



## ***Des fentes et leurs effets sur la CEM***

---

**Les fentes apparaissent partout dans les dispositifs électroniques.**

On va expliquer où elles se rencontrent et comment maîtriser leurs effets sur la CEM.

Elles apparaissent par exemple naturellement dès qu'il y a des parties amovibles ou mobiles comme des portes dans une armoire métallique. Ces fentes, entre les points de fixation, agissent comme des antennes.

Les fentes sont un des objets de la CEM qui peuvent être entièrement décrits par la théorie, qui sont facilement mesurables et dont les effets peuvent être facilement contrôlés.

**Ce qui n'est pas le cas des chemins de couplage des perturbations en mode commun comme par exemple ceux des transformateurs.**

**Les fentes sont intentionnellement utilisées comme antennes dans les téléphones portables ; ce sera l'objet d'un autre article.**



## Un peu de théorie

---

**Ci-dessous quelques notions sur les sources de champs électromagnétiques et le concept d'inductance.**

1) Une fente n'est **active** du point de vue CEM que si elle **coupe du courant**.

En arrivant sur la fente, les lignes de courant sont déviées et se **concentrent** sur les deux extrémités de la fente, ce qui produit un champ électromagnétique local.

Il y a un effet d'antenne en champ magnétique.

Les lignes de champ obtenues ressemblent à celles d'une ligne bifilaire excitée par un courant de mode commun.

2) Le coefficient d'accumulation du champ magnétique par unité de volume est **l'inductance L**.

Cette inductance L crée une impédance Z et une chute de tension inductive V

Loi de Lenz-Faraday

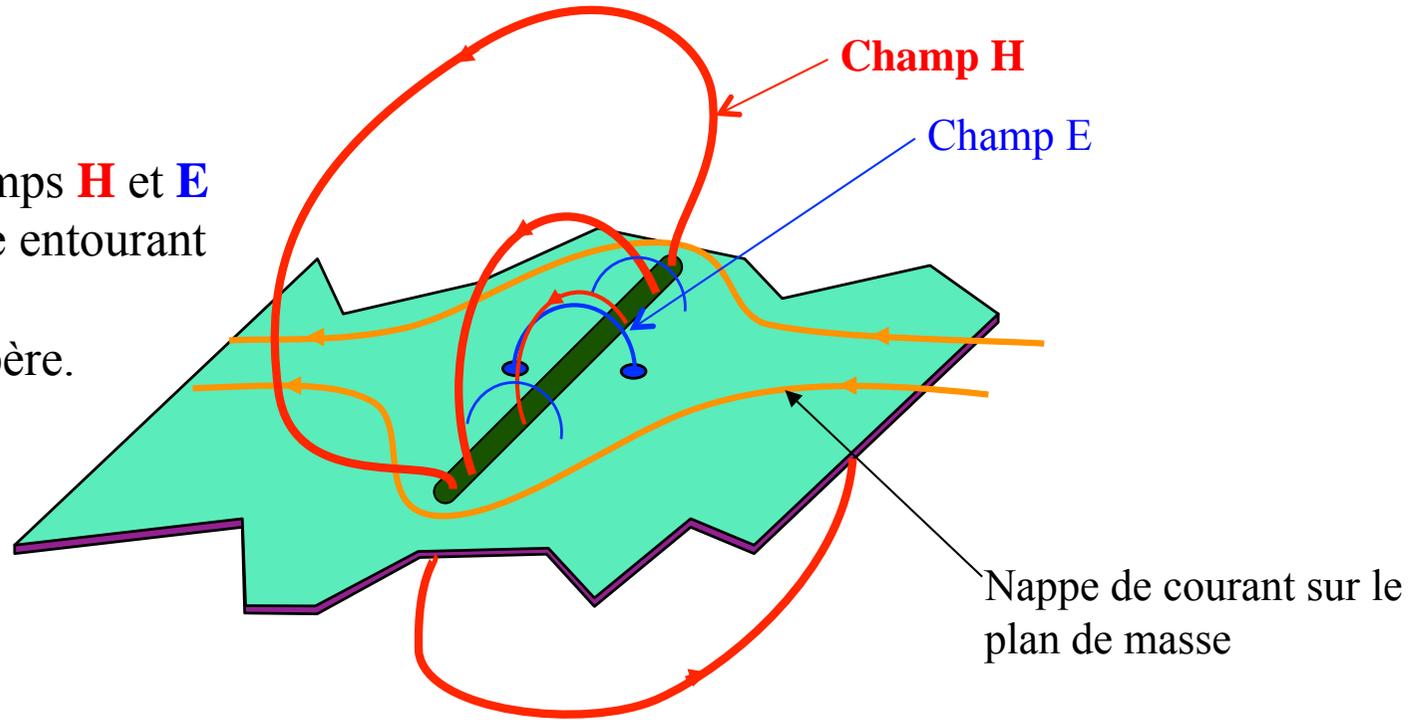
- $Z = 2.\pi.F .L$  en régime harmonique à la fréquence F ;  $V = Z*I$
- $V = -L. dI / dt$  en impulsionnel

3) Ces impédances perturbent l'équipotentialité des 0V lors des échanges de signaux rapides



# Création de champs par une fente coupant du courant

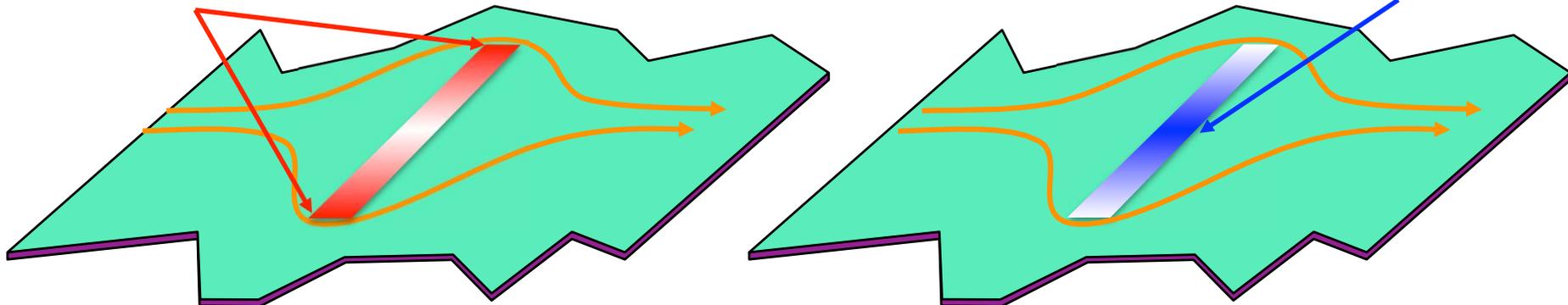
Lignes de champs **H** et **E**  
dans le volume entourant  
la fente.  
Cf. Loi d'Ampère.



