement une onde réfléchie

.....

.....

# Expression du champ électrique



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

.....  
.....

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

.....  
.....

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

.....  
.....

Propagation  
guidée

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





OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

# Expression du champ magnétique



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

.....  
.....

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

.....  
.....

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

.....

Propagation  
guidée

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

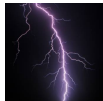


**OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques**

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

**Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal**

Propagation  
guidée



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

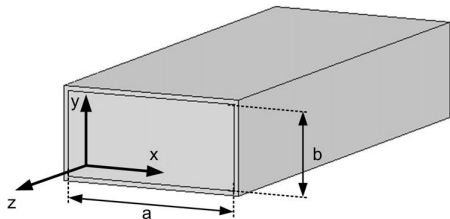
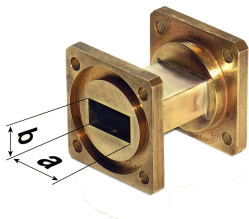
3

Propagation guidée

# Guide d'onde

On considère un guide d'onde constitué d'une cavité métallique creuse, d'axe ( $Oz$ ), et dont la section droite est le rectangle  $\{0 \leq x \leq a; 0 \leq y \leq b\}$ .

L'intérieur du guide est rempli d'air assimilé à du vide. On adopte pour les parois le modèle du conducteur parfait. Dans ces conditions les champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont nuls dans le métal.



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée



## Forme du champ électrique

Justifier que la composante tangentielle du champ électrique et la composante normale du champ magnétique dans le vide doivent s'annuler au niveau des parois.

.....

.....

.....

Il n'est pas possible d'envisager un champ électrique sous la forme d'une onde plane dans la cavité spatialement limitée par  $a$  et  $b$   
On cherche alors en notation complexe un champ électrique de la forme :

$$\underline{\vec{E}} = A(x, y) \exp[j(\omega t - kz)] \vec{u}_y$$

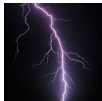
OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée





Montrer que  $A(x, y)$  ne dépend pas de  $y$  et que  $A(x \in \{0, a\}) = 0$

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

# De l'équation de propagation à l'équation de dispersion



OEM dans les conducteurs ohmiques

Propriétés des conducteurs ohmiques

Réflexion d'une OEM sur un métal

Propagation guidée

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



# Vitesse de phase

OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

.....  
.....

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

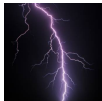
.....  
.....

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

.....  
.....

Propagation  
guidée

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



# Vitesse de groupe

OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

.....  
.....

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

.....  
.....

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

.....  
.....

Propagation  
guidée

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



# Synthèse :

OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée





# Expressions des modes propres des champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$

OEM dans les conducteurs ohmiques

.....  
.....

Propriétés des conducteurs ohmiques

.....  
.....

Réflexion d'une OEM sur un métal

.....  
.....

Propagation guidée

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



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

# Puissance moyenne transportée par l'OEM

OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

.....  
.....

.....  
.....

.....  
.....

.....  
.....

.....



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



# Vitesse d'énergie

OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

.....  
.....

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

.....  
.....

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

.....  
.....

Propagation  
guidée

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



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



OEM dans  
les  
conducteurs  
ohmiques

Propriétés  
des  
conducteurs  
ohmiques

Réflexion  
d'une OEM  
sur un métal

Propagation  
guidée

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....