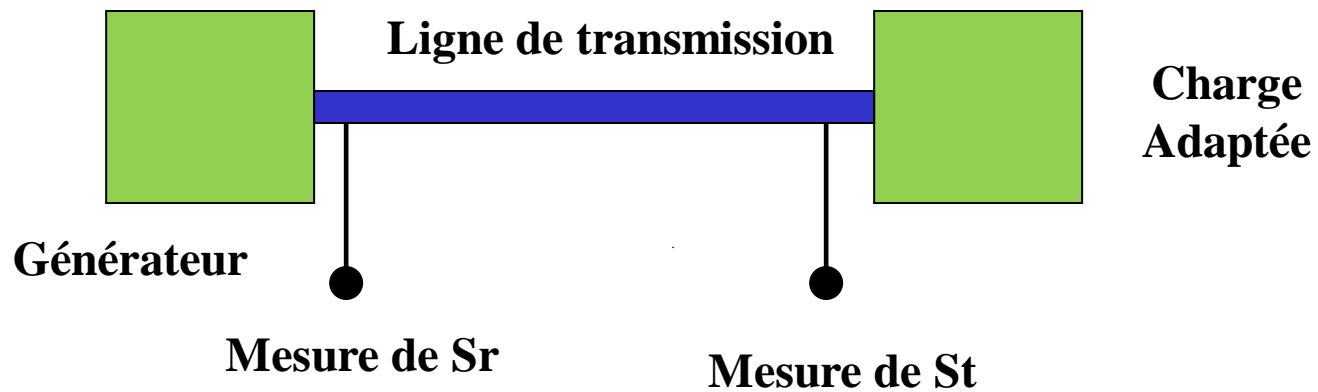


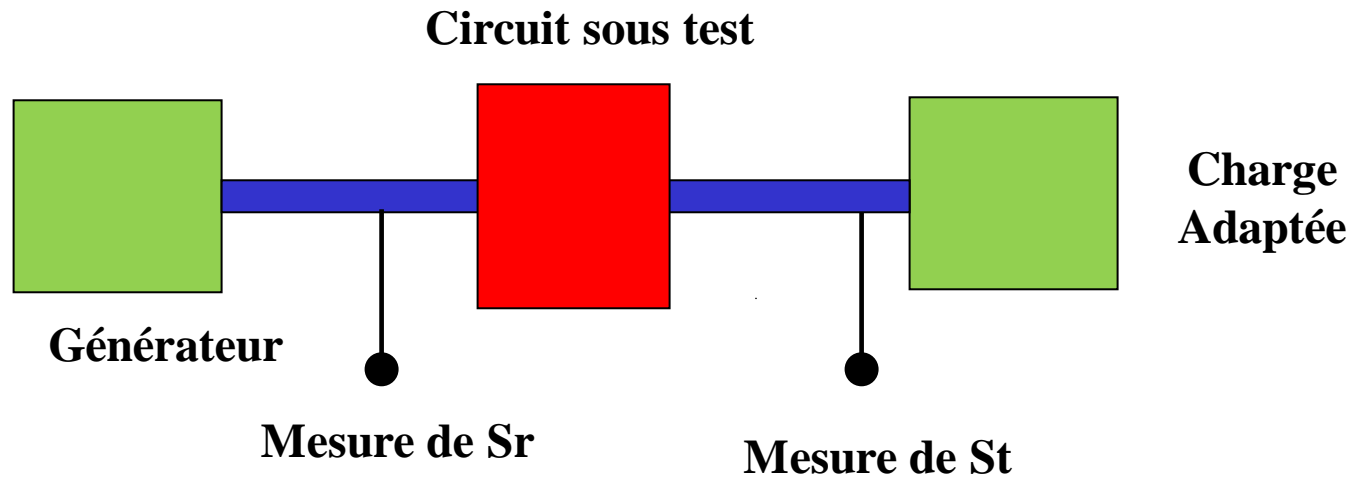
# Cours CEM : Plan

- 1 – Introduction: la problématique CEM à travers l'exemple**
  - Exemples de problématiques CEM
- 2 – Techniques de mesure & de simulation en CEM**
  - **Mesures en temporel – mesures en CRBM**
  - Méthodes numériques pour la CEM
- 3 – Perturbateurs et Couplages**
  - les principaux perturbateurs
  - les différents modes de couplage
- 4 – Evaluation de niveaux de couplage**
  - calcul du couplage conduit sur les câbles
  - diaphonie entre câbles
- 5 – Analyse topologique en CEM**
  - De la complexité des systèmes au découpage topologique

## Caractérisation ultra large bande de circuits



## Caractérisation de circuit





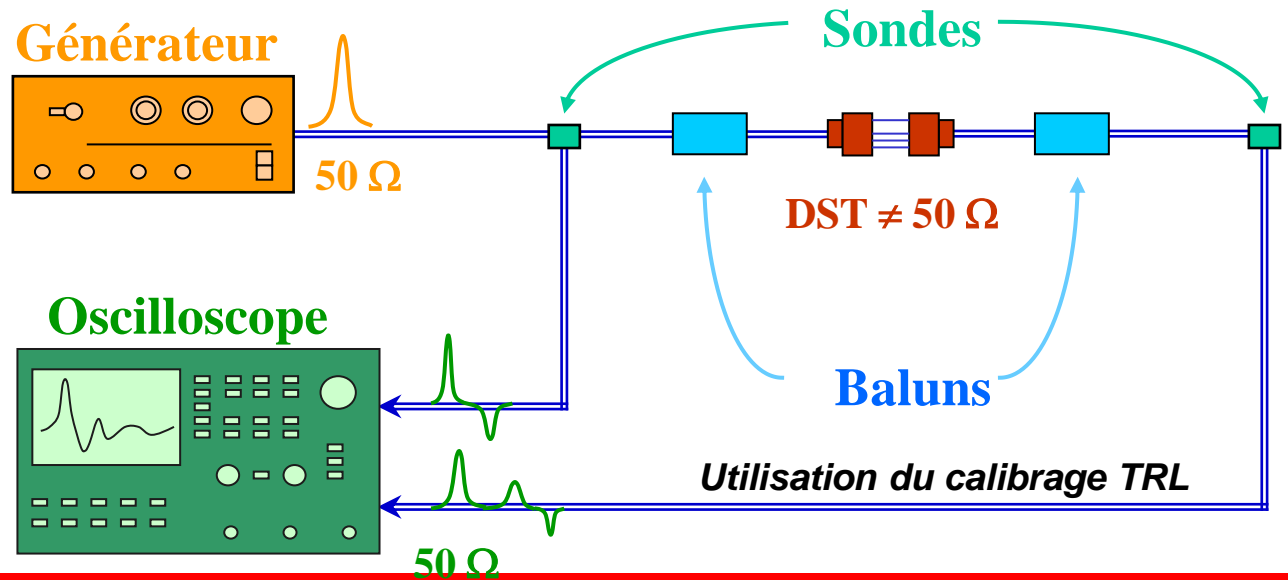
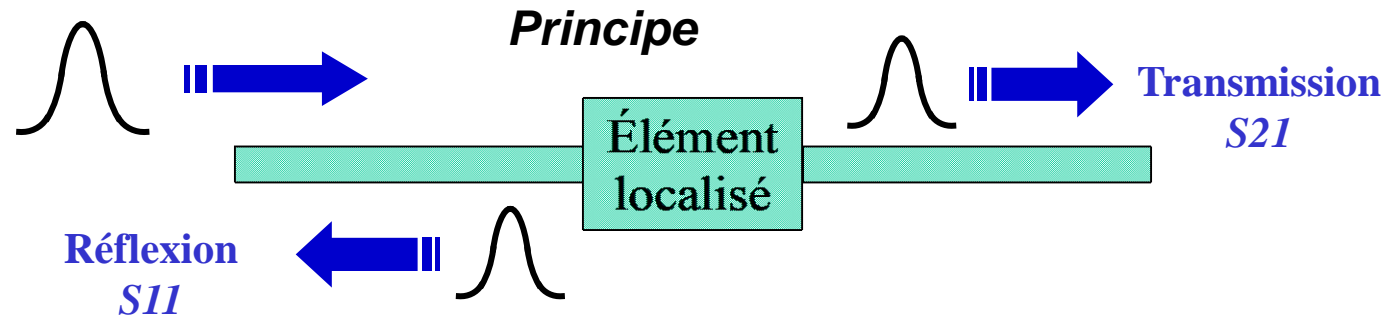
Connecteur USB