**Champ H maximal  
aux extrémités**

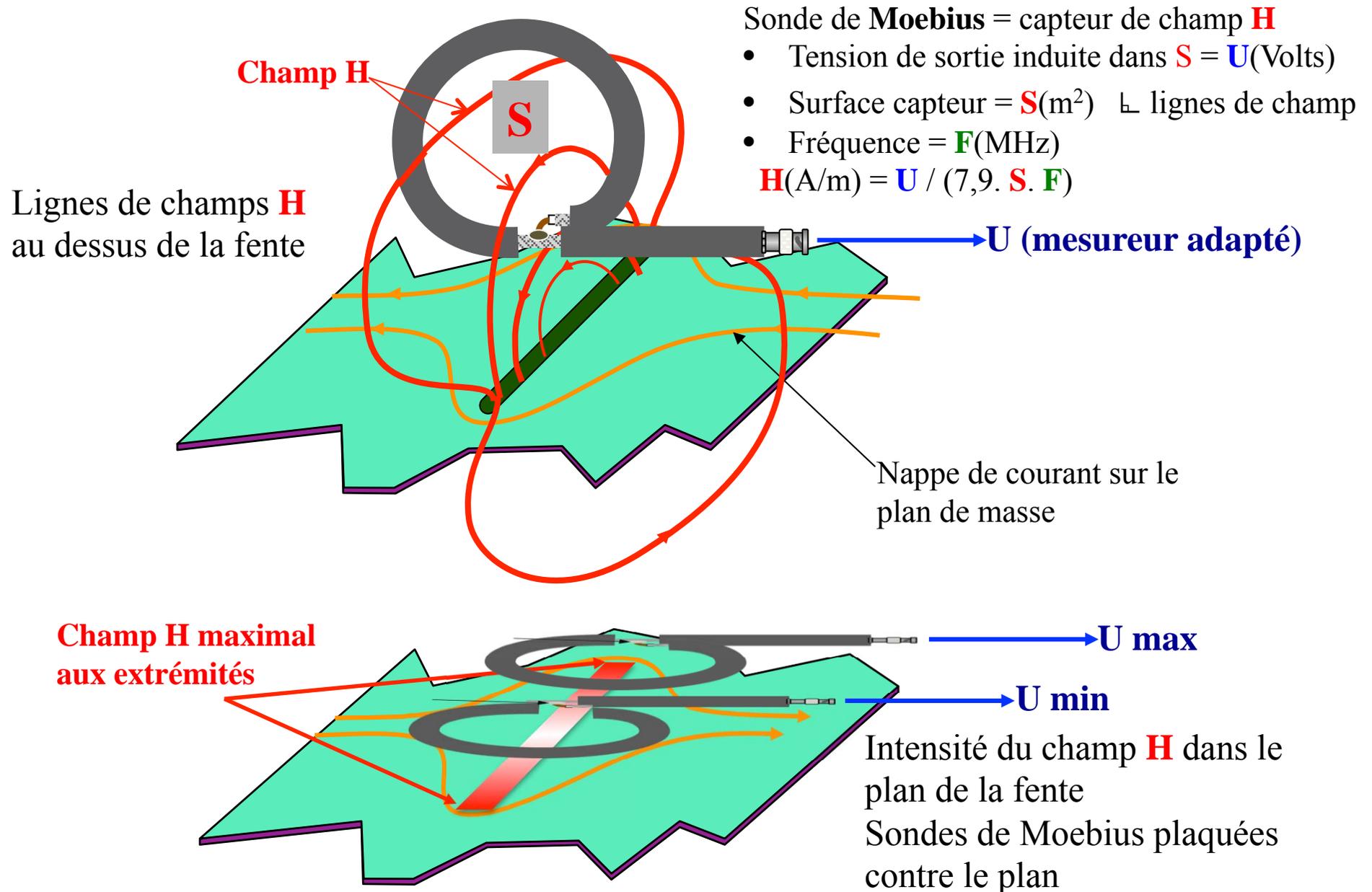
Intensité des champs **H** et **E** dans le plan de la fente

**Champ E maximal  
au centre**





## Mesure du champ H rayonné par une fente





## ***Création de selfs parasites par les fentes : ordres de grandeur***

**Un plan de masse tendant vers l'infini a une résistance nulle et une inductance nulle.**

Cela permet d'assurer les équipotentialités du continu aux hyperfréquences dans les plans de masse servant de 0V de référence.

Cet effet favorable est contré en pratique par l'effet de peau qui crq,t en fonction de  $\sqrt{\text{Fréquence}}$ .

L'effet de peau concentre le courant juste sous la surface du conducteur dans une épaisseur dite épaisseur de peau : **épaisseur de peau pour le cuivre =  $66 \mu / \sqrt{\text{Fréquence (MHz)}}$**

Donc, au delà d'une certaine fréquence, il est inutile d'avoir des conducteurs épais.

**$Z(\mu\Omega) / \text{carré par effet de peau dans un plan de masse en cuivre} = 370 \cdot \sqrt{\text{Fréquence (MHz)}}$**

Un plan de cuivre carré en  $35 \mu$  a une impédance de  **$4 \text{ m}\Omega$  à  $100 \text{ MHz}$**  pour une épaisseur de peau de  $6,6 \mu$ .

Par exemple, un plan de masse de forme carrée de côté  $l$  a une self vers  $100 \text{ MHz}$  qui est  **$10\,000$**  fois plus faible que celle d'un fil de longueur  $l$ .

- Ordre de grandeur de la self linéique  $L_1 \approx 1 \mu\text{H} / \text{m}$  ou  $10 \text{ nH} / \text{cm}$  ou  $1 \text{ nH} / \text{mm}$
- Impédance linéique ( $\Omega$ ) d'un fil =  $2 \cdot \pi \cdot F(\text{Hz}) \cdot L_1(\text{H}) \approx 2 \cdot \pi \cdot F(\text{MHz}) \cdot \text{Longueur}(\text{m})$
- Un fil de  $10 \text{ cm}$  de longueur a une self de l'ordre de  $0,1 \mu\text{H}$  et une impédance de  $60 \text{ Ohm}$  à  $100 \text{ MHz}$ .

