



MODÈLES DE COMPRÉHENSION PAR LA THÉORIE DES IMAGES DES PHÉNOMÈNES TRANSITOIRES ET DU RÉGIME PERMANENT EN CHAMBRE RÉVERBÉRANTE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

21 octobre 2011
Emmanuel Amador
IETR, CNRS UMR 6164, INSA Rennes



Sommaire

1. Introduction
2. Présentation du modèle numérique
3. Validation du modèle numérique
4. Application: essais en immunité
5. Bilan et perspectives

1. Introduction

1.1. Les chambres réverbérantes

1.2. État de l'art de la modélisation de
chambres réverbérantes

1.3. Objectifs de la thèse

2. Présentation du modèle numérique

3. Validation du modèle numérique

4. Application: essais en immunité

5. Bilan et perspectives

- Utilisées en compatibilité électromagnétique (CEM) depuis les années 70
- Essais normalisés CEM en chambre réverbérante (~2000)
 - Essai en immunité
 - Mesure de la puissance totale rayonnée
- Plus récemment :
 - caractérisation d'antennes
 - simulation de canaux de propagation
 - ...

- Cavité rectangulaire munie d'une antenne et d'un objet sous test
- Le brasseur de modes modifie les conditions aux limites
- Sa rotation assure l'homogénéité statistique du champ électromagnétique (si la densité de modes est suffisante)
- Alternatives :
 - brassage de source
 - brassage électronique



Fig.1.1 Photographie de la chambre réverbérante de l'IETR

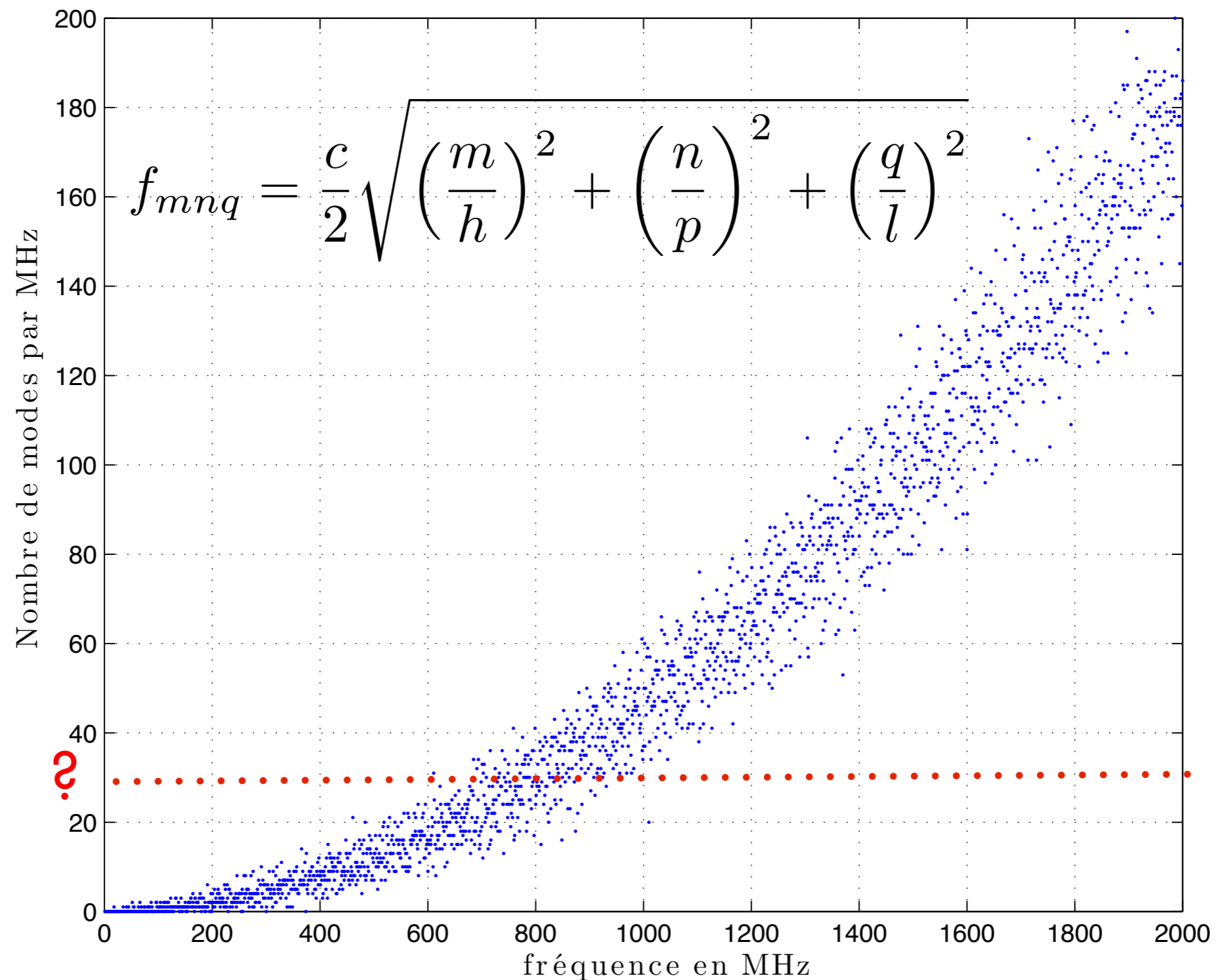


Fig.1.2 Nombre de modes par MHz entre 0 et 2 GHz

Modélisation de chambres réverbérantes

- Un objet dont la géométrie est simple
- Mais difficile à modéliser
- 3 grandes stratégies de modélisation :
 - Déterministes
 - Statistiques
 - Hybrides

Approches déterministes

- Modèles temporels ou fréquentiels (FDTD, TLM, MoM)
- La chambre réverbérante est discrétisée
- Le facteur de qualité élevé d'une CRBM pose des problèmes :
 - Comportement quasi chaotique \Rightarrow Exigence d'une description extrêmement fine des paramètres physiques [1]
 - Convergence lente dans le domaine temporel [2]
- Ils permettent de modéliser le brassage mécanique

Un modèle déterministe est-il pertinent ?

[1] Leuchtman et al., *On the Validation of Simulated Fields in a Reverberation Chamber*, Microwave Conference, 2003

[2] Moglie F., *Convergence of the Reverberation Chambers to the Equilibrium Analyzed with the Finite-Difference Time-Domain Algorithm*, IEEE Trans. on EMC, 2004

- Deux approches :
 1. Caractérisation empirique [3]
 2. Spectre d'ondes planes de Hill (cavité idéale) [4]
- Difficulté de mesurer l'influence de paramètres physiques de la chambre comme ses dimensions ou son facteur de qualité

Pour comprendre les phénomènes physiques les approches statistiques sont insuffisantes

[3] Kostas *et al.*, *Statistical model for a mode-stirred chamber*, IEEE Trans. on EMC, 1991

[4] Hill D.A., *Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers*, IEEE Trans. on EMC, 1998

- Les approches hybrides offrent à la fois une approche physique et une approche statistique
- Le modèle d'ondes planes de Hill est utilisé en FDTD pour simuler un essai en immunité sur un objet sous test [5]
- Des modèles physiques élémentaires 1D, 2D ou 3D ont permis de reproduire de manière qualitative le comportement d'une chambre réverbérante réelle [6]

Nous choisissons de réaliser un modèle physique simple et d'employer des outils statistiques pour l'exploiter

[5] Gradoni et al., *Field-to-enclosure coupling in reverberation chamber: numerical and experimental analysis*, IEEE EMC 2005

[6] Serra et al., *A One-Dimensional Interpretation of the Statistical Behavior of Reverberation Chambers*, ICEAA 2007

Problématique et Objectif de la thèse

- Constat :
 - Les approches déterministes ne sont pas adaptées pour l'étude des chambres réverbérantes
 - Les approches statistiques ne permettent pas de comprendre les phénomènes physiques mis en jeu
- Objectif principal de la thèse :

"Créer un modèle physique simple pour l'analyse du comportement d'une chambre réverbérante en régime transitoire ou permanent"

1. Introduction
2. Présentation du modèle numérique
 - 2.1. Présentation de la théorie des images
 - 2.2. Modélisation d'une chambre réverbérante
3. Validation du modèle numérique
4. Application: essais en immunité
5. Bilan et perspectives

- Notre modèle utilise la théorie des images
- La théorie des images permet la description d'un problème de condition limite [7]

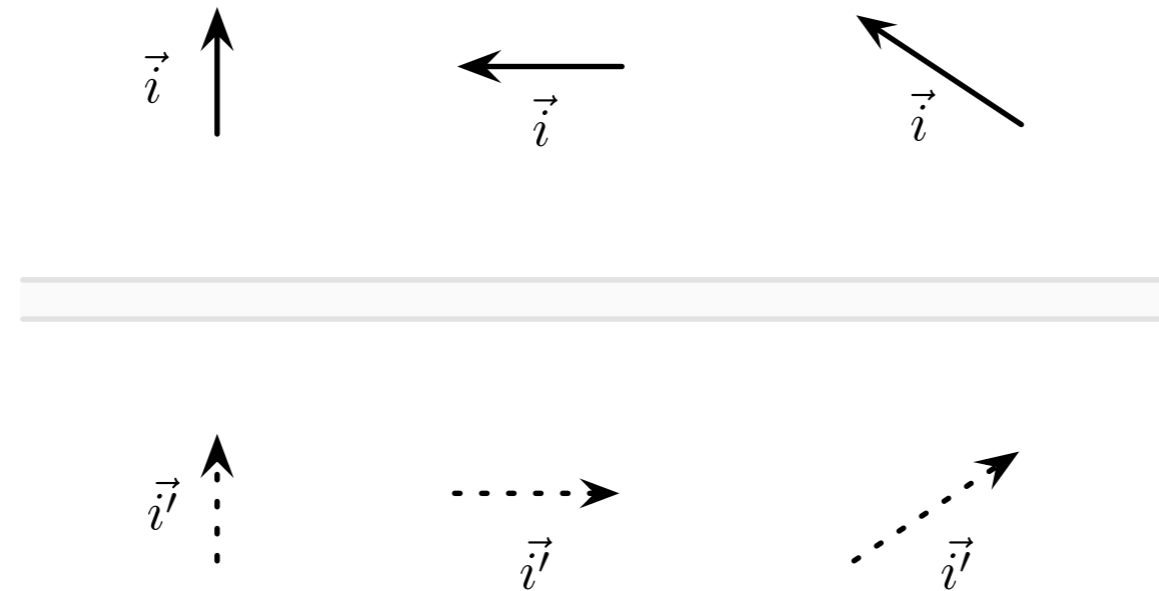


Fig.2.1 Règles de construction des courants image

- Les pertes sont introduites par un coefficient scalaire ϵ

$$I' = (1 - \epsilon)I$$

[7] Harrington R.F., *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill, 1961

- **Image** : objet virtuel créé par une réflexion
- **Ordre** d'une cavité ou d'un courant : nombre de réflexions nécessaires pour l'engendrer
 - la cavité d'ordre 0 ou cavité initiale correspond à la cavité réelle
 - une cavité d'ordre n est créée à partir de n réflexions sur les parois
- L'amplitude d'un courant d'ordre n vaut :

