

MODÉLISATION ET SIMULATION D'UNE CHAMBRE RÉVERBÉRANTE À BRASSAGE DE MODES À L'AIDE DE LA MÉTHODE DES DIFFÉRENCES FINIES DANS LE DOMAINE TEMPOREL

Frédéric PETIT

laboratoire SYSTÈMES DE COMMUNICATION (ESYCOM)

Université de Marne la Vallée

collaboration : France Télécom R&D, CERPEN

Objectifs

- tester des appareils médicaux soumis aux radiofréquences ≈ 1 GHz ;
- conception d'une petite chambre réverbérante ($\approx 1 \text{ m}^3$) ;
- petite chambre non disponible \Rightarrow utilisation de la chambre du CERPEM ($\approx 24 \text{ m}^3$) ;
- mise au point d'une méthodologie pour l'étude des chambres réverbérantes.

Plan

- 1 **Introduction**
- 2 **Propriétés des cavités**
- 3 **Principe de fonctionnement d'une CRBM**
- 4 **Modélisation de la CRBM**
- 5 **Étude modale en basses fréquences**
- 6 **Étude statistique en hautes fréquences**
- 7 **Influence de la forme du brasseur sur les résultats statistiques**
- 8 **Conclusion et perspectives**

1 Introduction

environnement électromagnétique de plus en plus pollué



étude des interactions entre systèmes électroniques :

- en émission ;
- en réception (immunité, susceptibilité) ;

perturbés par les ondes électromagnétiques



domaine d'étude de la CEM



la CRBM: un des moyens d'essais en phase de reconnaissance

BUT DE LA CHAMBRE RÉVERBÉRANTE À BRASSAGE DE MODES (CRBM) :

obtention d'un champ électromagnétique **statistiquement**
homogène et **isotrope** en espace, **uniforme** en fréquence
dans **un volume donné**



avantages par rapport à d'autres moyens d'essais (chambre anéchoïque) :

- l'objet à tester est éclairé sous toutes ses faces ;
- moins de puissance à injecter dans l'enceinte à niveau de champ égal.

2 Propriétés des cavités

- la CRBM: cavité de Faraday, de plusieurs m^3 , de volume adapté :
 - à la bande de fréquences étudiée ;
 - aux dimensions de l'objet sous test.
- établissement d'un champ électromagnétique stationnaire, dû aux réflexions sur les parois.

2 Propriétés des cavités : pertes

présence de pertes au sein de la cavité



facteur déterminant dans le fonctionnement d'une CRBM

- pertes Joule dans les parois ;
- charge des antennes présentes dans l'enceinte ;
- puissance absorbée par l'objet sous test ;
- fuites par rayonnement (cavité de Faraday non parfaite).

2 Propriétés des cavités : notion de facteur de qualité Q

pertes caractérisées par le facteur de qualité Q
défini à la fréquence f par

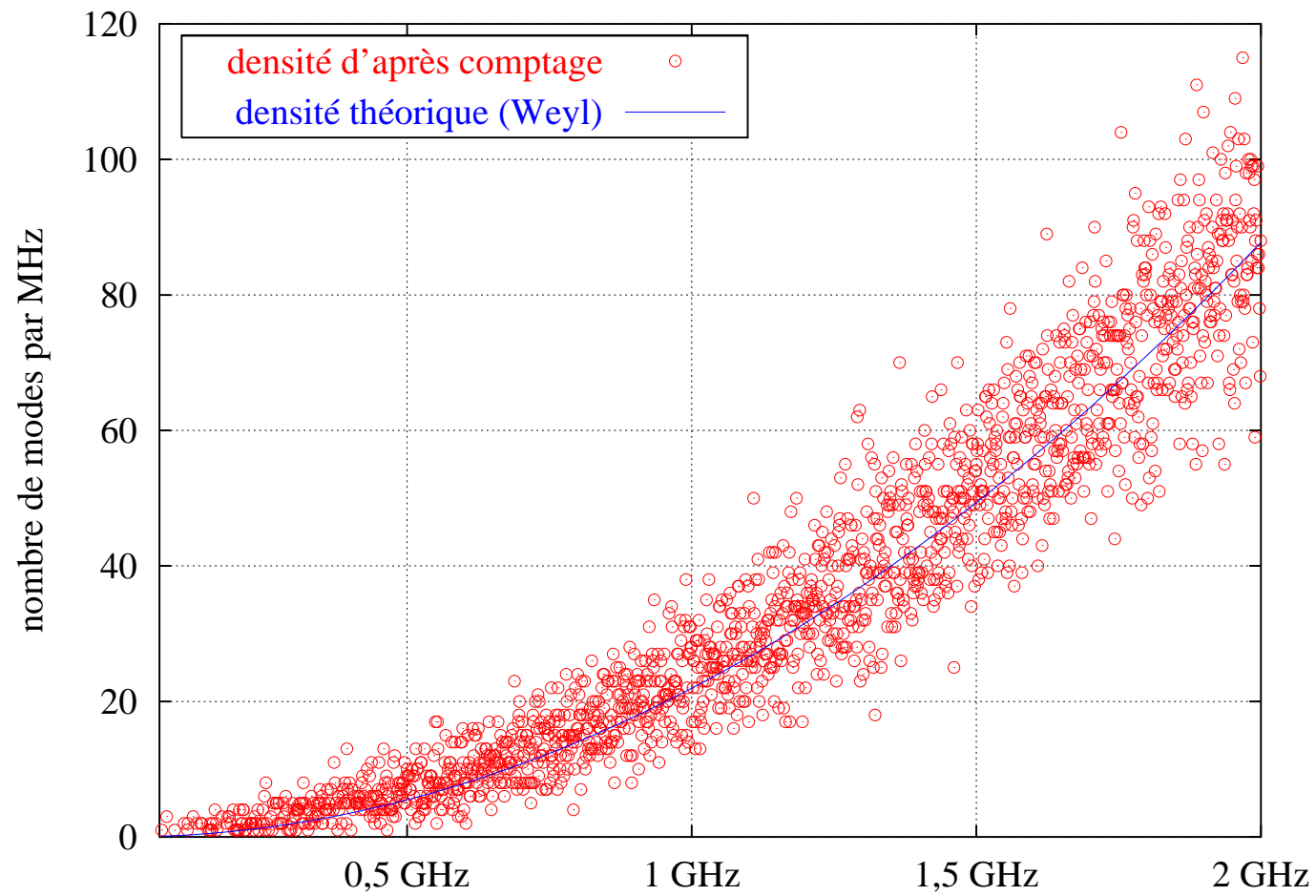
$$Q = 2\pi f \frac{U_s}{P_d}$$



élargissement des raies de résonance

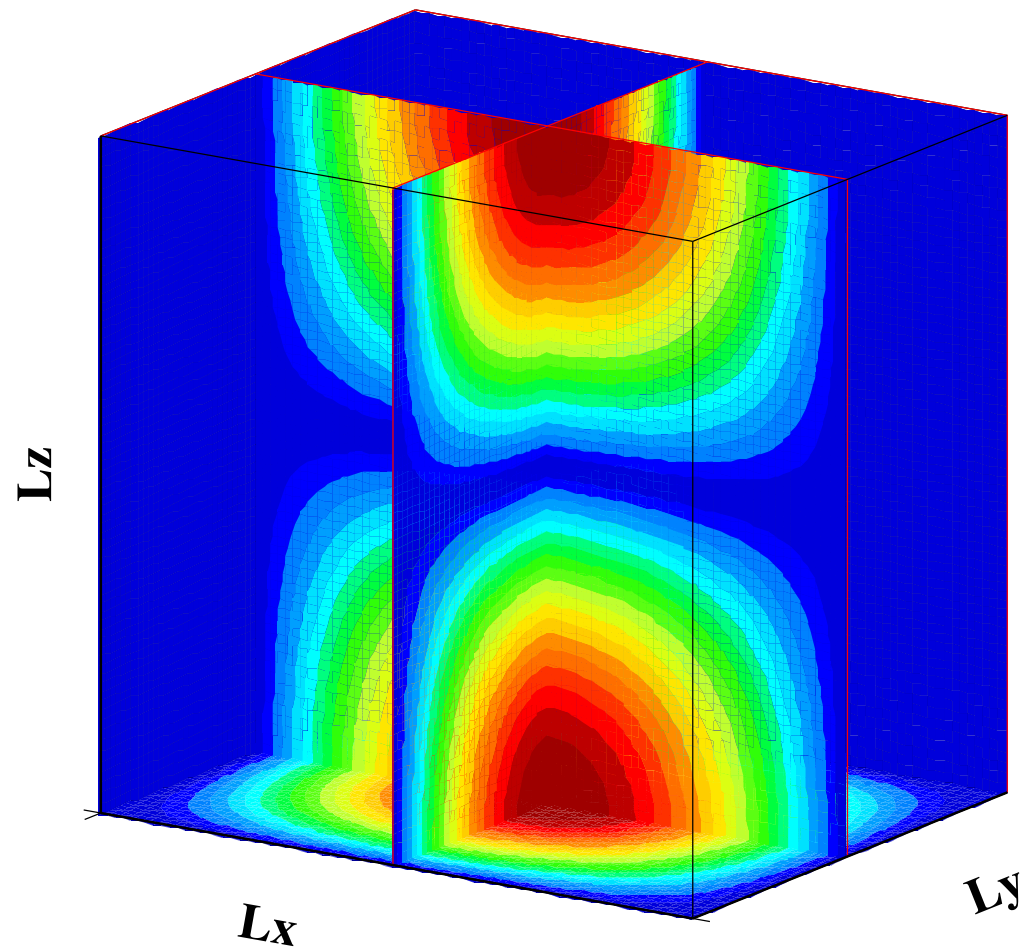
- Q faible \implies pertes importantes \implies raies larges;
- Q élevé \implies pertes faibles \implies raies étroites.

2 Propriétés des cavités : notion de densité de modes



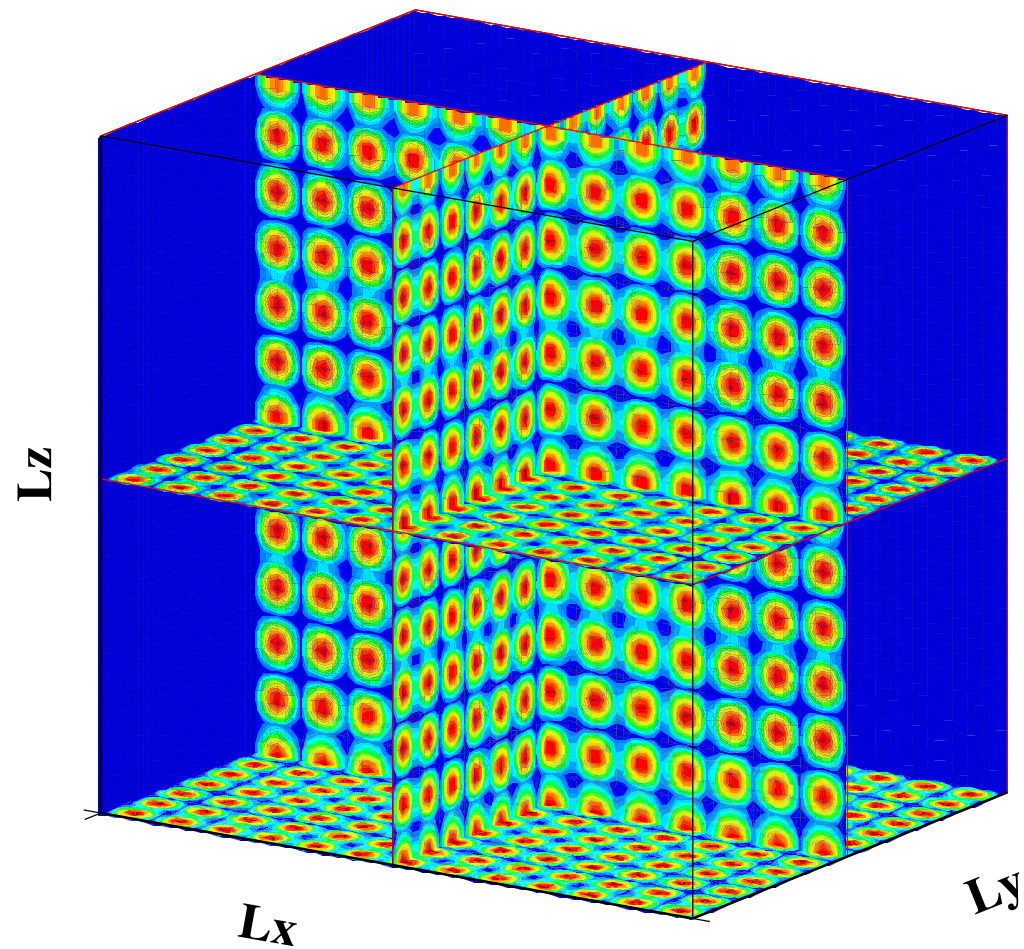
Densité de modes de la cavité ($3,105 \times 2,475 \times 3,067 \text{ m}^3$)

2 Propriétés des cavités : mode en basse fréquence



Cartographie du mode TE/TM_{111} à 91,6 MHz

2 Propriétés des cavités : mode en haute fréquence



Cartographie du mode $TE/TM_{13 12 12}$ à 1,2 GHz

en résumé :

- le spectre est suffisamment uniforme :
 - en hautes fréquences (plusieurs GHz) ;
 - dans le cas de pertes importantes (raies larges).

le problème est que :

- la fréquence de travail est bien inférieure à quelques GHz ;
- l'augmentation des pertes dans la chambre (absorbants) nécessite d'injecter plus de puissance dans l'enceinte.

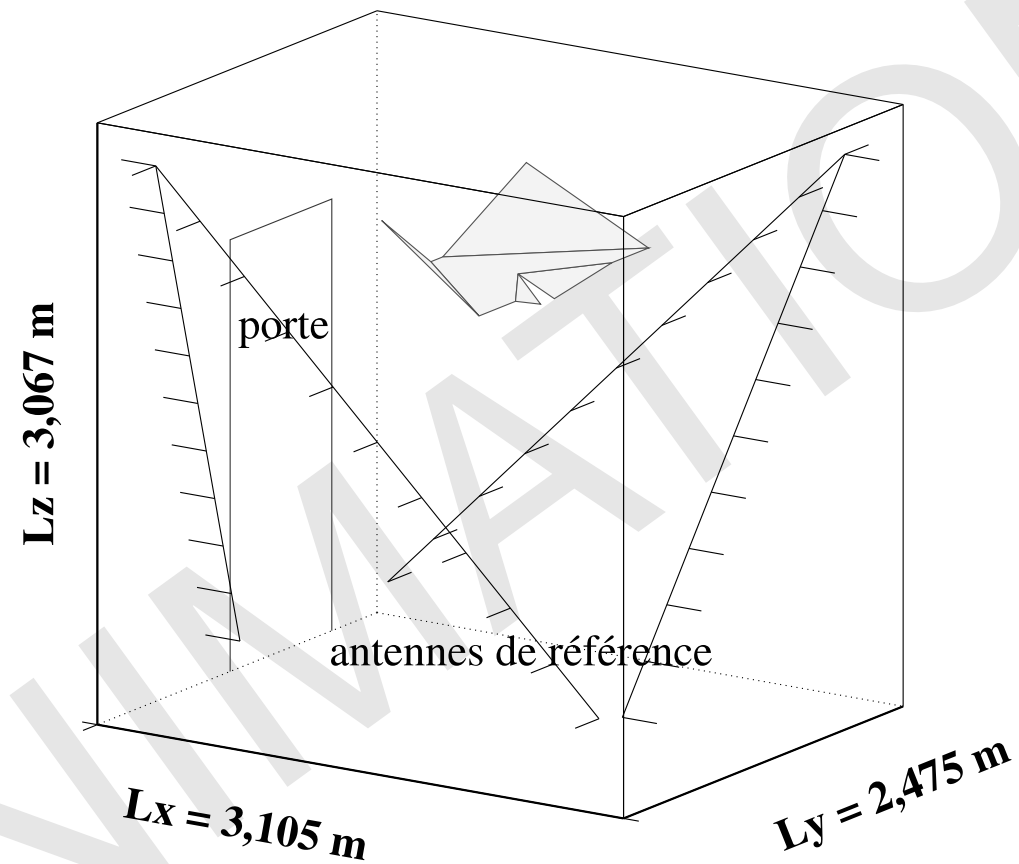
3 Principe de fonctionnement d'une CRBM

une solution : modification de la géométrie de la chambre
dont dépendent les fréquences de résonance



introduction d'un brasseur de modes en rotation
perturbant périodiquement les conditions aux limites

3 Principe de fonctionnement d'une CRBM



Brasseur de la chambre du CERPEM

3 Principe de fonctionnement d'une CRBM: fréquences d'utilisation

la CRBM est une **cavité surdimensionnée** par rapport à la longueur d'onde



la CRBM n'est utilisée qu'au-delà d'une certaine fréquence
(fréquence minimale de fonctionnement ou

lowest useable frequency, f_{LUF})

fixée par plusieurs critères **empiriques** :

- environ 60 modes en-dessous de la fréquence de travail ;
- fréquence de travail comprise entre 4 et 6 fois la fréquence fondamentale.