**La concentration des lignes de courant aux deux extrémités de la fente provoque une accumulation d'énergie magnétique et produit de la self.**

Self inductance  $\approx 1 \text{ nH} / \text{par cm}$  de longueur de fente.

Le plan de masse avec une petite fente de  $1 \text{ cm}$  est pénalisé par  $L \approx 1 \text{ nH}$  ; l'impédance résultante à  $100 \text{ MHz}$  passe de  $4 \text{ m}\Omega$  à  **$600 \text{ m}\Omega$  soit une augmentation d'impédance de plus de 100.**

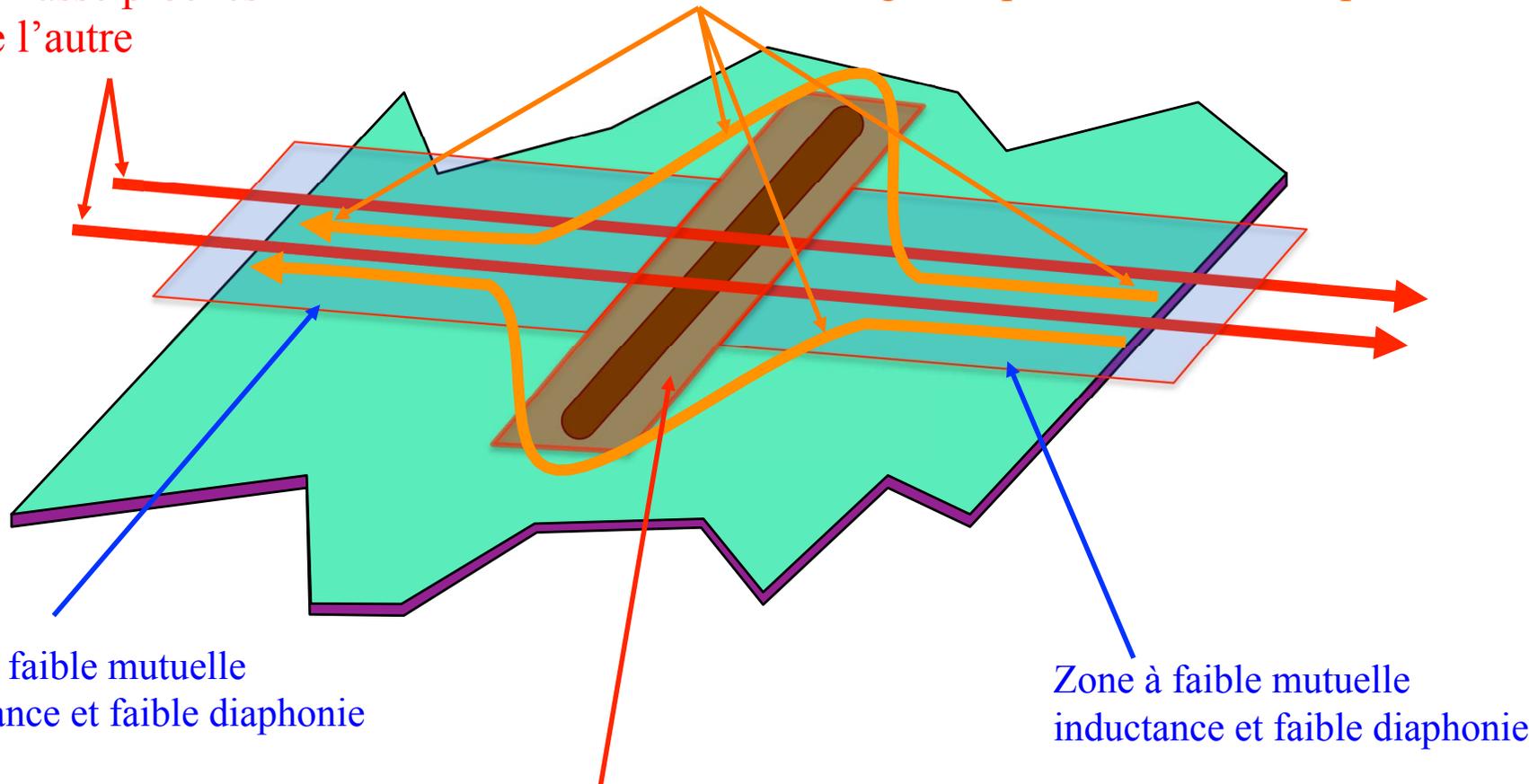
**-Attention** : Si la fente se prolonge jusqu'au bord du plan conducteur, la self linéique augmente encore et atteint  **$4 \text{ nH} / \text{par cm}$**  de longueur de fente.



## Augmentation de diaphonie par une fente

Lignes de transmission microstrip au dessus d'un plan de masse proches l'une de l'autre

Courant de retour = image des pistes aller dans le plan de masse



Zone à faible mutuelle inductance et faible diaphonie

Zone à faible mutuelle inductance et faible diaphonie

Zone à forte diaphonie à cause des inductances communes rajoutées par la fente dans le plan de retour



# Simulation du rayonnement d'une fente dans Java Falstad

Applet Java Electromagnétisme en 2D Transverse Electrique (<http://www.falstad.com/emwave1/>)

Boîte en mode cavité résonante sans effet de variation de champ en  $1/d$  avec dimensions  $> \lambda/2$

Boîte = Métal parfaitement conducteur

Source = Dipôle  $\lambda/2$

Fente = source secondaire d'ondes sphériques avec effet de diminution de champ en  $1/d$  ( $d > \lambda/6$ )

Simulation Speed  
Resolution  
Source Frequency  
Brightness  
E Field Brightness  
Line Density

- Champ électrique  $E$  = Flèches blanches
- Induction  $B$  magnétique =  $\mu.H$
- Colorations **rouges** et **vertes**
- Charges électriques = Sources aux extrémités du dipôle
- Densité de courant dans l'antenne et les parois de la boîte = Flèches jaunes.
- l'unité de longueur =  $\lambda$



