

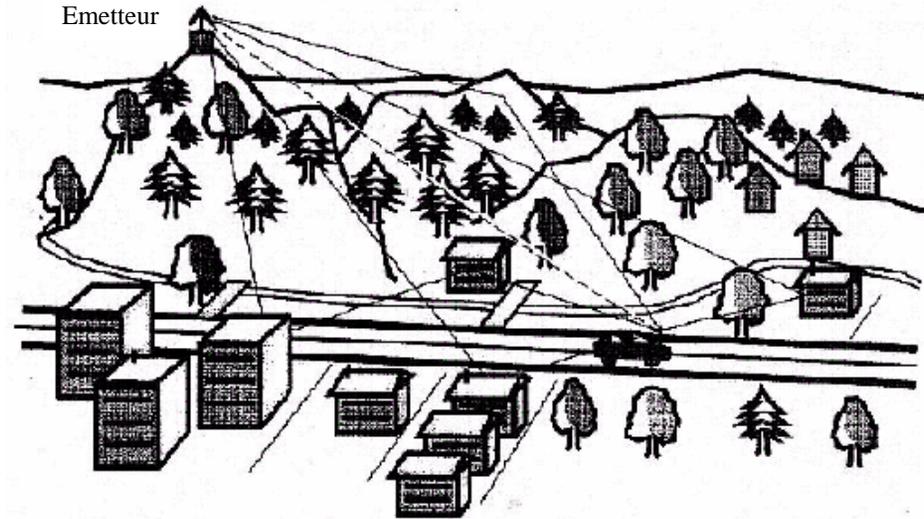
# INSTITUT D'ÉLECTRONIQUE ET DE TÉLÉCOMMUNICATIONS DE RENNES



Caractérisation  
statistique fine de  
différents environnements  
électromagnétiques  
en chambre réverbérante