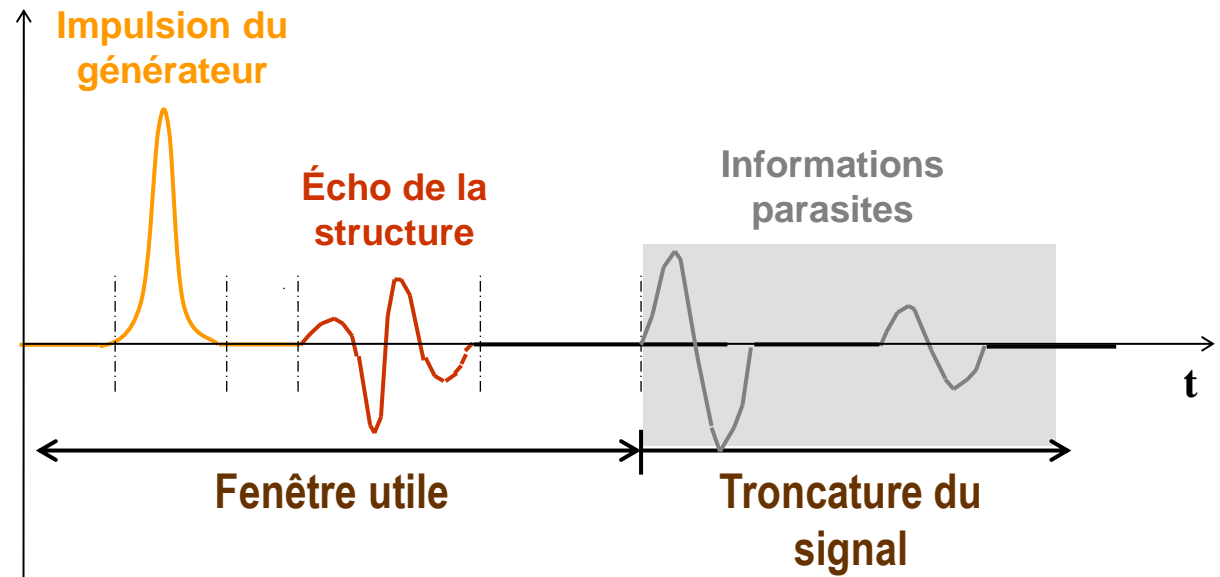
SUBD



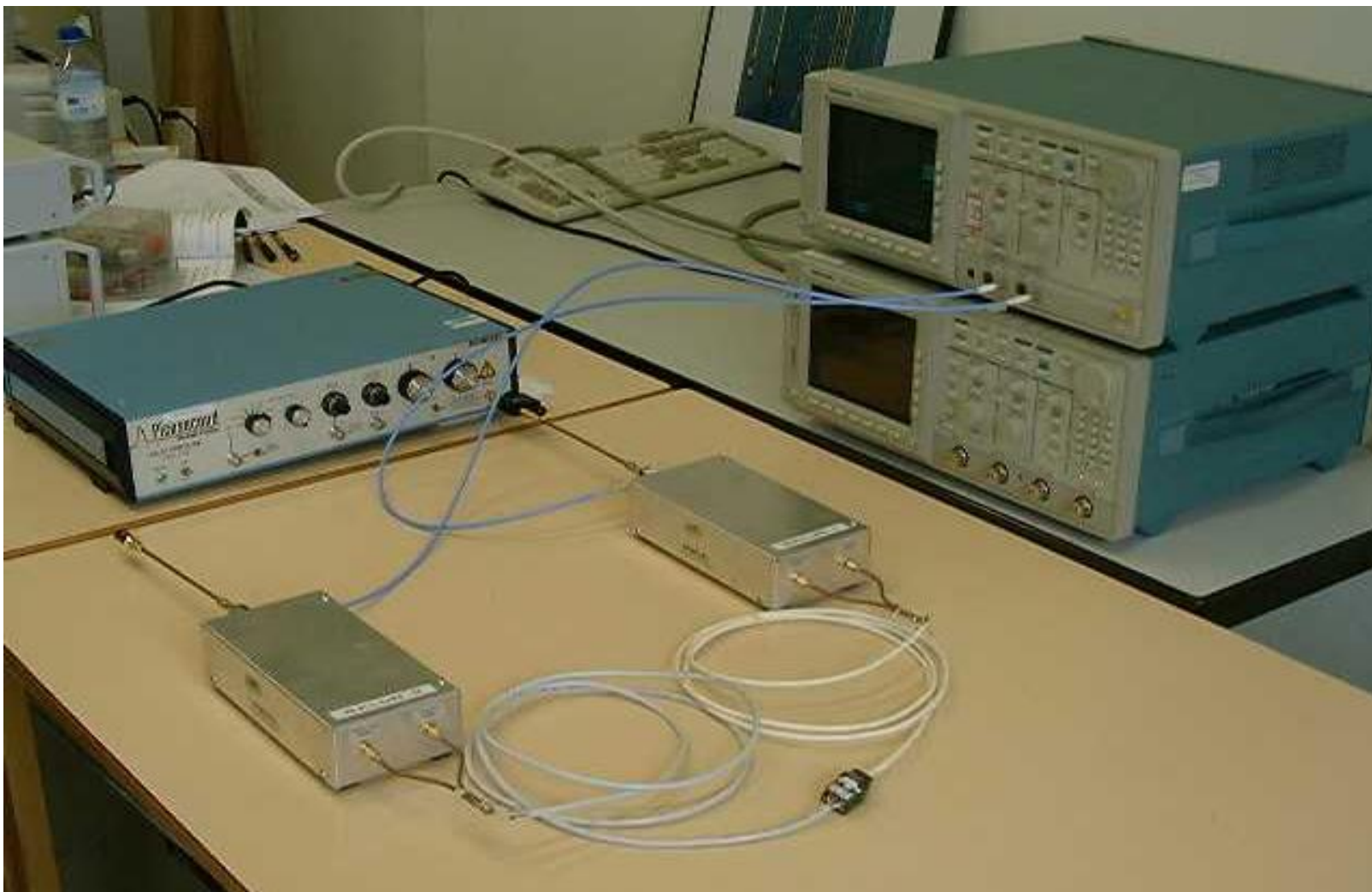
RJ45



- Dissociation temporelle des impulsions : conservation des informations utiles
- Précision accrue des mesures

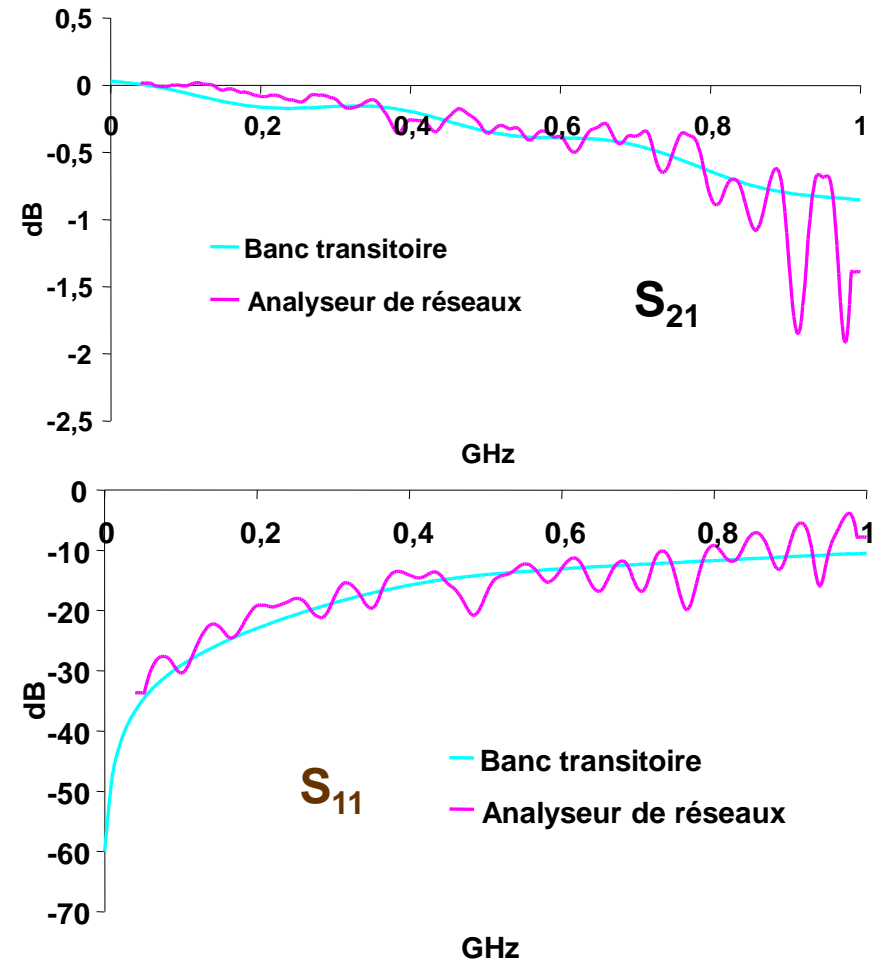
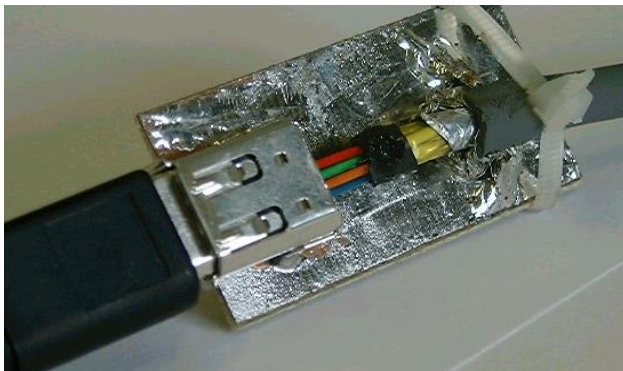


## Banc de caractérisation large bande en régime impulsionnel



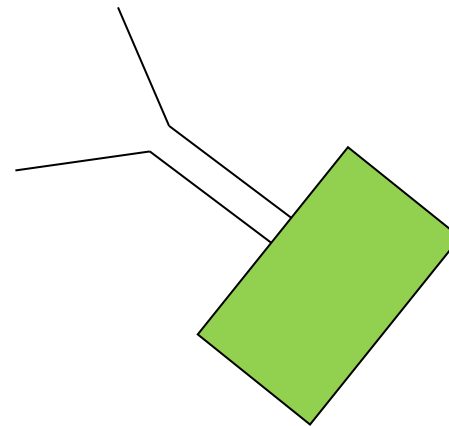
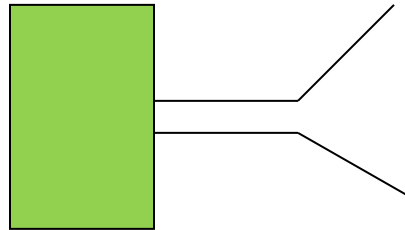
- Un exemple de résultat : mesure d'un connecteur IEEE 1394

## Mise en place expérimentale



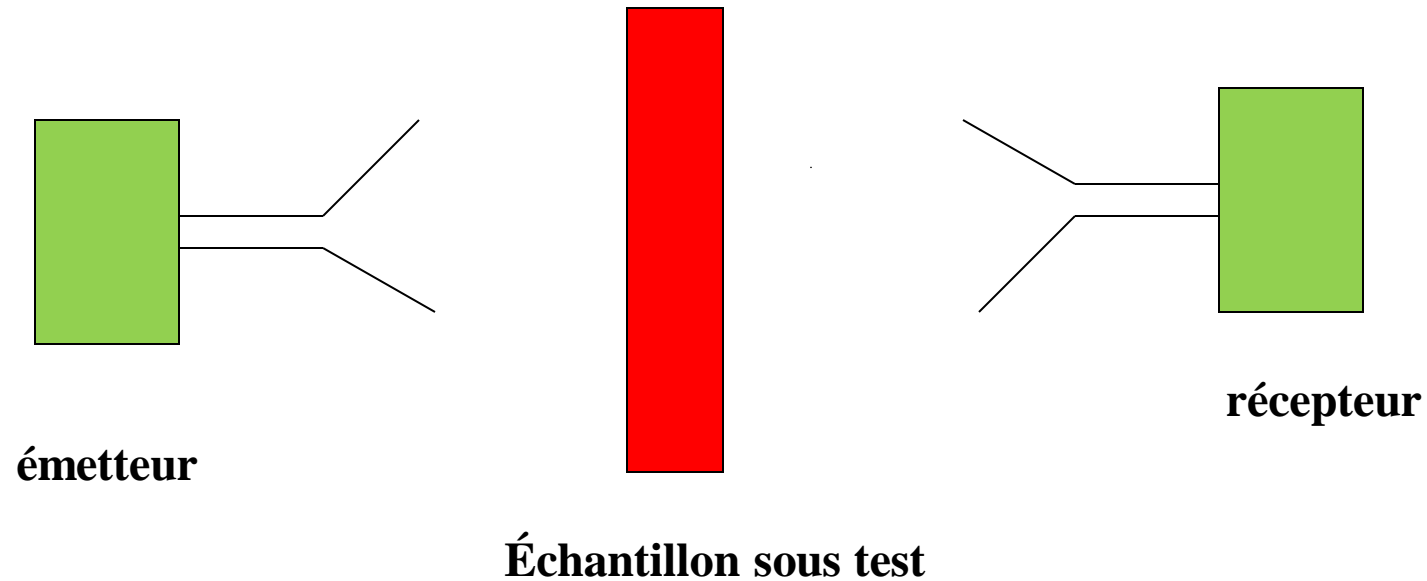
Plus grande précision des mesures  
transitoires