# Champ électromagnétique proche en 3D observé avec 4NEC2X

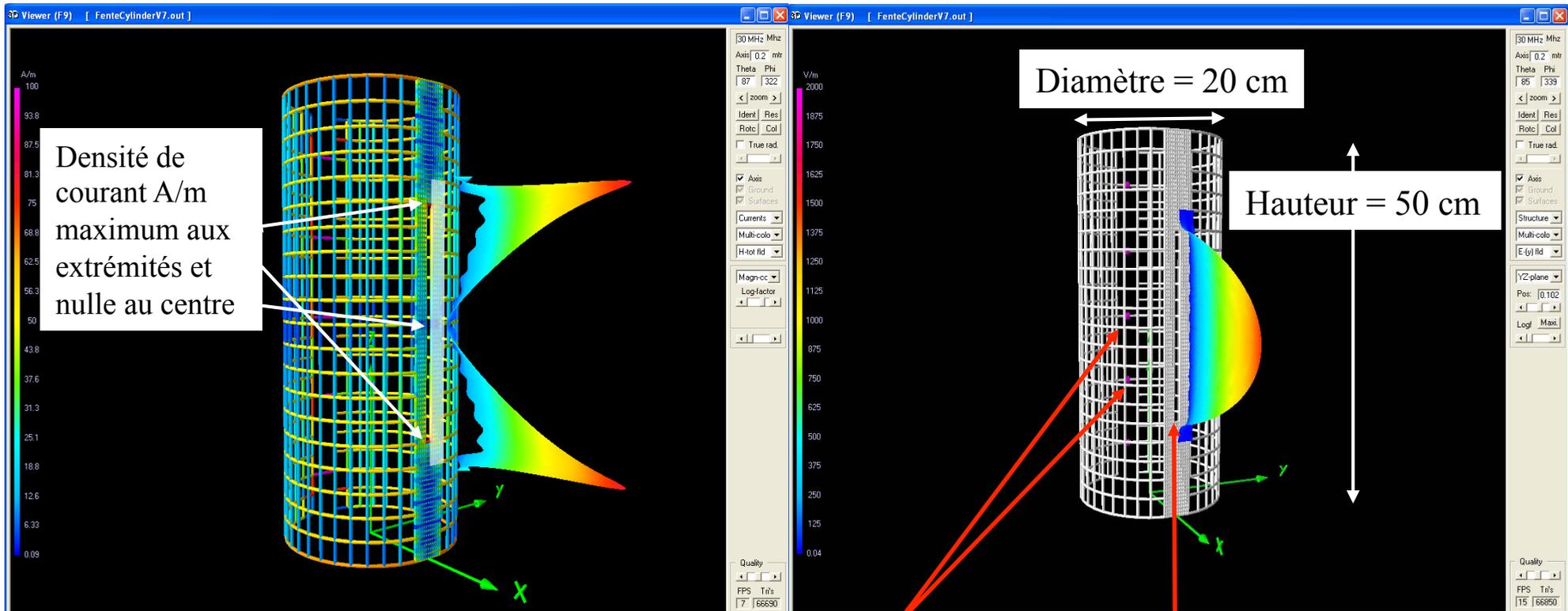
**Simulation des composantes E et H rayonnées par une fente coupant un cylindre parcouru par des nappes de courant à 30 MHz.**

Logiciel libre 4NEC2X (3D FullWave) utilisant la méthode des moments en champs proches. (Near Field)  
Modèle construit en «grillage» densifié autour de la fente.

En champ proche, ou en champ électromagnétique non formé, E et H sont découplés et le vecteur de Poynting  $\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$  ne transporte pas d'énergie : Champs réactifs.

Champ magnétique **H** (A/m) **dans** la fente  
Maximum aux extrémités et nul au centre

Champ électrique **E** (V/m) **dans** la fente  
Nul aux extrémités et maximum au centre



Excitation par 5 sources de courant d'un plan déformé en cylindre Fente



## **Application : Repérer les fentes critiques dans les blindages**

Pour identifier une fente critique, il faut rechercher les endroits où il y a des courants HF susceptibles d'être coupés.

- **Fentes dans les faradisations**



Les fentes dans les faradisations se repèrent par les moyens simples suivants :

- 1) En essayant d'y insérer une carte de visite
- 2) En essayant de recevoir la radiodiffusion FM vers 100 MHz ou de détecter la présence de réseau de téléphonie portable ou de bornes Wifi proches
- 3) En cherchant les fuites de la lumière émise par une lampe baladeuse installée dans le blindage



## **Application : Repérer les fentes critiques dans les P.C.B.**

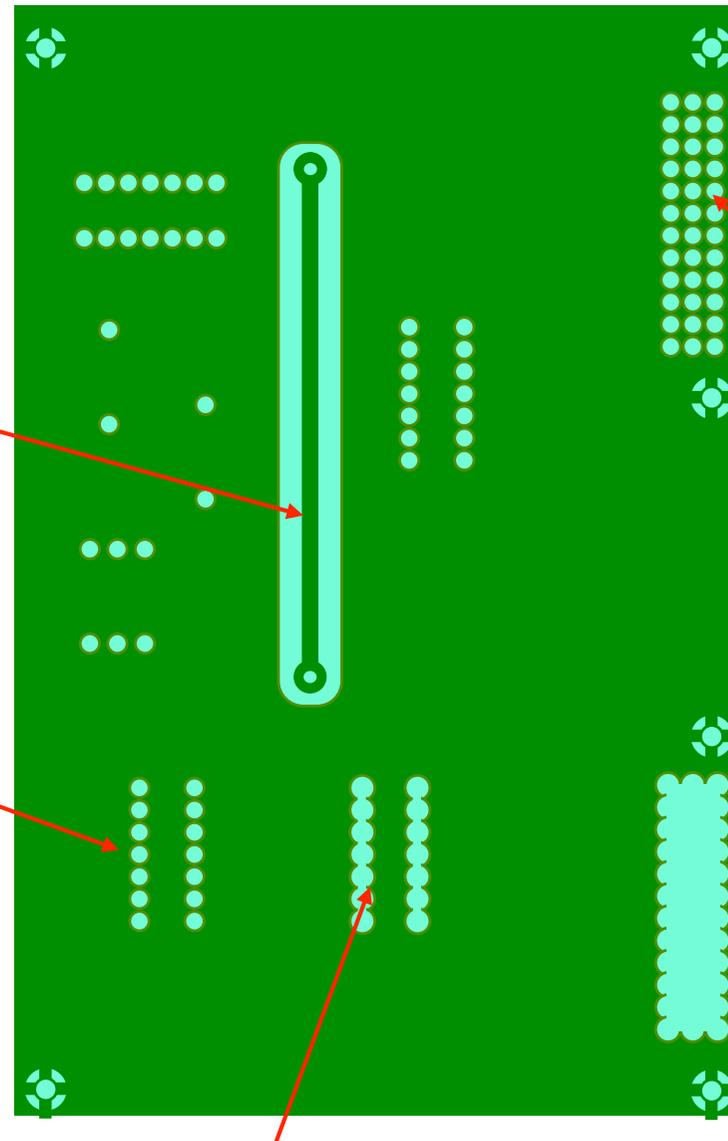
Pour identifier une fente critique, il faut rechercher les endroits où il y a des courants HF susceptibles d'être coupés.