4 Modélisation de la CRBM

différences finies dans le domaine temporel
(Finite-Difference Time-Domain, ou FDTD)

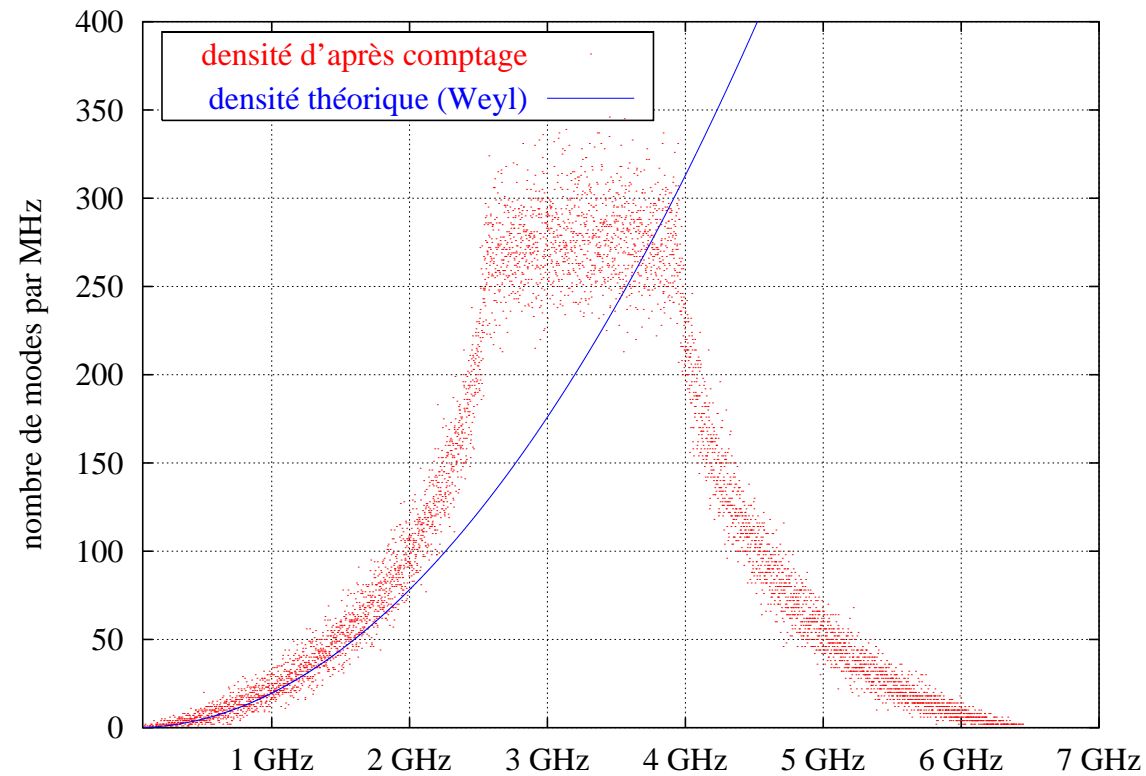


- méthode temporelle \Rightarrow étude du spectre sur une large bande, au moyen d'une transformée de Fourier discrète (TFD) ;
- formalisme très simple ;
- discrétisation des équations de Maxwell sur un maillage formé de cellules parallélépipédiques rectangulaires.

4.1 Erreurs numériques liées à la FDTD

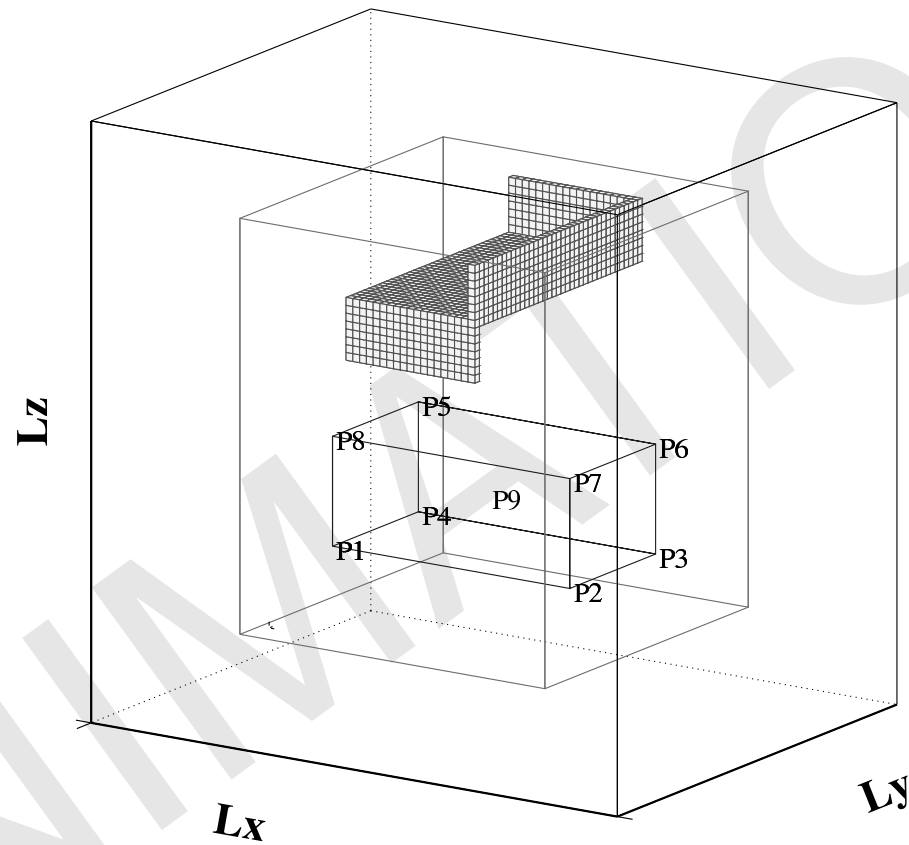
- dispersion numérique qui modifie la vitesse de propagation des ondes EM dans le maillage ;
- discrétisation du brasseur de modes par des cellules cubiques \Rightarrow utilisation d'un maillage non uniforme.

4 Modélisation de la CRBM: erreurs numériques liées à la FDTD



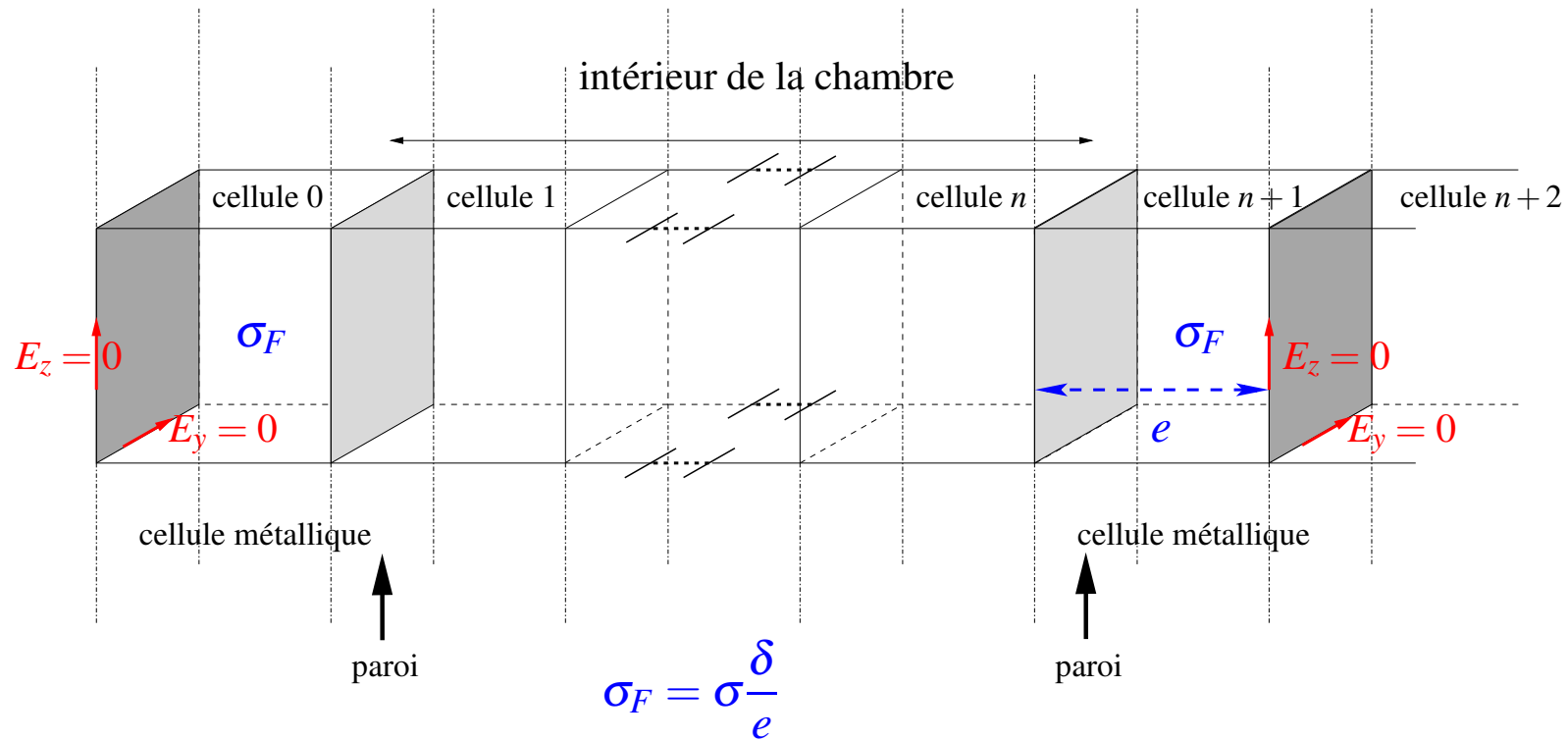
Densité de modes numérique en fonction de la fréquence (taille des cellules en $\lambda/10$ à 750 MHz (0,99 c))

4 Modélisation de la CRBM: erreurs numériques liées à la FDTD



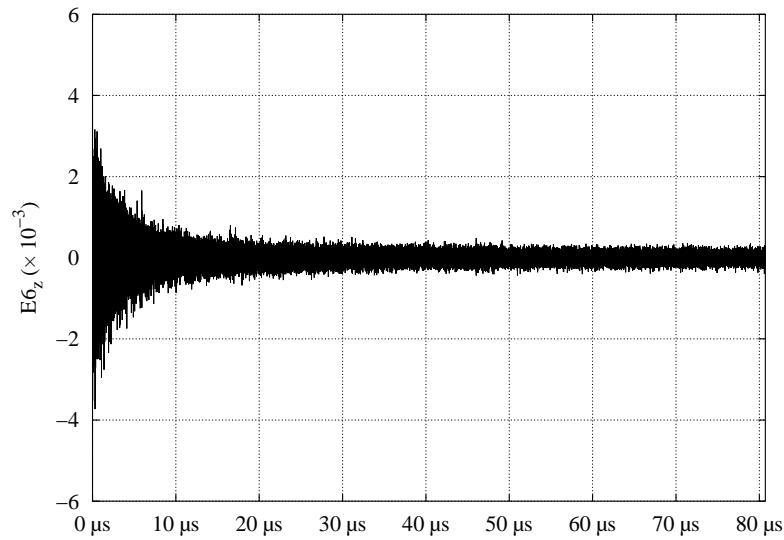
Brasseur modélisé pour les études statistiques (brasseur3)

4.2 Méthode des pertes simulées

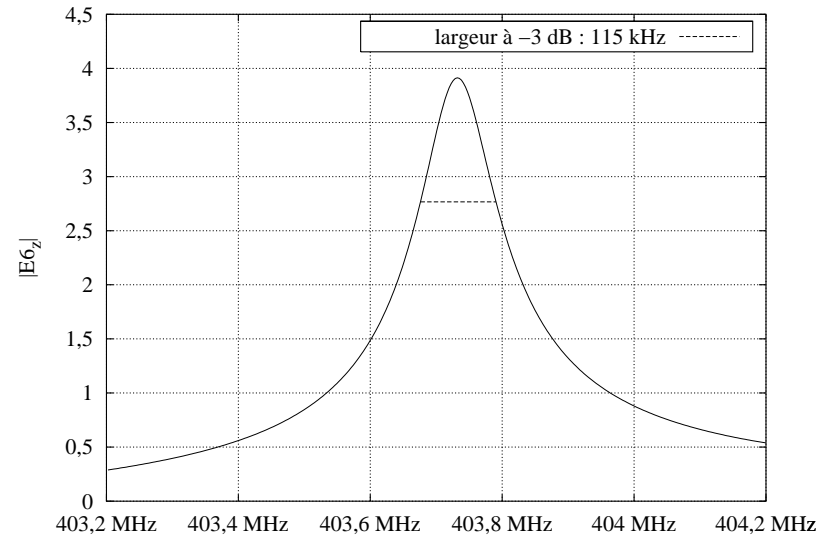


Implémentation de la conductivité dans les parois

4 Modélisation de la CRBM: méthode des pertes simulées



(a) Signal temporel



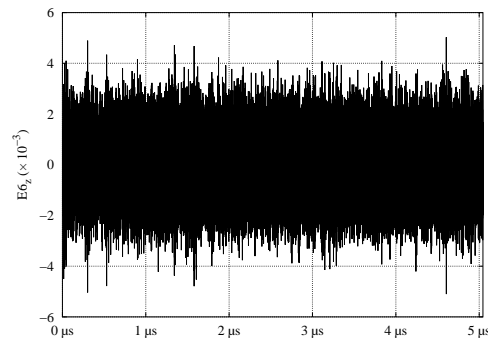
(b) Spectre d'une raie ($Q = 3500$)

Signal temporel et spectre pour $T_{max} = 80 \mu s$ et $\sigma_F = 200 S \cdot m^{-1}$

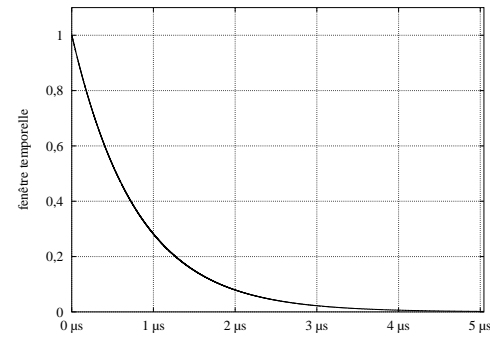
4.3 Méthode des pertes modélisées

- prise en compte du facteur de qualité *composite* Q dans la **fonction de transfert** de la cavité ;
- calcul de la fenêtre temporelle correspondante ;
- application de cette fenêtre sur le résultat temporel de la simulation.

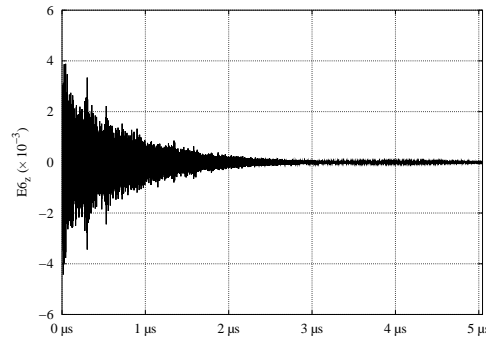
4 Modélisation de la CRBM: méthode des pertes modélisées



(a) Signal temporel sans pertes

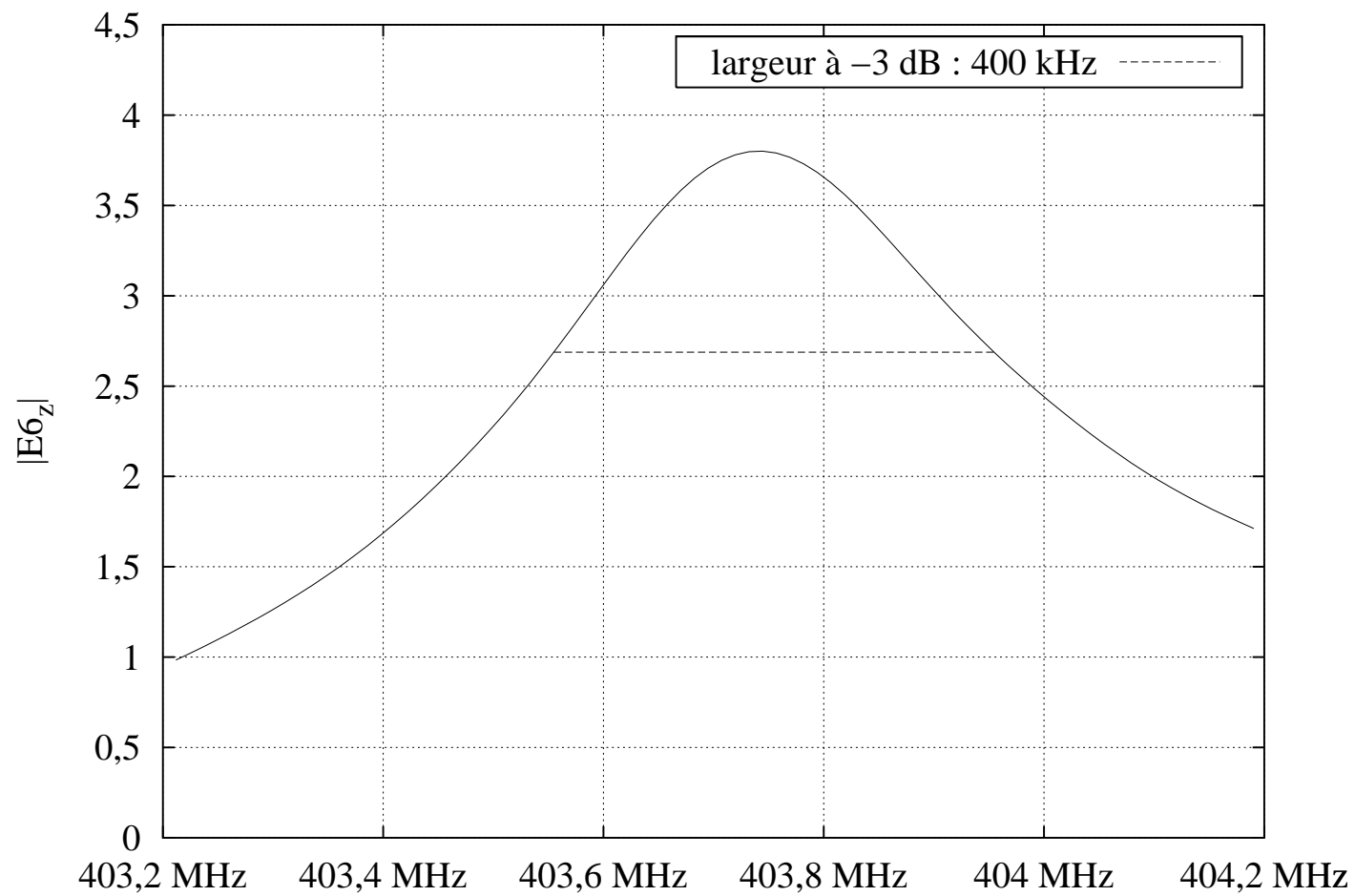


(b) Fenêtre temporelle de la fonction de transfert



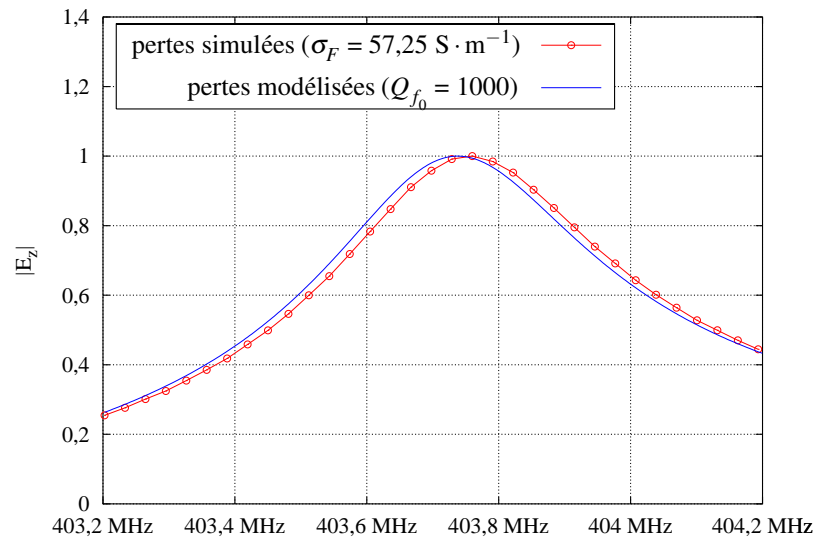
Signal temporel pondéré par la fenêtre de pertes