## Caractérisation d'antennes





## Caractérisation de matériaux



# Simulateur à ligne de transmission

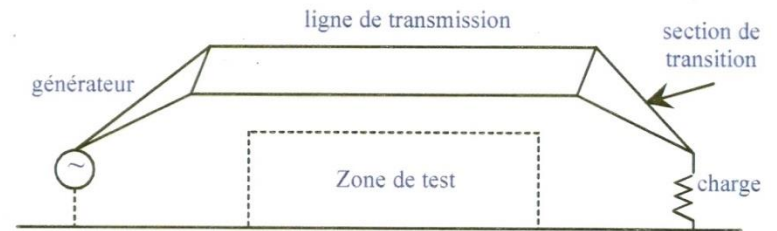


Champ sous le simulateur

$$E = V / h$$

## SIMULATEURS A ONDES GUIDEES

\*\*\*\*\*



Toute l'énergie E.M. contenue à l'intérieur de la structure

### PRINCIPE :

principe de la ligne "stripline" adaptée  
⇒ mode TEM ou quasi TEM

### GRANDES STRUCTURES ⇒

surfaces remplacées par des fils

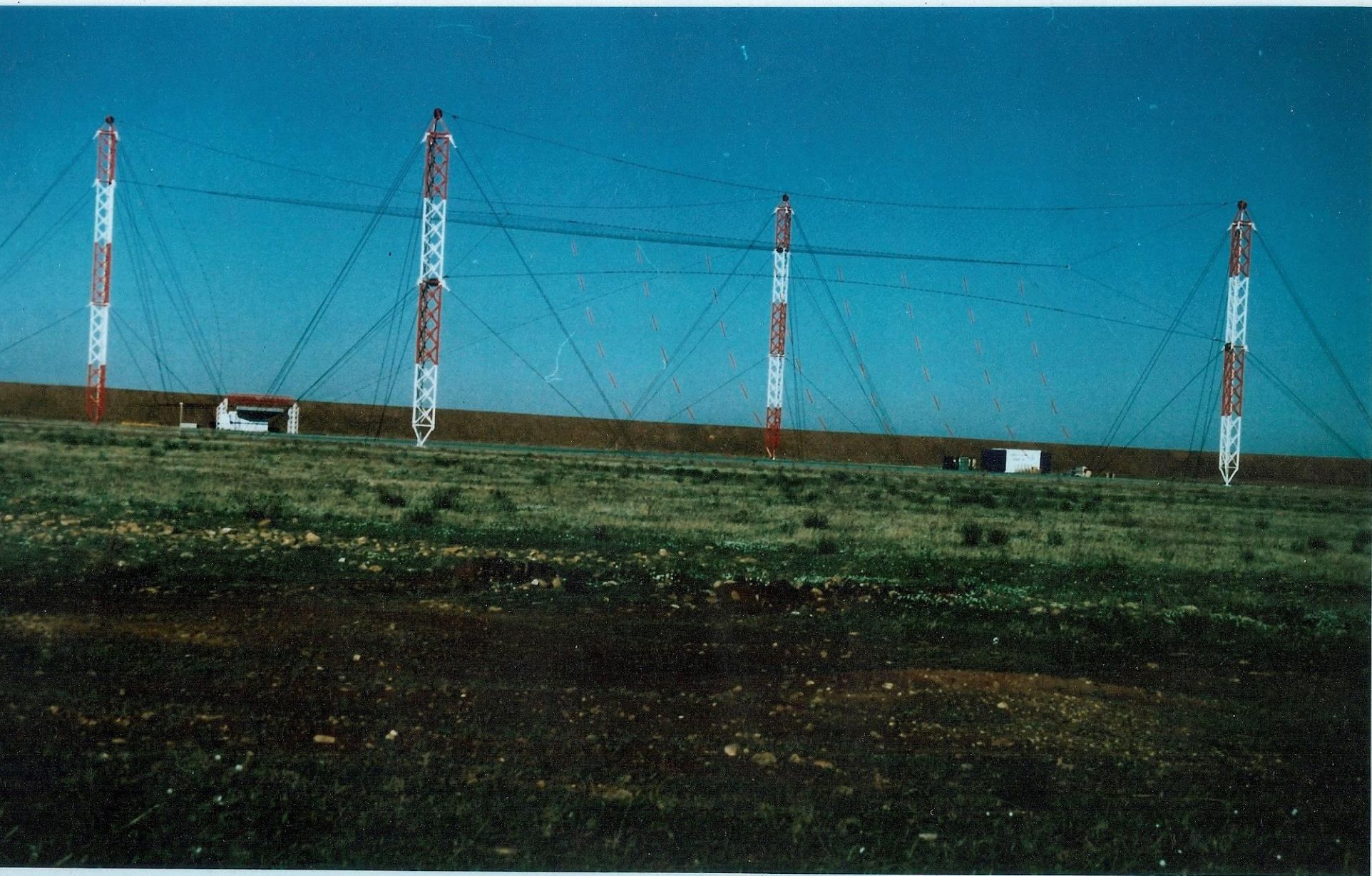
### PROBLEMES :

adapter l'excitation à la ligne → transition conique

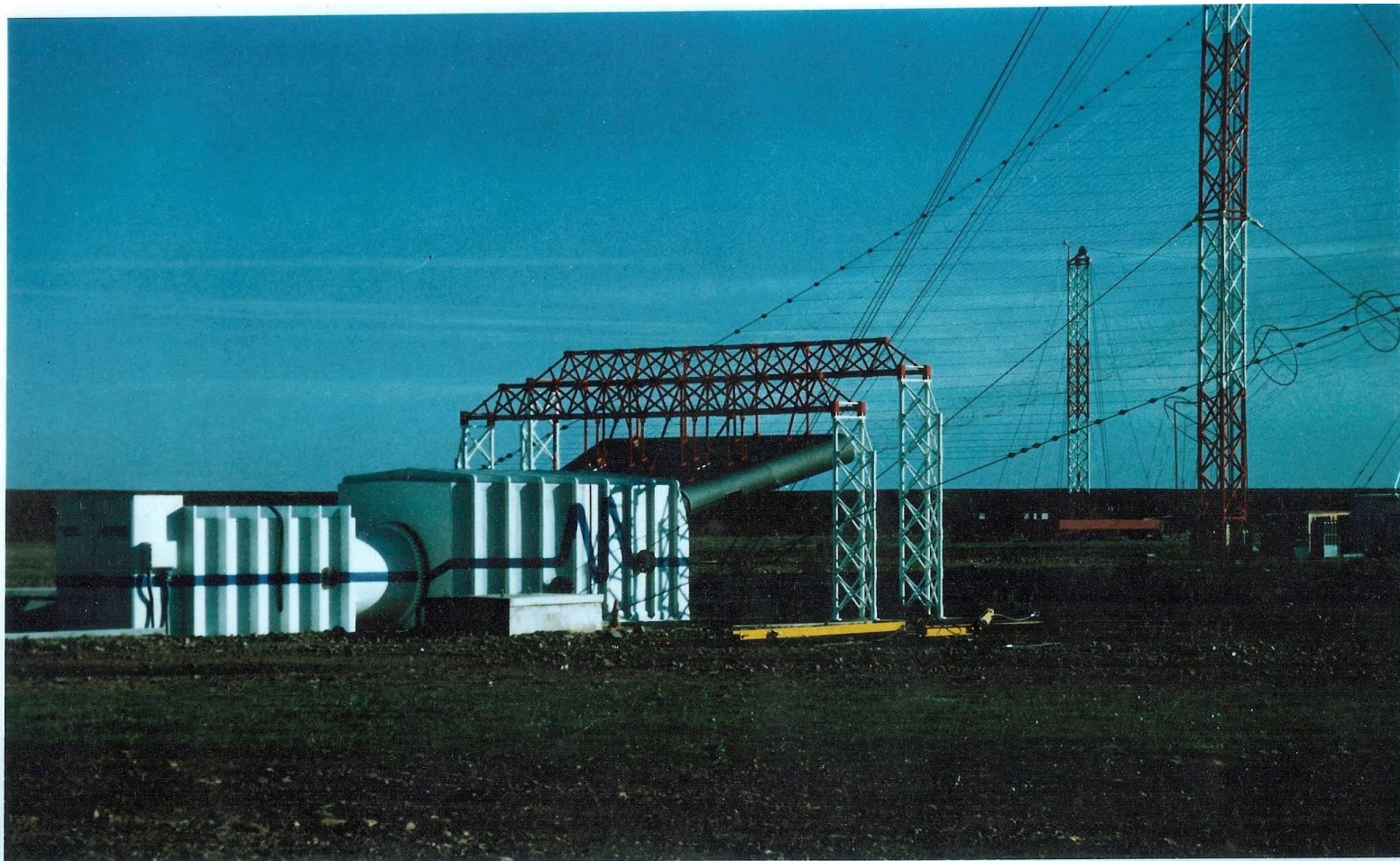
### TYPES DE SIMULATEUR :

- ⇒ polarisation horizontale (problème lié au sol)
- ⇒ polarisation verticale



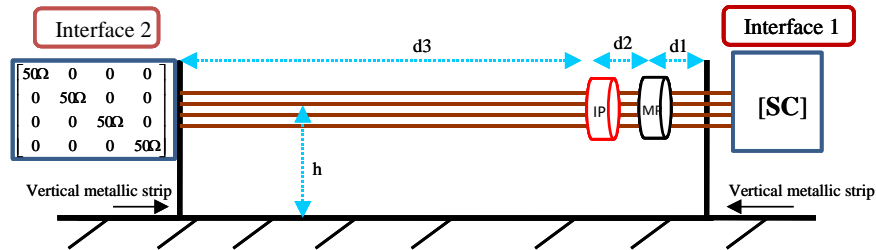






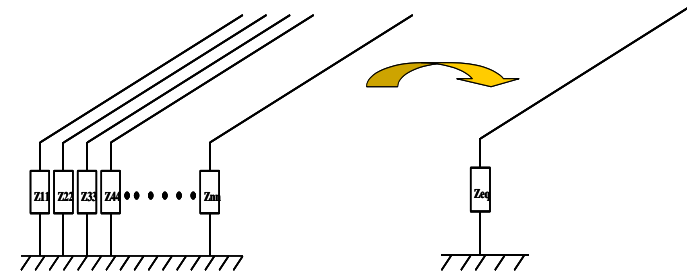
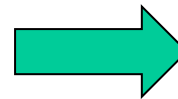
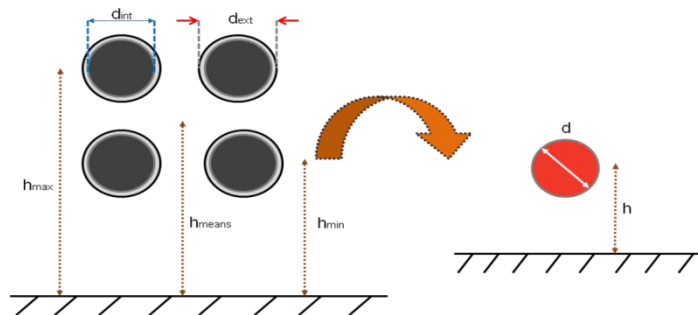
# MODELISATION DE L'ESSAI BCI

## Configuration de test



Parameter s	Radius	Line length (cm)	Elementary Height (cm)
Value	External: 2.6mm Internal: 1.2 mm	80	h1 = 6.5 h2 = 6.5 h3 = 5 h4 = 5

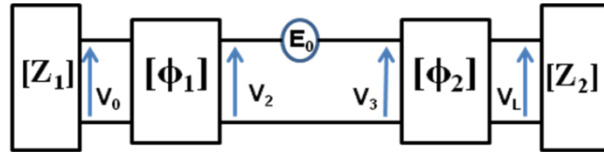
## Injection en MC → application de la méthode du faisceau équivalent



$$\frac{1}{Z_{eq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{Z_i}$$

# Théorie des lignes appliquée à l'essai BCI

## Représentation à l'aide de matrices chaînes



$$\begin{bmatrix} V_L \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi'_{11} & \Phi'_{12} \\ \Phi'_{21} & \Phi'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_3 \\ -I_3 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_{1,2} = \exp \left( \begin{bmatrix} 0 & -Z \\ -Y & 0 \end{bmatrix} \right)$$

$$[Z] = [R] + [L]p$$

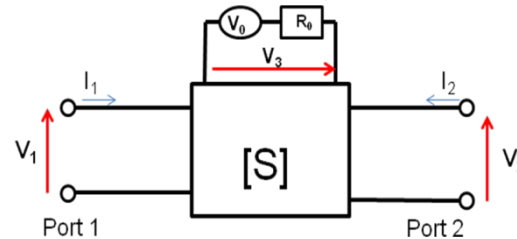
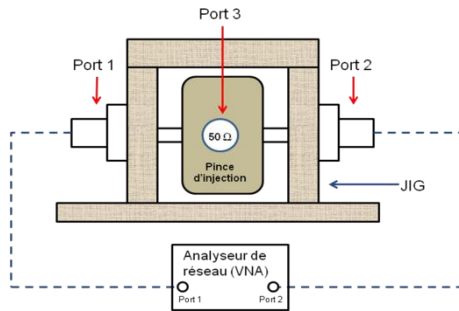
$$[Y] = [G] + [C]p$$

$$V_2 = \Phi_{11} \cdot V_0 - \Phi_{12} \cdot I_0 \quad I_2 = \Phi_{21} \cdot V_0 - \Phi_{22} \cdot I_0$$

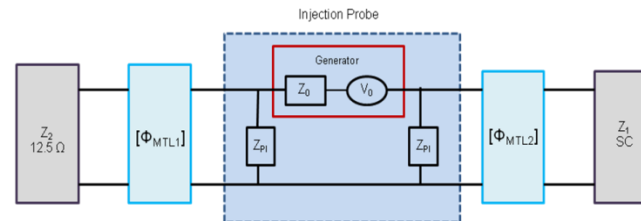
$$I_L = \Phi'_{21} \cdot V_3 - \Phi'_{22} \cdot I_3 \quad V_L = \Phi'_{11} \cdot V_3 - \Phi'_{12} \cdot I_3$$

$$I_L = \Phi'_{21} [I_1 (-\Phi_{11} Z_1 + \Phi_{12})] + \Phi'_{21} \cdot E_0 + \Phi'_{22} [(-\Phi_{21} Z_1 + \Phi_{22}) I_1]$$