- Fentes dans les circuits imprimés

**Fente créée pour  
Rajouter une piste**

**Pas de fente**

**Attention aux composants traversants  
La criticité d'une fente augmente avec  
la longueur de la fente et la densité de  
courant coupée**



**Pas de fente**

**Fente pour  
un connecteur**

**Fente pour un circuit intégré DIL**

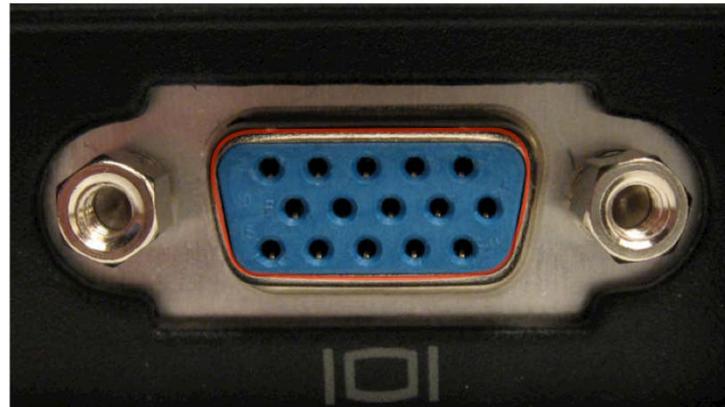


## Application : Repérer les fentes critiques dans les connecteurs

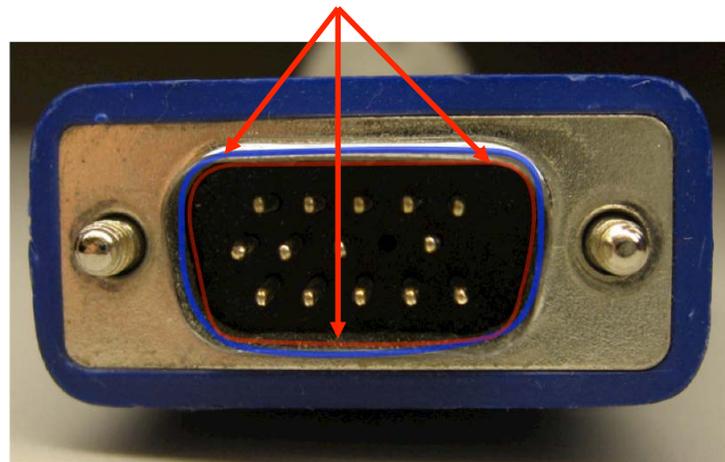
Pour identifier une fente critique, il faut rechercher les endroits où il y a des courants HF susceptibles d'être coupés.