$$I_n = (1 - \epsilon)^n I_0 \approx R^n I_0$$

Principe de la modélisation d'une cavité en 2D

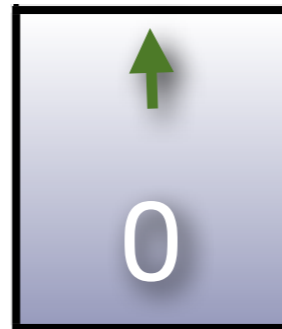


Fig.2.2 Principe du modèle à l'aide d'une cavité 2D

Principe de la modélisation d'une cavité en 2D

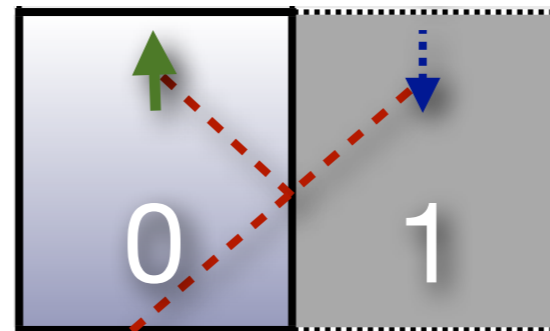


Fig.2.2 Principe du modèle à l'aide d'une cavité 2D

Principe de la modélisation d'une cavité en 2D

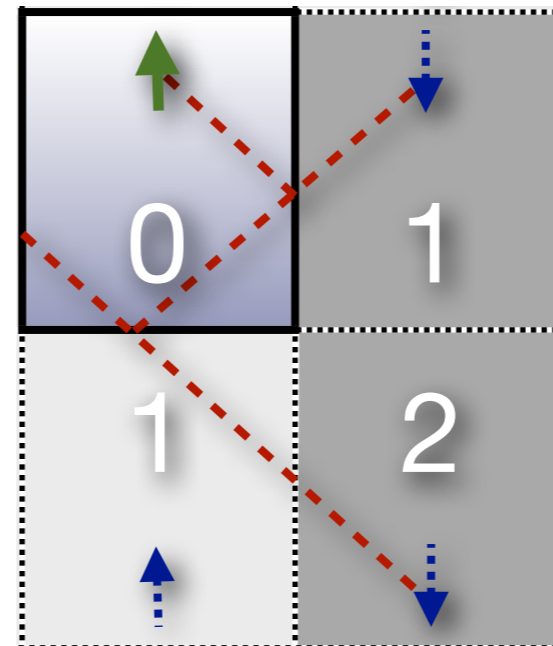


Fig.2.2 Principe du modèle à l'aide d'une cavité 2D

Principe de la modélisation d'une cavité en 2D

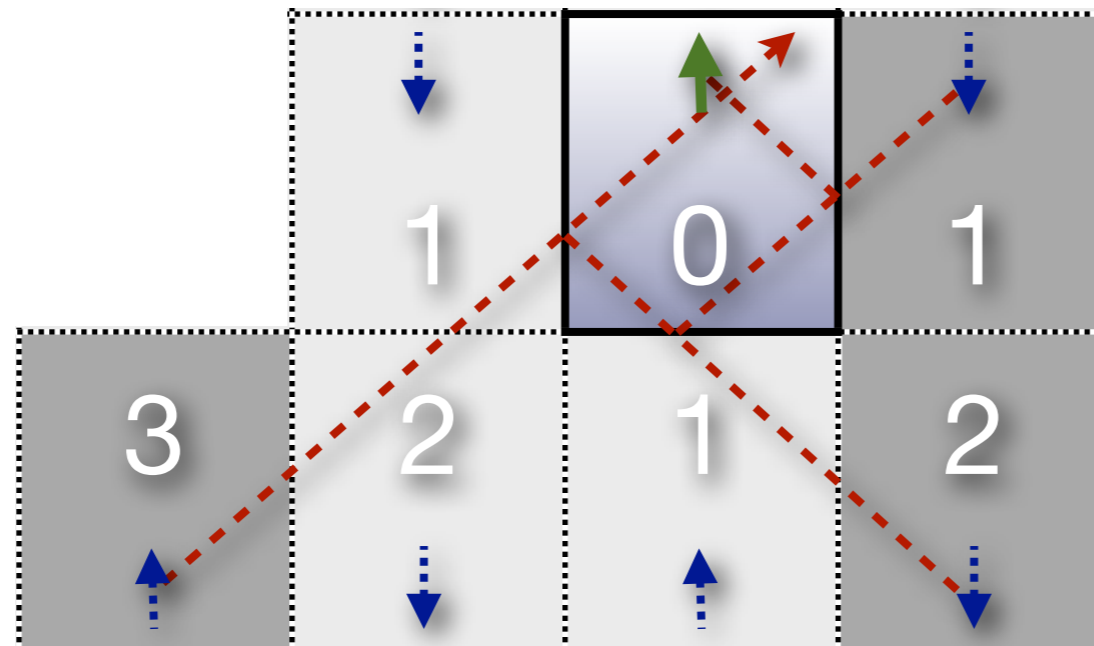
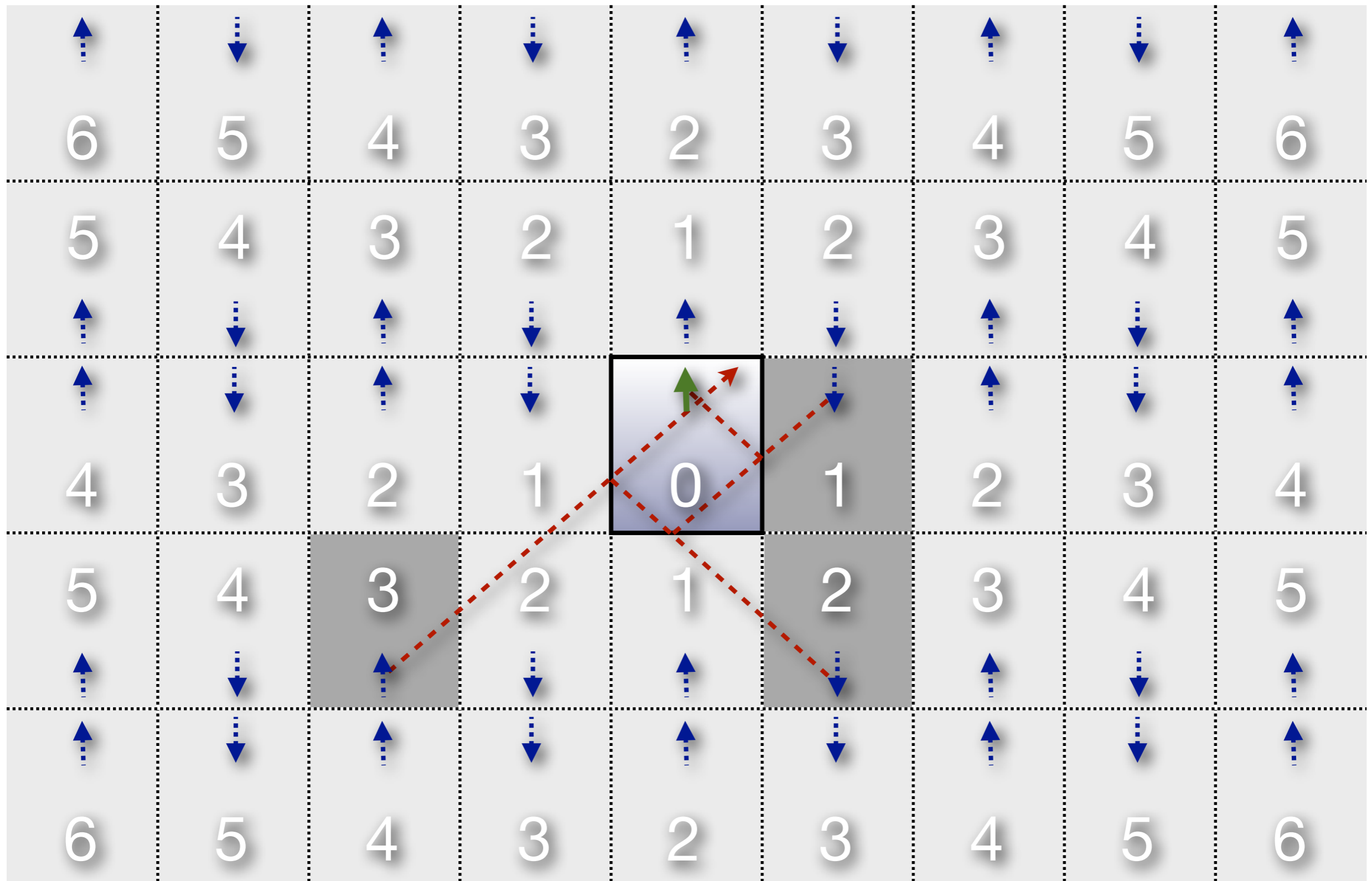


Fig.2.2 Principe du modèle à l'aide d'une cavité 2D

2. Modélisation d'une chambre réverbérante

Principe de la modélisation d'une cavité en 2D



Dénombrement des cavités

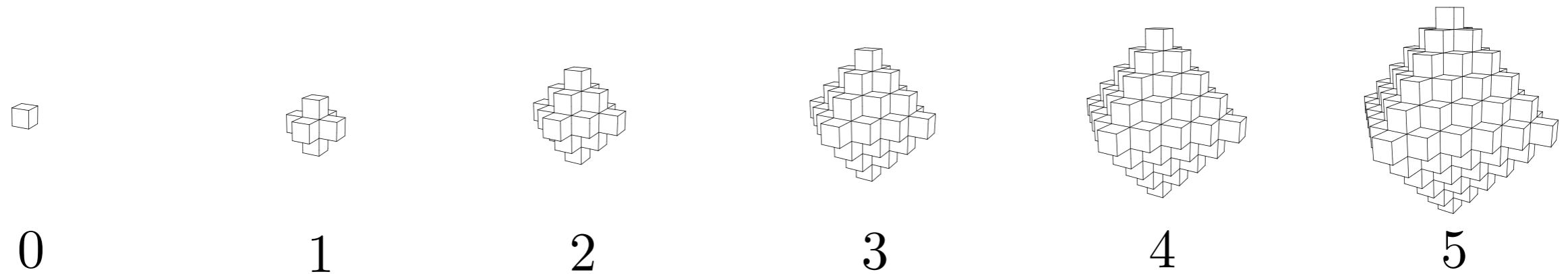


Fig.2.3 Représentation des cavités pour différents ordres

- Nombre de cavités d'ordre i ($i > 0$) :

$$N_i = 4i^2 + 2$$

- Nombre total de cavités jusqu'à l'ordre n :

$$M_n = 1 + \sum_{i=1}^n N_i = 1 + 2n + \frac{2n(n+1)(2n+1)}{3}$$

2. Modélisation d'une chambre réverbérante

Calcul des positions des images

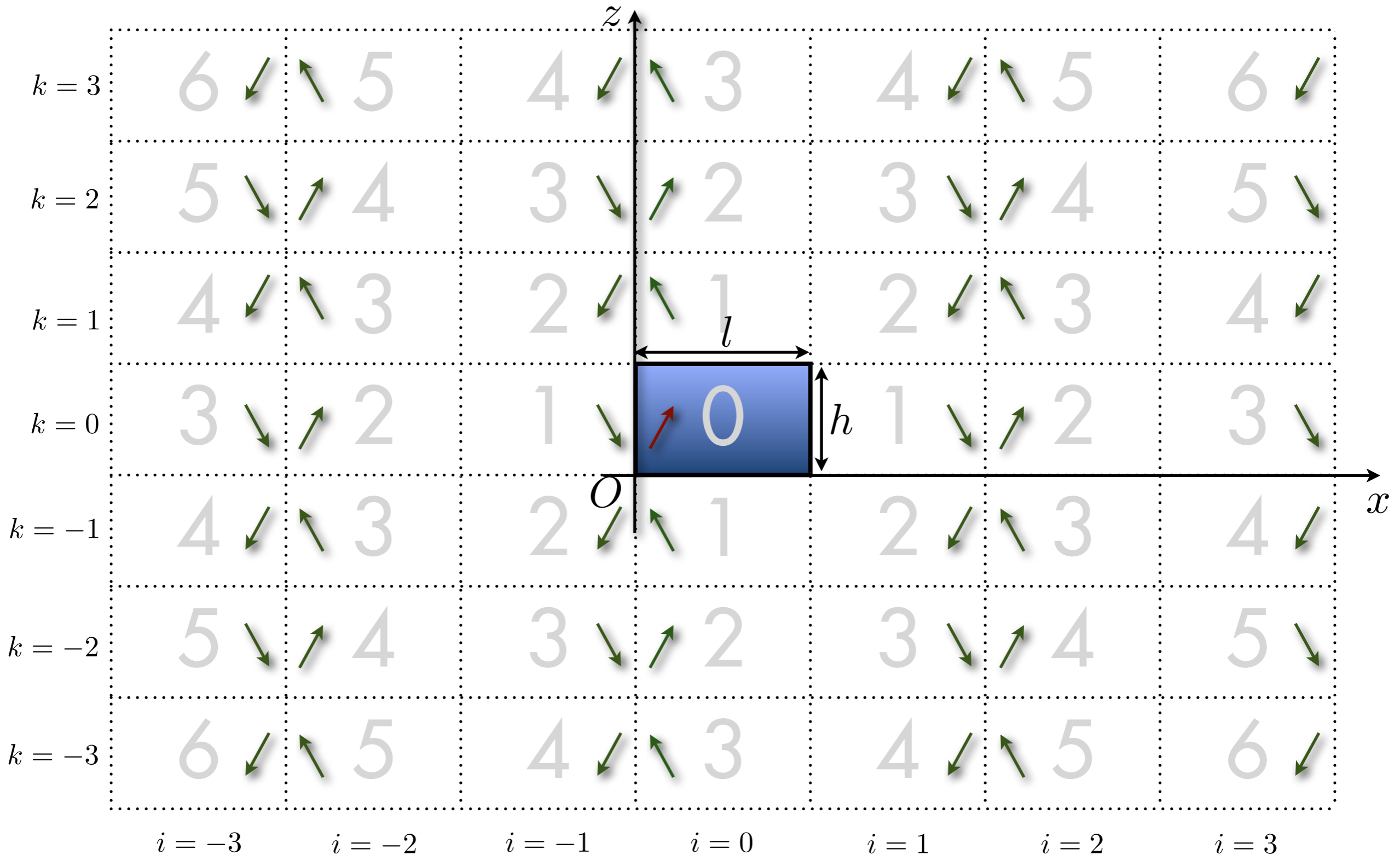


Fig.2.4 Construction des images par sur les parois de la cavité

2. Modélisation d'une chambre réverbérante

Calcul des positions des images

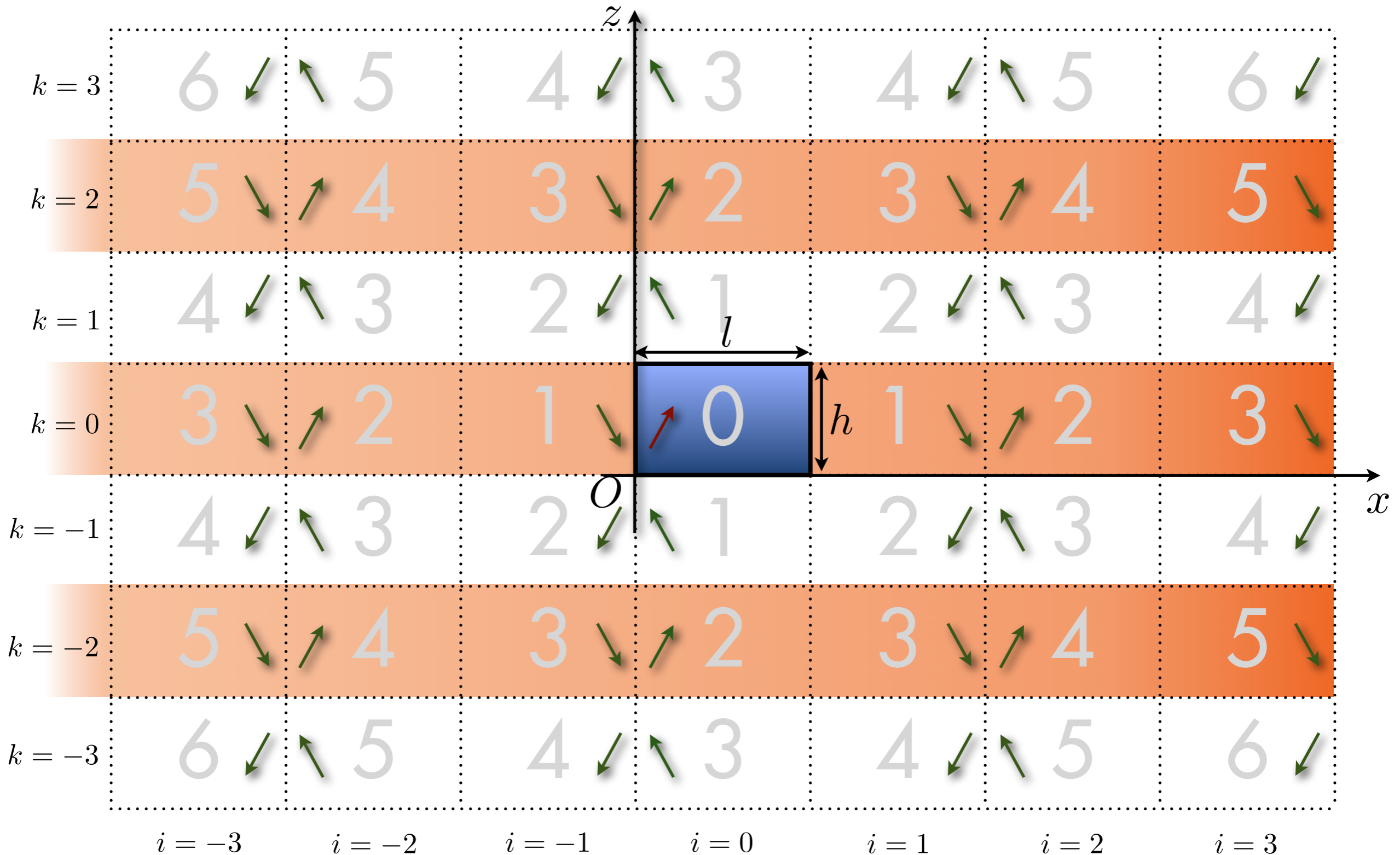


Fig.2.4 Construction des images par sur les parois de la cavité

2. Modélisation d'une chambre réverbérante

Calcul des positions des images

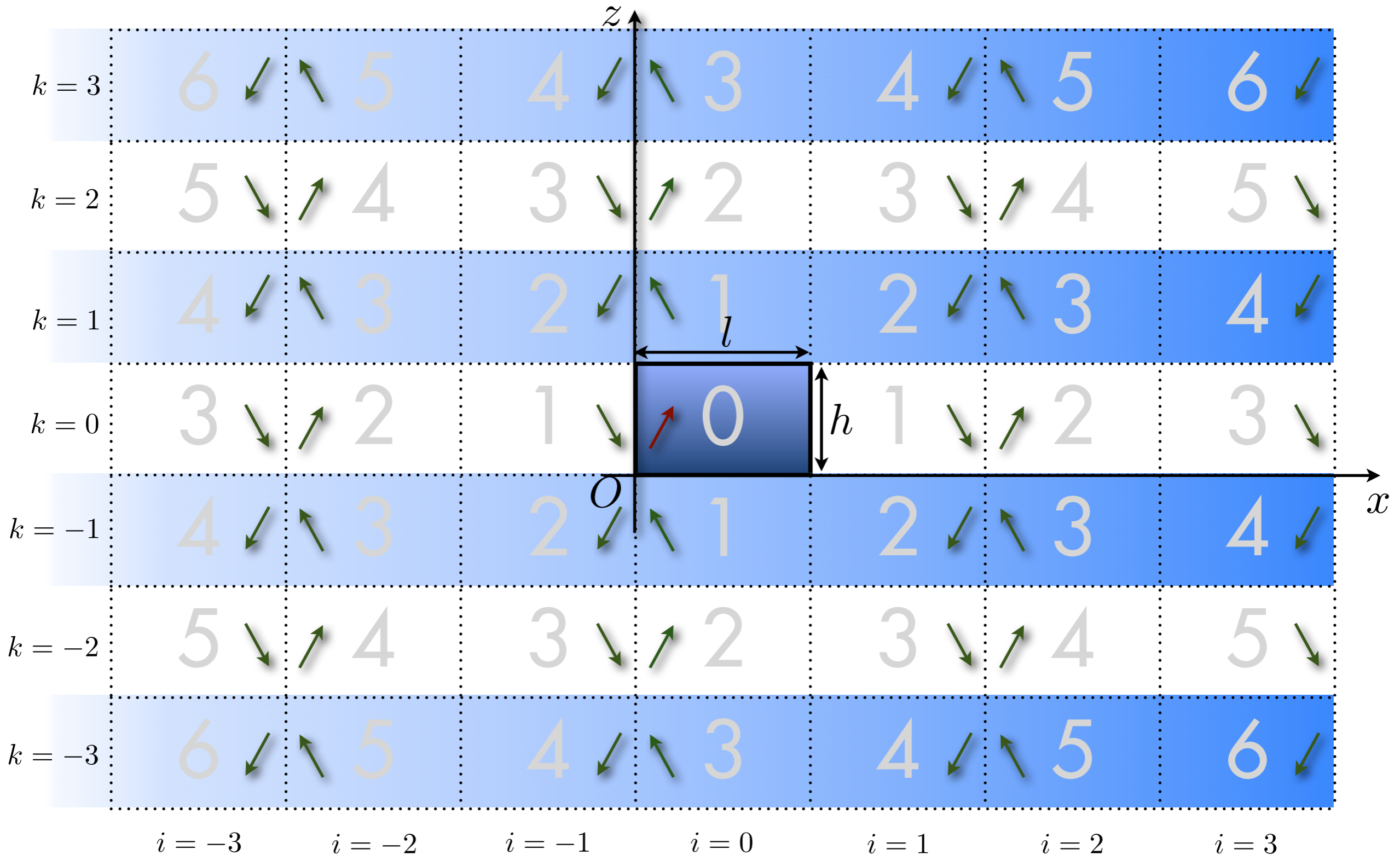


Fig.2.4 Construction des images par sur les parois de la cavité

Optimisations du calcul des images

Pour une réponse impulsionnelle de durée T_m :