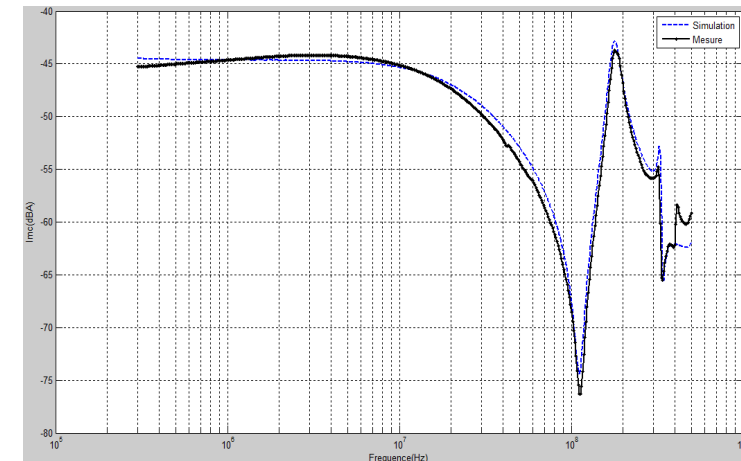
## Modèle de la pince d'injection



$$[S] = \begin{bmatrix} \hat{e} & \hat{e} & \hat{e} \\ \hat{e} & \hat{e} & \hat{e} \\ \hat{e} & \hat{e} & \hat{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{31} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \end{bmatrix}$$