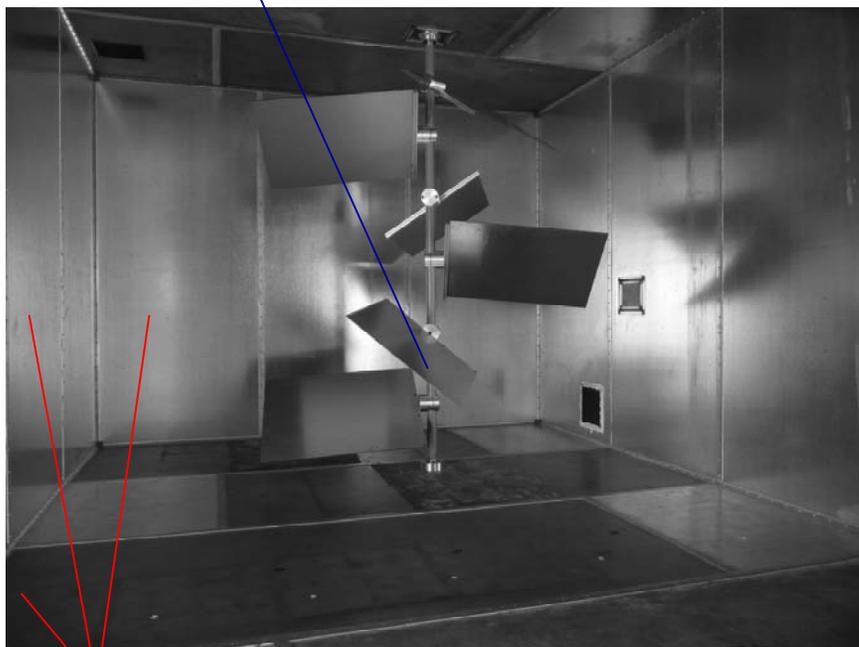
**C. Lemoine, P. Besnier, M. Drissi**

JS 08 / CEM 08 / Paris / 20-23 mai 2008

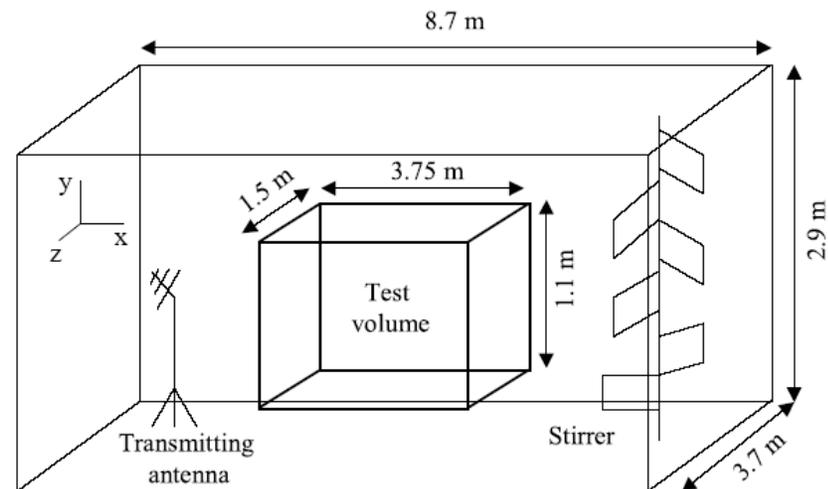


- Introduction
- Génération d'environnements électromagnétiques indépendants
- Lois de distribution en l'absence de trajet direct
- Caractérisation d'un canal de Rice en chambre réverbérante
- Conclusion

Brasseur de modes



CRBM de l'IETR : 93 m<sup>3</sup>



Parois métalliques (acier, aluminium)

- ★ La chambre réverbérante à brassage de modes peut être considérée comme un générateur aléatoire de mesures de champ/puissance
- ★ C'est un moyen d'essais pour diverses applications :
  - ★ Essais CEM (immunité / émissivité)
  - ★ Simulation de canaux de propagation
  - ★ Caractérisation d'antennes



- La propriété d'indépendance des mesures est capitale pour contrôler l'essai que l'on réalise en terme d'indépendance des mesures

✦ Exemple : le résultat du théorème central limite (CLT) pour  $N'$  mesures indépendantes :

Soit  $x_1, \dots, x_{N'}$  un échantillon **indépendant** de la variable aléatoire  $X$  de moyenne  $\mu_X$  et de variance  $\sigma_X^2$

➔ Pour  $N'$  grand, l'estimateur de la moyenne  $\mu_X$  est distribué selon une loi Normale avec l'écart type suivant :

$$\sigma_{\mu_X} = \frac{\sigma_X}{\sqrt{N'}}$$

Appliqué aux mesures en CRBM, la distribution de  $X$  correspond par exemple au cas où chaque position de brasseur engendre une distribution de champ indépendante

- La fonction d'autocorrélation  $r$  est la mesure communément admise de l'indépendance des mesures

avec :

$$Y_1 = \{y_1, y_2, \dots, y_{N-1}, y_N\}$$

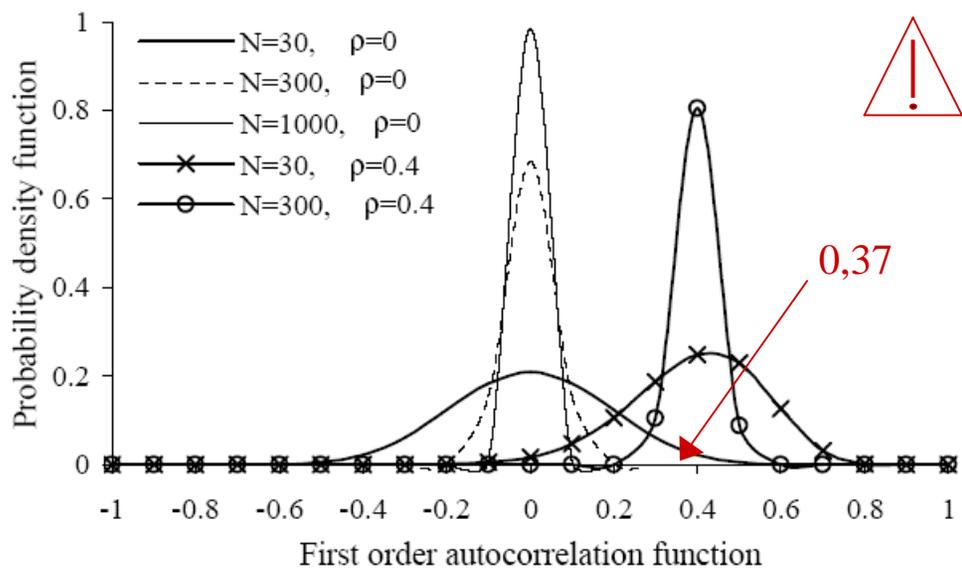
$$Y_2 = \{y_2, y_3, \dots, y_N, y_1\}$$

$$r(Y_1, Y_2) = \frac{\text{Cov}(Y_1, Y_2)}{\sqrt{\text{Var}(Y_1) \times \text{Var}(Y_2)}} \quad [\text{ACF}(1)]$$