4 Modélisation de la CRBM: méthode des pertes modélisées

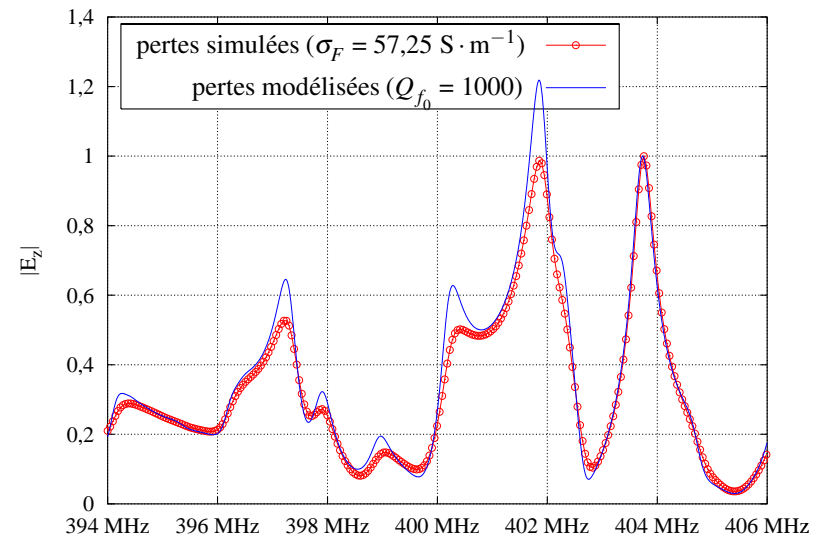


Spectre d'une raie pour $T_{max} = 5 \mu s$ et $Q = 1000$

4 Modélisation de la CRBM: comparaison des deux méthodes



(a) Spectre centré sur $f_0 = 403,72 \text{ MHz}$

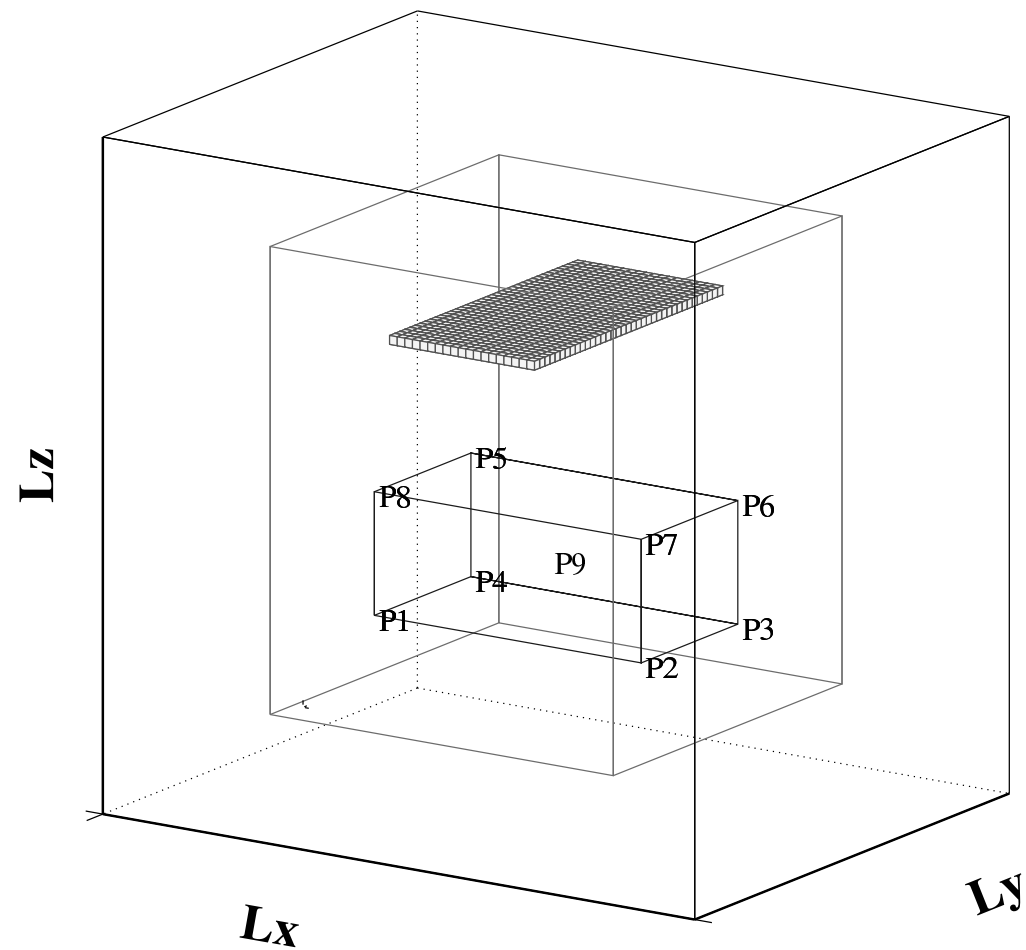


(b) Spectre sur une dizaine de MHz

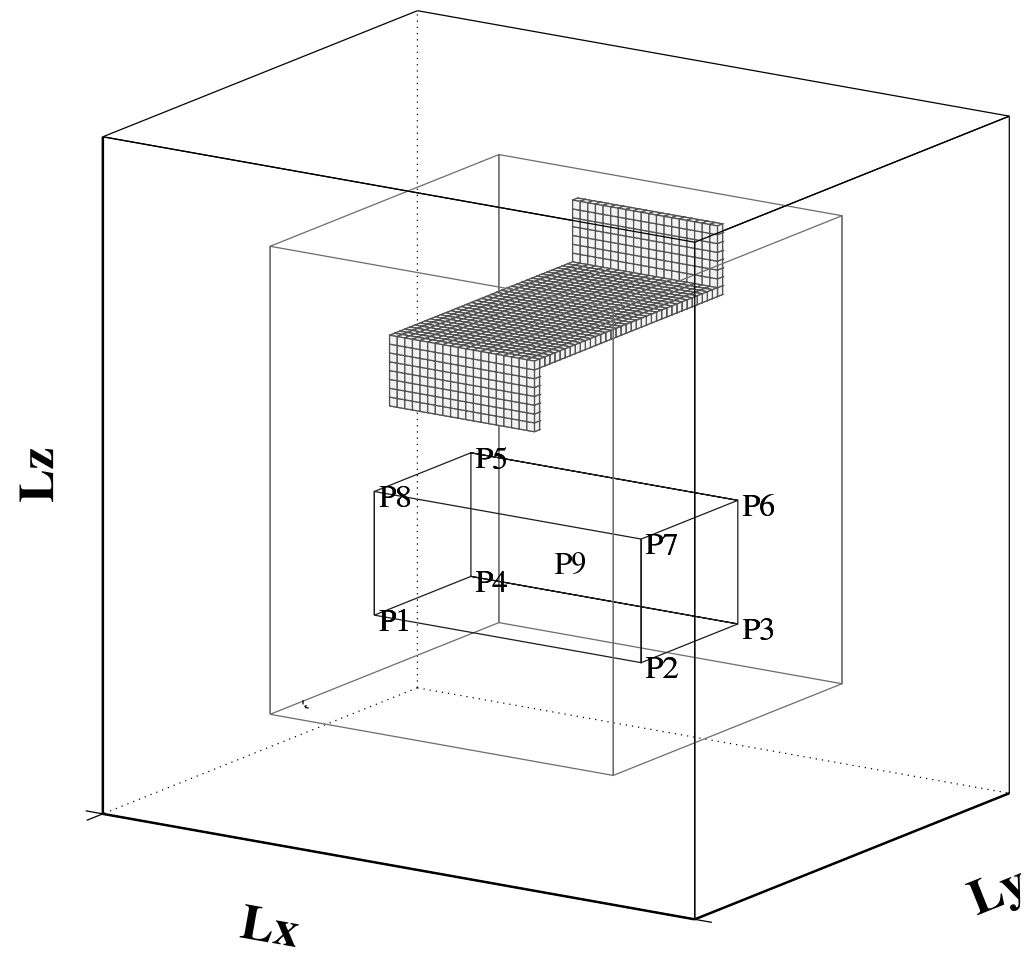
Comparaison des deux méthodes de pertes autour d'une fréquence et sur une bande étroite

5 Étude modale en basses fréquences

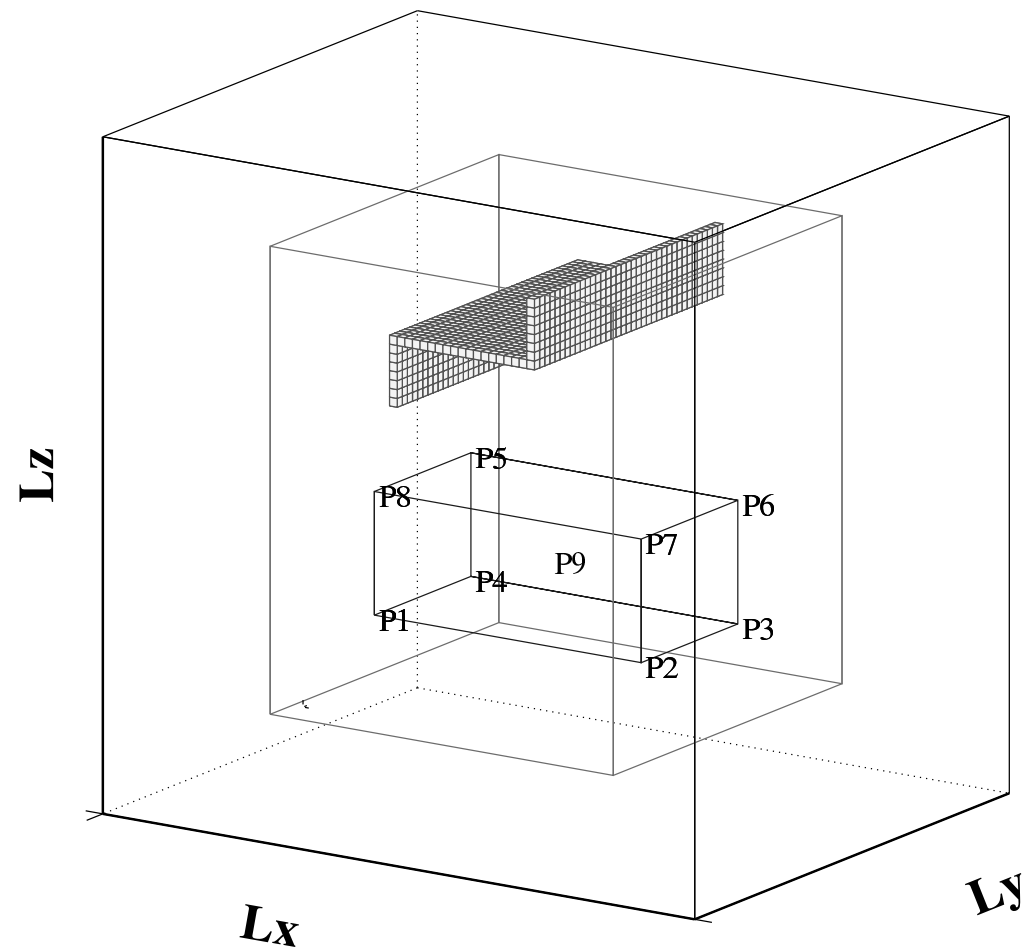
- objectif : étudier l'influence du brasseur sur les fréquences de résonance des premiers modes propres de la chambre ;
- de plus, une étude en basses fréquences sans brasseur permet de valider le code calcul par rapport à des résultats analytiques :
 - à partir des spectres de raies ;
 - à partir des cartographies de champ.
- pour cette étude, on a utilisé plusieurs brasseurs, de forme simple.



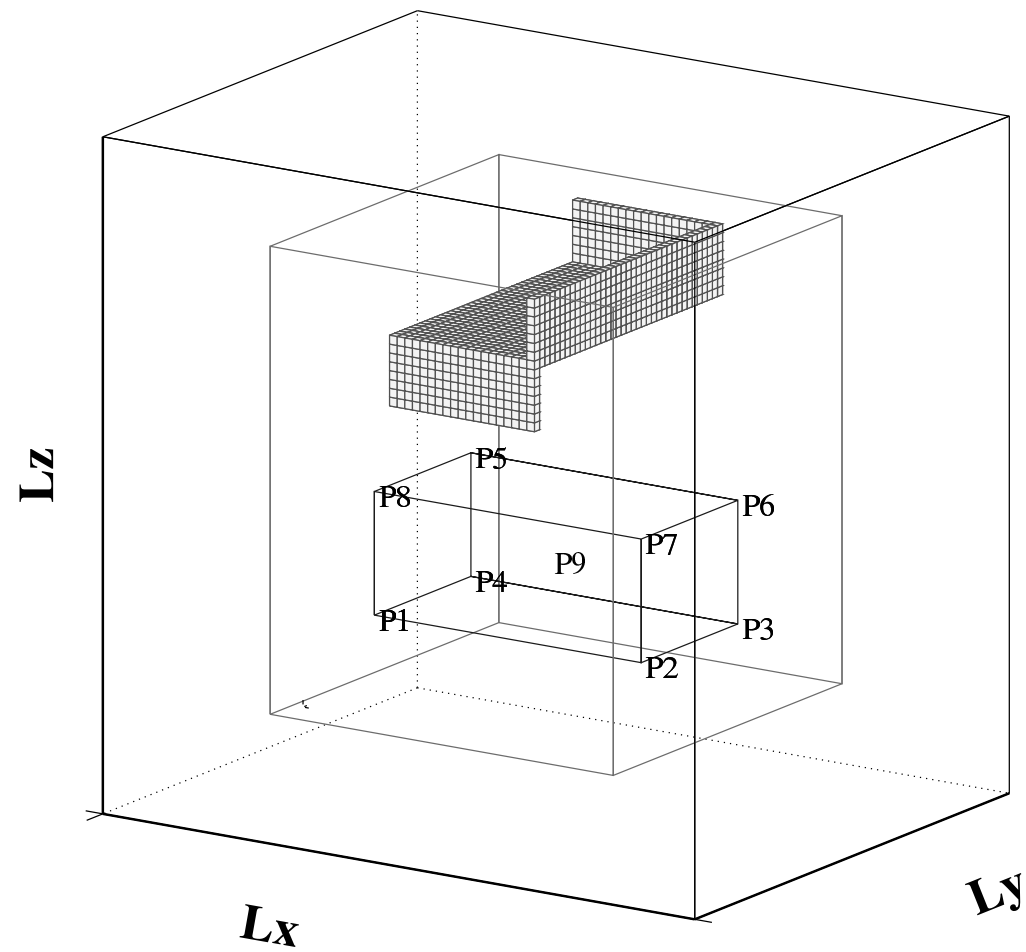
Brasseur plan



Brasseur1



Brasseur2



Brasseur3

3 types de modes propres dans une cavité (chambre sans brasseur)

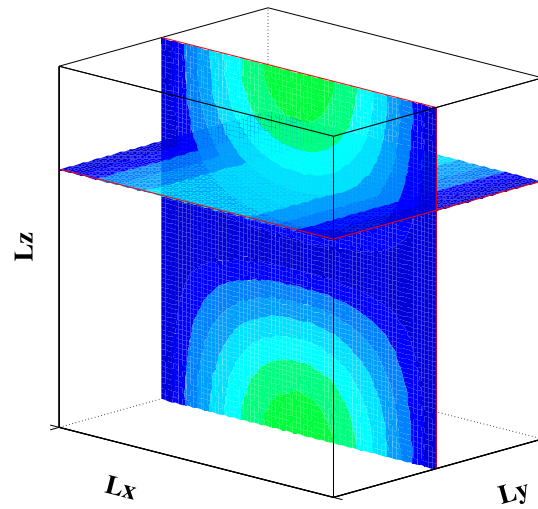


3 types de comportement en présence du brasseur :

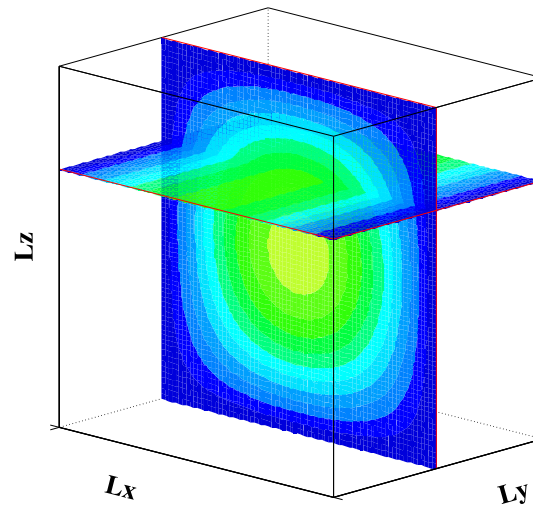
- modes TE_{0np} et TE_{m0p} : indépendants d'une variable d'espace, ils subissent un décalage fréquentiel de plusieurs MHz entre une position du brasseur à 0° et à 90° ;
- modes TM_{mn0} : indépendants de la variable d'espace z , ils sont peu influencés par la présence du brasseur (horizontal) ;
- modes TE/TM_{mnp} : dépendants des 3 variables d'espace, ils subissent un décalage fréquentiel de l'ordre du MHz entre 0° et une position oblique du brasseur.