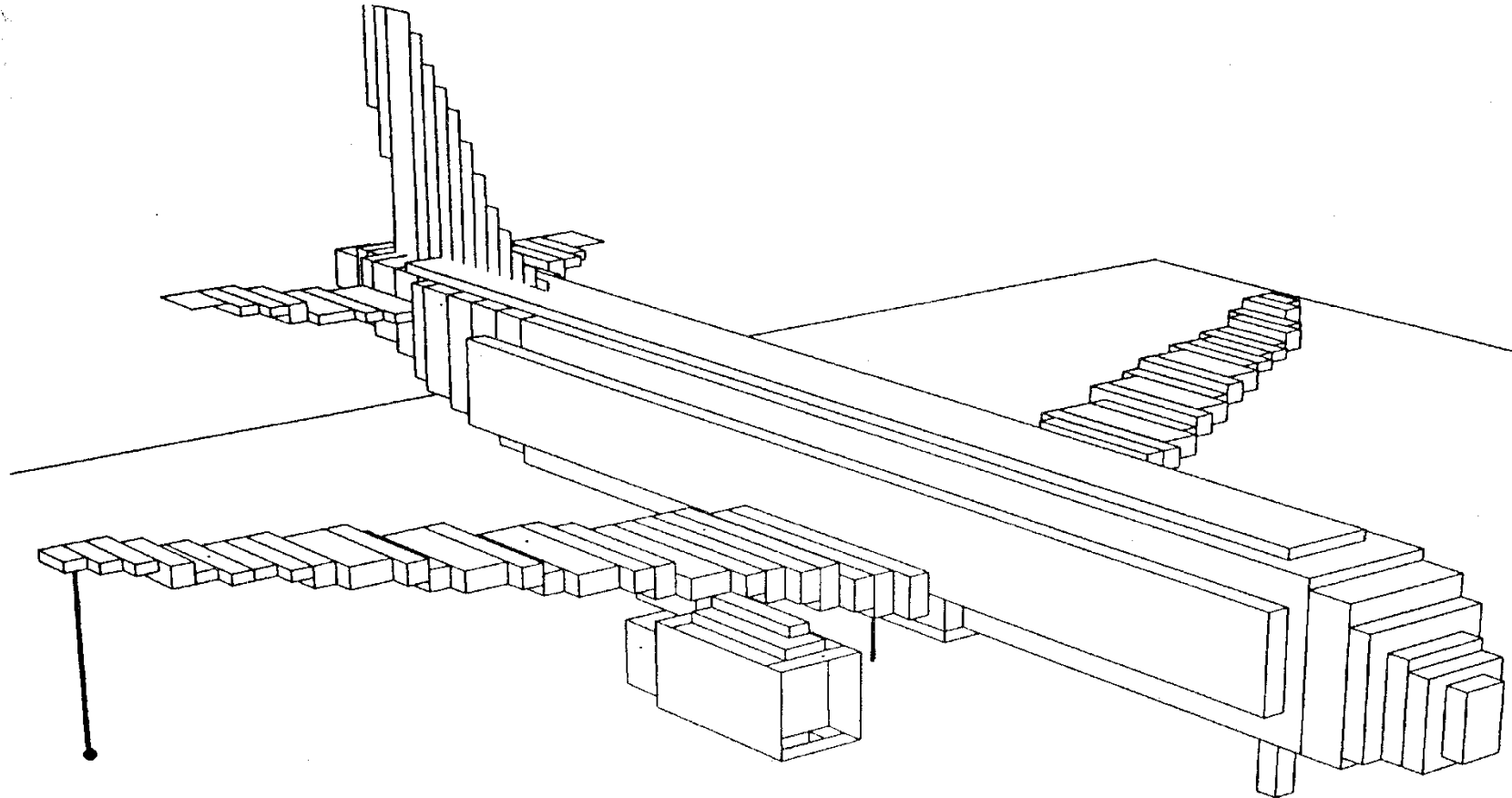


## Résultat

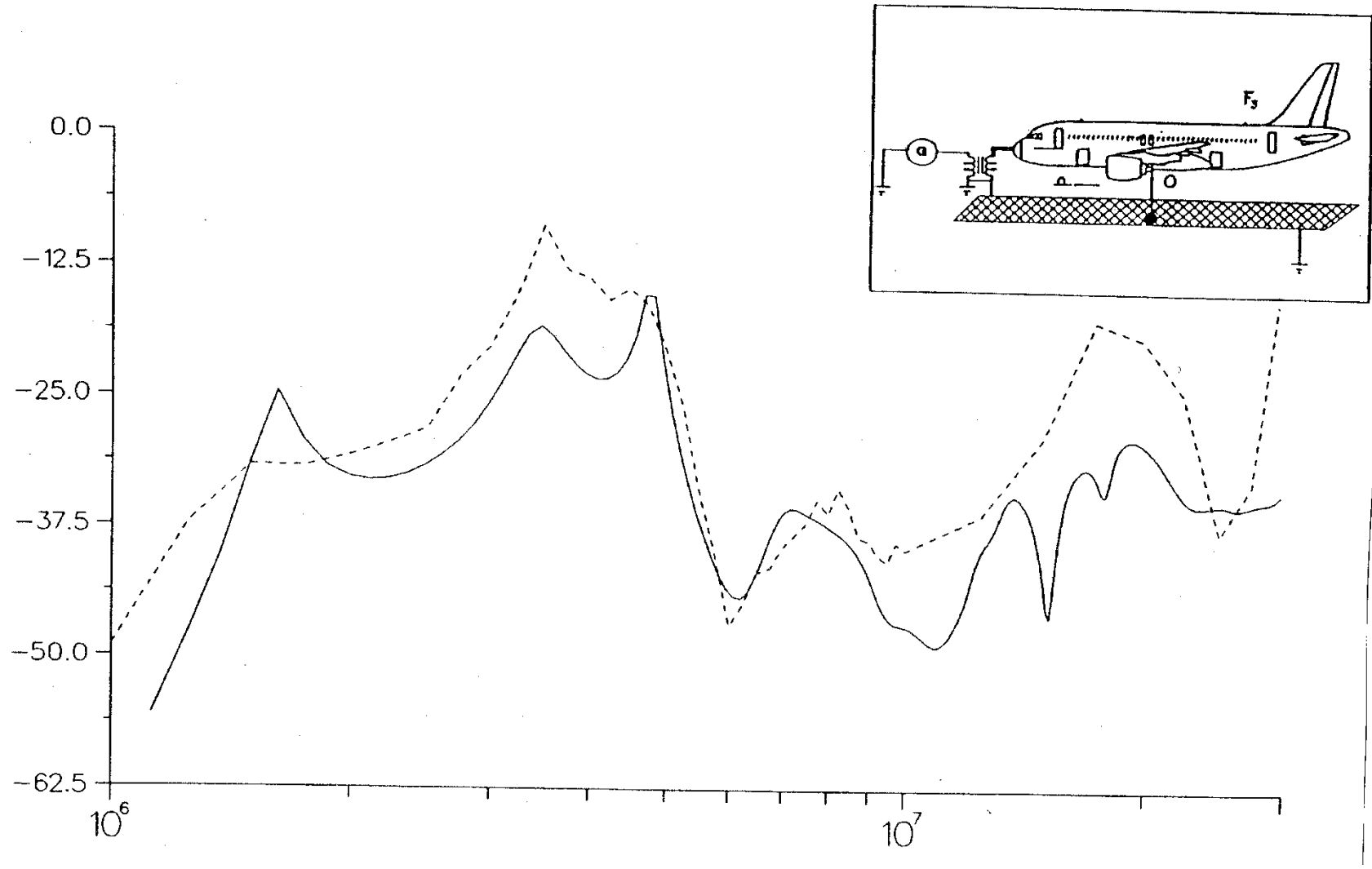


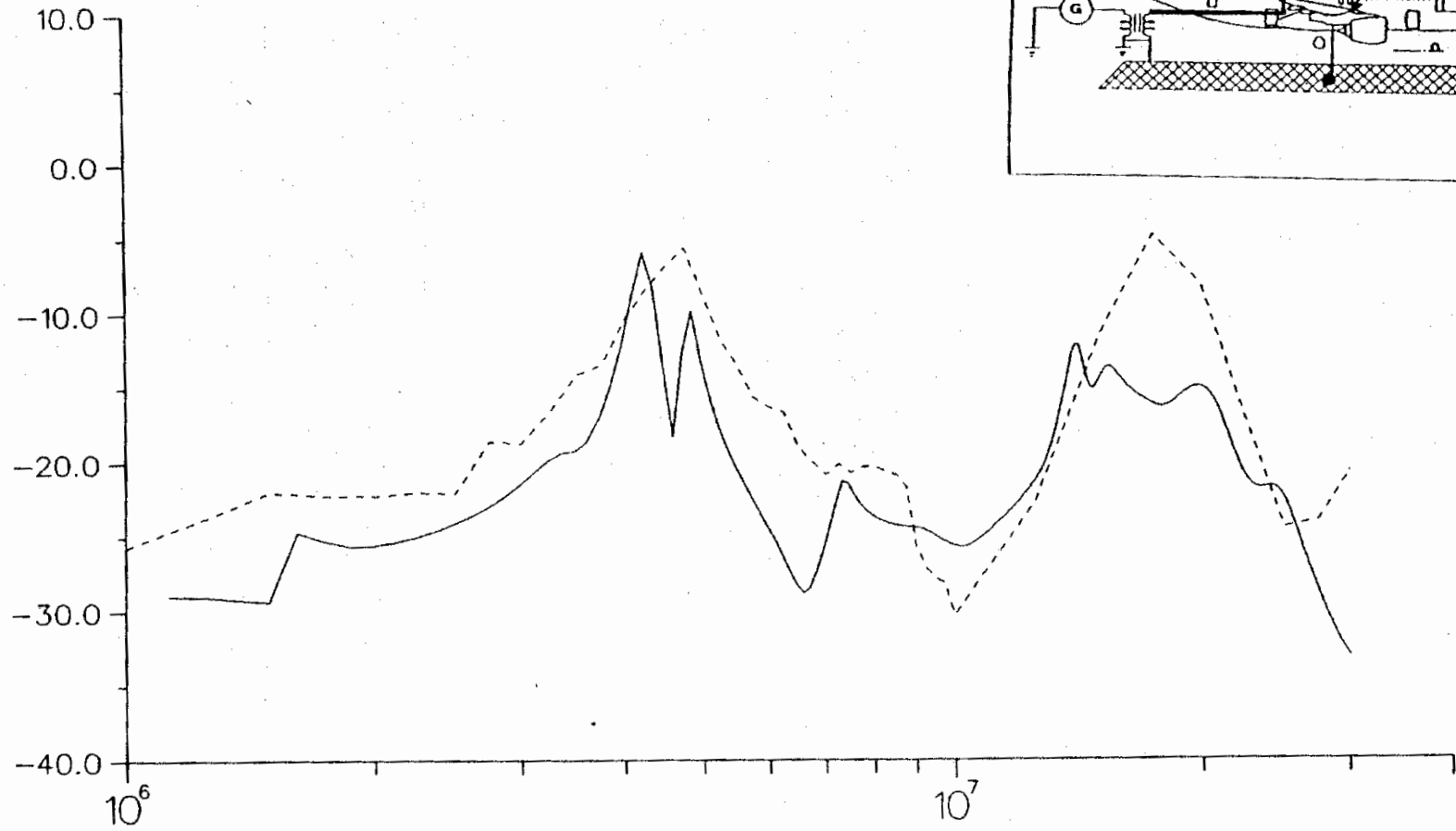


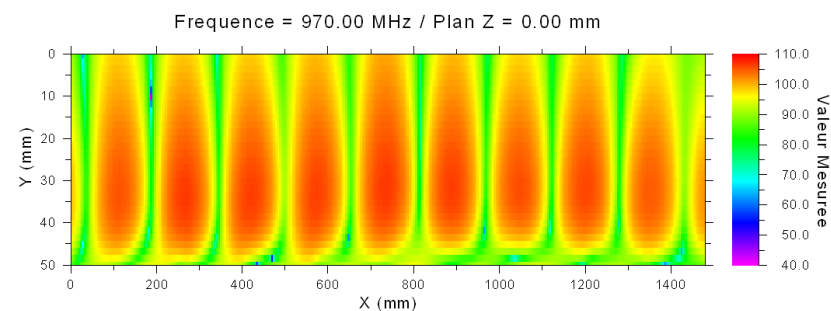
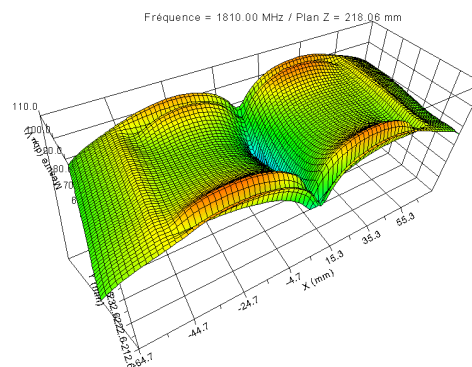
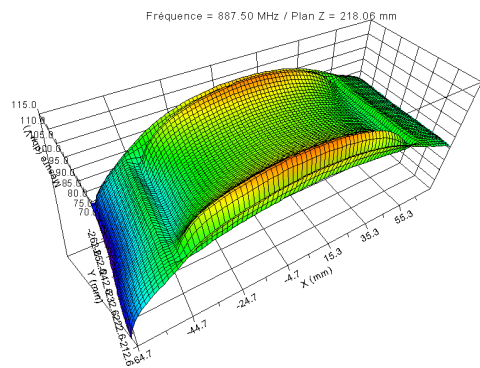
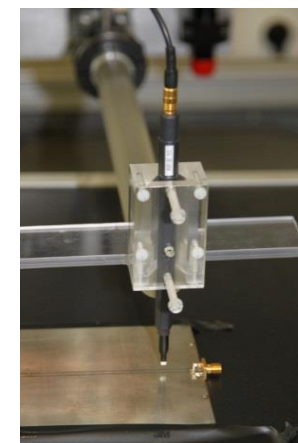
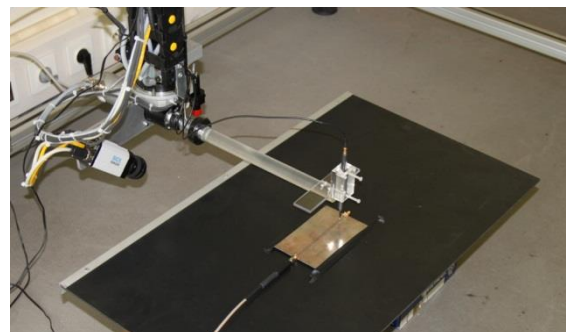
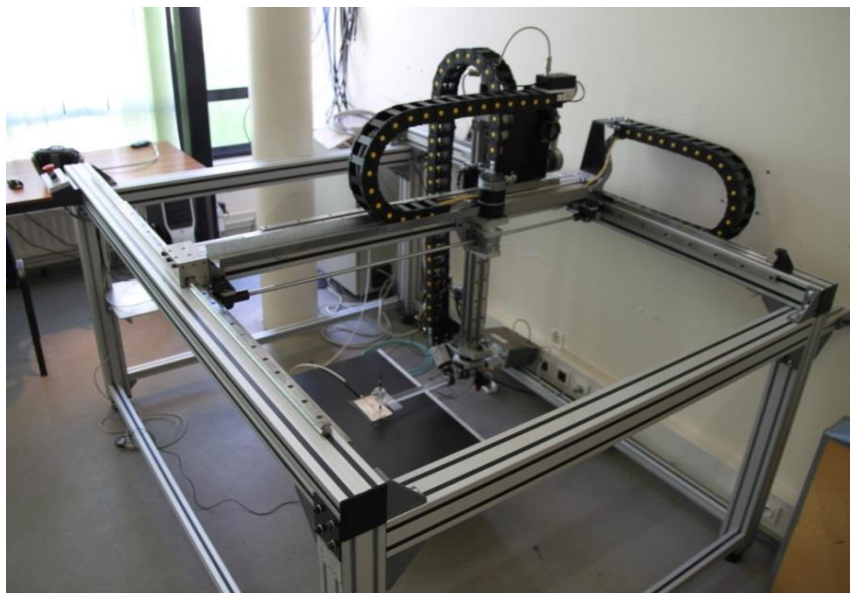
# Test aéronef soumis à une agression radar







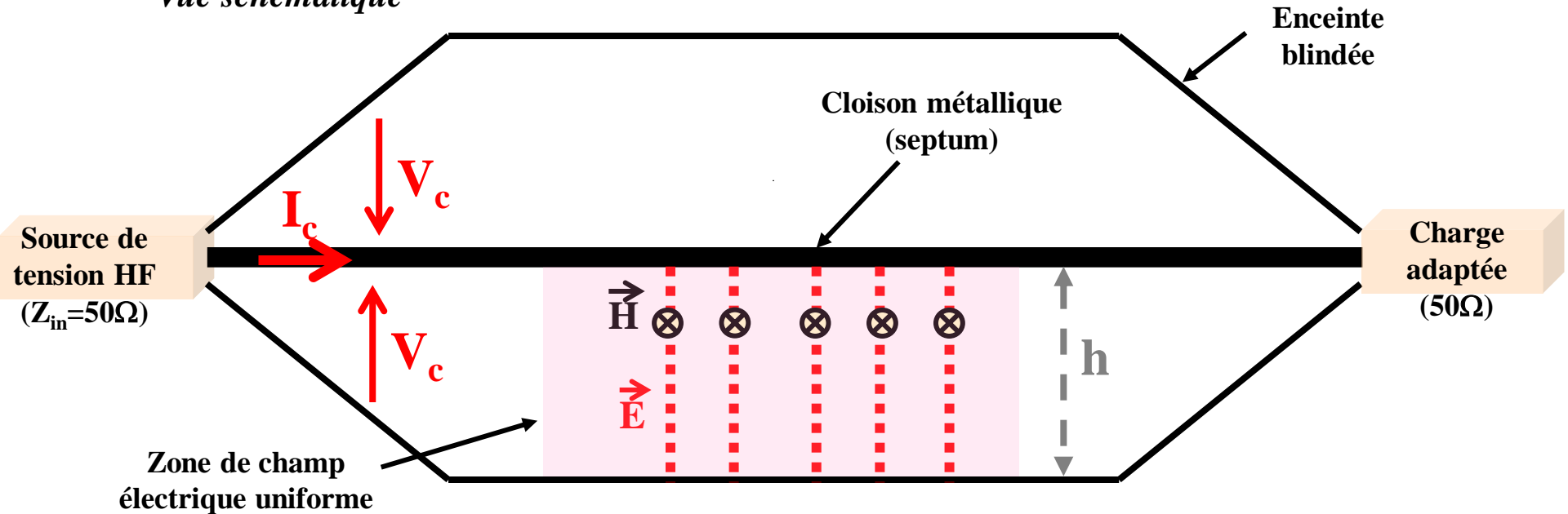




## La cellule TEM

Exposer un objet protégé de l'environnement extérieur à une onde plane rasante de type TEM

### Vue schématique

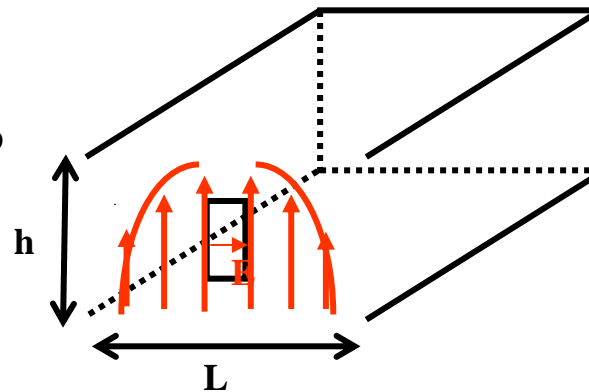


$$\text{avec } E(V/m) = \frac{V_c(V)}{h(m)}$$

## *La cellule TEM*

La fréquence maximale d'utilisation ( $f_{\max}$ ) d'une cellule TEM correspond à la fréquence du mode fondamental ( $TE_{10}$ )

Coupe transversale du champ électrique du mode fondamental  $TE_{10}$



$f_{\max}$  est directement relié à la plus grande dimension de la cellule TEM

$$f_{\max} = C / (2 * L)$$



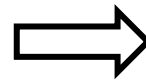
$$L = \lambda / 2$$

## La cellule GTEM (Giga TEM)

Augmenter la fréquence maximale d'utilisation / cellule TEM

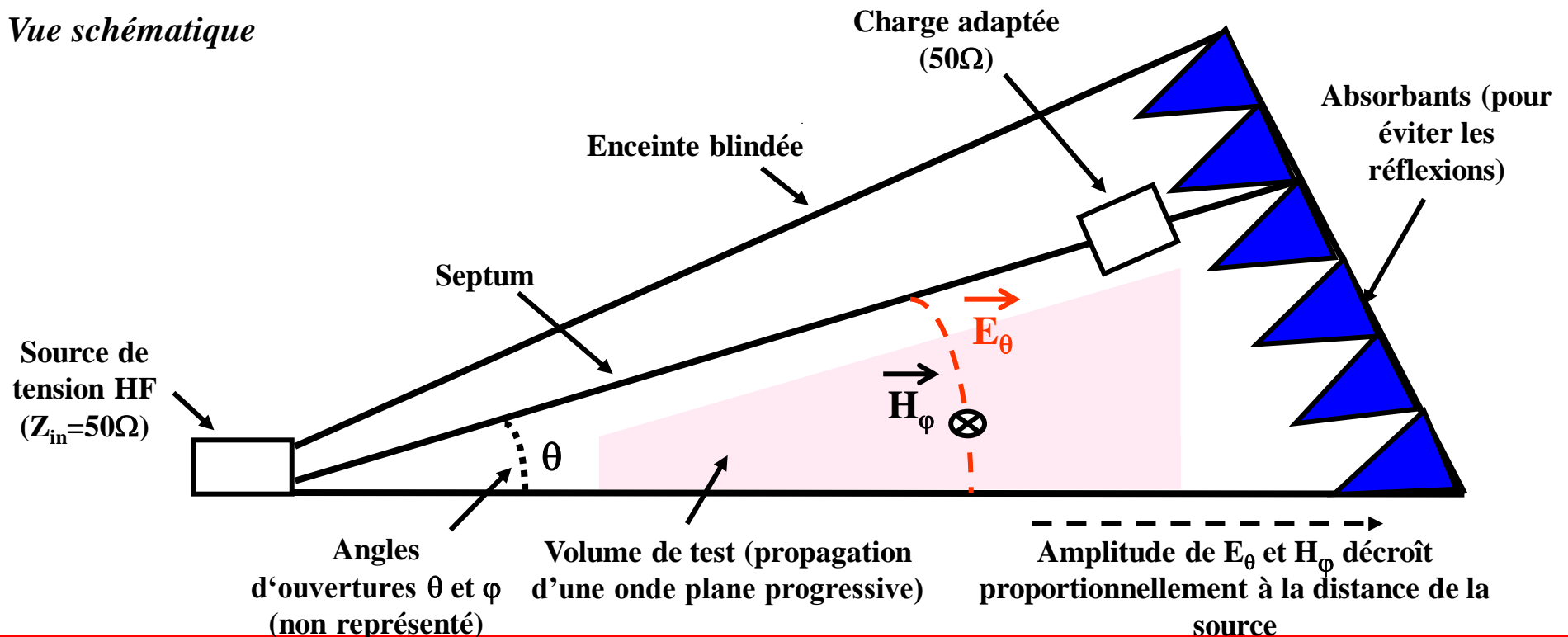
Comment ?