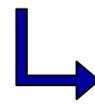
- D'une manière générale  $r \in [-1; 1]$
- ✦ Absence de corrélation si  $r = 0$

✦ La corrélation ➔ si  $|r|$  ➔

- Les normes telles que IEC 61000-4-21 supposent l'indépendance statistique des conditions aux limites en CRBM entre 2 positions de brasseur successives si  $r < \rho_0 = 0,37$



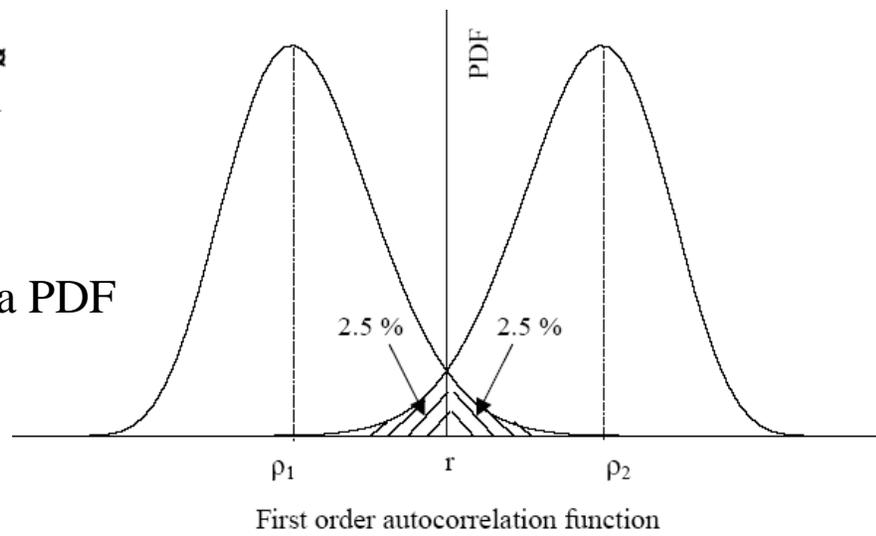
La distribution de l'ACF(1) est fonction de la taille N de l'échantillon



Le seuil  $\rho_0$  devrait dépendre de N



Encadrement de  $\rho$  par un intervalle de confiance :



- En première approximation, on peut assimiler la PDF à une loi normale  $N(\rho, \sigma)$  telle que :

$$\sigma = \frac{N-1}{N^2} (1-\rho^2) \approx \frac{1}{N} (1-\rho^2)$$

- D'où la détermination de l'intervalle de confiance à 95% :  $[\rho_1 ; \rho_2]$

$$\text{tel que : } \rho_1 = r - 1,96 \sigma \quad \text{et} \quad \rho_2 = r + 1,96 \sigma$$

- Nous nous attachons à respecter la condition suivante pour l'indépendance :  
avec  $N=1500$  mesures, l'espérance de l'ACF(1) est dans l'intervalle  $[ r - 0.05 ; r + 0.05 ]$

- Concept de **taille effective** (\*) d'un échantillon  $N'$  (ESS):

Soit  $y_1, \dots, y_N$  un échantillon **corrélé** de la variable aléatoire  $Y$  de moyenne  $\mu_Y$  et de variance  $\sigma_Y^2$

Appliqué aux chambres réverbérantes,  $Y$  correspond au cas d'un brassage pour lequel les positions de brasseur sont corrélées, à cause d'une modification insuffisante des conditions aux limites

**$N'$  est le nombre d'échantillons indépendants d'une série corrélée de taille  $N$**

(\*) Estimating the effective sample size to select independent measurements in a reverberation chamber  
C. Lemoine, P. Besnier, M. Drissi, *IEEE Trans. on EMC*, May 2008