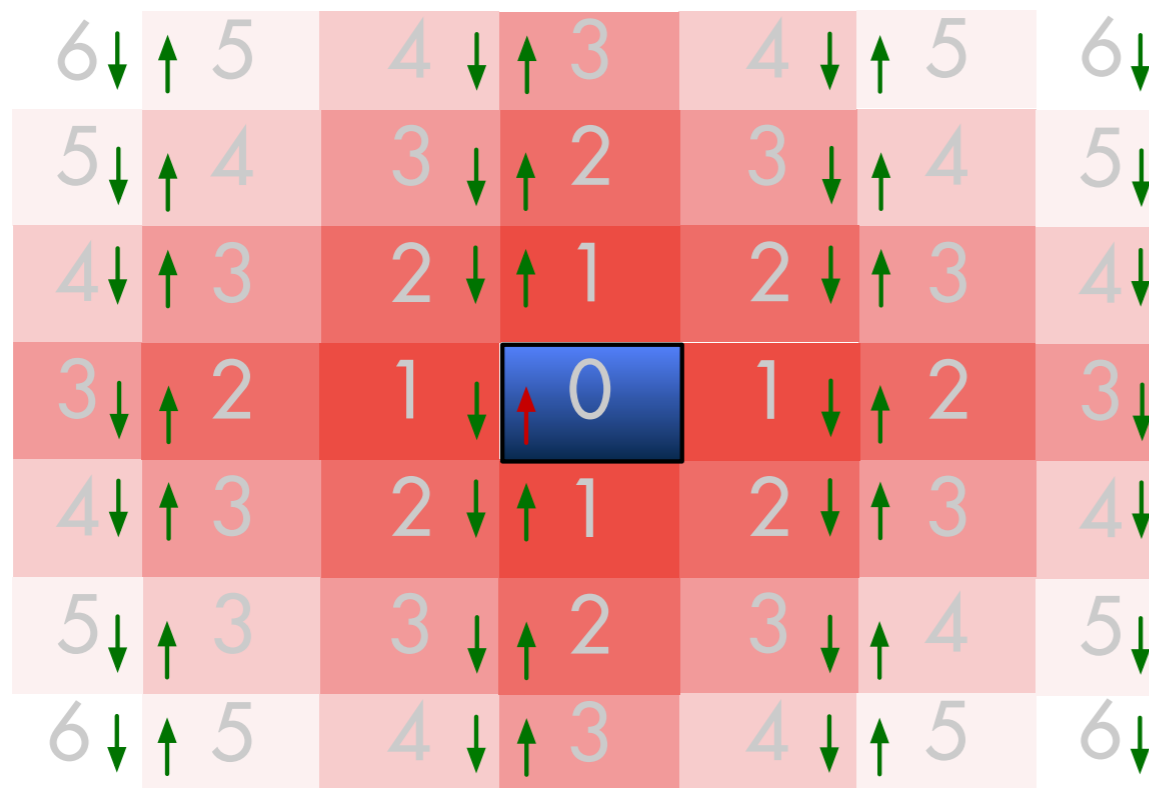
- La suppression des sources hors de la boule de rayon cT_m réduit d'un facteur 8 leur nombre
 - Génération des sources dans un 8^e de l'espace en exploitant les symétries
- ➔ La durée de la réponse impulsionnelle T_m est ainsi successivement passée de $3 \mu s$ à $6 \mu s$ puis enfin $12 \mu s$

Introduction des pertes (1)

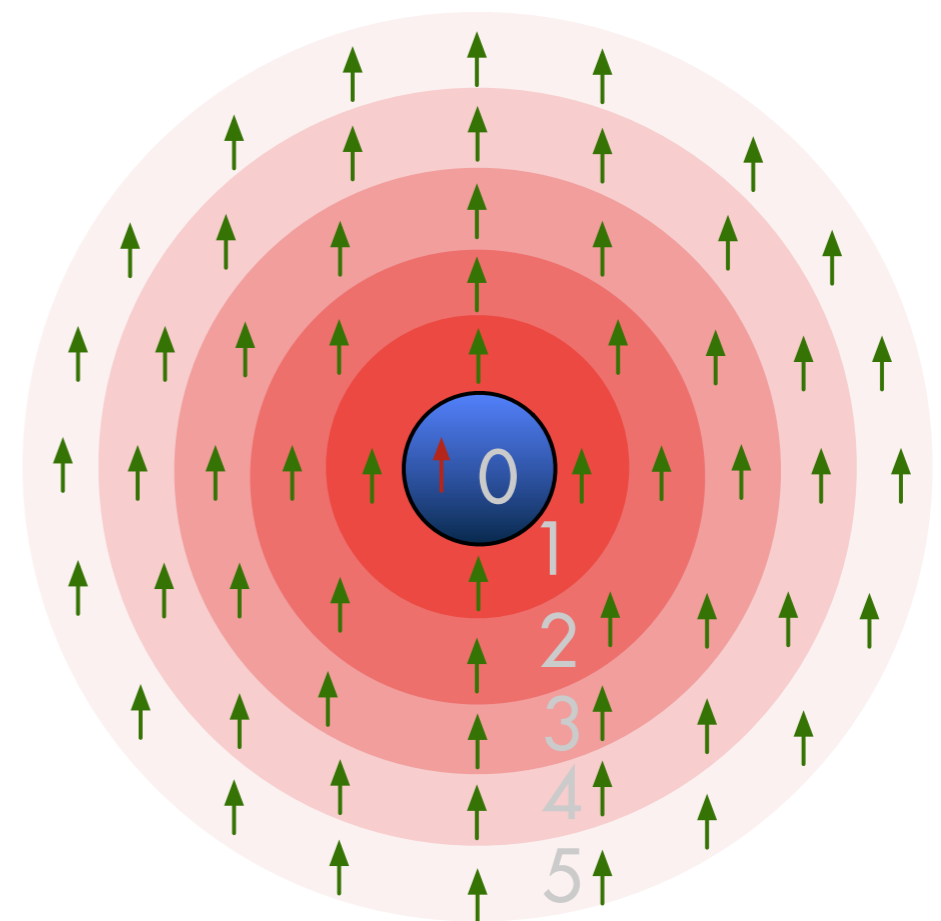
- L'acoustique [8] permet de déterminer L , distance moyenne entre deux réflexions :

$$L = \frac{4V}{S} = \frac{2lph}{(lp + lh + ph)}$$

- Simplification du modèle :



(a)



(b)

Fig.2.5 Modèle par la théorie des images (a) et approximation par des sphères concentriques (b)

[8] Rossing T.D., *Handbook of Acoustics*, Springer-Verlag, 2007

Introduction des pertes (2)

- Un courant d'ordre i situé entre les sphères iL et $(i+1)L$ a pour amplitude

$$I(i) = R^i I_0$$

- Champ rayonné dans la cavité d'ordre 0 (à une distance iL) par ce courant

$$E(i) \propto \frac{R^i}{iL} I_0 = \frac{R^i}{iL} E_0$$

- Densité de puissance reçue

$$P(i) \propto \frac{R^{2i}}{4\pi(iL)^2} E_0^2 = \frac{R^{2i}}{4\pi(iL)^2} \mathcal{P}_0$$

- Densité de puissance totale créée par les N_i sources d'ordre i

$$P_t(i) = N_i \frac{R^{2i}}{4\pi(iL)^2} \mathcal{P}_0 \approx \frac{R^{2i}}{\pi L^2} \mathcal{P}_0 = \boxed{R^{2i} P_0}$$

Introduction des pertes (3)

- On peut relier l'ordre i à l'instant t en posant : $i \approx \frac{tc}{L}$
- La densité de puissance totale reçue devient :

$$P_t(t) \approx R^{2t \frac{c}{L}} P_0 = P_0 e^{2t \frac{c}{L} \ln R}$$

$$= \underline{P_0 e^{-t/\tau}}$$

- On isole la constante de temps τ de la chambre :

$$\tau = -\frac{L}{2c \ln R}$$

- On peut relier τ au facteur de qualité Q de la chambre à la fréquence f :

$$Q = 2\pi f \tau$$

Calcul du champ électrique (1)

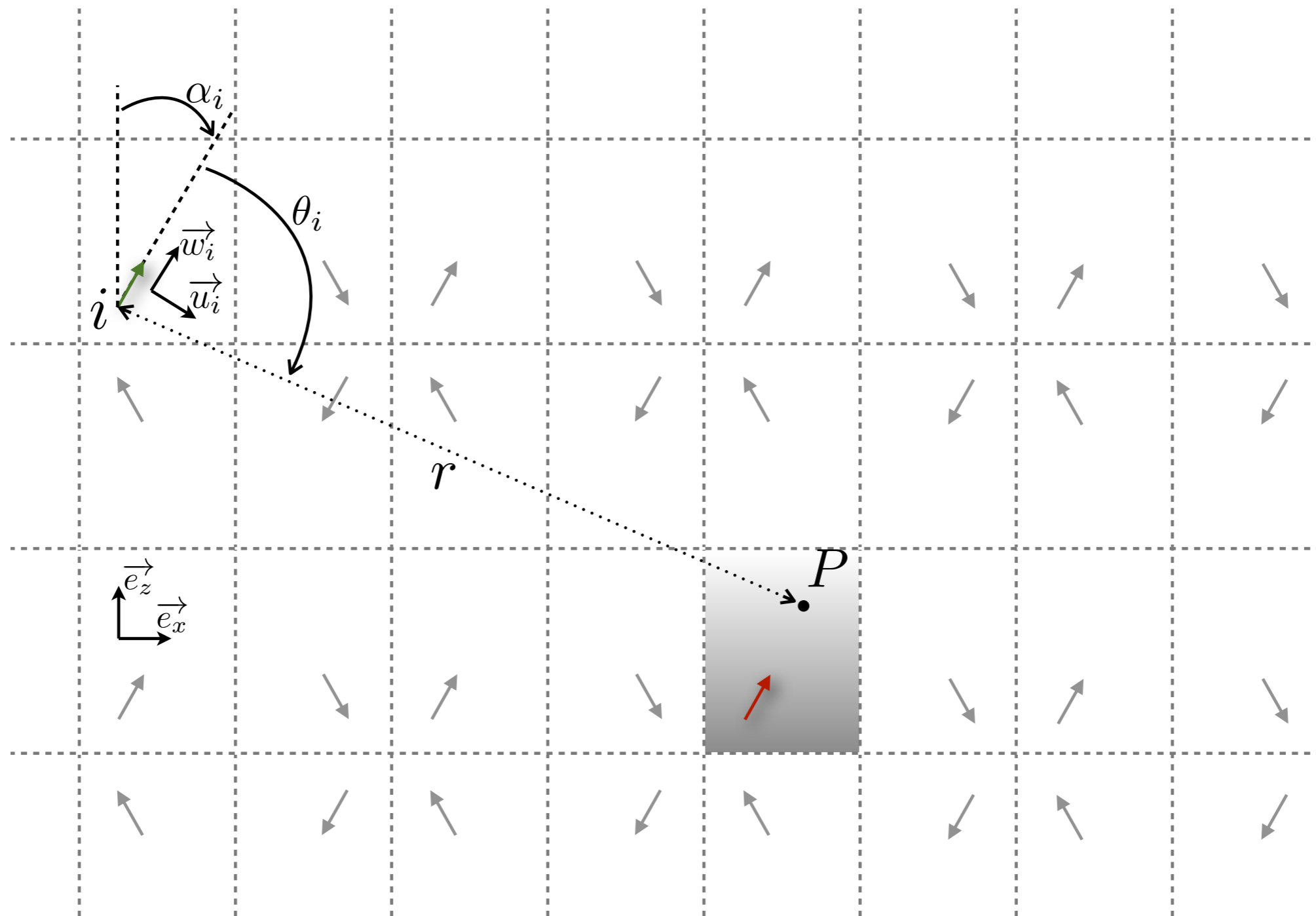


Fig.2.7 Soient un courant i d'ordre n et un point de réception P dans la cavité initiale

Calcul du champ électrique (2)

- Champ électrique créé par le courant i d'ordre n au point P dans les coordonnées locales associées au courant i :

$$\vec{E}_i(t) = - \frac{C R^n f(t - t_i)}{r} \sin \theta_i \begin{cases} \cos \theta_i \cos \phi_i \vec{u}_i \\ \cos \theta_i \sin \phi_i \vec{v}_i \\ - \sin \theta_i \vec{w}_i \end{cases}$$

1 V \swarrow $C R^n$ \swarrow $f(t - t_i)$ \swarrow r \swarrow $\sin \theta_i$ \swarrow $\begin{cases} \cos \theta_i \cos \phi_i \vec{u}_i \\ \cos \theta_i \sin \phi_i \vec{v}_i \\ - \sin \theta_i \vec{w}_i \end{cases}$

pertes \swarrow $f(t) = \begin{cases} 1 \text{ si } t = 0 \\ 0 \text{ ailleurs} \end{cases}$ \swarrow t_i \swarrow temps d'arrivée

\swarrow rayonnement dipolaire

- On exprime ensuite le champ dans les coordonnées usuelles en employant une matrice de changement de base