$f_{\max}$  d'une cellule TEM fixée par sa largeur



Augmentation progressive de la largeur de la cellule GTEM

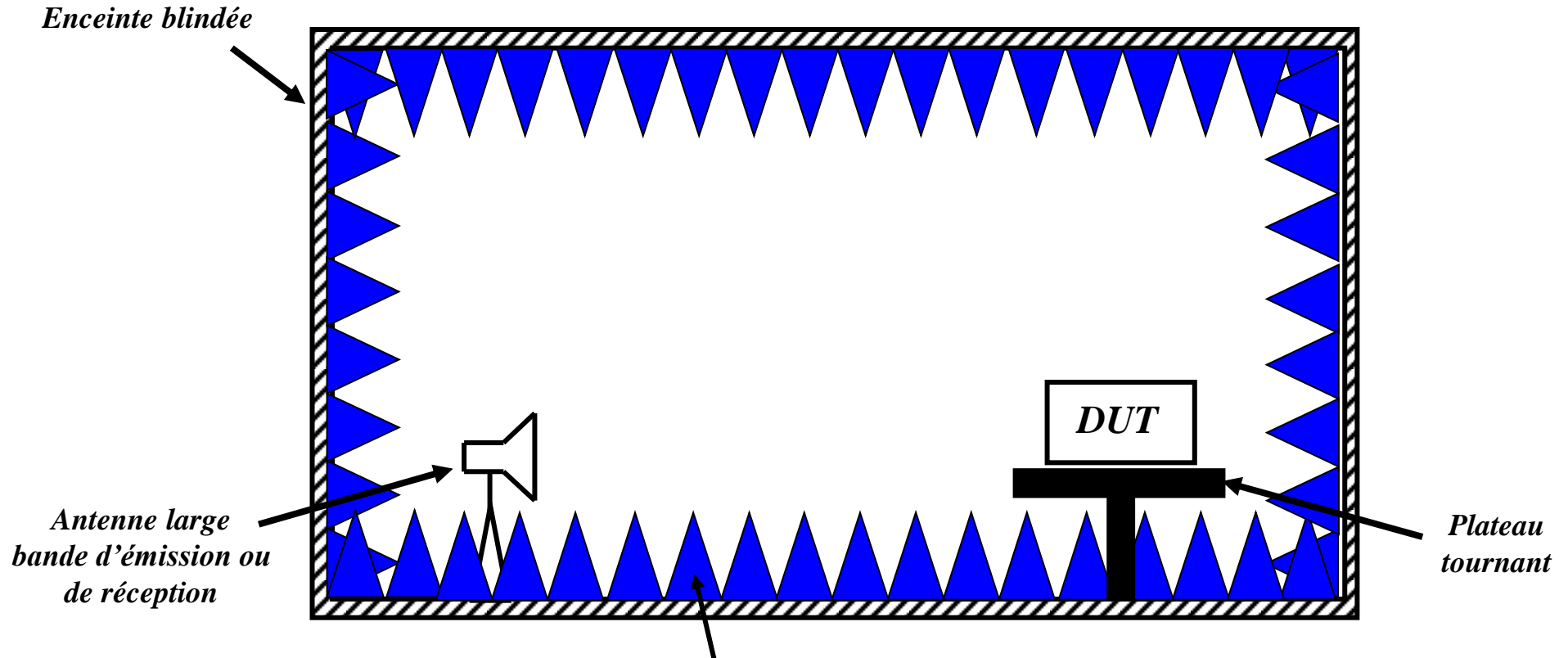
## Vue schématique



## Principe

Enceinte blindée dont toutes les parois sont recouvertes de matériaux absorbants pour limiter les réflexions internes et se rapprocher du comportement en espace libre

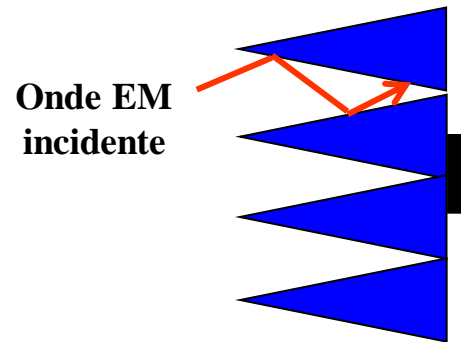
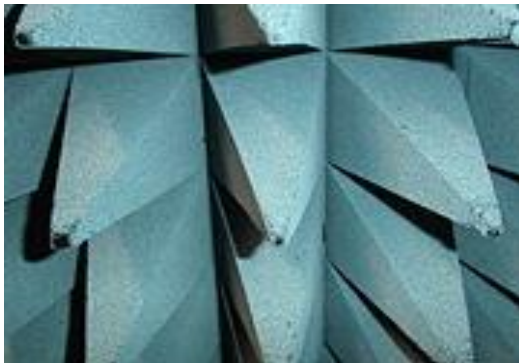
## Vue schématique



En l'absence d'absorbants sur le plancher, on parle de chambre semi-anéchoïque

## Les différents types d'absorbants

- Cônes absorbants (mousse de polyuréthane chargé d'un complexe à base de carbone)



- Objectif : Provoquer de multiples réflexions des ondes incidentes sur les parois des cônes
- Suffisant aux fréquences élevées (100-200MHz)
- L'absorption en BF est proportionnelle à la taille des cônes

- Carreaux de ferrite (matériau dont la perméabilité magnétique  $\mu_r > 1$ )

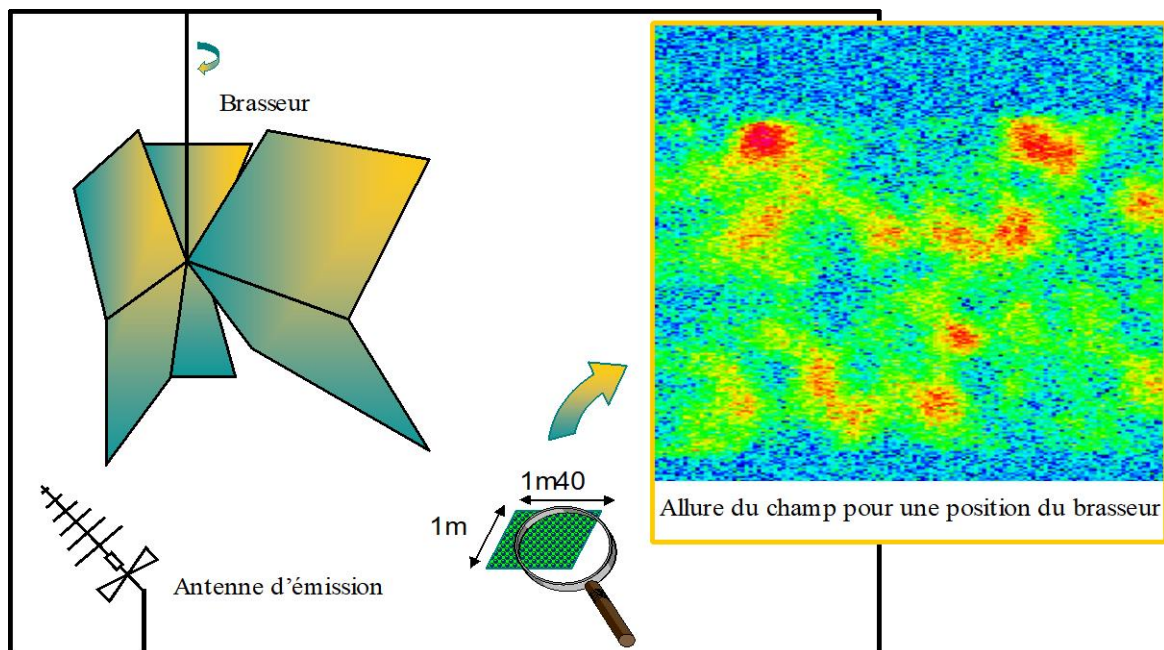


- Objectif : Augmenter les pertes magnétiques
- efficace en basse fréquence (<100-200 MHz)
- Utilisé en chambre semi-anéchoïque en CEM

Ces 2 types d'absorbants peuvent être utilisés simultanément pour améliorer les performances de la chambre anéchoïque



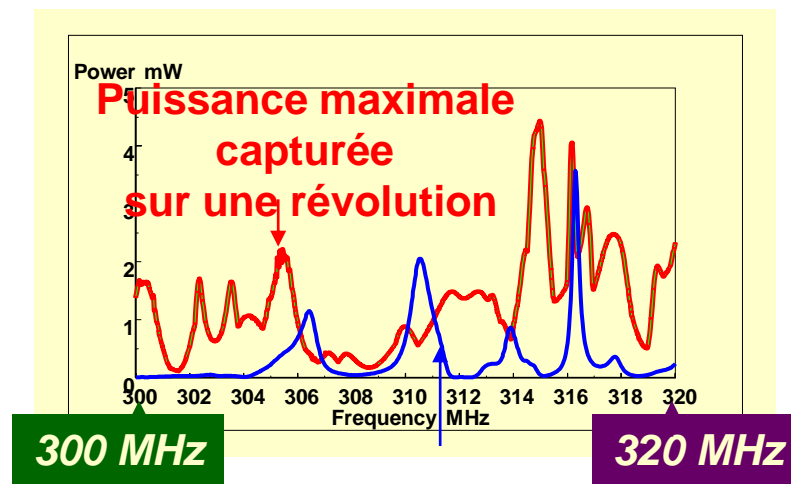
# Moyens de test : couplage



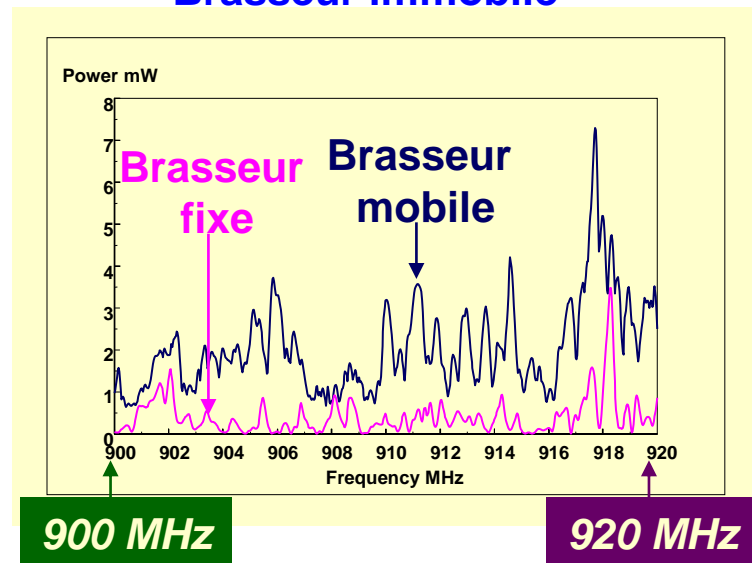
**Chambre réverbérante** : cage de Faraday surdimensionnée  
→ multimodale

Caractéristiques du champ dans la chambre :