- Fentes dans les connecteurs

Exemple de connecteur de câble VGA sans **indentation**



Zone de contacts non définie ; fentes aléatoires

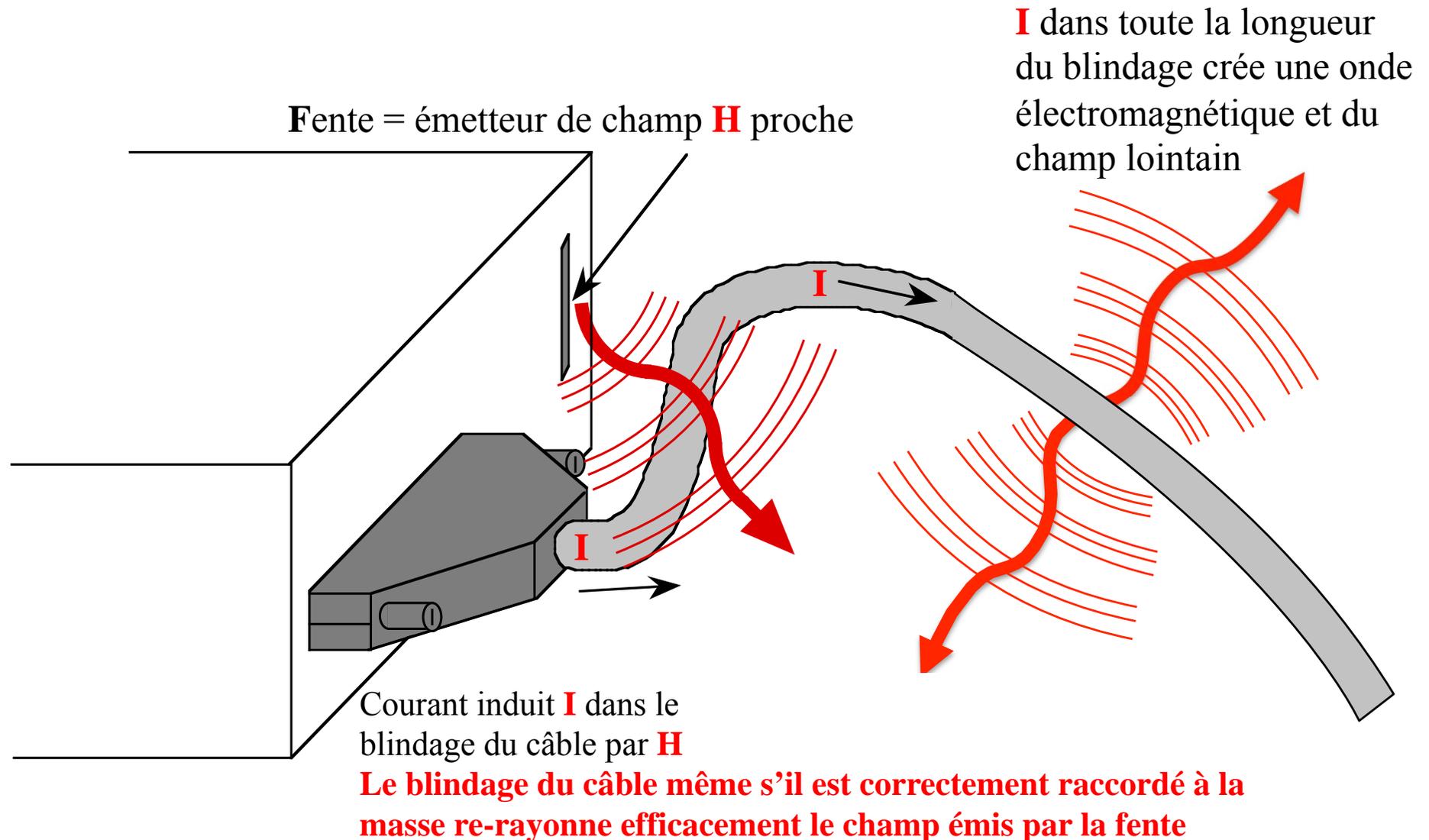


Jeu nécessaire pour l'insertion



## Application : Repérer les fentes proches de câbles

Une fente peut être critique si son rayonnement est capté par un conducteur de grande dimension. Les courants induits transforment à leur tour ce conducteur en antenne plus efficace que la fente.





## Remèdes : les principes

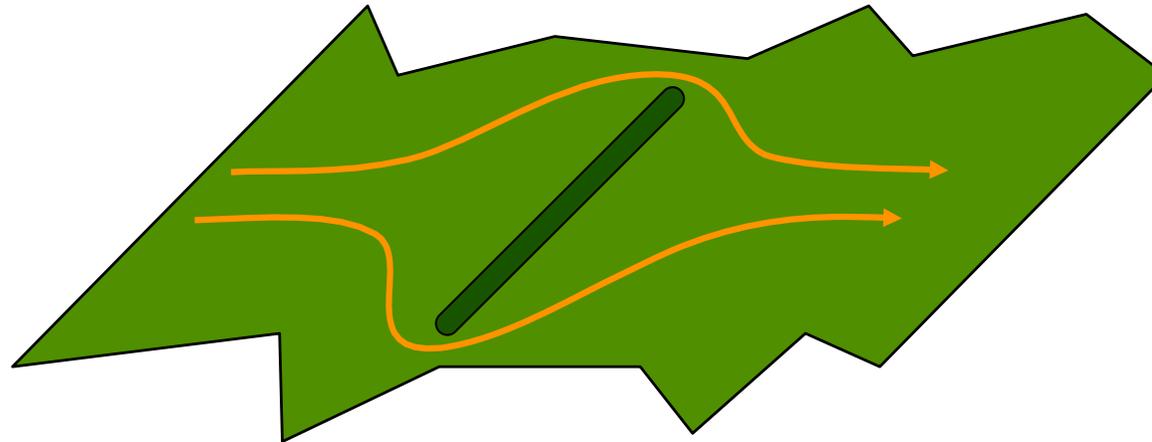
---

1. Agir sur la source : les lignes de courant : Ré-orienter les fentes de façon à ce qu'elles ne coupent pas de courant.
2. Diviser les fentes : Utilisation de joints de blindage qui coupent les fentes ; beaucoup de petites fentes rayonnent moins qu'une grande.  
Les formes en nids d'abeilles sont optimales pour la ventilation.  
Pour les parties fixes, rajouter des vis, des cordons de soudure.
3. Recouvrir les fentes avec un écran et profiter de l'effet de chicane
4. Eloigner les conducteurs filiformes de grande dimensions quels qu'ils soient des fentes excitées. Commencer par les câbles blindés et boucher les fentes liées aux connecteurs.
5. Augmenter l'épaisseur de la fente et la transformer en un guide d'ondes sous-coupure qui a un affaiblissement linéique.

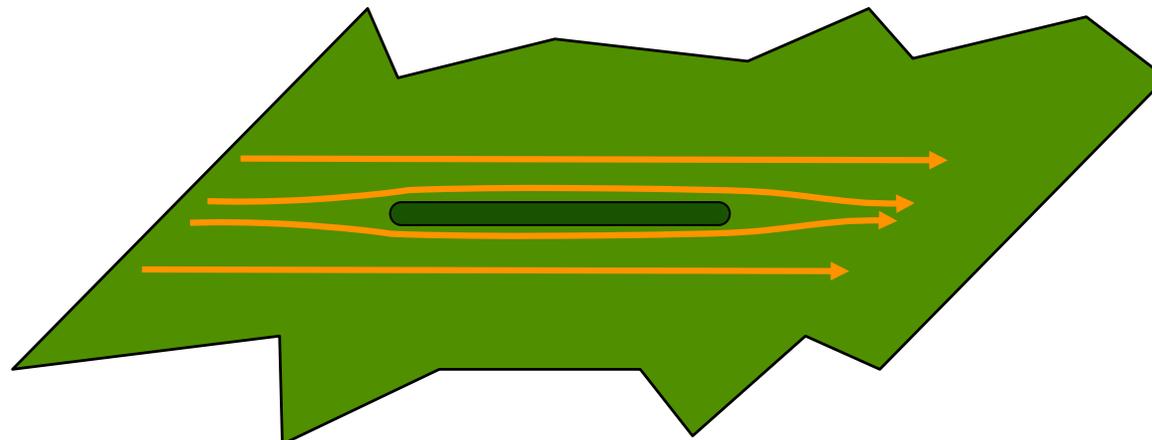


## Réduction des fuites d'une fente par réorientation

Effet de rayonnement maximum lorsque la fente est perpendiculaire aux lignes de courant



Effet de rayonnement minimum lorsque la fente est alignée avec les lignes de courant





## Réduction des fuites d'une fente par contacts

Le principe est de diviser la fente en sections de faible longueur grâce à des court-circuits enjambant la fente. Une fente dans un plan infini agit comme un réflecteur électromagnétique avec  $E_r$  (dB) qui est d'autant plus efficace que la fréquence  $F$  est faible et la longueur de la fente  $L$  petite. Il faut des fentes résiduelles les plus courtes possible.