Remarque : ces modes sont définis par rapport à l'axe de rotation du brasseur
(axe Oz)

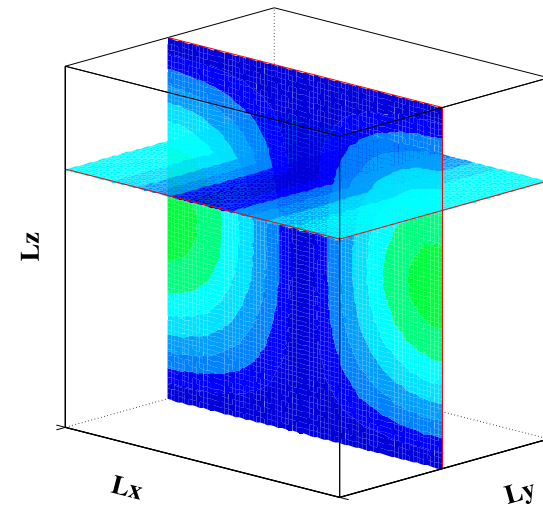
5 Étude modale en basses fréquences : bande 45-80 MHz



(a) Composante H_x



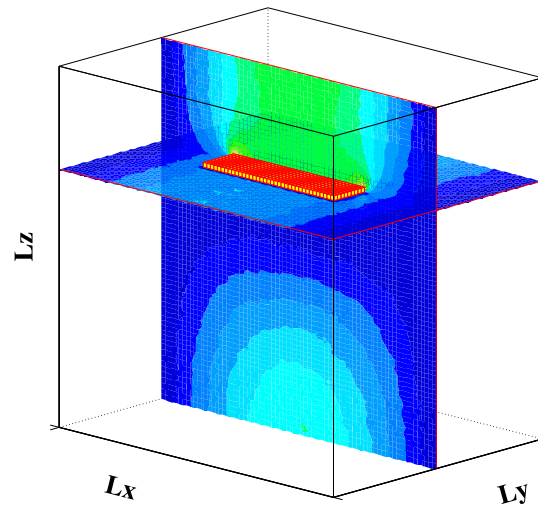
(b) Composante E_y



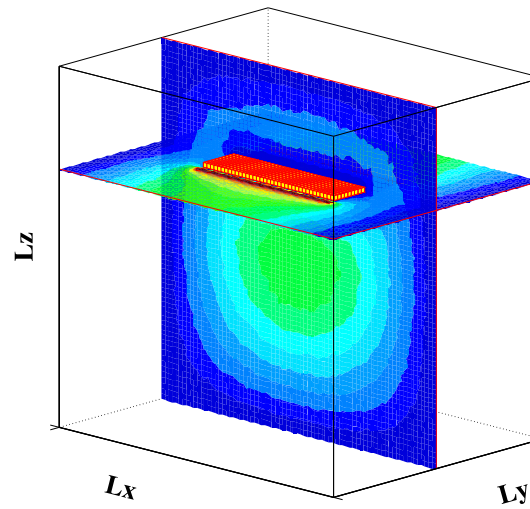
(c) Composante H_z

Cartographies du mode TE_{101} à 68,62 MHz

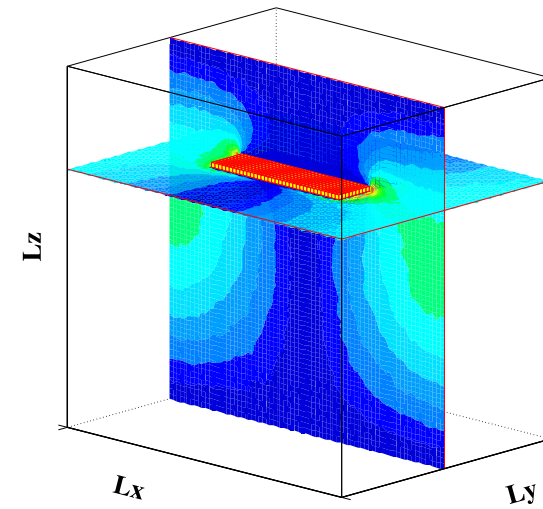
5 Étude modale en basses fréquences : bande 45-80 MHz



(a) Composante H_x



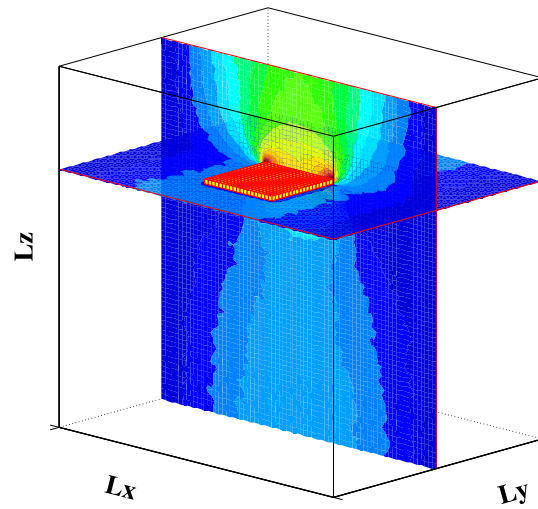
(b) Composante E_y



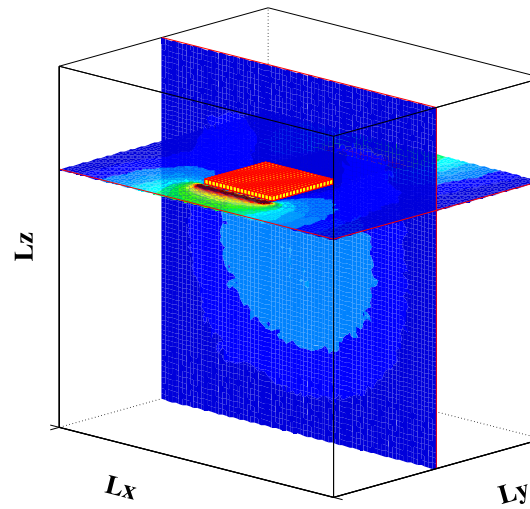
(c) Composante H_z

Cartographies du mode à 65,59 MHz, brasseur à 90°

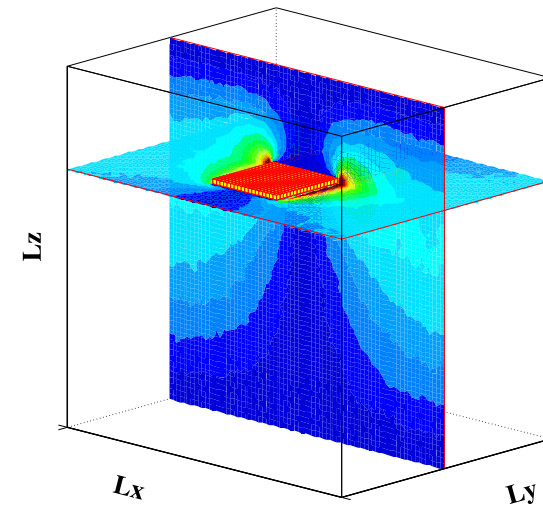
5 Étude modale en basses fréquences : bande 45-80 MHz



(a) Composante H_x



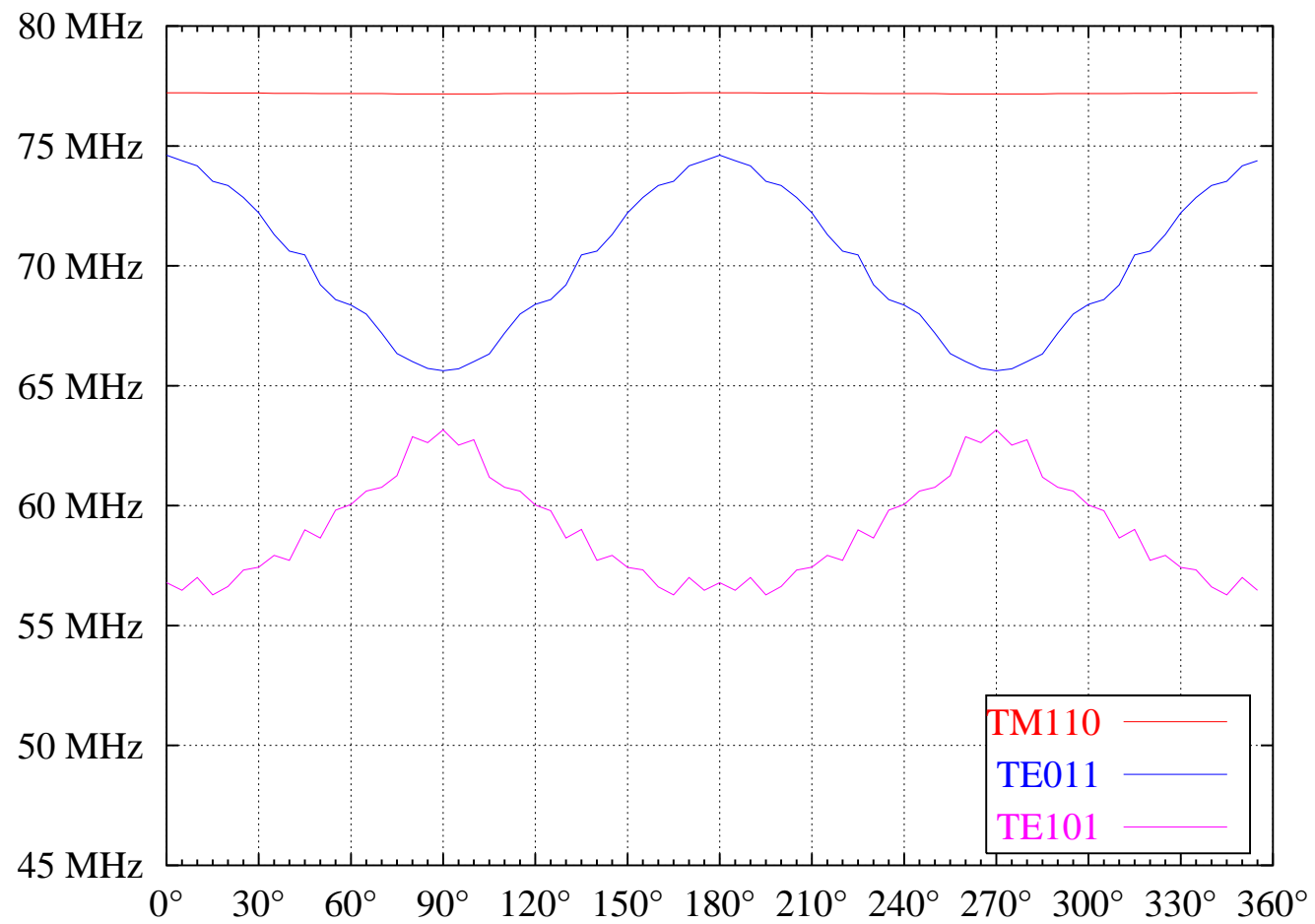
(b) Composante E_y



(c) Composante H_z

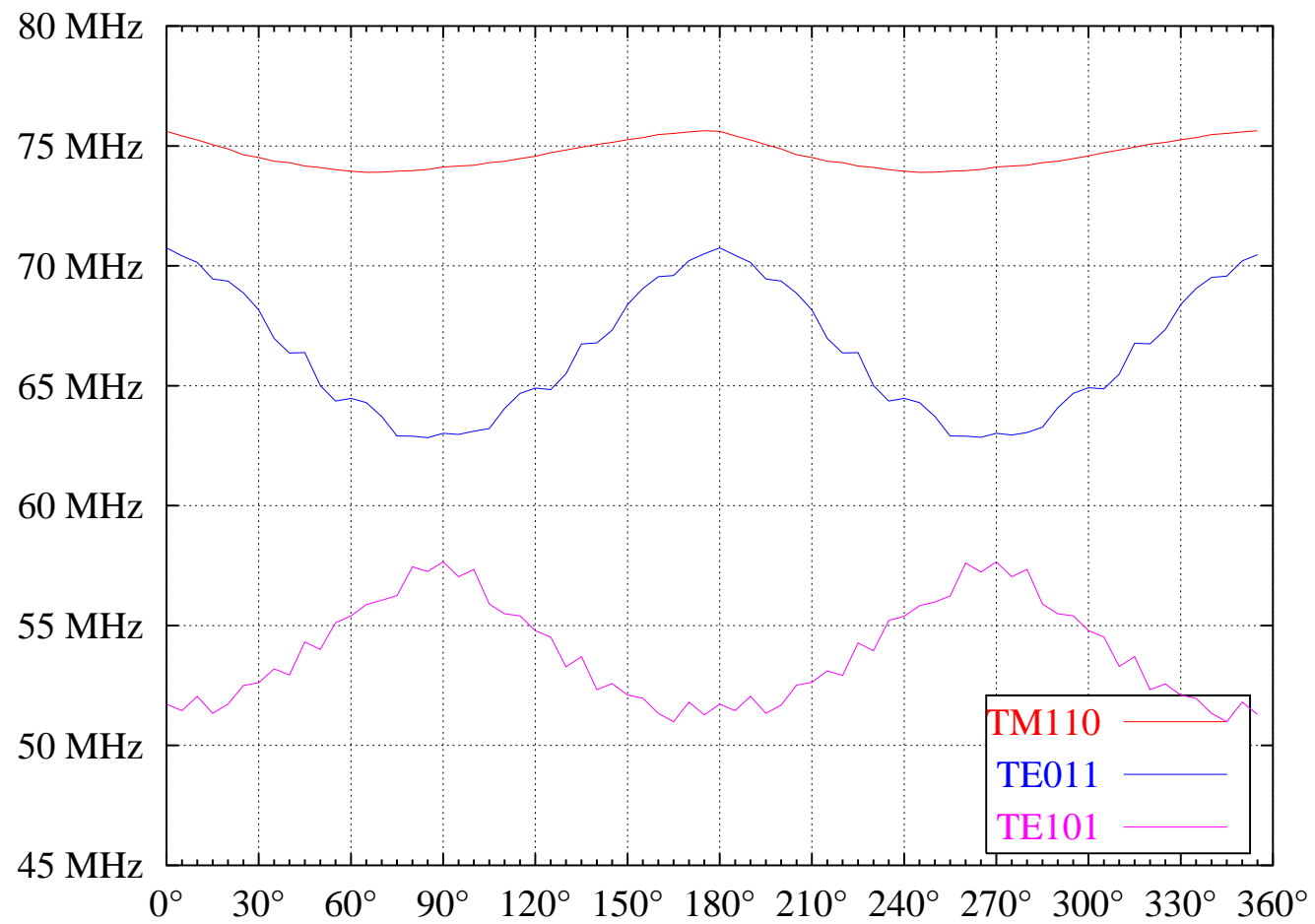
Cartographies du mode à 56,76 MHz, brasseur à 0°