- \* Homogène
- \* Isotrope



**Brasseur immobile**



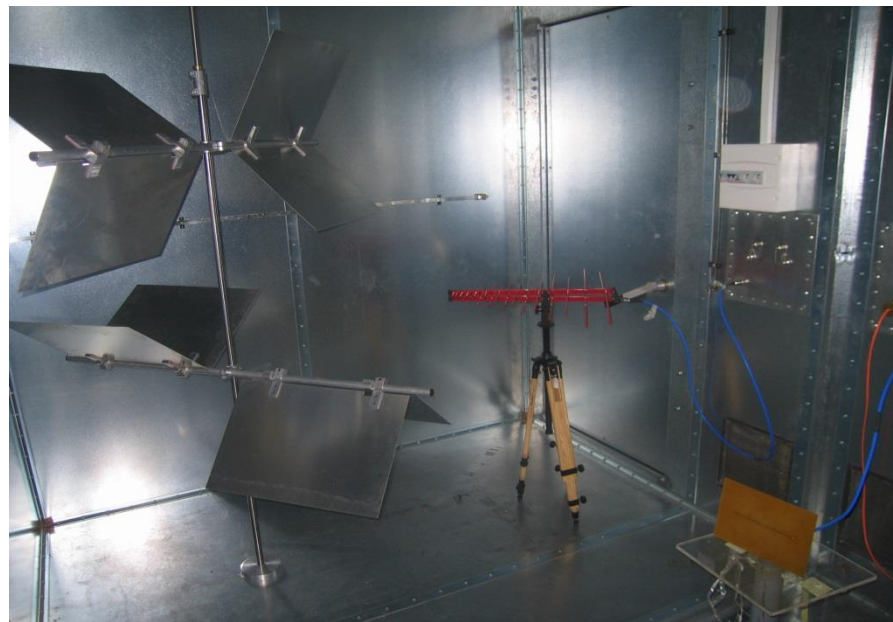
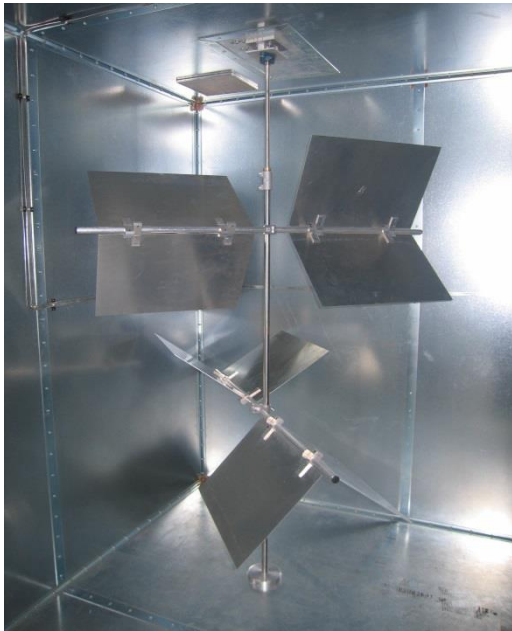
## Objectif:

Exposer un objet sous test placé dans une cage de Faraday à un champ statistiquement homogène et isotrope

Champ EM indépendant de la position de l'objet

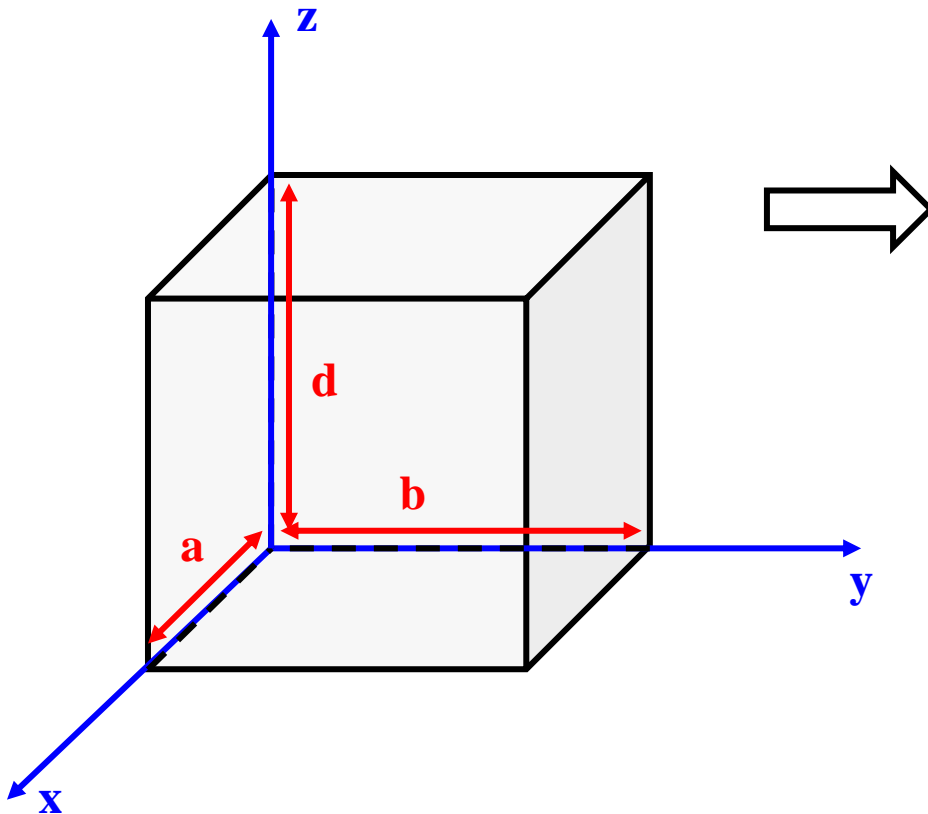
Champ EM provenant de toutes les directions de l'espace

$\cos(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z) \longrightarrow$  Exponentielles



CRBM du laboratoire XLIM

## Propriétés d'une cavité parallélépipédique



Recherche des modes propres:  
équation d'Helmholtz:

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right] E = 0$$

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] E = -k^2 E$$

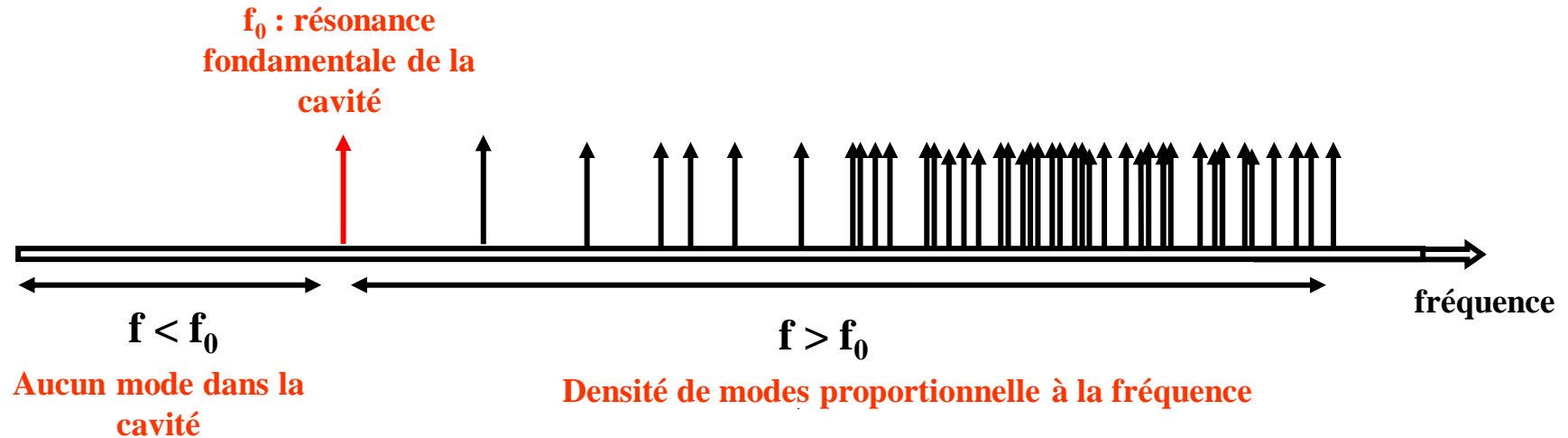


$$f_{mnp} = \frac{C}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2}$$

m, n, p ordre des modes

Champ → fonctions trigonométriques en x,y,z

## *Spectre de modes d'une cavité vide*



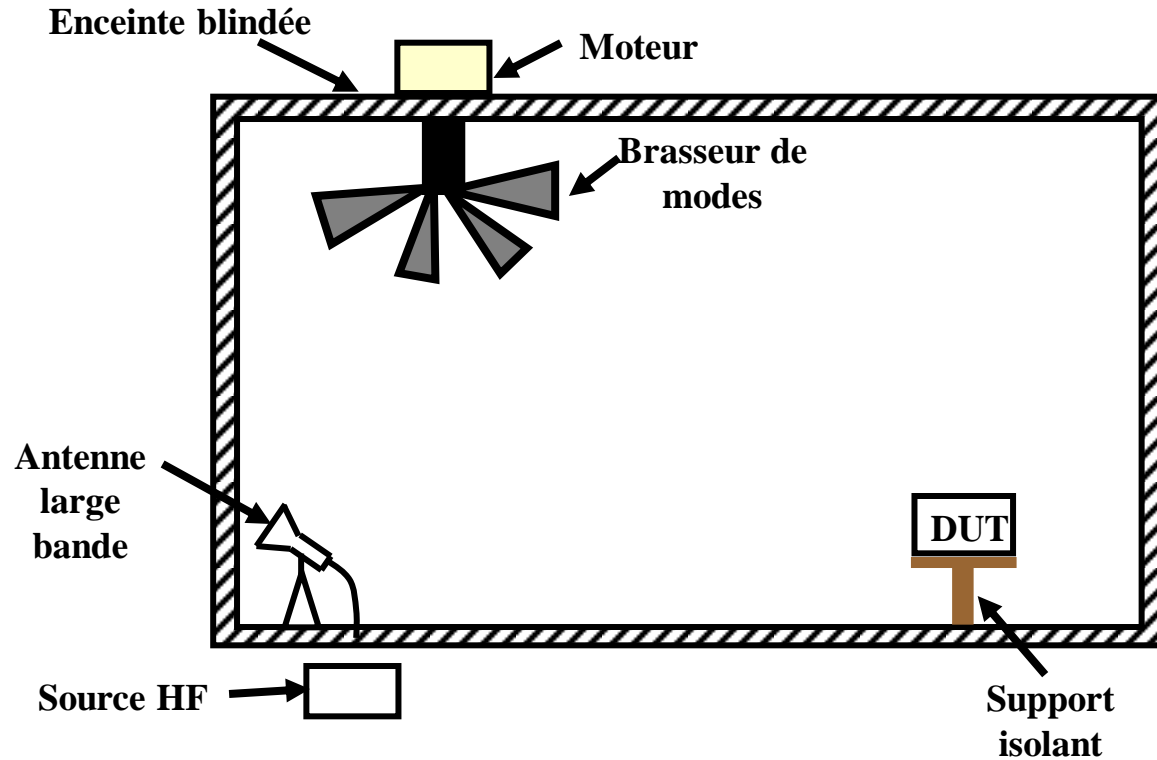
spectre de modes discontinu

- Amplitude du champ importante uniquement aux résonances
- Champ EM déterministe et non statistique

Nécessité de réaliser un « brassage de modes » mécanique ou électronique

## Principe du brassage de modes mécanique (1/2)

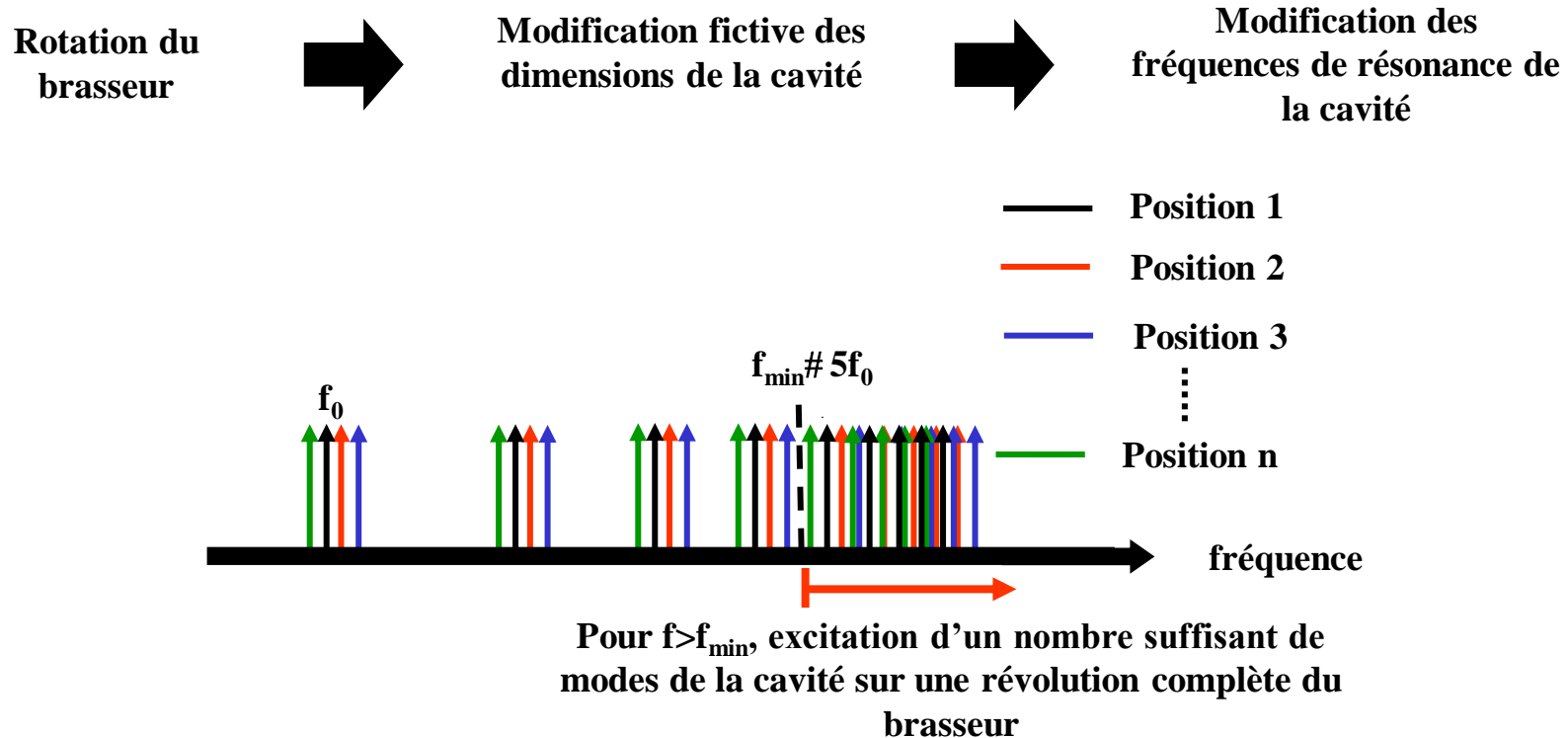
Introduction d'un objet métallique en rotation (brasseur de modes) dans la CRBM