Réponse impulsionnelle, réponse fréquentielle

- La réponse impulsionnelle est calculée en sommant la contribution des M courants image :

$$h_{x,y,z}(t) = \sum_{i=0}^M \vec{E}_i(t) \cdot \vec{e}_{x,y,z}$$

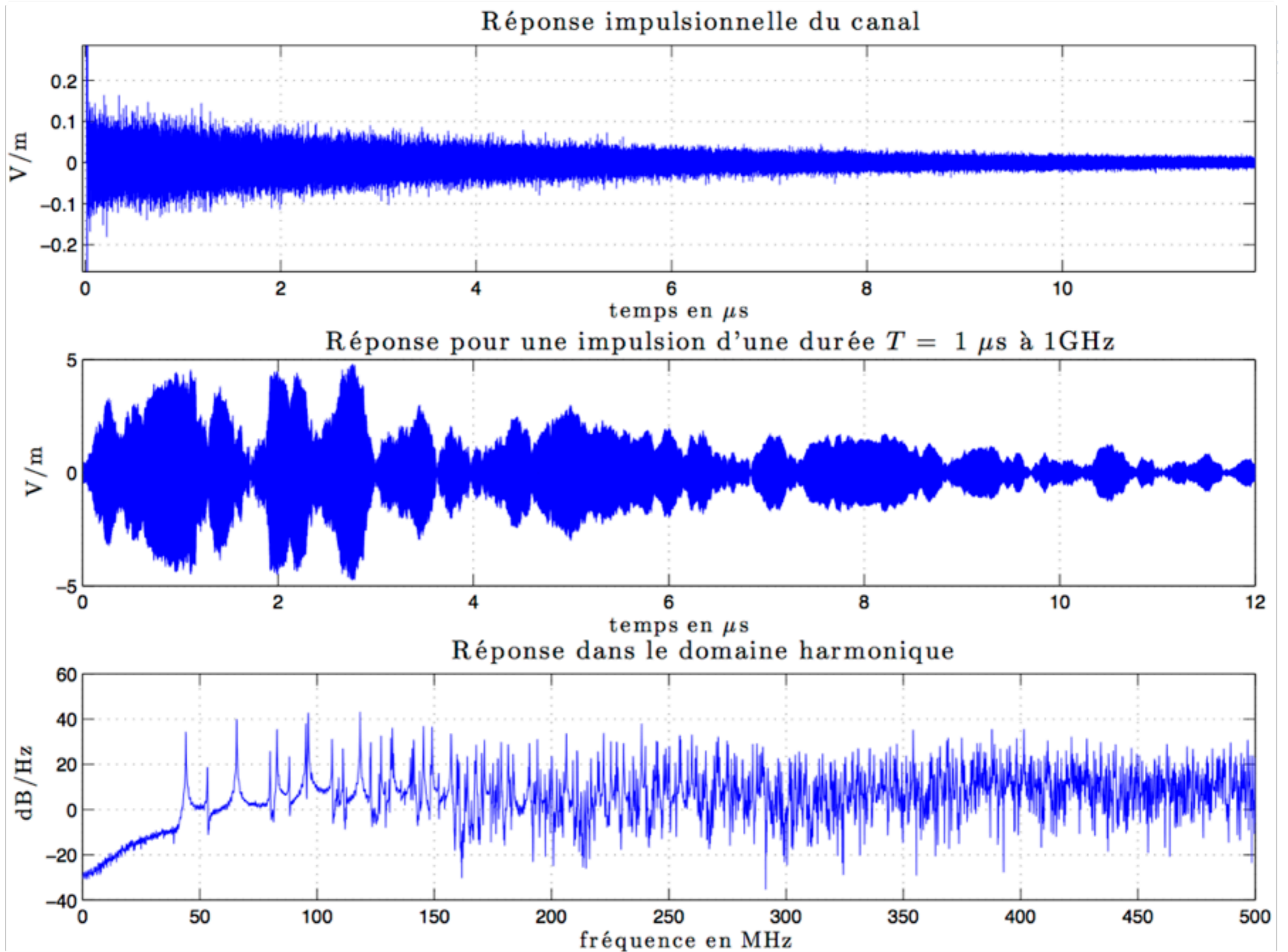
- La réponse de la chambre pour un signal $s(t)$ est donnée par :

$$S_{x,y,z}(t) = s(t) * h_{x,y,z}(t)$$

- La réponse de la chambre dans le domaine harmonique est obtenue en calculant :

$$H_{x,y,z}(f) = \text{FFT}(h_{x,y,z}(t))$$

× La "convergence" de la réponse impulsionnelle est nécessaire



- La théorie des images ne permet pas de décrire un brasseur mécanique
- On emploie un brassage de source qui consiste à déplacer l'émetteur (ou le récepteur) dans le volume utile de la chambre [9]
- On emploie aussi un brassage électronique qui consiste à réaliser une estimation sur plusieurs fréquences [10]

[9] Huang *et al.*, *A novel reverberating chamber: the source-stirred chamber*, IEEE EMC 1992

[10] Hill D.A, *Electronic mode stirring for reverberation chambers*, IEEE Trans. on EMC, 1994

Conclusion de la 2^e partie

- Nous proposons un modèle élémentaire comportemental de chambre réverbérante basé sur la théorie des images
- Les paramètres sont :
 - les dimensions de la cavité
 - les pertes
 - la position de l'émetteur
- Le processus de brassage est assuré par un déplacement du récepteur dans la cavité

1. Introduction
2. Présentation du modèle numérique
3. Validation du modèle numérique
 - 3.1. Modélisation de la chambre de l'IETR
 - 3.2. Validation dans le domaine temporel et harmonique
4. Application: essais en immunité
5. Bilan et perspectives

Quelques ordres de grandeurs

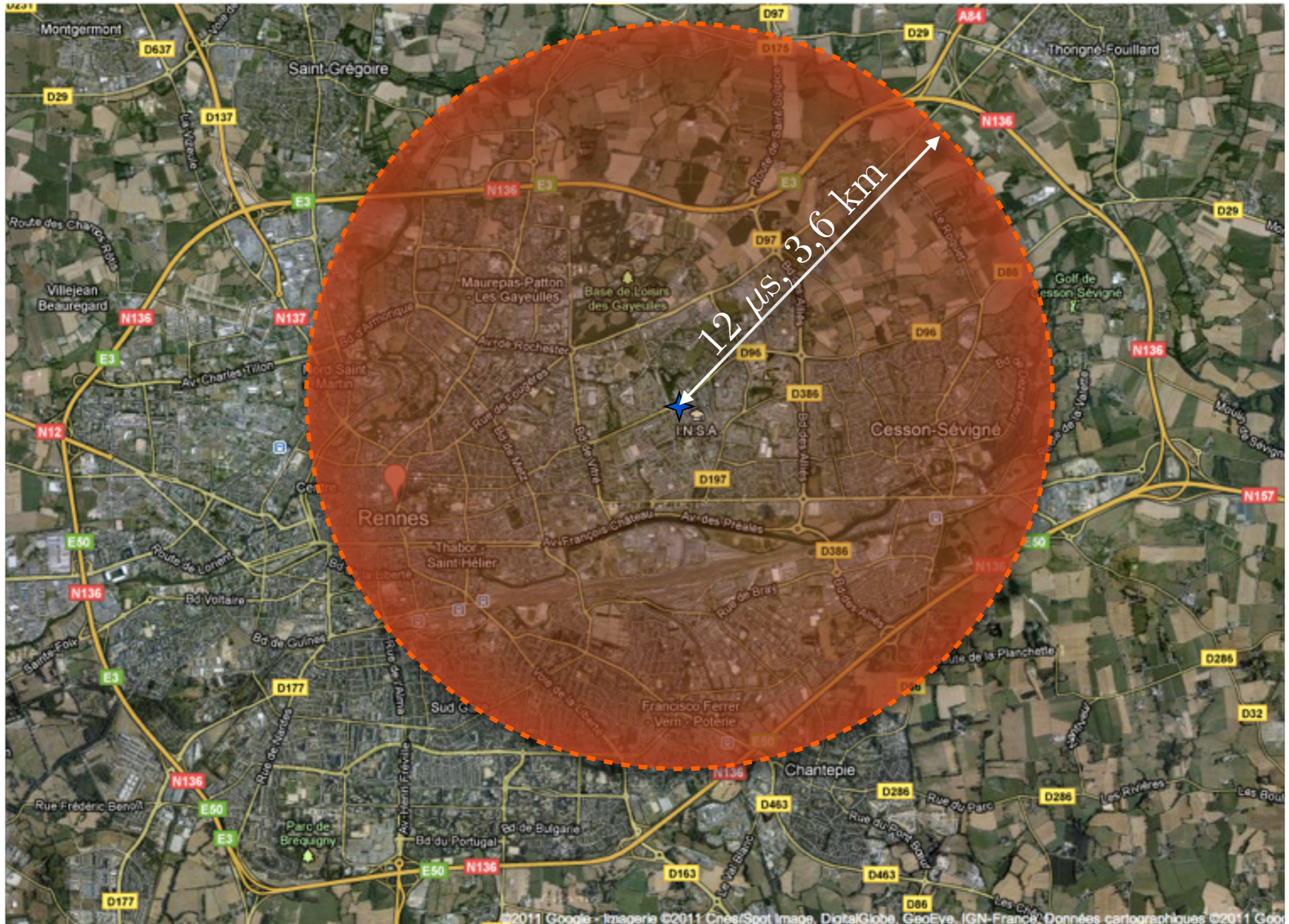
- Dimensions de la chambre de l'IETR : $8,7 \times 3,7 \times 2,9 \text{ m}^3$
- Chambre vide, on trouve une constante de temps entre 2 et 3 μs pour des fréquences entre 400 MHz et 2 GHz

la durée de la réponse impulsionnelle T_m doit être choisie entre 10 et 15 μs pour simuler plus de 99 % de l'énergie

T_m en μs	M_{T_m}	Q en octets	temps de calcul
0,5	$1,9 \cdot 10^4$	$0,910 \cdot 10^6$	0,2 s
1	$1,5 \cdot 10^5$	$7,27 \cdot 10^6$	1,3 s
3	$4,1 \cdot 10^6$	$196 \cdot 10^6$	35 s
6	$3,3 \cdot 10^7$	$1,57 \cdot 10^9$	5 min
12	$2,6 \cdot 10^8$	$12,6 \cdot 10^9$	37 min
15	$5,1 \cdot 10^8$	$24,6 \cdot 10^9$	(1 h 10 min)
25	$1,2 \cdot 10^9$	$58,2 \cdot 10^9$	(2 h 20 min)

1. Modélisation de la chambre de l'IETR

Quelques ordres de grandeurs



Résultats préliminaires (1)

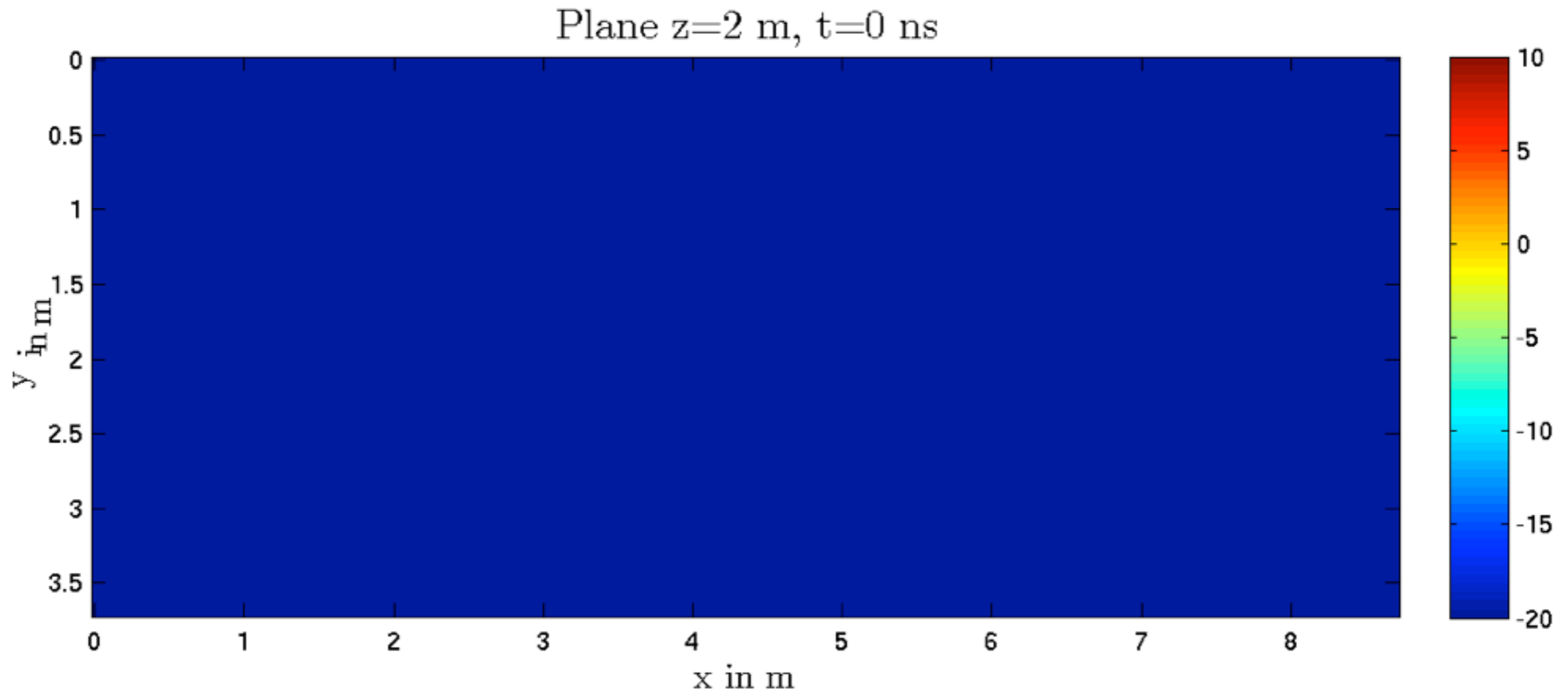


Fig.3.1 Propagation d'une impulsion de durée 100 ns à 500 MHz dans un plan horizontal, puissance totale en dBm

Résultats préliminaires (2)

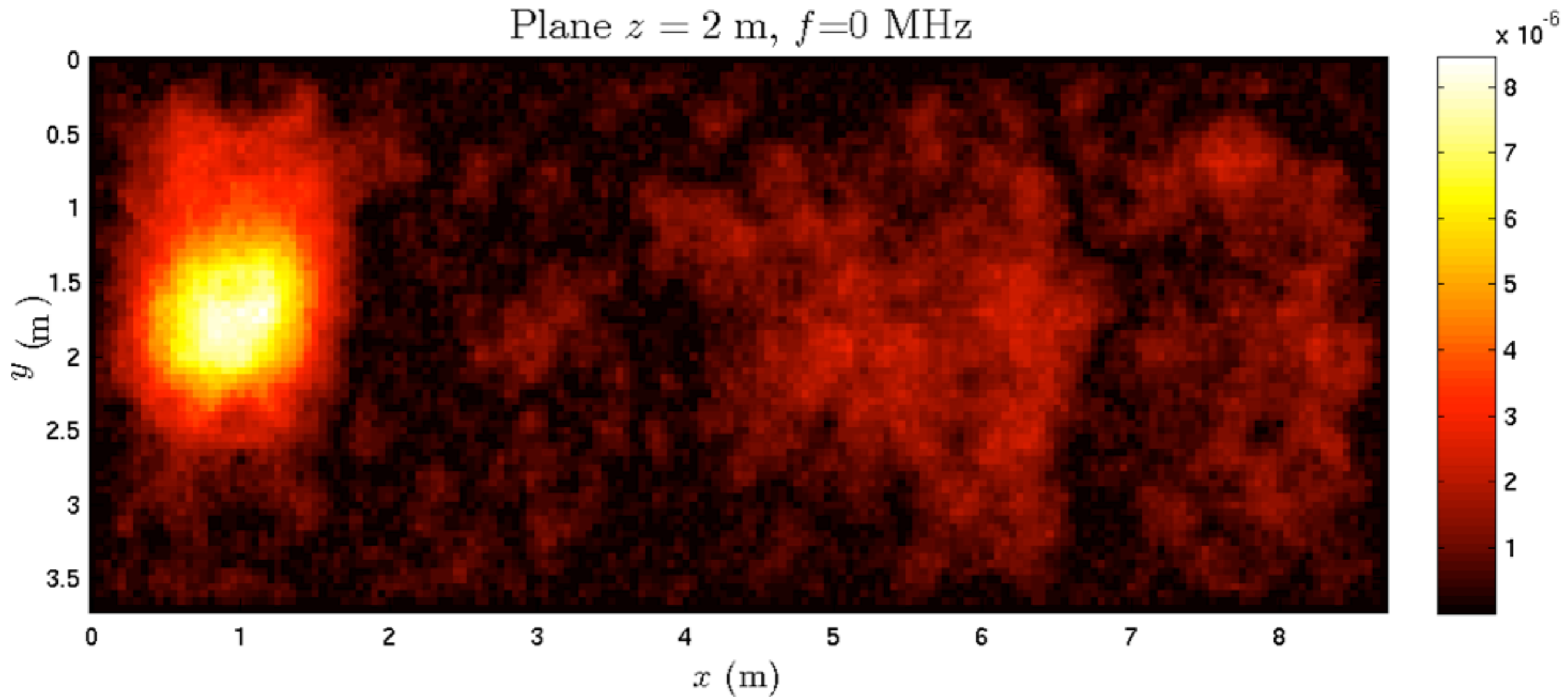


Fig.3.2 Modes de cavité, module de la composante vertical E_z dans un plan horizontal, unités linéaires

Validation du modèle de pertes (1)

- Estimation des coefficients de perte :
 - R chambre vide
 - R_c chambre chargée
- À partir de réponses impulsionnelles du canal on estime R :

$$R \approx e^{-\frac{L}{2c\tau}}$$



$$\tau \approx 2,76 \mu\text{s}$$

$$R \approx 0.998$$



$$\tau_c \approx 180 \text{ ns}$$

$$R_c \approx 0.975$$

Validation du modèle de pertes (2)