5 Étude modale en basses fréquences : bande 45-80 MHz



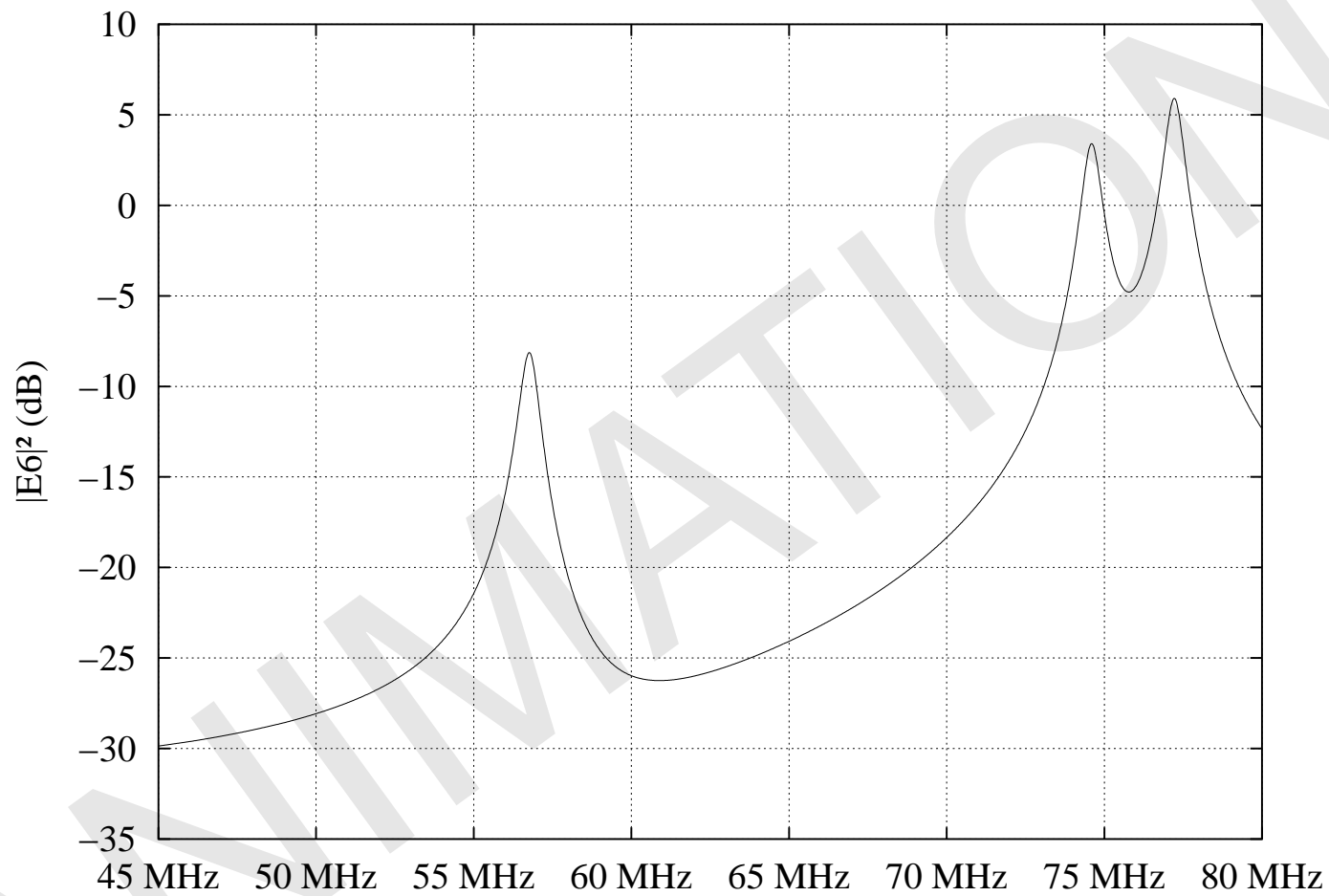
Variations fréquentielles des modes (brasseur plan)

5 Étude modale en basses fréquences : bande 45-80 MHz



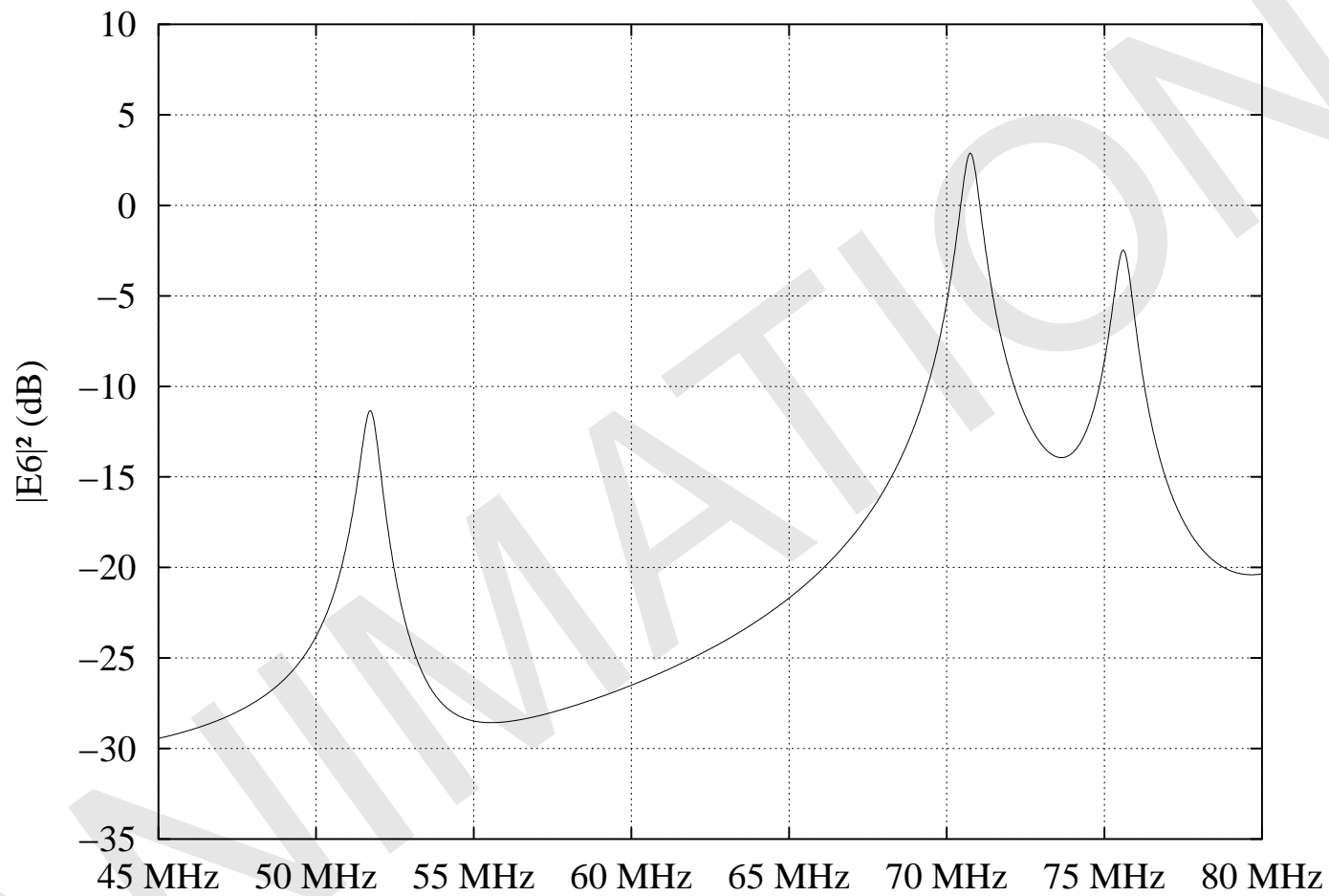
Variations fréquentielles des modes (brasseur3)

5 Étude modale en basses fréquences : bande 45-80 MHz



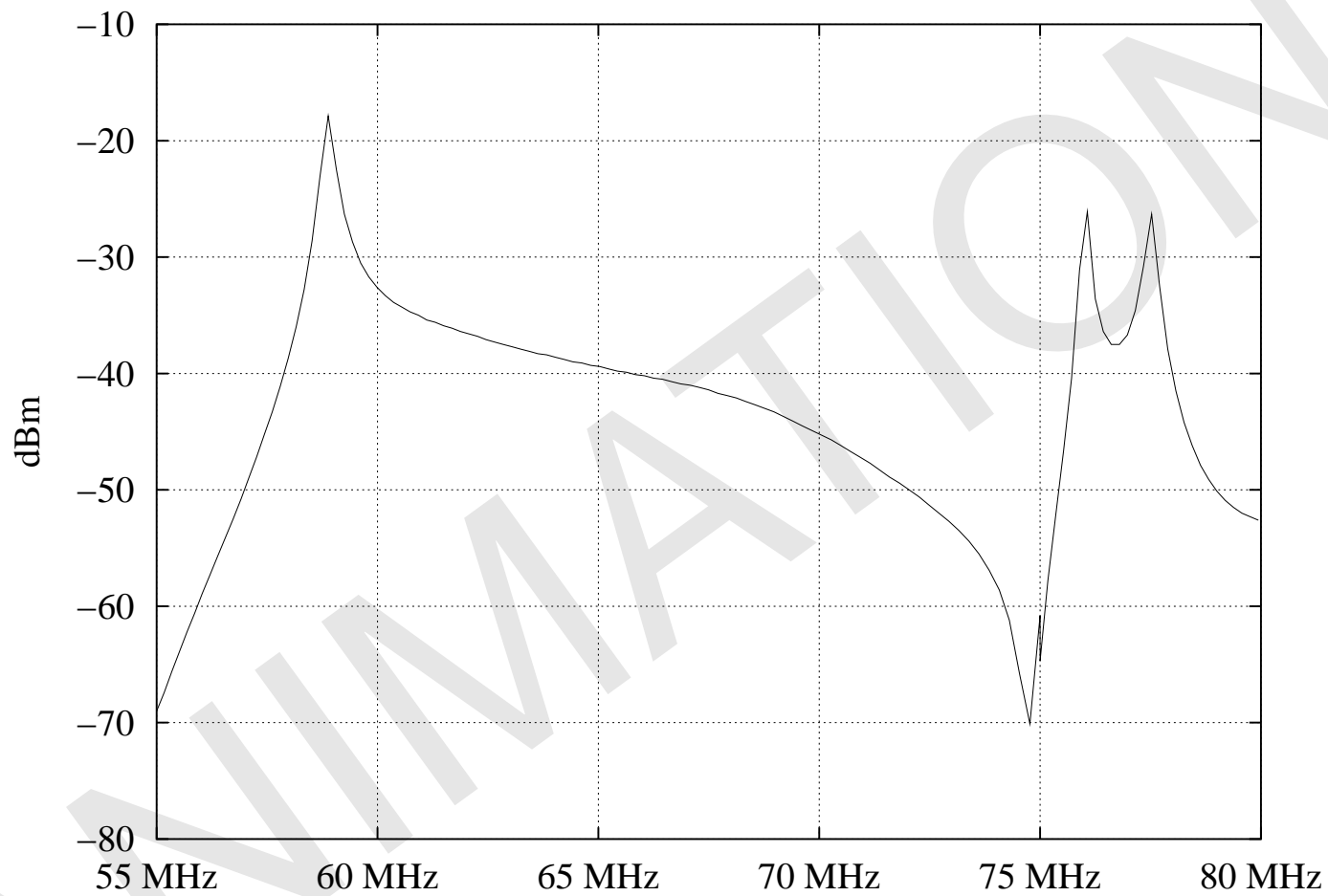
Spectres de puissance avec le brasseur plan (simulations)

5 Étude modale en basses fréquences : bande 45-80 MHz



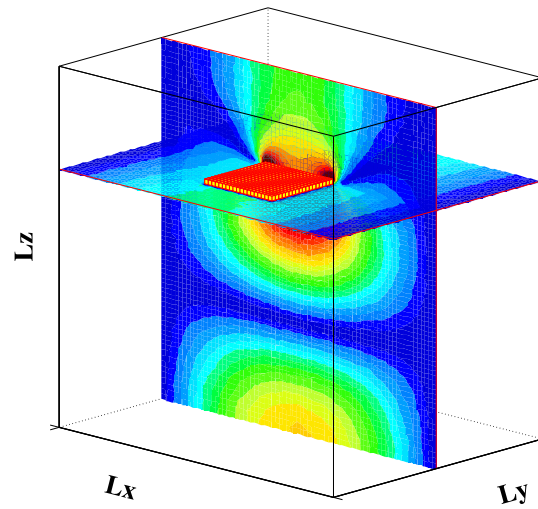
Spectres de puissance avec le brasseur3 (simulations)

5 Étude modale en basses fréquences : bande 55-80 MHz

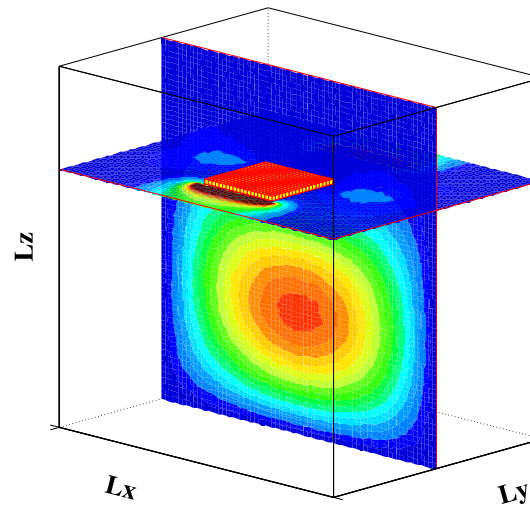


Spectres de puissance (mesures CERPEM)

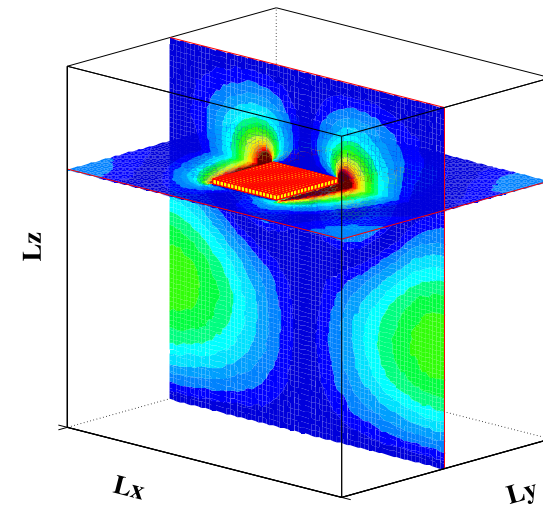
5 Étude modale en basses fréquences : bande 80-96 MHz



(a) Composante H_x



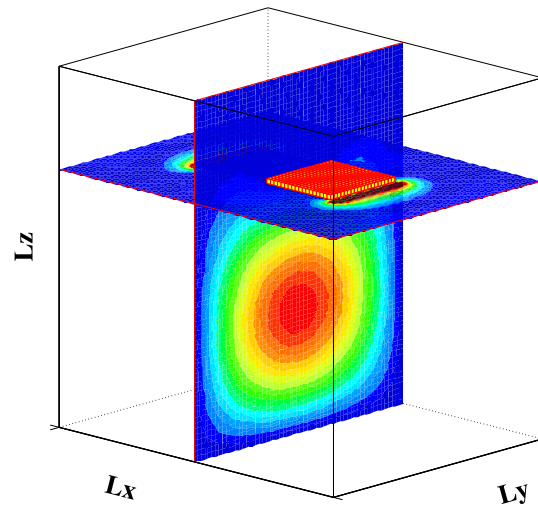
(b) Composante E_y



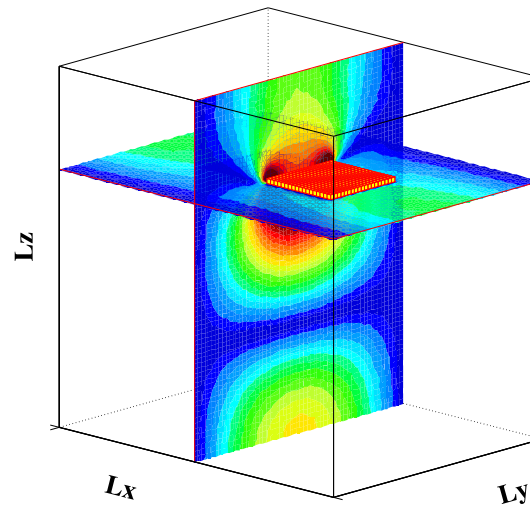
(c) Composante H_z

Cartographies du mode à 88,43 MHz, brasseur à 0°

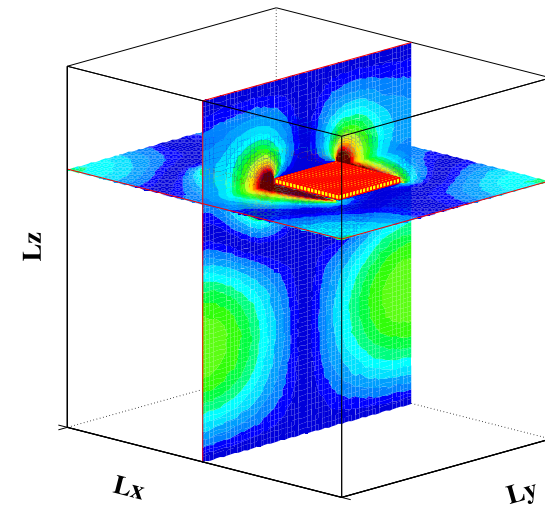
5 Étude modale en basses fréquences : bande 80-96 MHz