- Détermination de la taille effective  $N'$  à l'aide d'un modèle de régression :

$$N'_{AR(1)} = N \times \frac{1 - \Phi_{11}}{1 + \Phi_{11}} \times \left( \frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2 \times \left( \frac{\mu_y}{\sigma_y} \right)^2$$

- Ordre 1 -

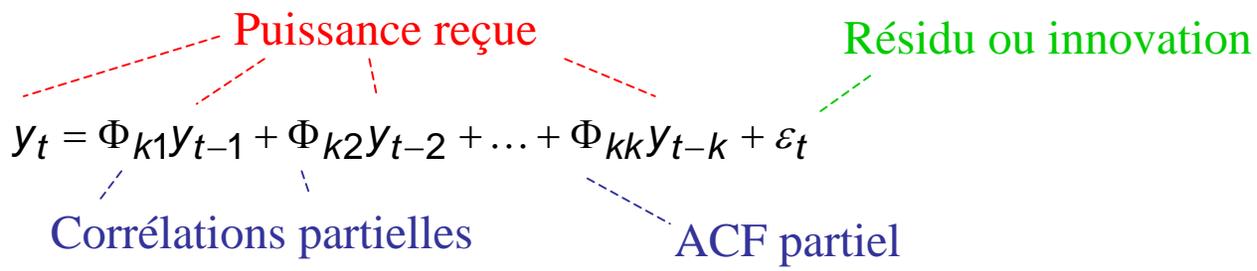
$$y_t = \Phi_{11} \times y_{t-1} + \varepsilon_t$$

$$N'_{AR(2)} = N \times \frac{1 - \Phi_{21} - \Phi_{22}}{1 + \Phi_{21} - \Phi_{22}} \times \left( \frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2 \times \left( \frac{\mu_y}{\sigma_y} \right)^2$$

- Ordre 2 -

$$y_t = \Phi_{21} \times y_{t-1} + \Phi_{22} \times y_{t-2} + \varepsilon_t$$

- La formulation générale d'un processus AR(k) exprime l'observation à la date t de la variable dépendante  $y_t$  en fonction des observations précédentes  $y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-k}$  et d'un résidu  $\varepsilon_t$



- Augmenter l'ordre  $k$  d'un modèle est nécessaire lorsqu'il reste suffisamment d'information qui n'est pas exploitée dans le résidu

- Pour la CRBM, nous considérons que les résidus sont indépendants lorsque l'ACF(1)  $|r_\varepsilon|$  des résidus est inférieur à 0.1 pour  $N=1500$  échantillons

f (MHz)	$\Phi_{11}$ (N)	$\Phi_{11}$ (N')
400	0.74 (300)	0.06 (52)
700	0.41 (300)	0.11 (133)
1000	0.21 (300)	0.11 (220)

▪ Distributions pour une cavité idéale (densité de modes infinie) :

Ratio écart type / moyenne

Exponentielle (NLOS\*)

$$P, E_R^2$$

$$f(x) = \frac{1}{\theta} e^{-\frac{x}{\theta}}$$

$$\hat{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\frac{\sigma}{\mu} = 1$$

Rayleigh (NLOS\*)