$$E_{r(dB)} = 20 \cdot \log \left( \frac{150\,000}{L_{(mm)} \cdot F_{(MHz)}} \right)$$

Une fente de forme carrée est transparente aux ondes électromagnétiques si sa longueur  $L = \lambda / 2$

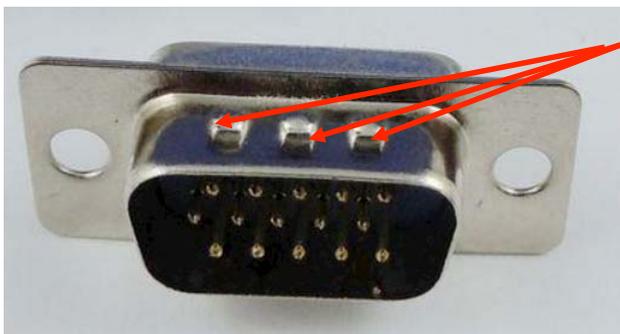
Dans le commerce, on trouve tous types de joints de blindage qui se distinguent tant par les matériaux utilisés que par leurs formes.

Il n'existe pas de matériau répondant à toutes les exigences notamment en terme de tenue climatique et de couple électrochimique (Corrosion par effet de pile entre métaux différents en présence d'humidité).

Une bonne précaution est de compléter le joint électromagnétique par un **joint climatique** placé coté extérieur.

L'efficacité de blindage maximale est obtenue avec une faible résistance de contact et une grande densité de contacts linéaire. Exemple des joints en bronze Béryllium sur dormants en laiton pour les cages de Faraday avec une efficacité qui peut atteindre 120 dB jusqu'à 10 GHz.

**Indentations** sur une embase à monter sur châssis pour connecteur vidéo VGA



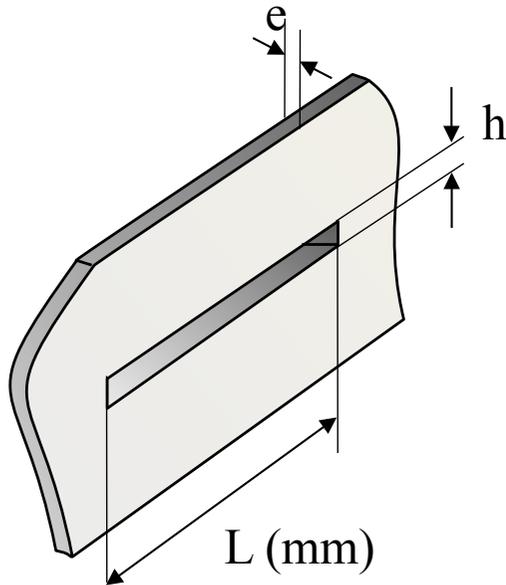
Indentations coupant les fentes



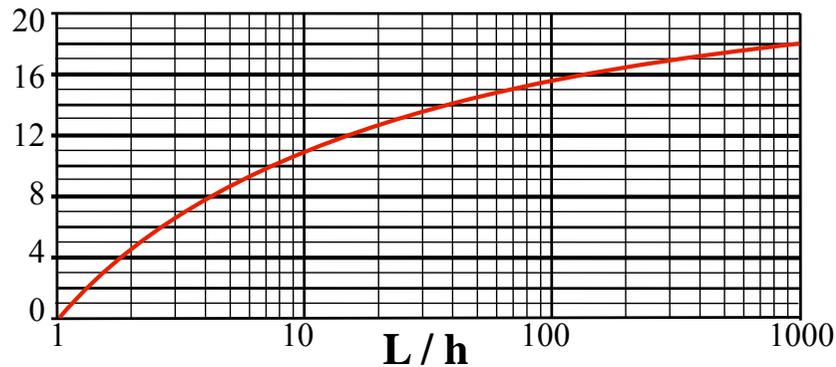


## Réduction des fuites par facteur de minceur et chicane

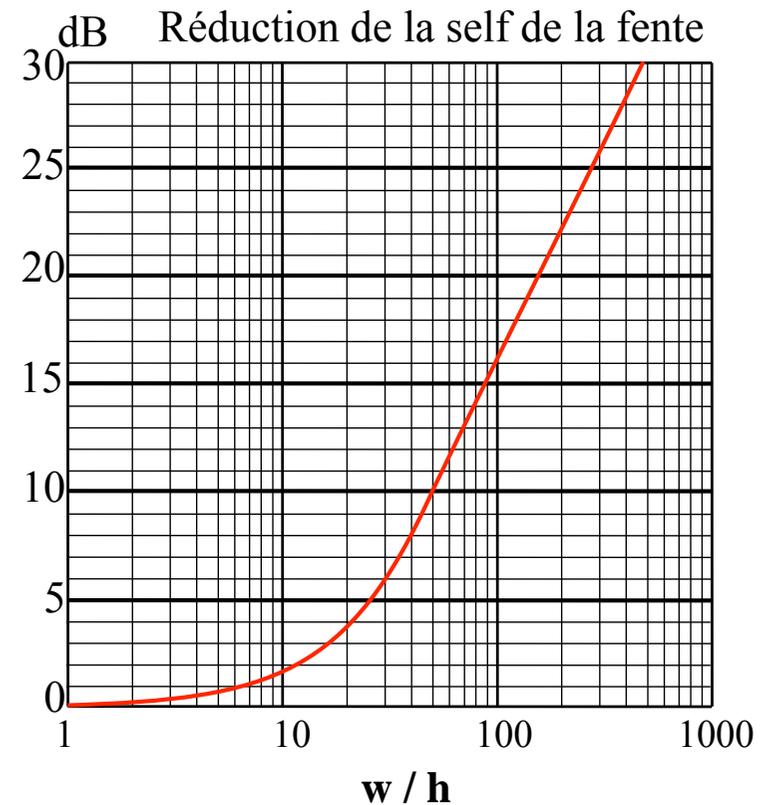
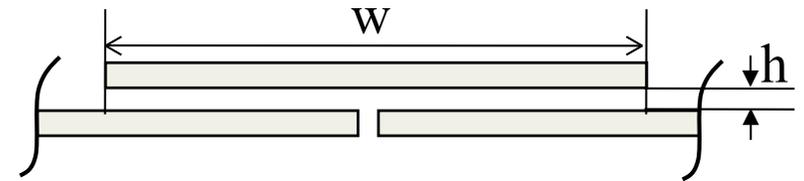
Lorsque l'on tient compte du rapport Longueur  $L$  / hauteur  $h$  d'une fente, il apparaît un facteur de minceur qui réduit sa fuite électromagnétique jusqu'à 20 dB au maximum.