(a) Composante E_x



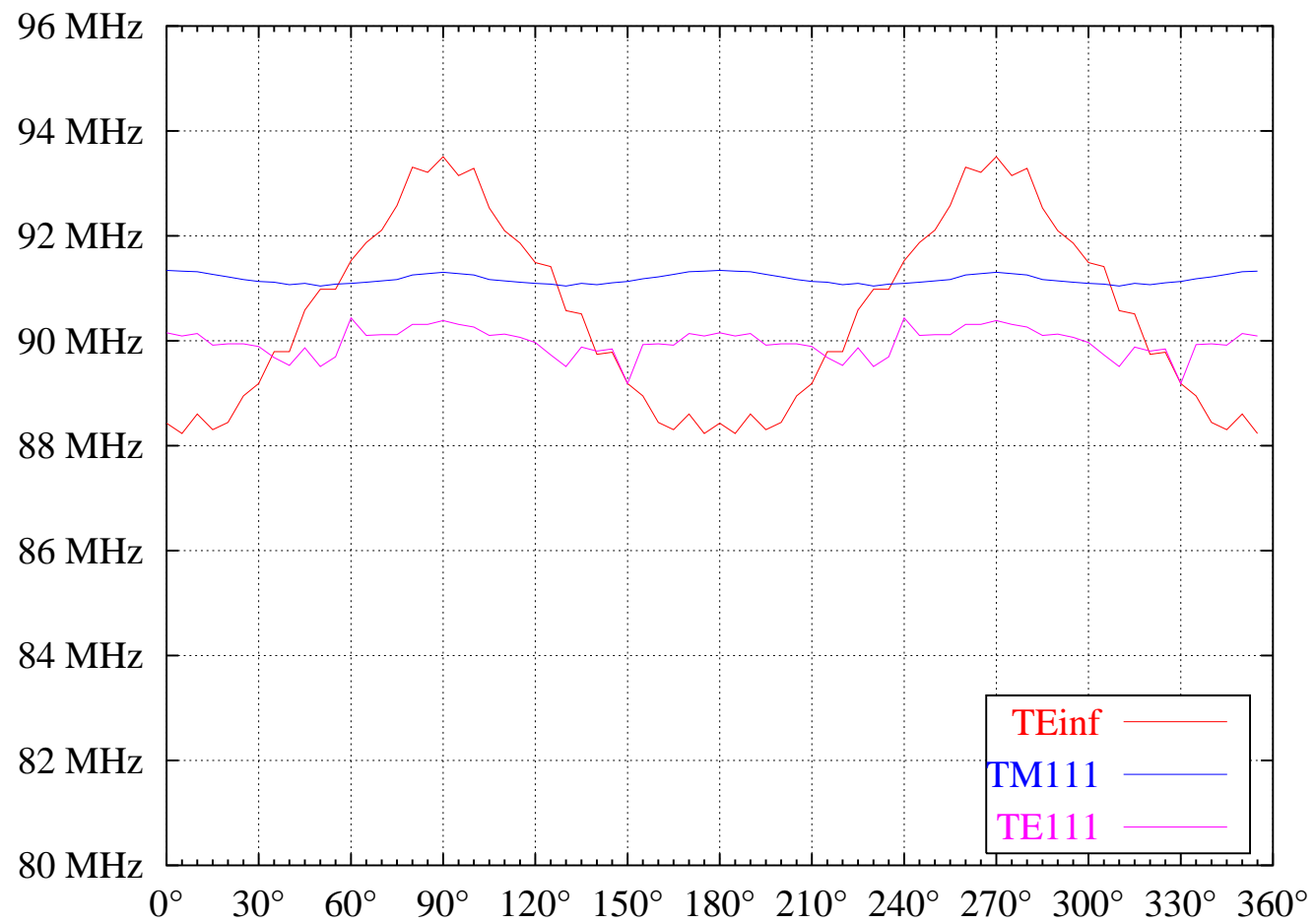
(b) Composante H_y



(c) Composante H_z

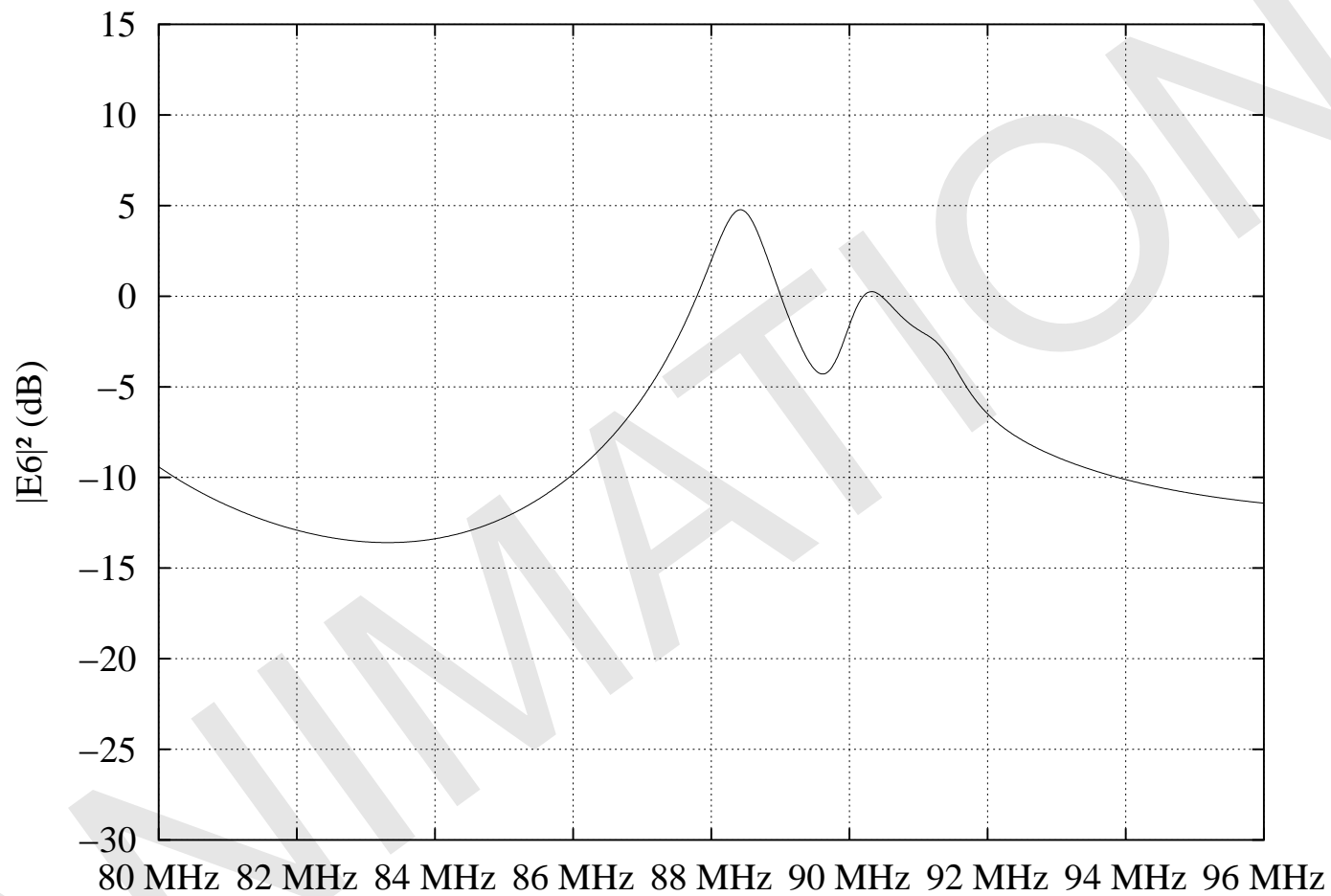
Cartographies du mode à 93,48 MHz, brasseur à 90°

5 Étude modale en basses fréquences : bande 80-96 MHz



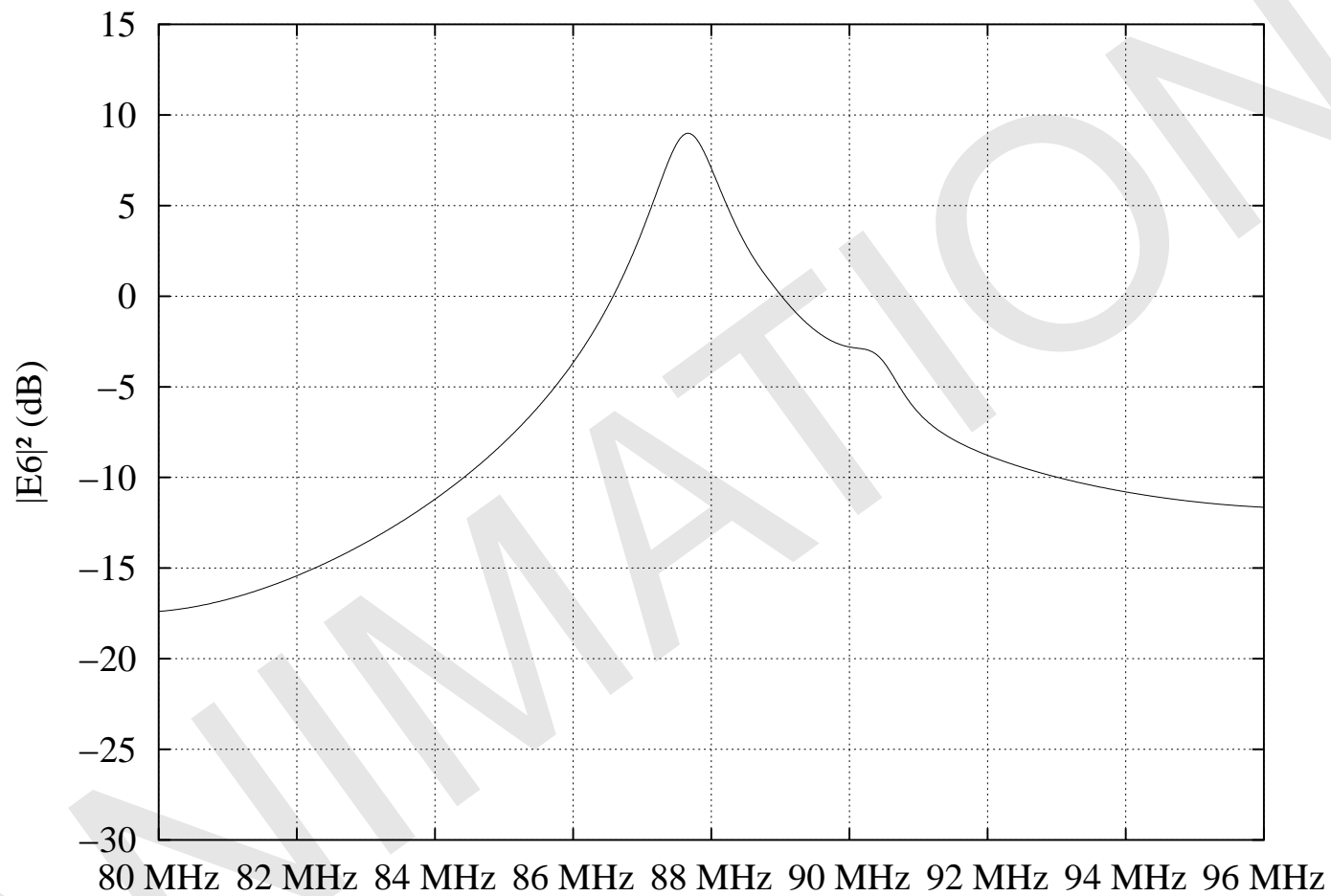
Variations fréquentielles des modes (brasseur plan)

5 Étude modale en basses fréquences : bande 80-96 MHz



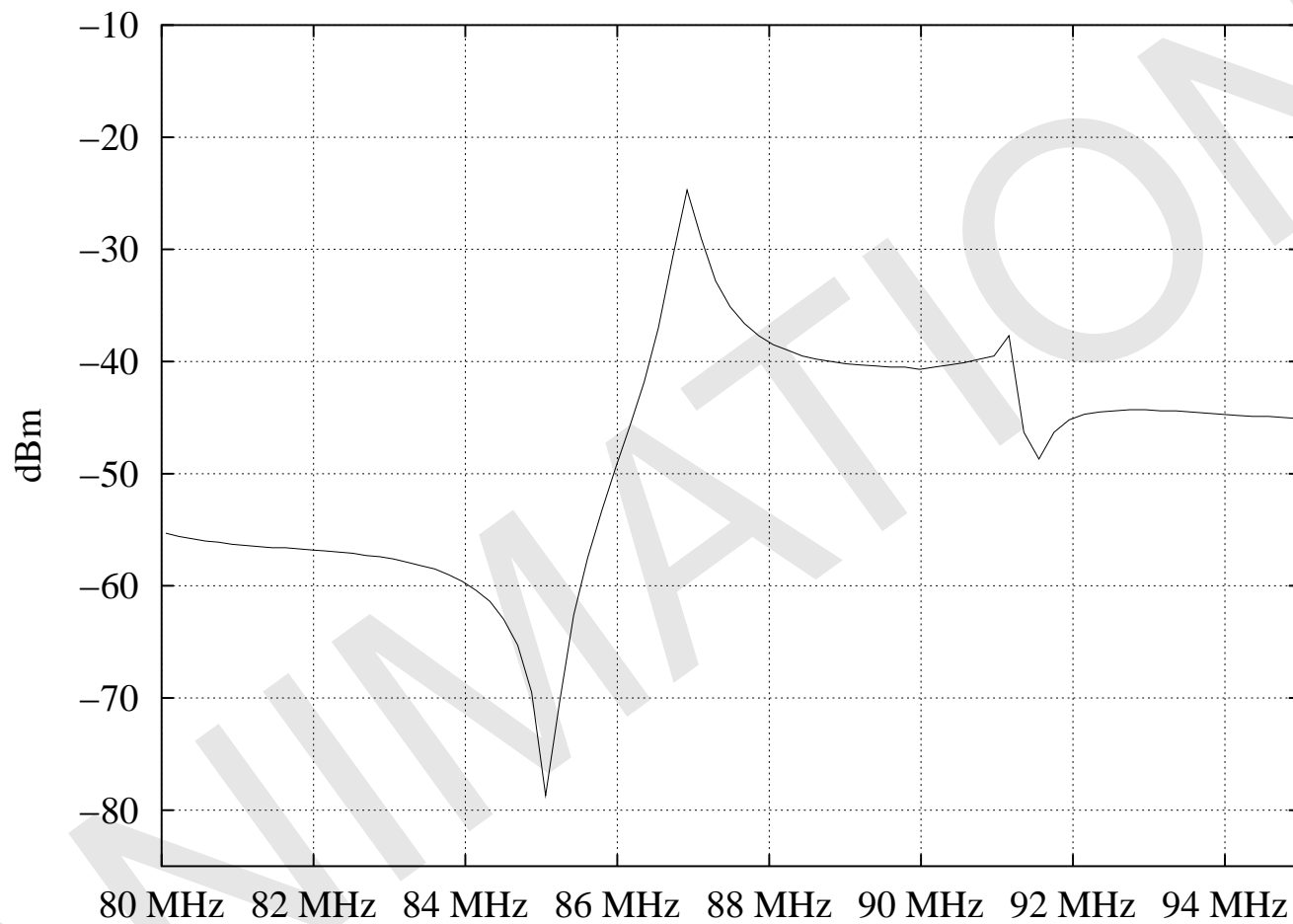
Spectres de puissance avec le brasseur plan (simulations)

5 Étude modale en basses fréquences : bande 80-96 MHz



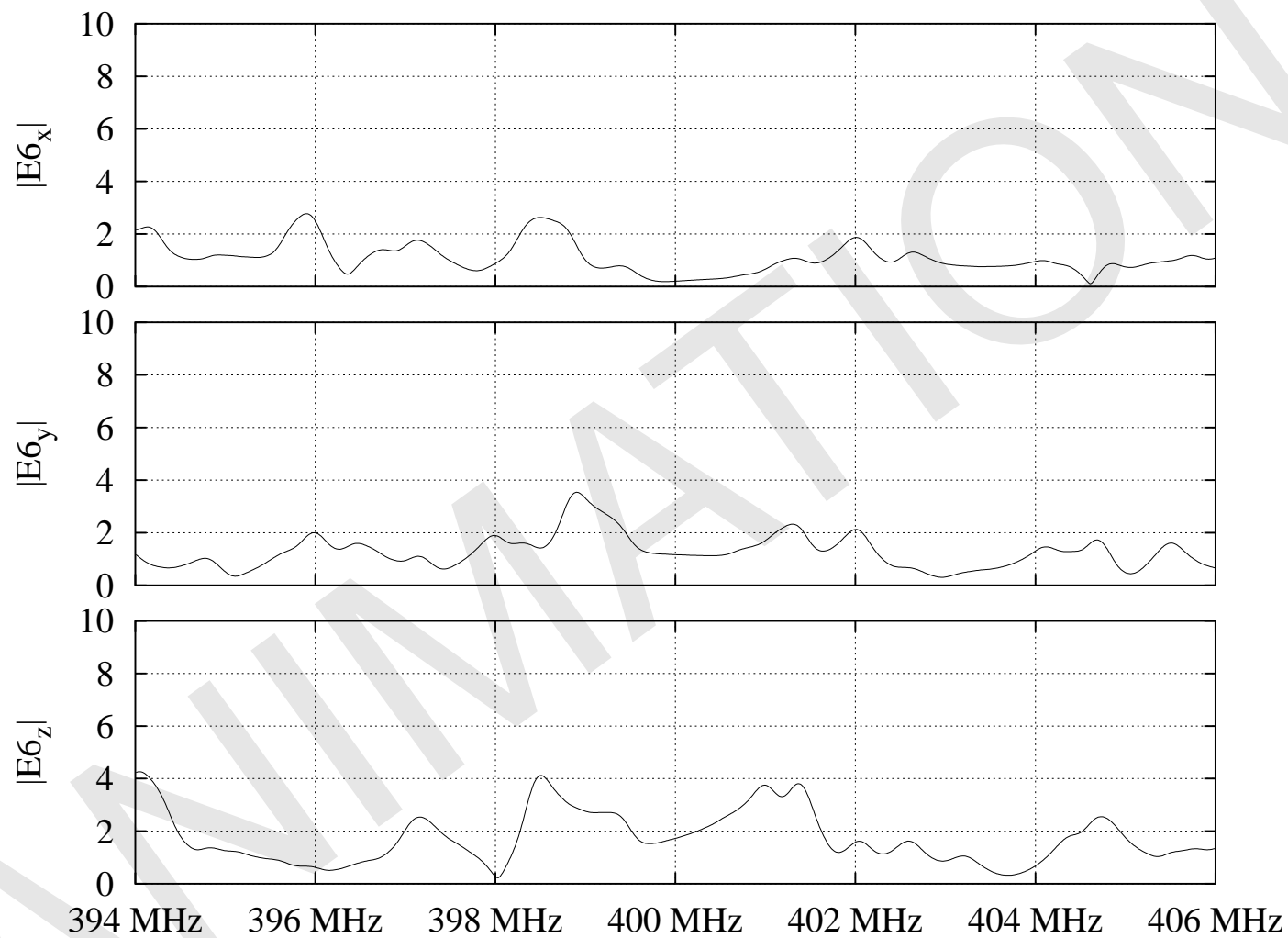
Spectres de puissance avec le brasseur3 (simulations)