- Le signal utilisé est sinusoïdal à 1 GHz et modulé par une impulsion rectangulaire de 300 ns
- On mesure la puissance reçue à $N=50$ positions d'antennes dans le volume utile de la chambre vide et de la chambre chargée
- On simule en prenant $N=50$ points de réception dans le volume utile avec R et R_c
- Pour ajuster les valeurs simulées aux mesures, on multiplie les simulations par un facteur constant de mise à l'échelle

2. Validation dans le domaine temporel et harmonique

Validation du modèle de pertes (3)

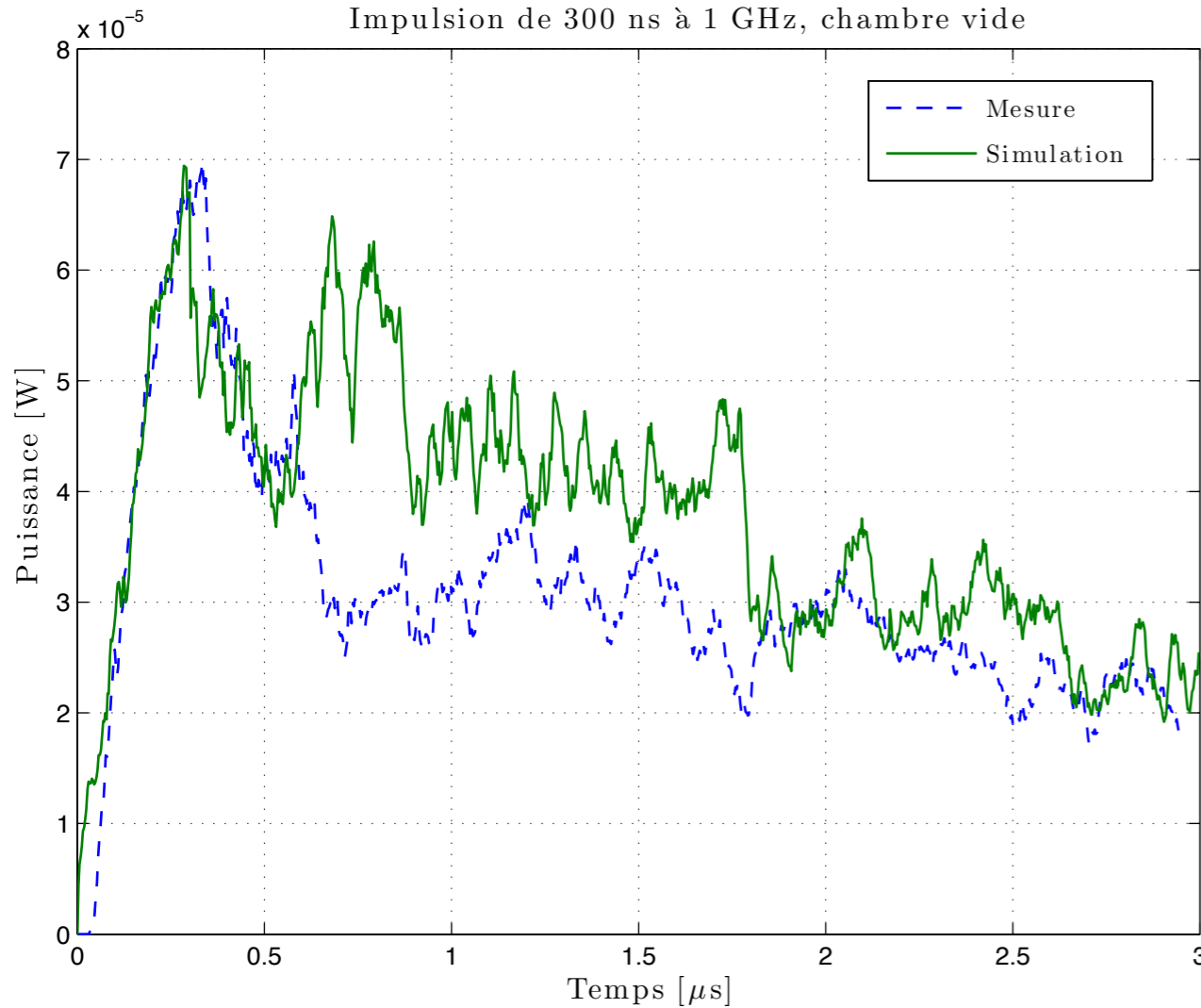


Fig.3.3 Puissance moyenne, chambre vide

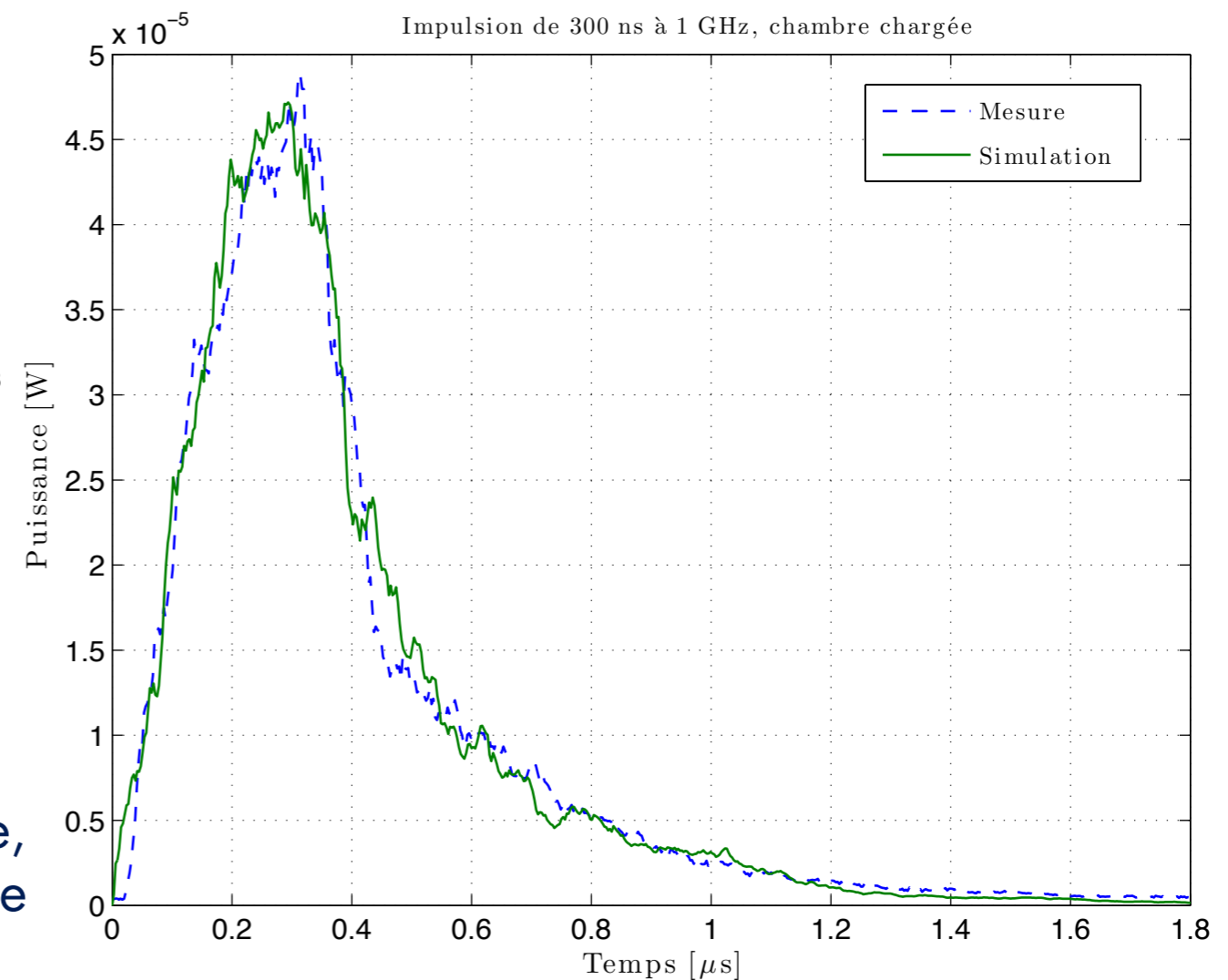


Fig.3.4 Puissance moyenne, chambre chargée

Statistique du champ simulé (1)

- On cherche à caractériser le comportement statistique des composantes cartésiennes du champ électrique dans le domaine harmonique
- On réalise $N=150$ simulations dans le volume utile
- La durée de la réponse impulsionnelle T_m est $12 \mu s$, soit environ 4 ou 5τ
- On utilise les tests d'ajustement d'Anderson - Darling pour la loi de Rayleigh et pour la loi de Weibull pour caractériser le comportement statistique des composantes cartésiennes du champ électrique [11]
- Le test retourne la valeur 0 si l'échantillon suit la distribution testée et la valeur 1 dans le cas contraire

[11] Lemoine et al., *Investigations of Reverberation Chamber Measurements Through High-Power Goodness-of-Fit Tests*, IEEE Trans. on EMC, 2007

2. Validation dans le domaine temporel et harmonique

Statistique du champ simulé (2)

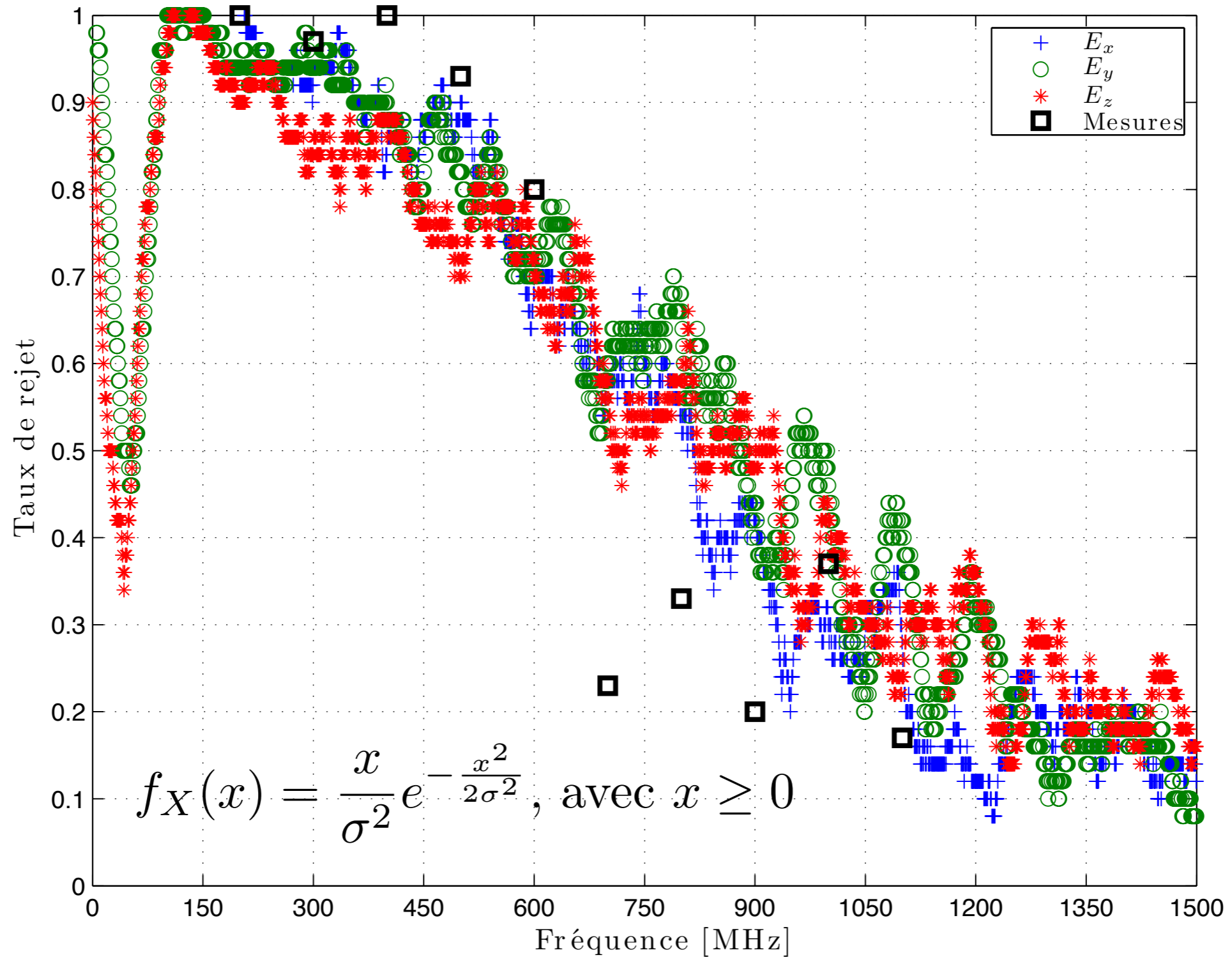


Fig.3.7 Ajustement à la loi de Rayleigh

2. Validation dans le domaine temporel et harmonique

Statistique du champ simulé (3)

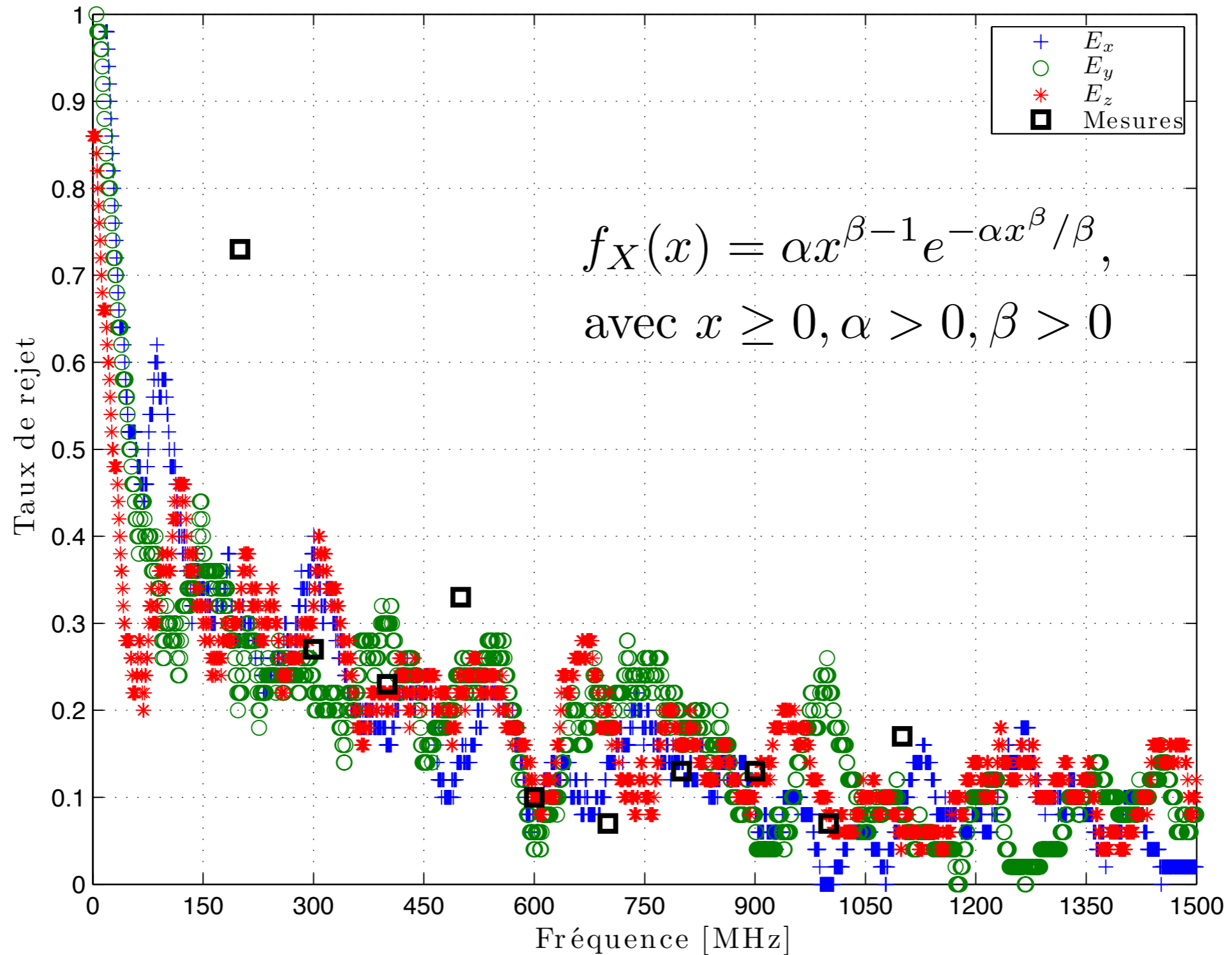


Fig.3.8 Ajustement à la loi de Weibull

2. Validation dans le domaine temporel et harmonique

Statistique du champ simulé (4)