$F_m$  = facteur de minceur fonction de  $L / h$



Si une fente est recouverte par une plaque de largeur  $w$  placée à une hauteur  $h$ , on obtient un effet de chicane qui court-circuite à distance la fente.

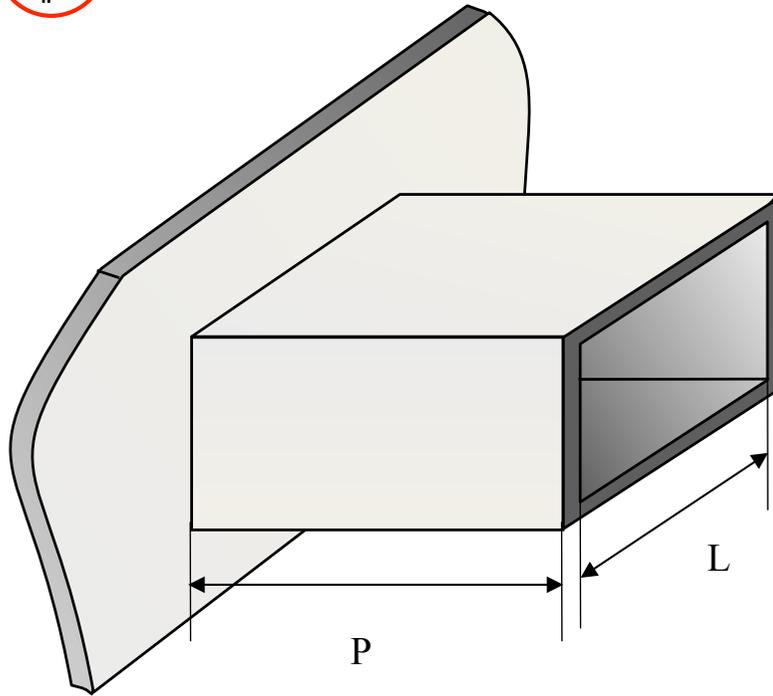




## Réduction des fuites d'une fente par effet de guide d'ondes

On peut réduire **sans limitation** la fuite d'une fente en la transformant en un guide d'onde **évanescents**.

On ajoute à l'effet de réflexion  $E_r$  de la fente un terme d'absorption  $A_b$  proportionnel à l'épaisseur  $P$ .



Grille d'aération de cage de Faraday du type nid d'abeille  
Application des principes précédents : réduction de la largeur des fentes et augmentation de leur épaisseur.  $E = 130 \text{ dB} @ 10 \text{ MHz}$



$$E \text{ (dB)} = E_r \text{ (dB)} + A_b \text{ (dB)}$$

$E_r \text{ (dB)}$  : Pertes par réflexion

$$E_r = 20 \cdot \log \left( \frac{150\,000}{L \cdot F \text{ (MHz)}} \right)$$

$A_b \text{ (dB)}$  : Pertes par absorption

$$A_b \text{ (dB)} = 27,2 \cdot \frac{P}{L} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{F}{F_c} \right)^2}$$

Conditions :

- $P > 0,3 L$
- $F < F_c$  (Guide en dessous de  $F_{\text{coupure}}$ )
  
- $L$  = plus grande dimension de l'ouverture (en mm)
- $P$  = profondeur de l'ouverture guide (en mm)
- $F$  = fréquence en MHz
- $F_c$  = fréquence de coupure en MHz =  $150 \cdot 10^3 / L$



## Guide d'onde ouvert = blindage efficace à basses fréquences

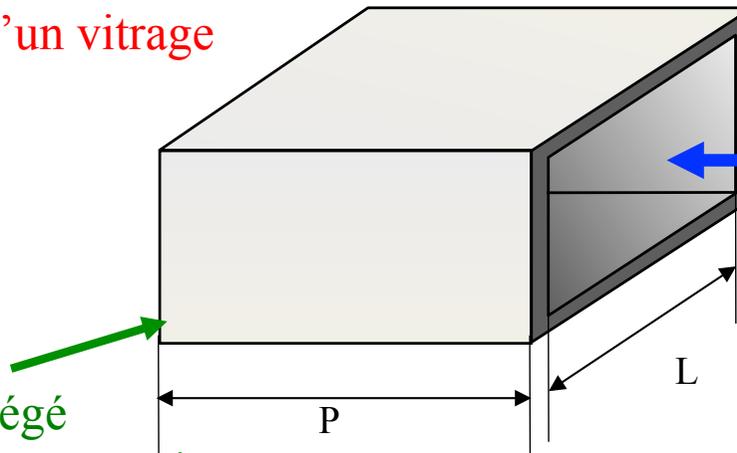
$$Ab(\text{dB}) = 27,2 \cdot \frac{P}{L} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{F}{F_c}\right)^2}$$

### Principe de fonctionnement :

Le coffret ouvert agit comme un **guide d'ondes évanescent** apportant un affaiblissement  $Ab$  pour toutes les fréquences  $< F_c$

Coffret ouvert ou  
-équipé d'une porte sans joint  
-équipé d'un vitrage

Côté protégé  
accueillant un équipement  
susceptible ou perturbateur



Onde électromagnétique externe  
Fréquence  $F$  ; niveau  $E_{\text{ext}}$   
agressant un équipement susceptible  
placé au fond d'un coffret

### Exemple numérique

#### Proximité d'une Installation I.S.M.

- $F = 27 \text{ MHz}$

- $E_{\text{ext}} = 100 \text{ V/m}$

Carte à protéger au format :

100 mm x 150 mm

- $L = 150 \text{ mm}$

On veut réduire  $E$  au niveau de la carte  
à  $E_{\text{int}} = 3 \text{ V/m}$

$Ab(\text{dB})_{\text{min}} = 20 \cdot \log(100/3) = 30,5 \text{ dB}$

$F_c = 150 \cdot 10^3 / 150 = 1000 \text{ MHz}$

$F \ll F_c$  : guide évanescent OK

$P_{\text{min}} = (A \cdot L) / 27,2 = (30,5 \cdot 150) / 27,2$

**P minimum = 168 mm ( $> 0,3L$ )**