5 Étude modale en basses fréquences : bande 80-95 MHz



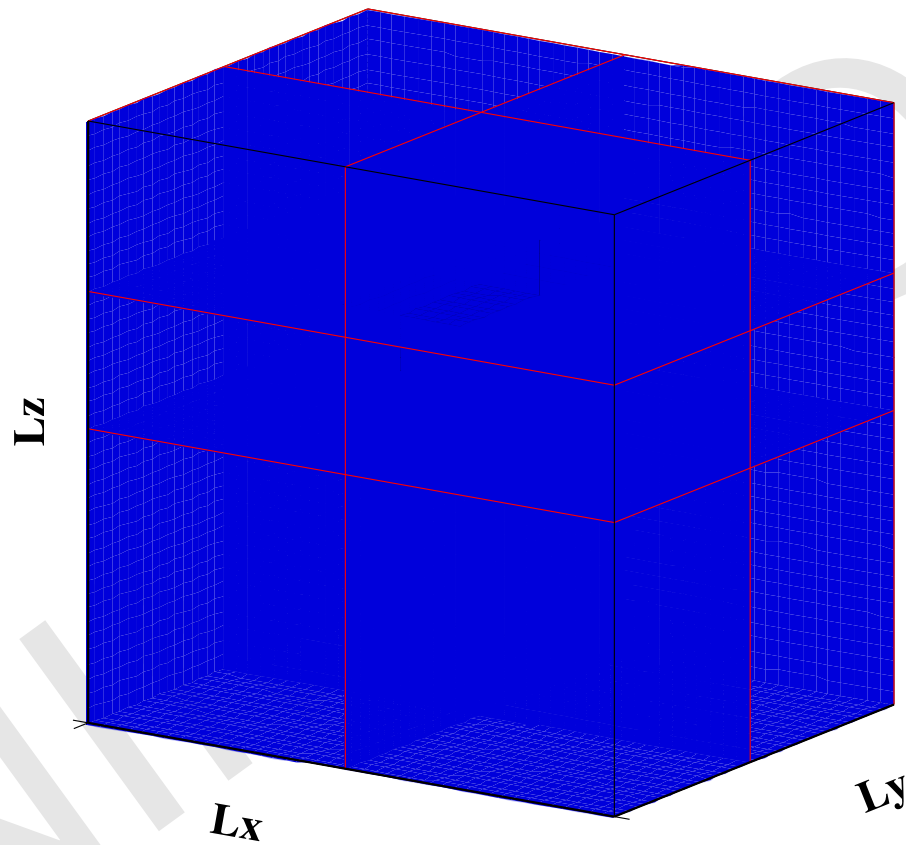
Spectres de puissance (mesures CERPEM)

5 Étude modale à 400 MHz



Spectres de champ à 400 MHz (brasseur3)

5 Étude modale à 400 MHz



Cartographies de puissance à 400 MHz (brasseur3)

6 Étude statistique en hautes fréquences

approche statistique nécessaire en hautes fréquences



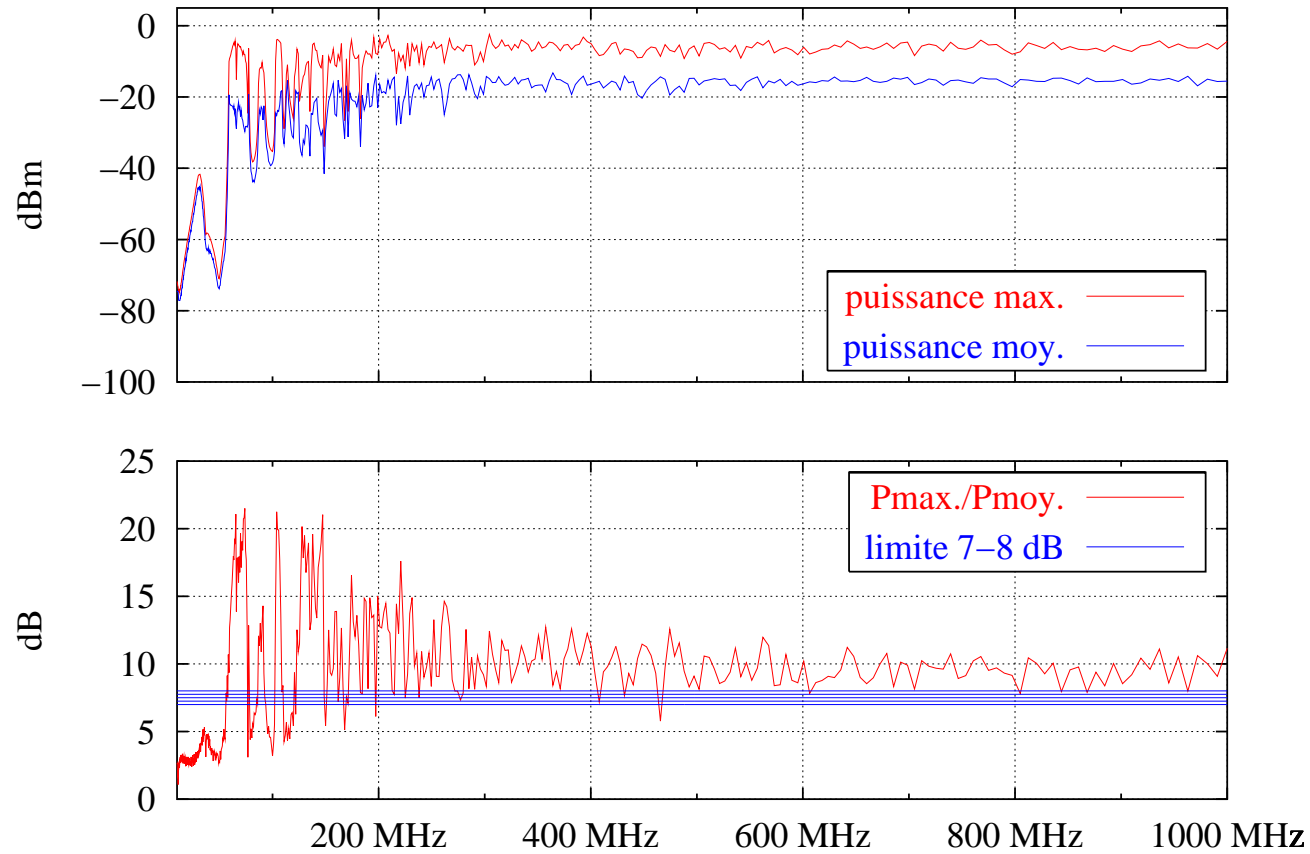
comment déterminer si le champ peut être considéré
comme statistiquement homogène et isotrope ?



- rapport de puissance sur la bande 10 MHz-1 GHz ;
- écart-type des valeurs de champ (norme 61000-4-21) ;
- comparaisons des lois empiriques et théoriques.

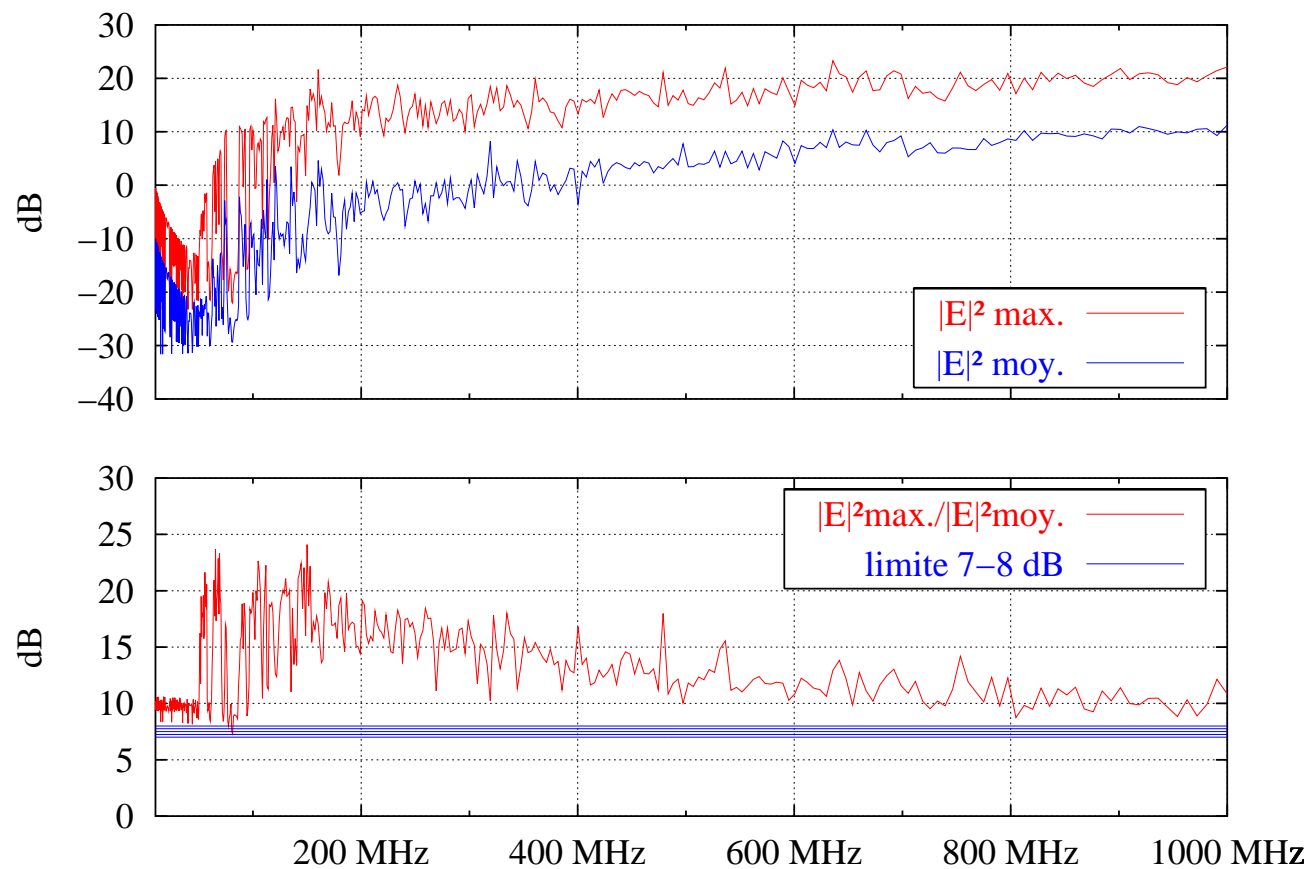
études à 2 fréquences : 400 MHz et 1 GHz

6 Étude statistique en hautes fréquences : rapport de puissances



Rapport de puissances (mesures CERPEM)

6 Étude statistique en hautes fréquences : rapport de puissances



*Rapport de puissances, sur le volume de travail, pour 240 positions du brasseur3
(sans perte)*

condition sur l'écart-type des valeurs de champ :

$$\sigma_{(dB)} = 20 \log \left(\frac{\sigma_{x,y,z} + \langle E_{x,y,z}^{max} \rangle}{\langle E_{x,y,z}^{max} \rangle} \right) < 3 \text{ dB}$$

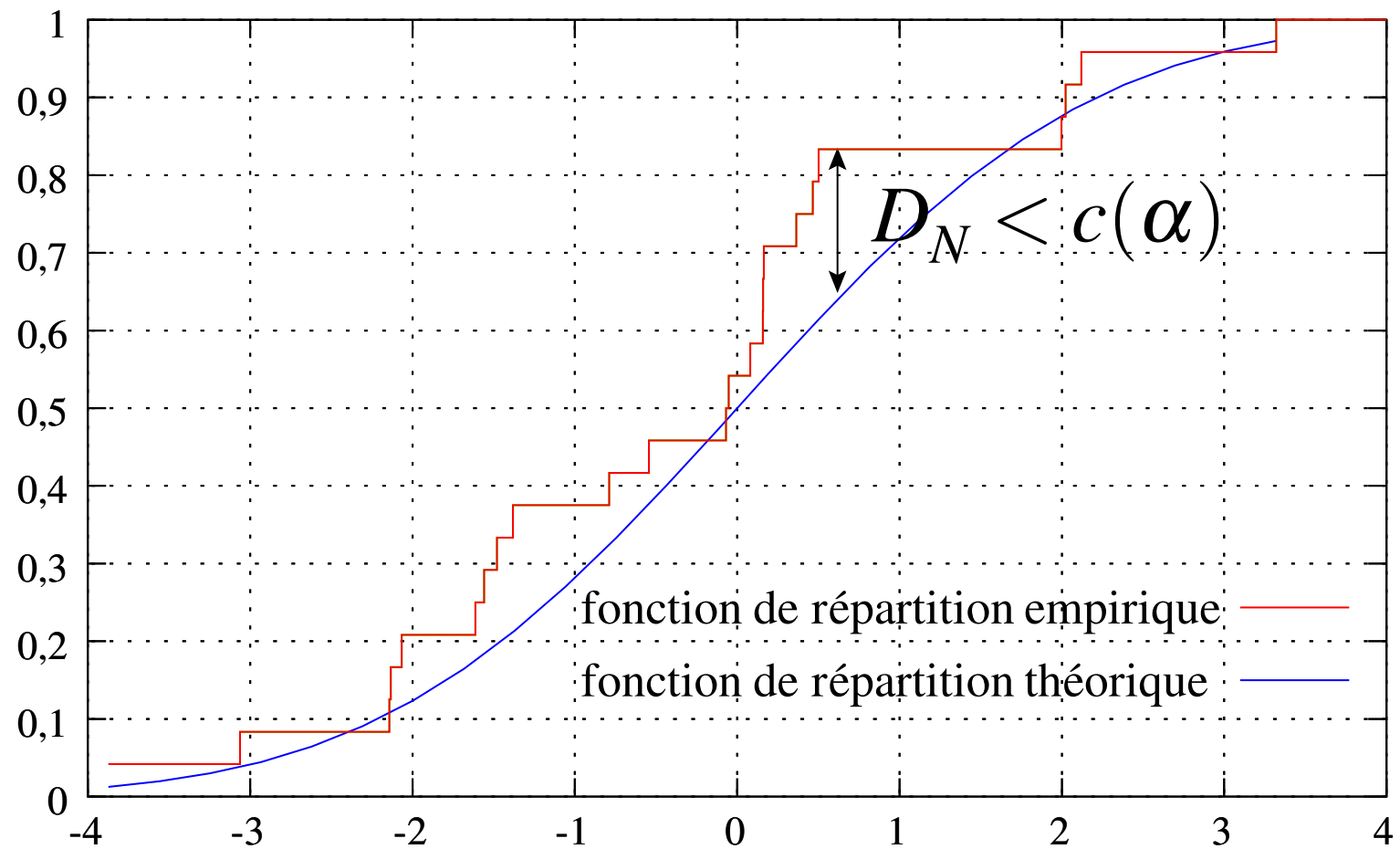
Remarque : ce critère est toujours vérifié, à 400 MHz comme à 1 GHz, quels que soient les paramètres des simulations

si la densité de modes est suffisante,
le champ est statistiquement homogène et isotrope
alors les différentes grandeurs liées au champ \vec{E}
doivent suivre les lois statistiques suivantes :

- les parties réelle et imaginaire suivent une loi normale centrée de variance σ^2 ;
- le module suit une loi de Rayleigh de paramètre σ^2 ;
- le module au carré suit une loi du χ^2 à 2 degrés de liberté et de paramètre σ^2 ;
- la phase suit une loi uniforme.

la comparaison est estimée à partir du test statistique
de Kolmogorov-Smirnov (KS)

6 Test de Kolmogorov-Smirnov



Comparaison des fonctions de répartition à l'aide du test de KS

Remarques importantes :

- les valeurs de l'échantillon doivent être décorrélées ;
- la réponse de ce test dépend fortement de la taille de l'échantillon.
- on part du nombre maximal de positions du brasseur (240) ;
- on diminue la taille de l'échantillon jusqu'à ce que les valeurs soient décorrélées : on peut arriver à 40 valeurs (pour $Q = 1000$ à 400 MHz).

on évalue l'homogénéité du champ à partir du taux de réussite au test de KS (TRKS) sur les 9 points du volume de travail

6.1 Résultats avec les pertes modélisées ($Q = 1000$)

les simulations ont été faites sur les 240 positions de brasseur :
la réduction de la taille des échantillons est importante