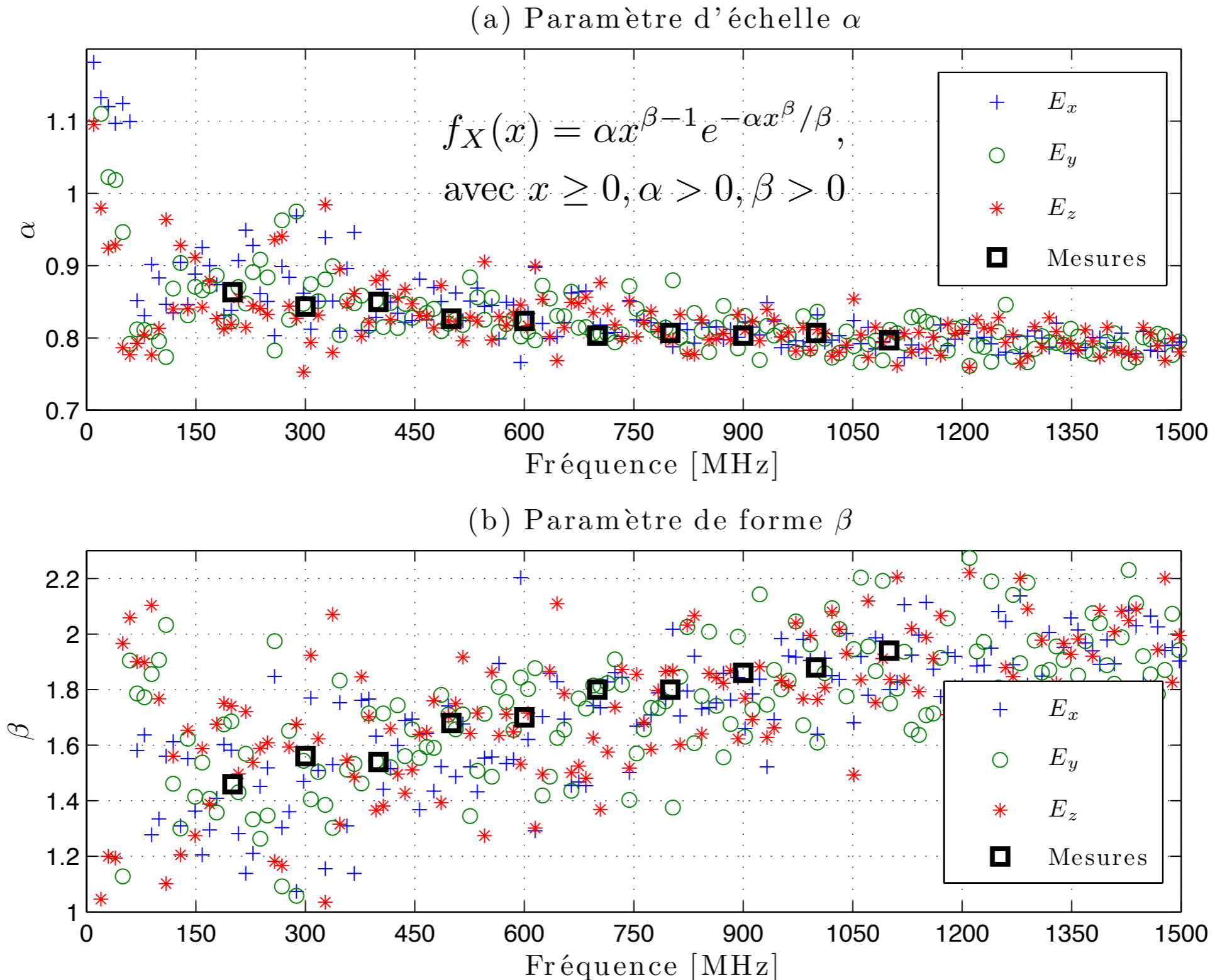


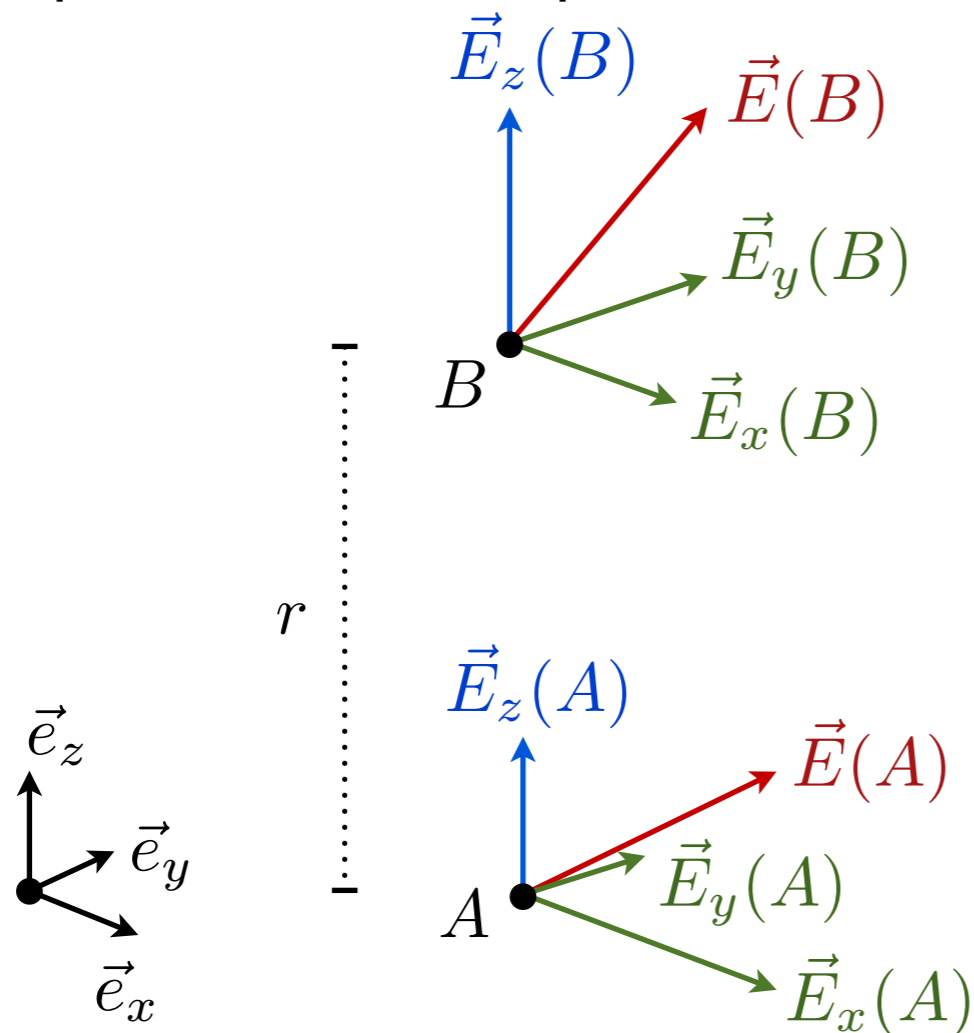
Fig.3.9 Paramètres de la loi de Weibull

Statistique du champ simulé (5)

- Qualitativement les distributions des composantes cartésiennes du champ simulé sont de la même nature que les distributions observées en mesure
- Quantitativement, les paramètres de Weibull montrent que les distributions statistiques des composantes sont très proches des distributions obtenues en mesure
- Le modèle numérique que nous proposons est capable de reproduire le comportement statistique d'une chambre réverbérante réelle avec une bonne description du régime non idéal

Corrélation spatiale du champ simulé (1)

- La corrélation spatiale du champ électrique donne une indication quantitative des propriétés spatiales du champ électrique
- Dans [12], 3 expressions théoriques de la corrélation spatiale dans un spectre d'ondes planes sont données :



$$\rho^2 = \text{Corr} (E^2(A), E^2(B))$$

$$\rho_{ll} = \text{Corr} (E_z^2(A), E_z^2(B))$$

$$\rho_{tt} = \begin{cases} \text{Corr} (E_x^2(A), E_x^2(B)) \\ \text{Corr} (E_y^2(A), E_y^2(B)) \end{cases}$$

Fig.3.11 Schéma de principe du calcul de la corrélation pour un déplacement \vec{r}_z

[12] Hill et al., *Spatial-Correlation Functions of Fields and Energy Density in a Reverberation Chamber*, IEEE Trans. on EMC, 2002

Corrélation spatiale du champ simulé (2)

- La corrélation spatiale s'étudie à l'aide du paramètre $kr = \frac{2\pi}{\lambda} r$
- Lorsque k varie:

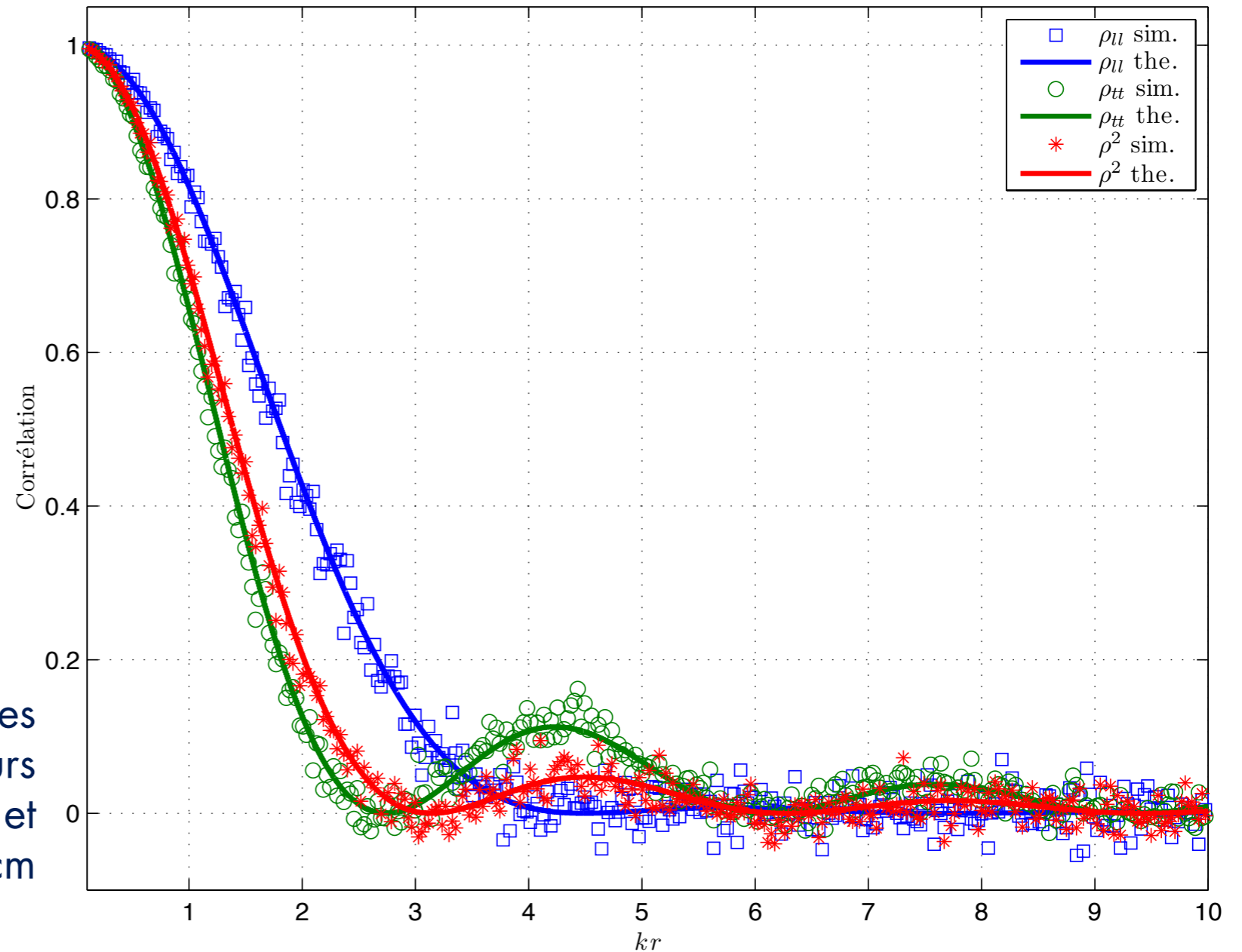


Fig.3.12 Comparaison des corrélations simulées aux valeurs théoriques, f entre 300 MHz et 32 GHz et $r=1,5$ cm

Que se passe-t-il quand r varie?

2. Validation dans le domaine temporel et harmonique

Corrélation spatiale du champ simulé (3)

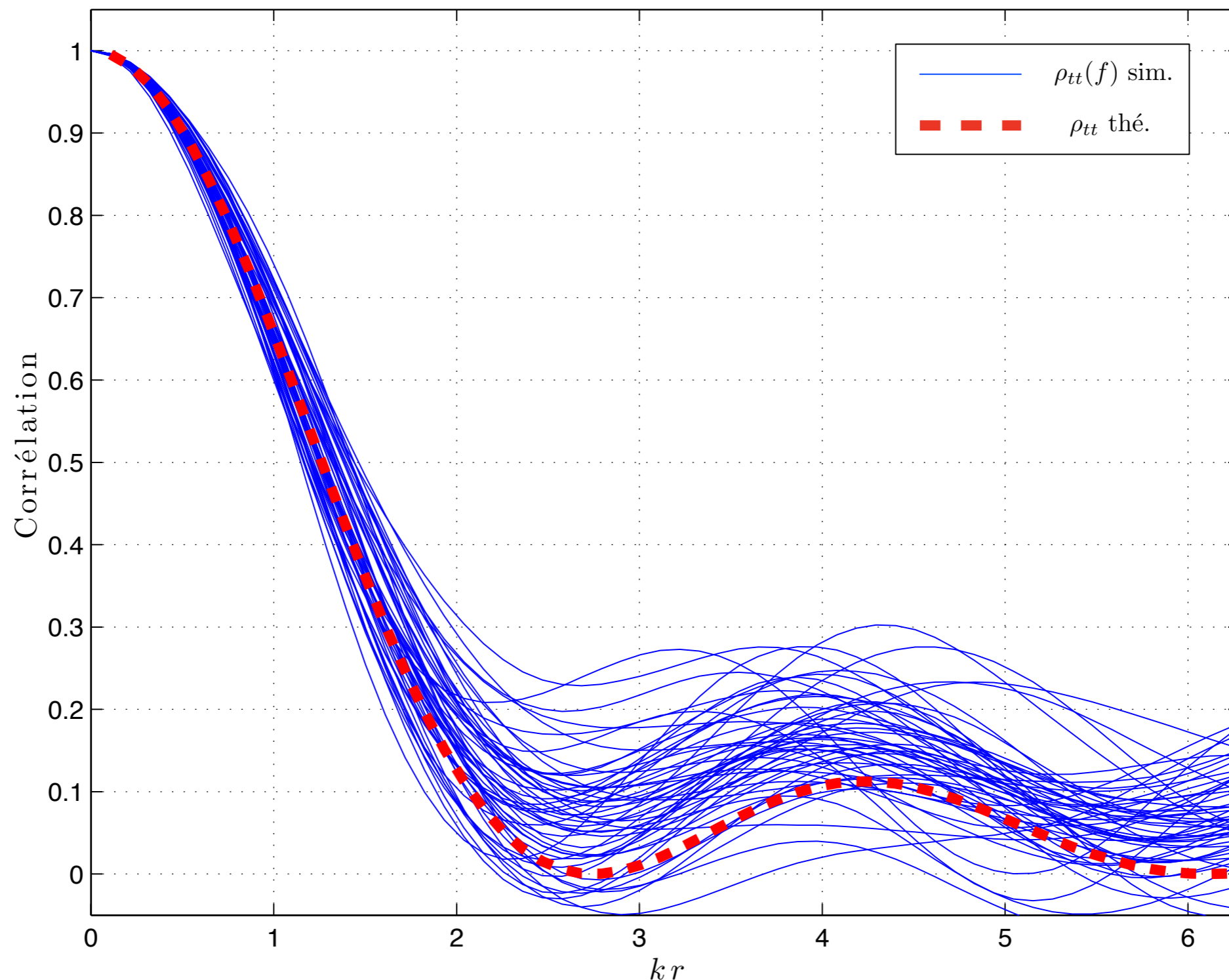


Fig.3.13 Comparaison des corrélations simulées quand r varie pour différentes fréquences entre 1000 et 1050 MHz à la courbe théorique