2 conditions à respecter pour obtenir un bon brassage de modes :

- taille suffisante / volume de la cavité
- sans géométrie particulière (perpendiculaire aux parois, symétrie, ...)

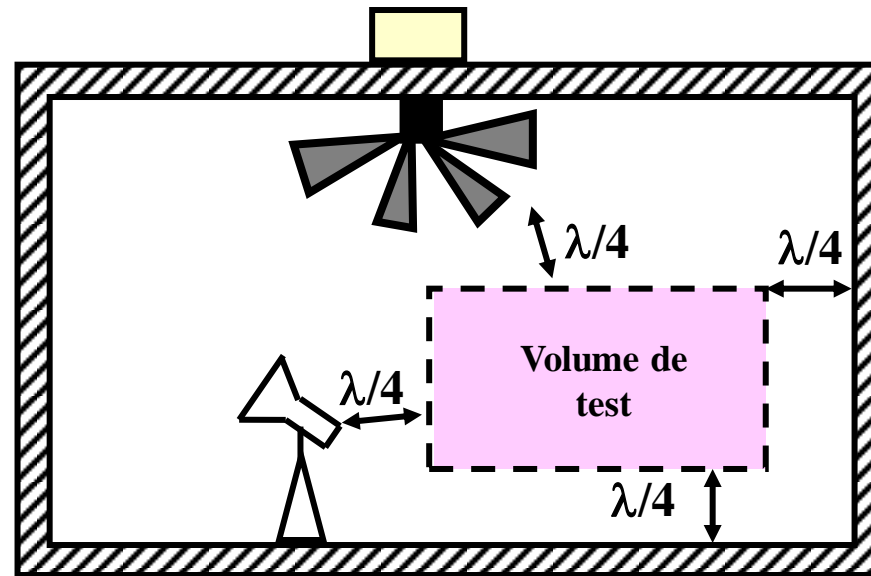
## Principe du brassage de modes mécanique (2/2)



- Champ électromagnétique homogène et isotrope sur l'ensemble des positions du brasseur
- Fréquence minimale d'utilisation de la CRBM inversement proportionnelle à son volume

### *Définition du volume de test d'une CRBM*

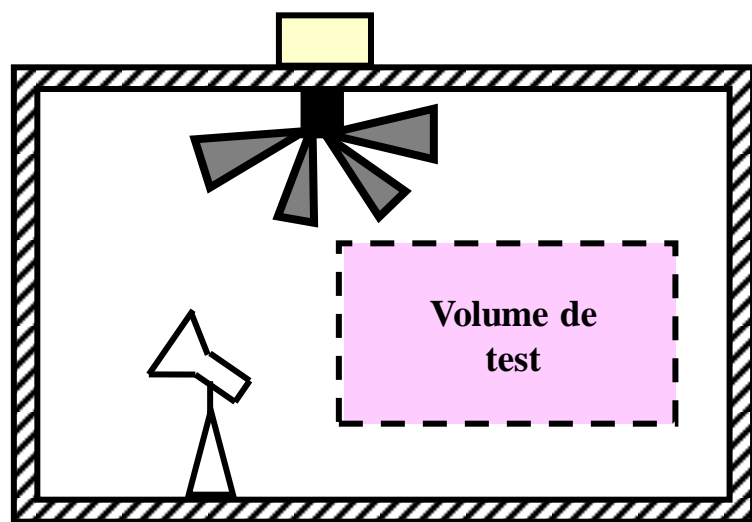
On définit un volume de test qui doit être éloigné d'au moins  $\lambda/4$  de la fréquence minimale de tout objet présent dans la CRBM (parois, brasseur, antennes, ...)



L'objet sous test doit ensuite être placé dans le volume de test de la CRBM

## Calibration d'une CRBM : Mesure de l'écart-type du champ électromagnétique

Pour vérifier les propriétés statistiques du champ EM au sein du volume utile de la CRBM, il est nécessaire de procéder à une phase de calibrage de la CRBM



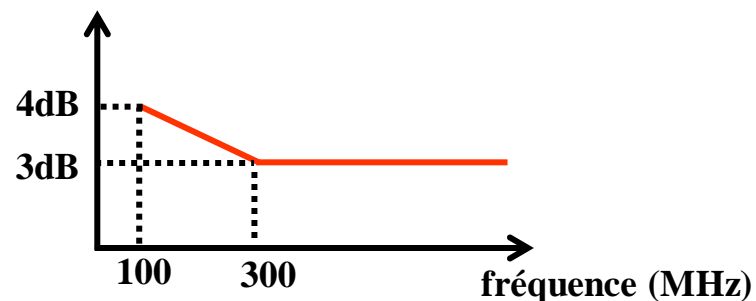
sur une  
rotation de  
brasseur



- Relevé du module du champ électromagnétique maximum ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ ) sur chacun des 8 sommets du volume utile
- Calcul de l'écart-type entre ces 8 valeurs
- Comparaison de l'écart-type avec le gabarit imposé par les normes en vigueur

Le respect du gabarit permet de s'assurer :

- de l'aspect uniforme et isotrope du champ EM
- d'une bonne reproductibilité des mesures



Gabarit imposé par la norme 61000-4-21



*Mesure de l'écart-type du champ électromagnétique → homogénéité et isotropie*

**Max d'une composante normalisée sur une rotation du brasseur**

$$E_i = \frac{E_{mi\max}}{\sqrt{P_{inj}}}$$

**Moyenne et écart type**

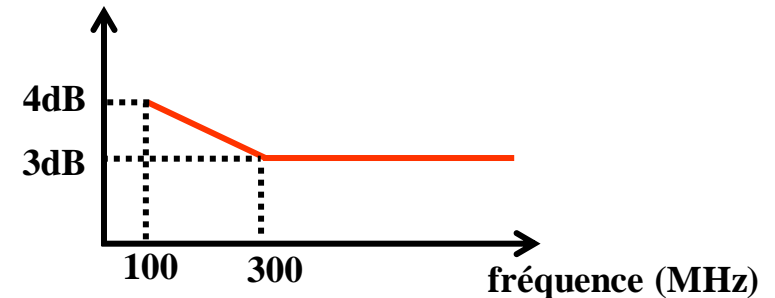
$$\langle E_i \rangle_N = \frac{\sum_{i=1}^N E_i}{N}$$

$$\sigma_{iN} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \langle E_i \rangle_N)^2}{N-1}}$$

**Observable imposé par la norme :**

$$\sigma_{biN} = 20 \log_{10} \left( \frac{\sigma_{iN} + \langle E_i \rangle_N}{\langle E_i \rangle_N} \right)$$

$$\sigma_{b3N} = 20 \log_{10} \left( \frac{\sigma_{3N} + \langle E_i \rangle_{3N}}{\langle E_i \rangle_{3N}} \right)$$

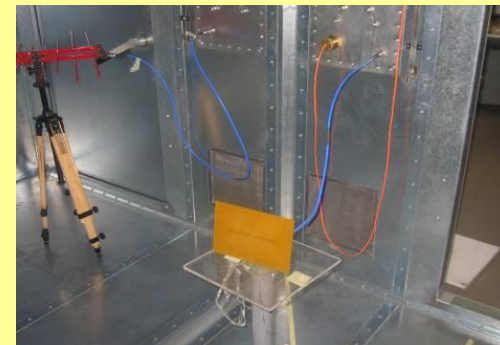
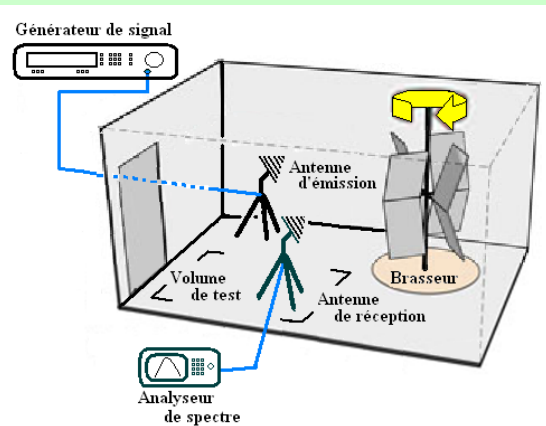


Gabarit imposé par la norme 61000-4-21

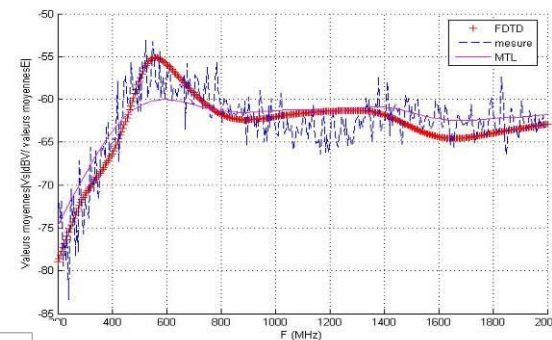
**3 composantes , 8 points → 3\*8 = 24 valeurs**

# La chambre réverbérante à brassage de modes

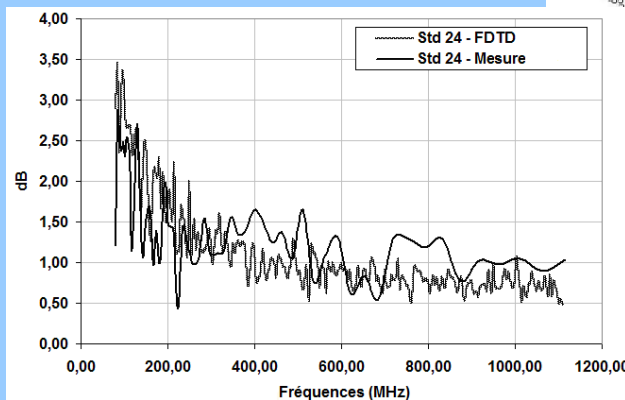
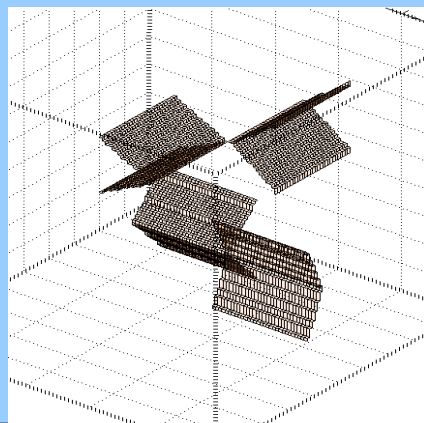
## Etude de CRBM



CEM de cartes : tension sur 50 ohm/ CC



## Modélisation FDTD de CRBM



CEM des cartes électroniques

# Arche Stargate