40 valeurs à 400 MHz, 60 valeurs à 1 GHz



le TRKS n'est évalué que sur le module :
80 % à 400 MHz, 95 % à 1 GHz

6.2 Comparaison pertes simulées / pertes modélisées

- conductivité équivalente pour un facteur de qualité $Q = 1000$:
 $\sigma_F = 57,25 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$;
- simulations effectuées sur 72 positions de brasseur (36 valeurs décorrélées) ;

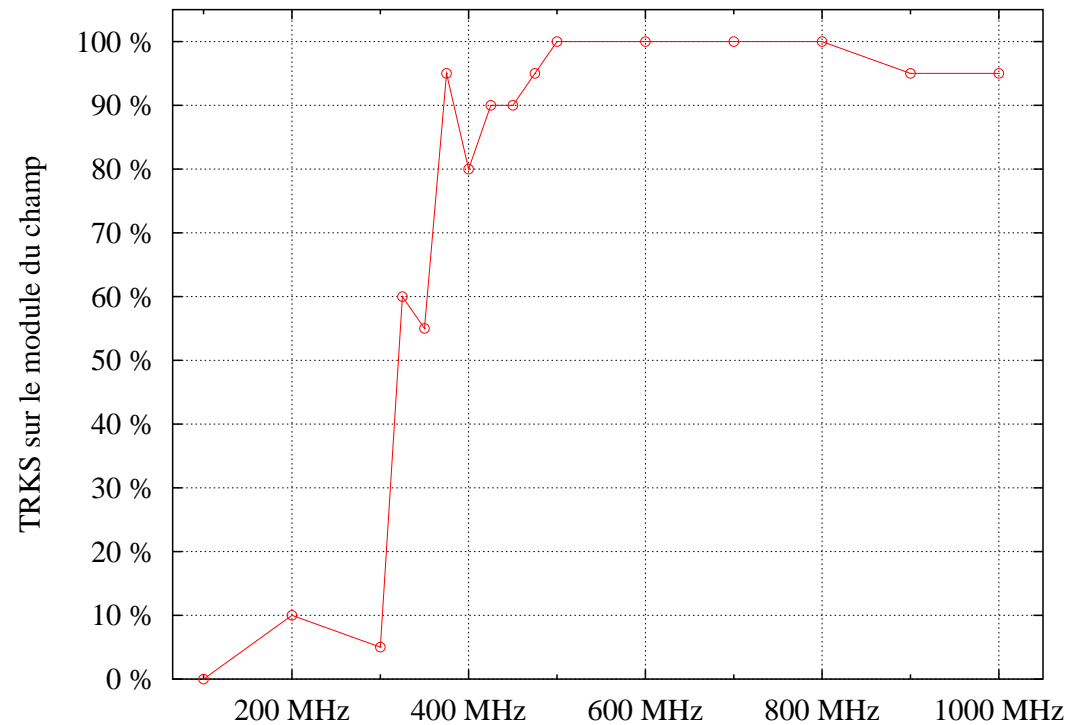


TRKS sur le module évalué sur une bande de 12 MHz centrée sur 400 MHz



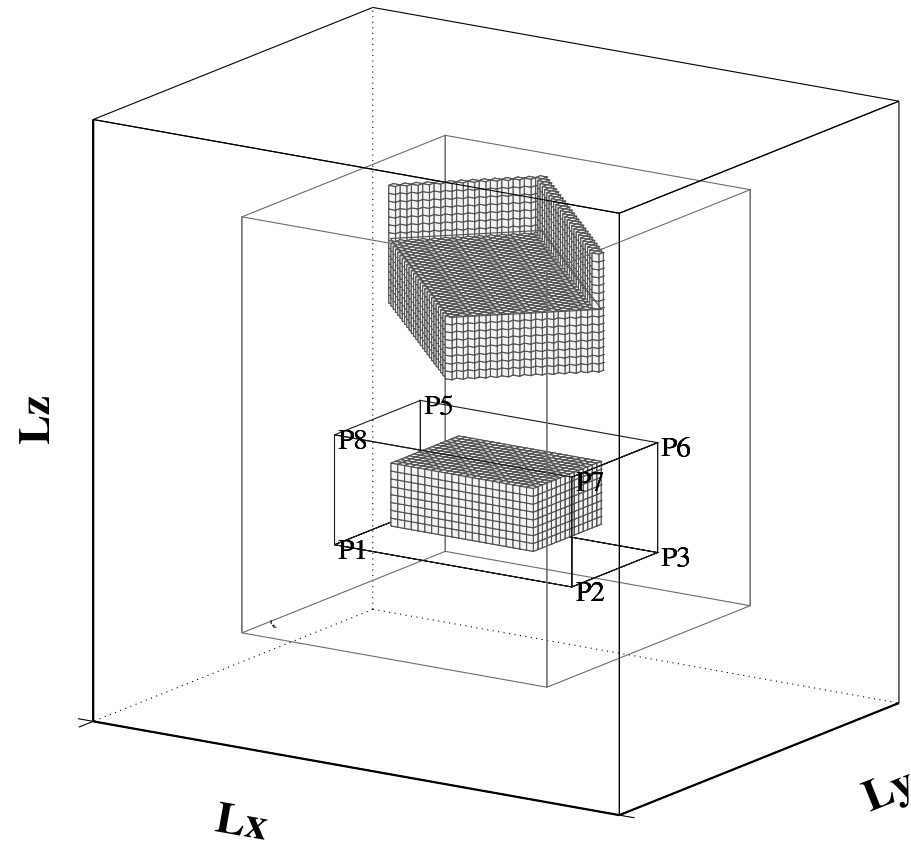
les 2 méthodes donnent un TRKS moyen de 80 %
(sans perte : 10 %)

à partir de quelle fréquence peut-on estimer
que la chambre fonctionne correctement ?



Évolution du TRKS sur le module du champ en fonction de la fréquence, $Q = 1000$

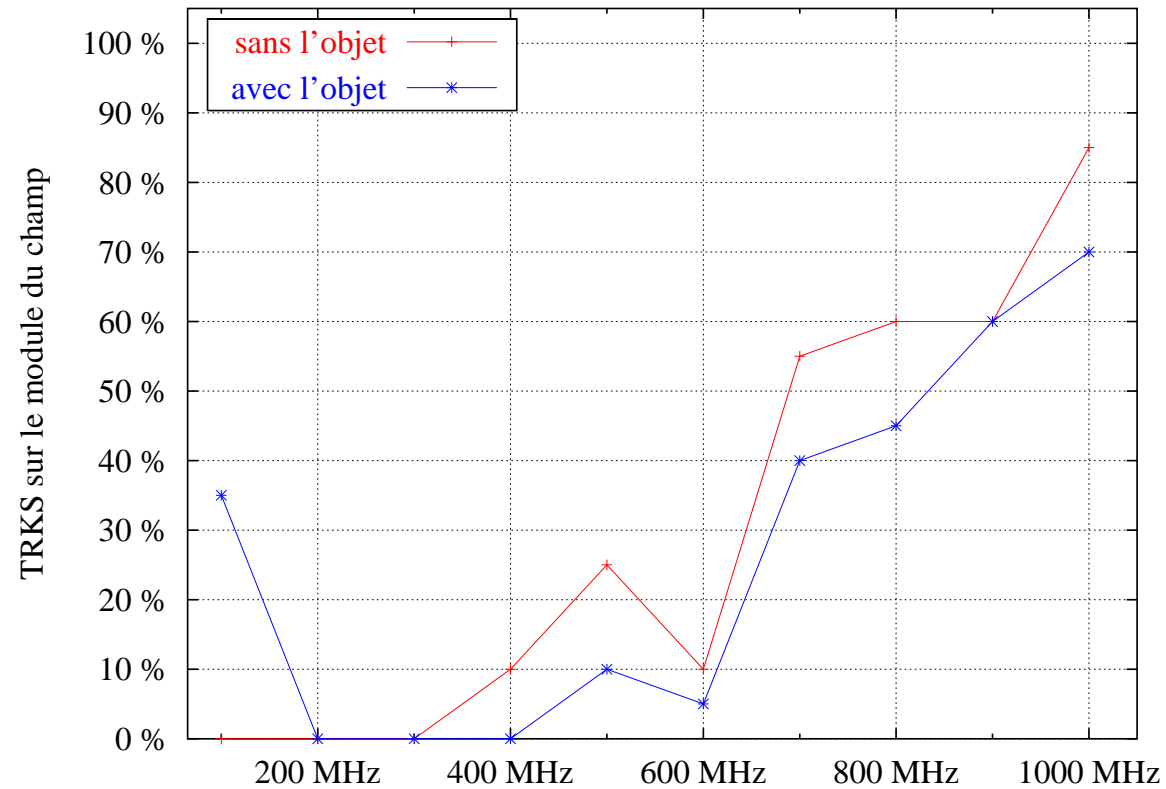
6.3 Influence d'un objet sur les résultats statistiques



Objet parfaitement conducteur placé dans la chambre (1/4 du volume de travail)

influence sur les critères statistiques précédents :

- le rapport des puissances est perturbé vers 300 MHz par les fréquences de résonance induites par la présence de l'objet ;
- l'écart-type des valeurs de champ est inférieur à 3 dB, à 400 MHz comme à 1 GHz ;
- les lois de probabilité sont dégradées (TRKS inférieur de quelques %).

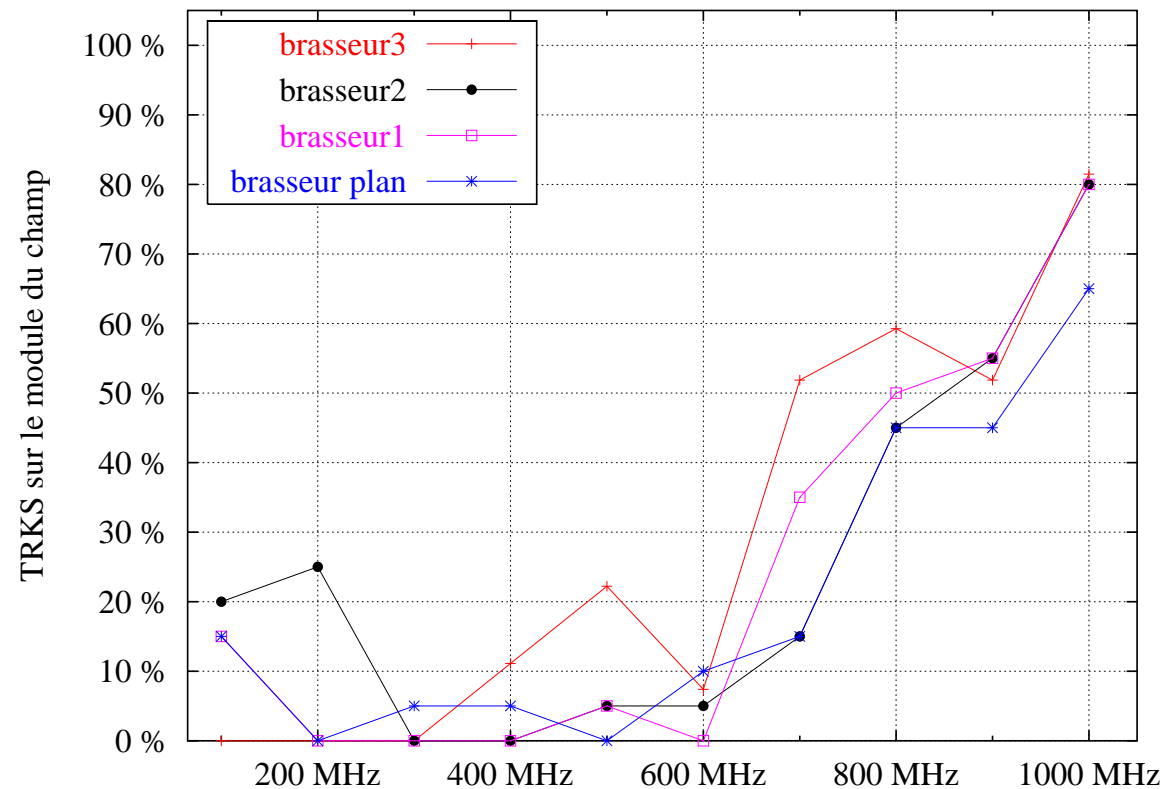


Évolution du TRKS sur le module du champ en fonction de la fréquence sur les 8 points du volume de travail, pour 72 positions de brasseur (sans perte)

7 Influence de la forme du brasseur sur les résultats statistiques

- les résultats précédents ne concernent qu'un seul brasseur ;
- on a vu l'influence des différents brasseurs en basses fréquences \Rightarrow influence en hautes fréquences :
 - les rapports des puissances pour chaque brasseur sont assez semblables ;
 - l'évolution du TRKS en fonction de la fréquence permet d'évaluer « l'efficacité » de chaque brasseur.

Influence de la forme du brasseur sur les résultats statistiques



Évolution du TRKS sur le module du champ pour les quatre brasseurs modélisés, pour 72 positions de brasseur (sans perte)

évaluation de l'**homogénéité** du champ sur le volume de travail
à l'aide du TRKS



information sur son **isotropie** masquée



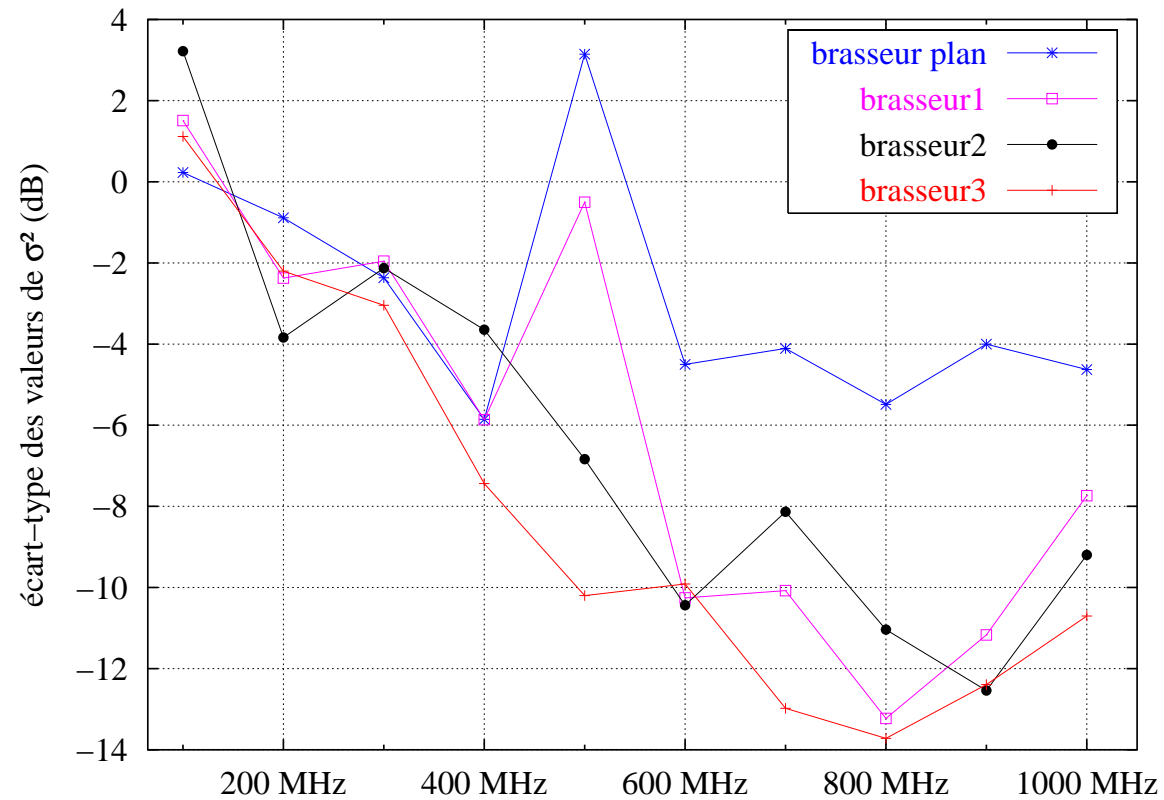
la comparaison des variances σ_x^2 , σ_y^2 , σ_z^2 des lois statistiques
sur chaque composante permet d'estimer cette isotropie



on relève l'écart-type de ces variances en fonction de la fréquence

$$\text{loi de Rayleigh : } \chi_{\sigma^2}(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

Influence de la forme du brasseur sur les résultats statistiques



Évolution de l'écart-type des variances pour les quatre brasseurs modélisés, pour 72 positions de brasseur (sans perte)

8 Conclusion et perspectives

- **Objectifs :** mise au point d'une méthodologie
 - à l'aide d'un outil numérique permettant de simuler le fonctionnement d'une chambre réverbérante à brassage de modes ;
 - exploitation des résultats de simulations (déterministes) sous forme statistique.
- **Moyens utilisés :**
 - comparaisons avec des résultats de mesures ;
 - analyse détaillée des limites de la méthode numérique utilisée appliquée au cas d'une CRBM;
 - utilisation de tests statistiques appliqués à la CRBM;
 - mise au point d'outils de traitement de données.

– Résultats :

- une étude a été menée en basses fréquences sur les premiers modes propres de la chambre ;
- approche statistique à partir de résultats déterministes, basée sur différents critères \Rightarrow le critère sur la comparaison des lois de probabilité semble le plus pertinent ;
- 2 applications ont été montrées :
 - la comparaison des différents brasseurs modélisés ;
 - l'influence de la présence d'un objet parfaitement conducteur, de taille relativement importante.

- **Perspectives :**

- forme des brasseurs modélisés très simple \Rightarrow utilisation d'autres types de maillages pour prendre en compte des faces obliques ;
- excitation ponctuelle du champ \Rightarrow modélisation de l'antenne ;
- natures différentes des objets sous tests \Rightarrow implémentation des SIBC.