Conclusion de la 3^e partie

- Simulation réaliste du champ électrique d'une chambre réverbérante réelle dans les domaines temporel et harmonique
- Simulation du régime non idéal aux basses fréquences
- Capacité du modèle à simuler des expériences difficiles à réaliser ou difficiles à simuler avec des méthodes numériques classiques

1. Introduction
2. Présentation du modèle numérique
3. Validation du modèle numérique
4. Application: essais en immunité
 - 4.1. Comparaison des essais en chambre réverbérante et en chambre anéchoïque
 - 4.2. Détections de la susceptibilité d'un système en chambre réverbérante
5. Bilan et perspectives

Introduction de la 4^e partie

Partie consacrée aux essais en immunité

- On cherche à comparer les performances d'un essai en chambre réverbérante et en chambre anéchoïque d'un point de vue statistique à l'aide de notre modèle
- On propose une mesure en chambre réverbérante de la susceptibilité d'un système compatible avec une mesure en onde plane et on vérifie par l'expérience les conclusions des simulations précédentes

Effet du diagramme de rayonnement (1)

- Simulation de l'effet du diagramme de rayonnement de l'objet sous test sur un essai en immunité en chambre réverbérante et en onde plane (chambre anéchoïque)
- Génération de diagrammes de rayonnement directifs

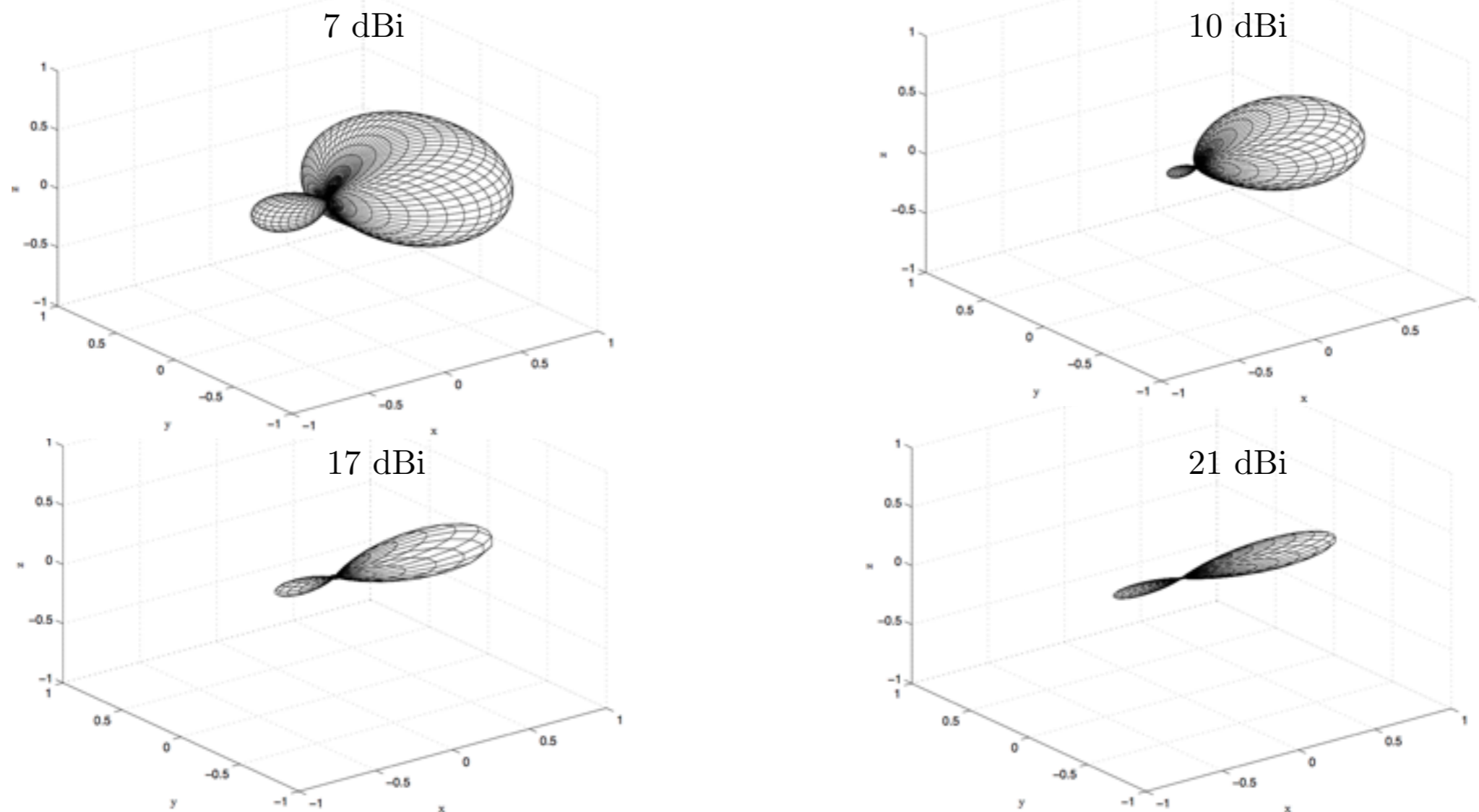
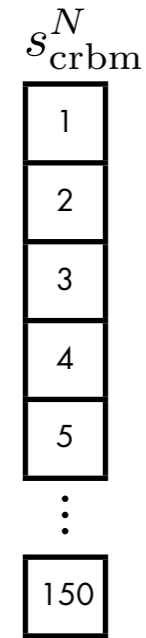
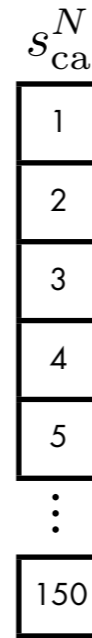


Fig.4.1 Diagrammes directifs simulés

Effet du diagramme de rayonnement (2)

1. On réalise $N=150$ simulations en onde plane et en chambre réverbérante
2. On retient le niveau maximal P_M pour chaque moyen d'essai
3. On retient le niveau max pour un échantillon de taille m
4. On analyse le rapport $\langle P_m \rangle_p / P_M$ pour chaque moyen d'essai



$$P_{M_{ca}} = \max(s_{ca}^N)$$

$$P_{M_{crbm}} = \max(s_{crbm}^N)$$

$$P_{m_{ca}} = \max(s_{ca}^m)$$

$$P_{m_{crbm}} = \max(s_{crbm}^m)$$

$$\times p$$

$$\times p$$

$\langle P_{m_{ca}} \rangle_p$
$P_{M_{ca}}$

$\langle P_{m_{crbm}} \rangle_p$
$P_{M_{crbm}}$

4.1. Comparaison des moyens d'essais

Effet du diagramme de rayonnement (3)

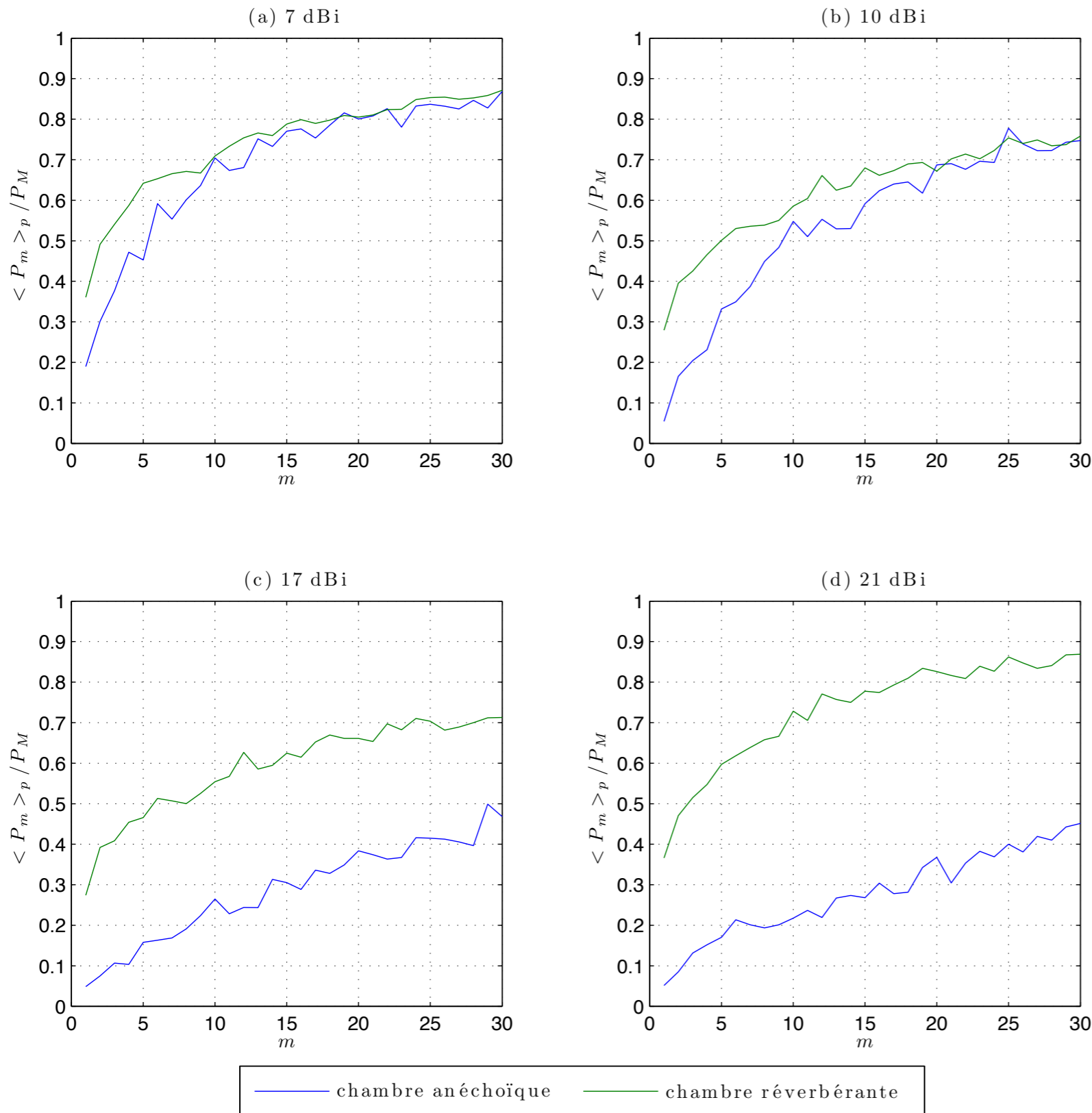


Fig.4.2 Résultats avec des diagrammes directifs

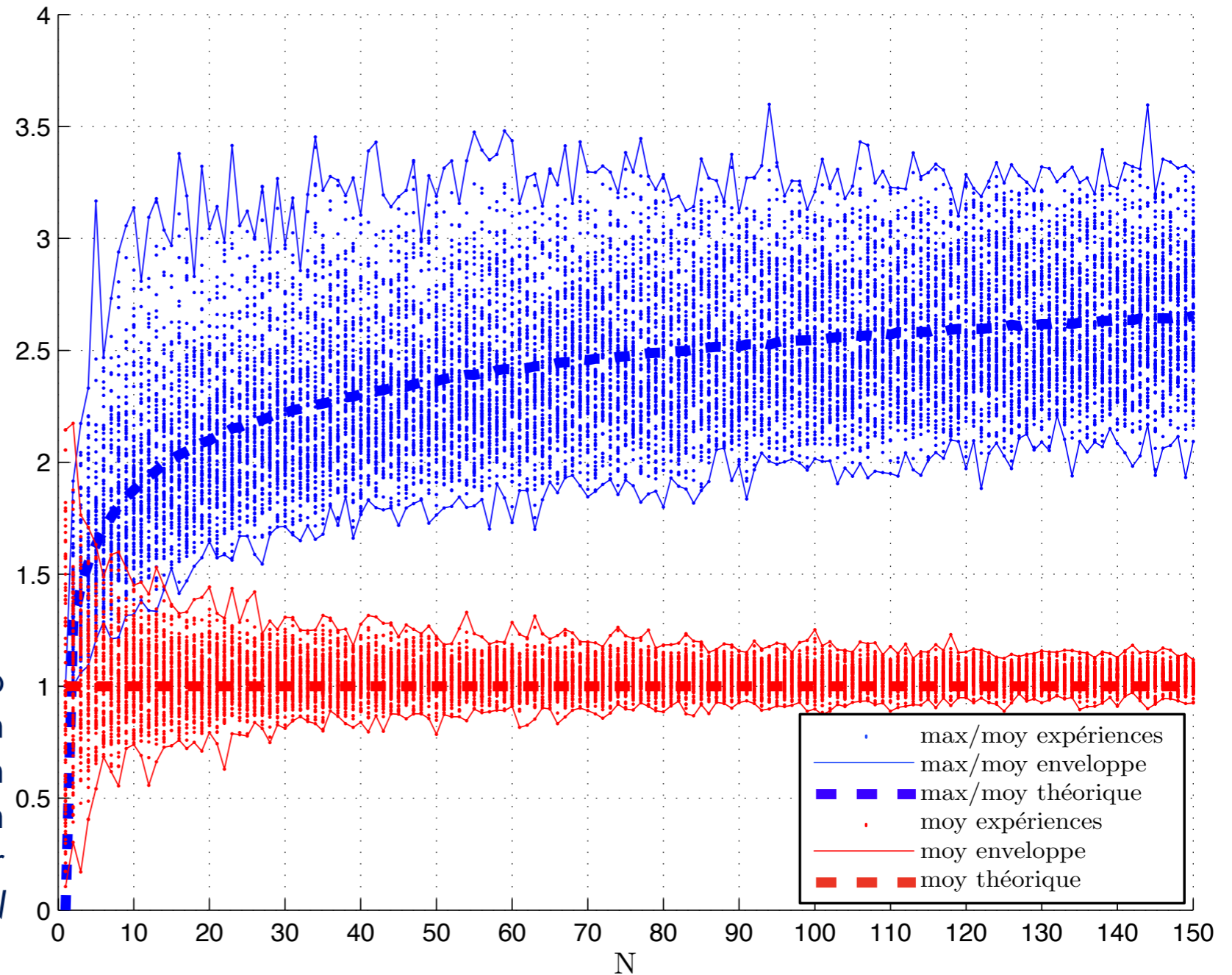
- L'augmentation de la directivité réduit les performances d'un essai en chambre anéchoïque
- Les performances des essai en chambre réverbérantes ne semblent pas affectées

4.2. Détection de la susceptibilité d'un système

Mesure de la susceptibilité d'un système en chambre réverbérante (1)

- En chambre réverbérante, la mesure de la susceptibilité se fait à partir de la consigne du champ maximal
- Le champ maximal est déduit du nombre d'expériences réalisées N et du niveau de champ moyen

Fig.4.3 Simulations du rapport champ max sur champ moyen et comparaison avec une estimation du champ moyen pour 100 expériences et comparaison avec les valeurs théoriques pour différentes valeurs de N

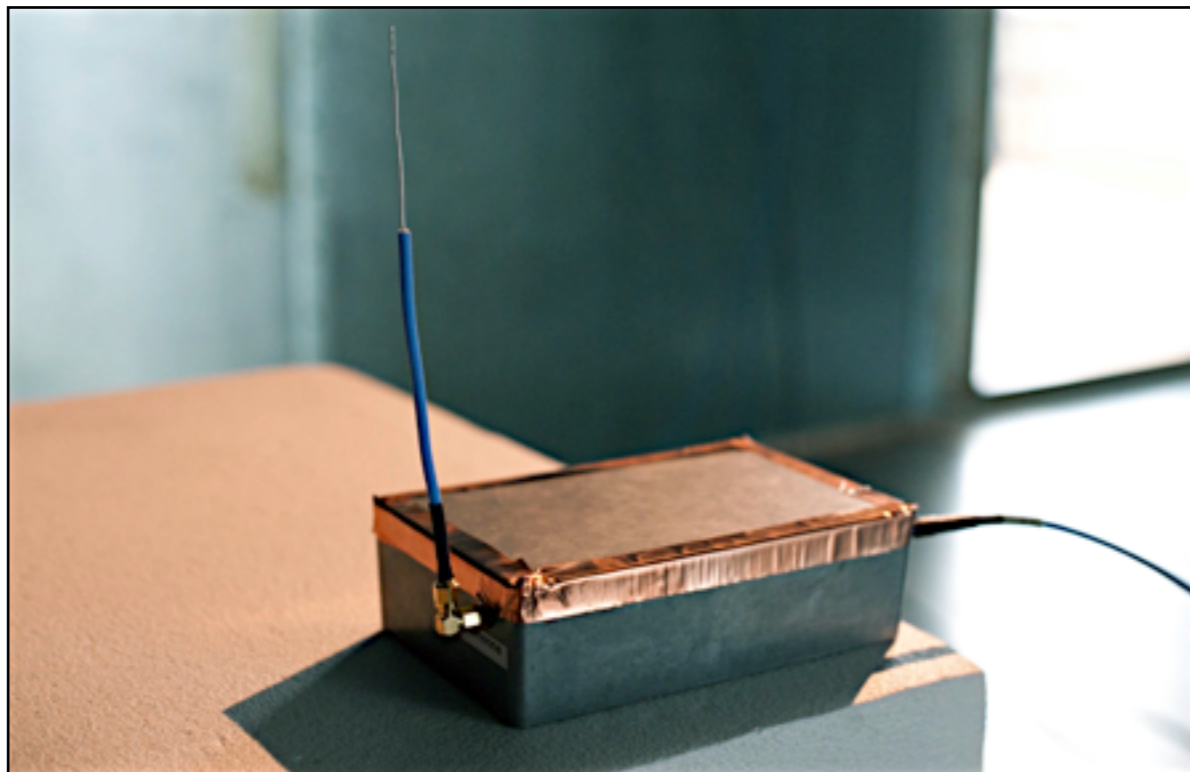


Mesure de la susceptibilité d'un système en chambre réverbérante (2)

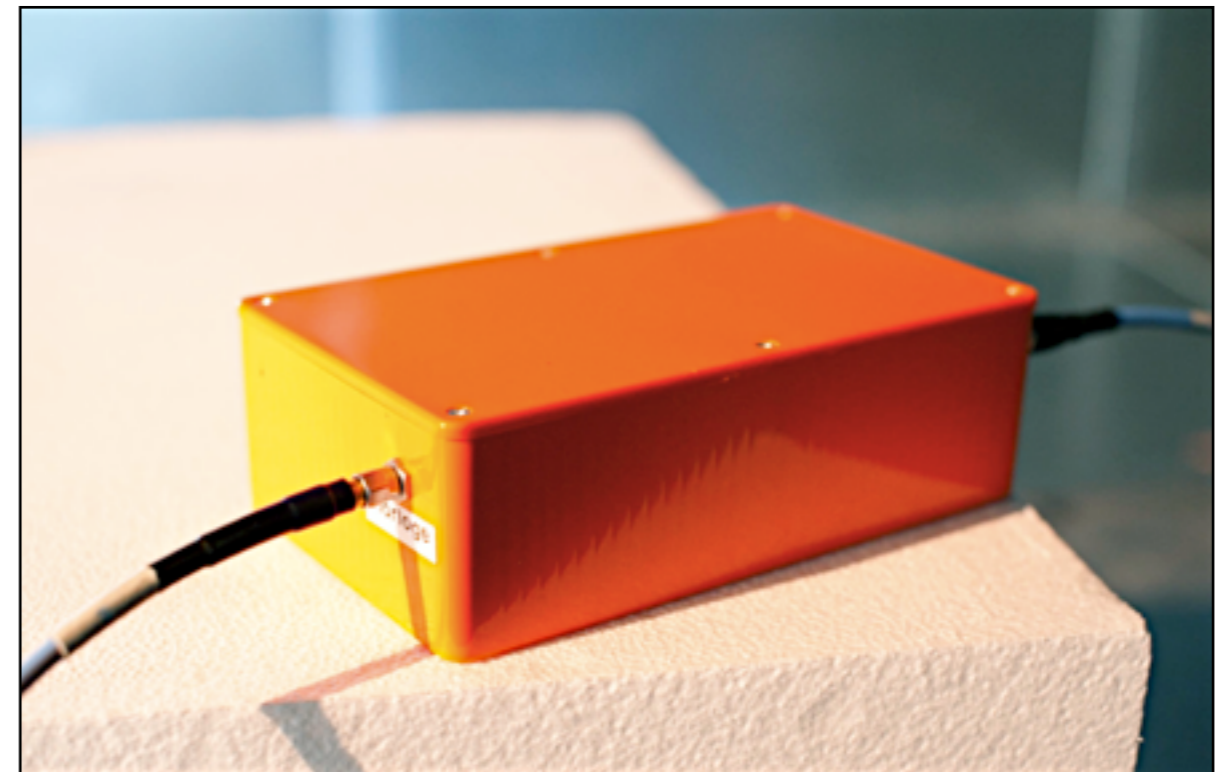
- Une estimation de la susceptibilité basée sur la consigne du champ moyen est statistiquement plus pertinente que la consigne du champ maximum
- On cherche une approche expérimentale de la mesure de susceptibilité en chambre réverbérante qui soit compatible avec les mesures en onde plane et indépendante du moyen d'essai
- Le niveau de susceptibilité est donné par la valeur moyenne du champ observé dans la chambre
- On suppose que le niveau de susceptibilité est atteint quand environ une position de brasseur sur deux engendre un défaut

Mesure de la susceptibilité d'un système en chambre réverbérante (3)

- On réalise une mesure de susceptibilité en chambre réverbérante et 5 mesures en cellule GTEM (onde plane) sur deux systèmes électroniques simples :



(a) Un amplificateur opérationnel (AOP) monté en comparateur dans un boîtier métallique. Une antenne permet d'introduire la perturbation



(b) Un convertisseur analogique numérique (CAN) monté dans un boîtier en plastique

Fig.4.4 Objets sous tests utilisés pour les mesures

4.2. Détection de la susceptibilité d'un système

Mesure de la susceptibilité d'un système en chambre réverbérante (4)

- Bonne adéquation entre les niveaux obtenus en cellule GTEM et en chambre réverbérante en prenant le champ moyen
- On peut comparer directement les niveaux obtenus en chambre réverbérante avec ceux obtenus en onde plane
- La mesure en chambre réverbérante est plus conservatrice que la mesure en cellule GTEM

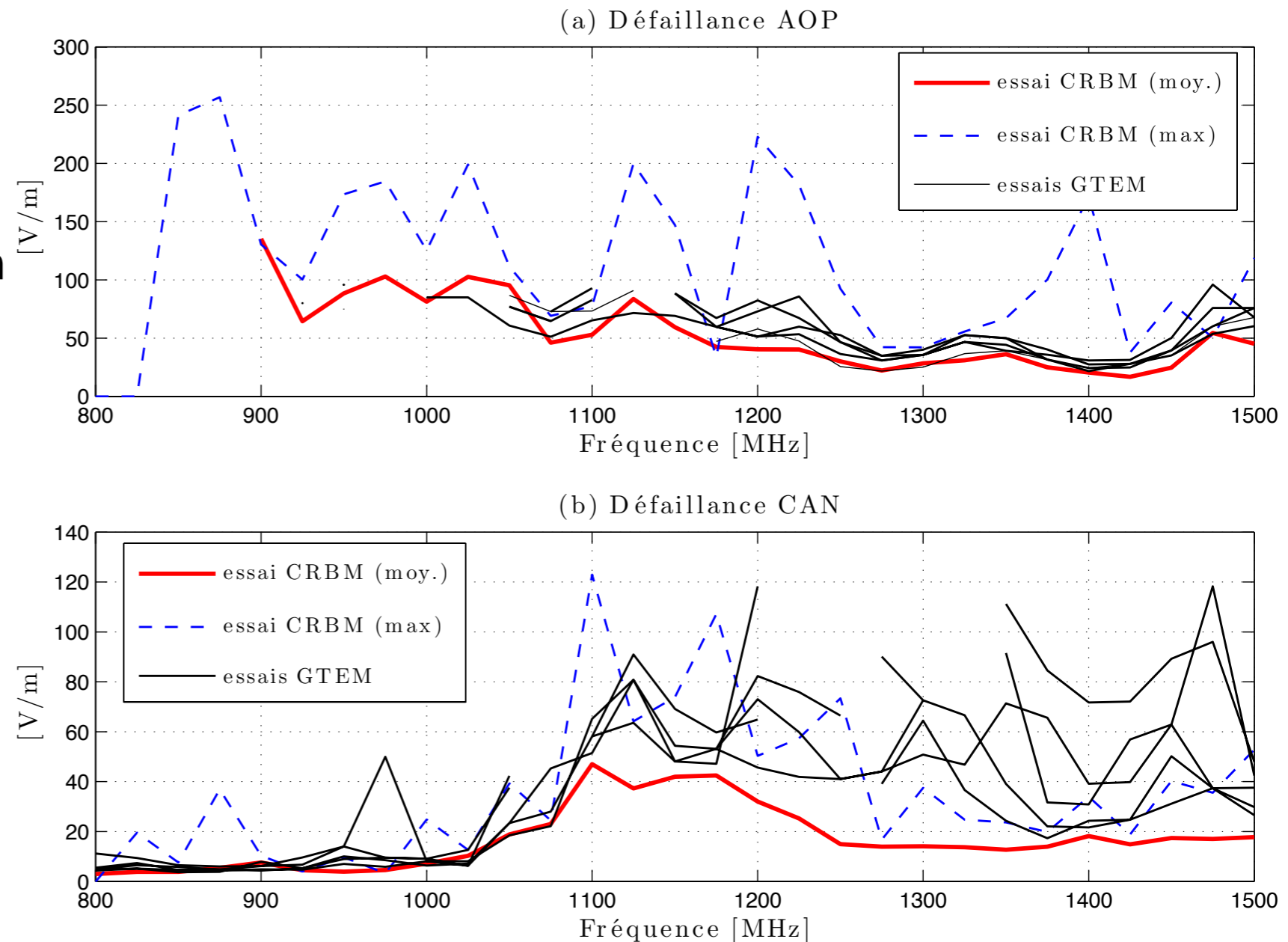


Fig.4.6 Mesures de la susceptibilité en cellule GTEM et chambre réverbérante

Conclusion de la 4^e partie

- A l'aide du modèle numérique, nous avons pu simuler des essais en immunité en chambre réverbérante et mesurer l'effet de la directivité de l'objet sous test sur les performances d'un essai en onde plane et en chambre réverbérante
- Nous avons proposé une mesure de la susceptibilité d'un objet basée sur la valeur moyenne du champ qui ne dépend plus de la manière dont l'essai est réalisé
- Dans le manuscrit, nous proposons une optimisation des essais en immunité et un protocole d'essai avec des signaux pulsés de manière à reproduire des situations d'illumination réelles

1. Introduction
2. Présentation du modèle numérique
3. Validation du modèle numérique
4. Application: essais en immunité
5. Bilan et perspectives

- Nous proposons un modèle numérique simple de chambre réverbérante
 - il prend en compte les dimensions de la chambre, les pertes et la position de l'antenne émettrice
 - aucune discrétisation de l'environnement n'est employée
- Il offre une description physique du fonctionnement d'une chambre réverbérante réelle dans le domaine temporel et le domaine harmonique
 - simulation de formes d'ondes dans le domaine temporel
 - prise en compte de la charge introduite par des objets tiers
 - statistique d'une chambre réelle avec notamment simulation du régime non idéal

Bilan - Essais en immunité

- Le modèle permet de simuler des essais en immunité
- Influence des caractéristiques du rayonnement sur un essai en immunité en onde plane et en chambre réverbérante
- Mesure de la susceptibilité d'un système à partir de la moyenne du champ et non du maximum

- Améliorations diverses du modèle :
 - Développement d'un modèle harmonique pour prendre en compte la variation des pertes en fonction de la fréquence
 - Prise en compte précise des angles d'incidences dans le coefficient de perte
 - Simulations de cavités sphériques ou cylindriques (simulation de fuselages)
- Autres utilisations du modèle :
 - Caractérisation de matériaux
 - Mesure de diagramme de rayonnement et de SER
 - Simulations de canaux de propagations
 - Utilisation acoustique du modèle

- *Reverberation Chamber Modeling Based on Image Theory : Investigation in the Pulse Regime*
Emmanuel Amador, Christophe Lemoine, Philippe Besnier and Alexandre Laisné.
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Nov. 2010
- *On the K-factor estimation for Rician channel simulated in reverberation chamber*
Christophe Lemoine, Emmanuel Amador, Philippe Besnier.
IEEE Transactions on Antennas and Propagation, March 2011.
- *An Empirical Statistical Detection of Non Ideal Field Distribution in a Reverberation Chamber Confirmed by a Simple Numerical Model Based on Image Theory*
Emmanuel Amador, Christophe Lemoine, Philippe Besnier.
Annals of Telecommunications, Special issue on Complexity management and modelling in electromagnetism, Aug. 2011
- *Mode-Stirring Efficiency of reverberation chambers based on Rician K-Factor*
Christophe Lemoine, Emmanuel Amador, Philippe Besnier.
Electronic letters (Accepté) 2011.
- *A Numerical Study of the Spatial Correlation in a Reverberation Chamber*
Emmanuel Amador, Christophe Lemoine, Philippe Besnier.
Soumis à Electronic Letters

Communications

- *Quantifying stirred and unstirred components in reverberation chamber with appropriate statistics*
Guillaume Lerideau, Emmanuel Amador, Christophe Lemoine, Philippe Besnier.
IEEE International Symposium on EMC 2009, Austin, Texas, U.S.A.
- *Modélisation d'une chambre réverbérante basée sur la théorie des images : étude en régime pulsée*
Emmanuel Amador, Christophe Lemoine, Philippe Besnier et Alexandre Laisné.
CEM 2010, Limoges, France
- *Estimation fine du facteur K en chambre réverbérante pour l'évaluation de la directivité*
Christophe Lemoine, Emmanuel Amador, Jérôme Sol et Philippe Besnier.
CEM 2010, Limoges, France.
- *Improved estimation of the K-factor for Rician channels emulation in a reverberation chamber*
Christophe Lemoine, Emmanuel Amador and Philippe Besnier (2010).
EuCAP 2010, Barcelona, Spain.
- *Studying the Pulse Regime in a Reverberation Chamber with a Model Based on Image Theory*
Emmanuel Amador, Christophe Lemoine, Philippe Besnier and Alexandre Laisné.
IEEE International Symposium on EMC 2010. Fort Lauderdale, Florida, U.S.A.
- *Fine Analysis of the Behavior of a Reverberation Chamber in the Frequency Domain with a Model Based upon Image Theory*
Emmanuel Amador, Christophe Lemoine, Philippe Besnier and Alexandre Laisné.
EMC Europe 2010, Wroclaw, Poland.
- *K-factor as an Accurate Estimator of the Stirring Efficiency in Reverberation Chamber*
Christophe Lemoine, Emmanuel Amador, Jérôme Sol and Philippe Besnier.
EMC Europe 2010, Wroclaw, Poland.
- *Statistical estimation of antenna gain from measurements carried out in a mode-stirred reverberation chamber*
Christophe Lemoine, Emmanuel Amador, Philippe Besnier, Jérôme Sol, Jean-Marie Floc'h and Alexandre Laisné.
2011 URSI General Assembly, Istanbul, Turkey.
- *Absorbing Material Characterization in a Reverberation Chamber*
Emmanuel Amador, Mihai-Ionut Andries, Christophe Lemoine and Philippe Besnier.
EMC Europe 2011, York, U.K.

Merci.