$$\sqrt{P}, E_R$$

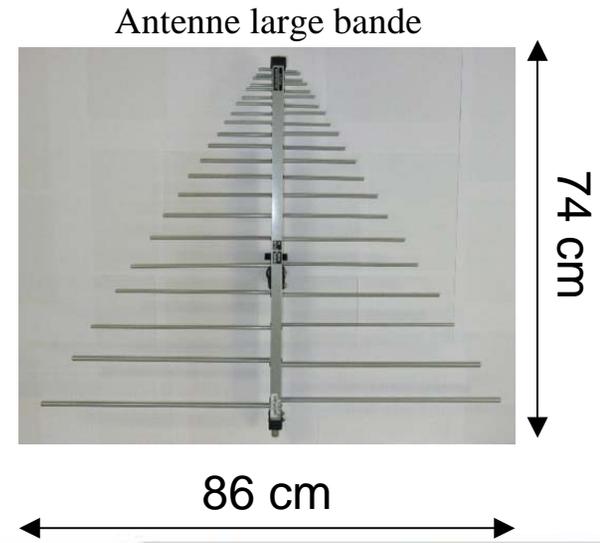
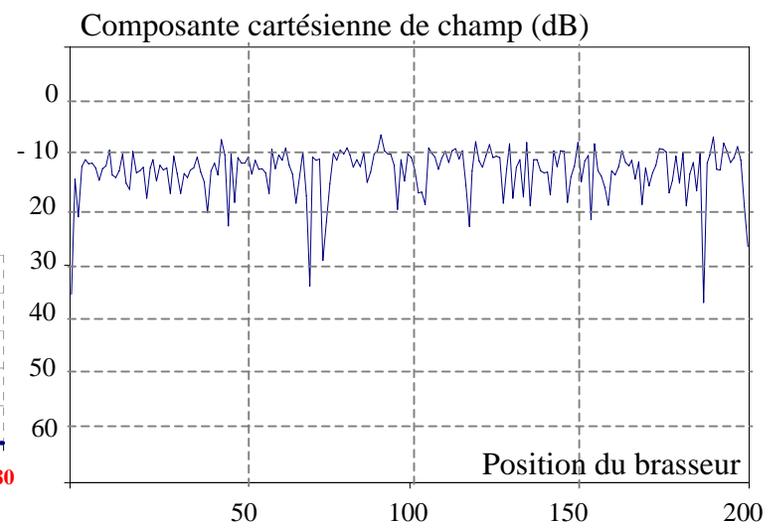
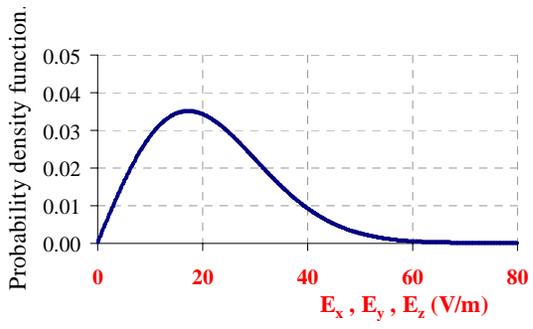
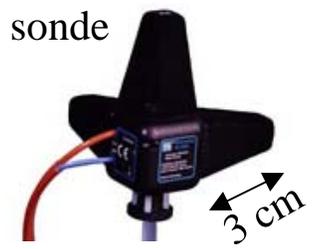
$$f(x) = \frac{2x}{\theta} e^{-\frac{x^2}{\theta}}$$

$$\hat{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2$$

$$\frac{\sigma}{\mu} = 0.52$$

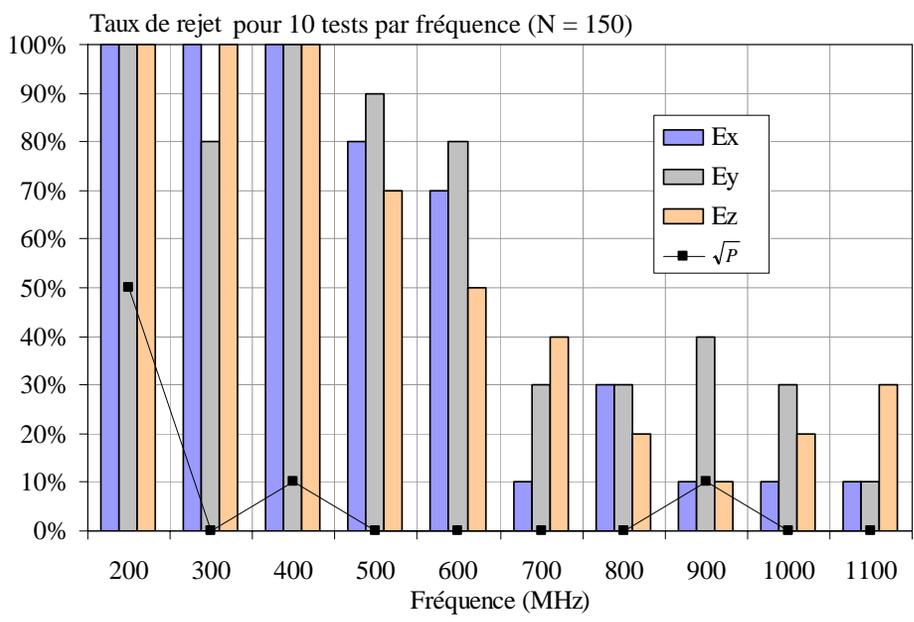
\*NLOS : Non Light-Of-Sight

Estimé par la méthode du maximum de vraisemblance

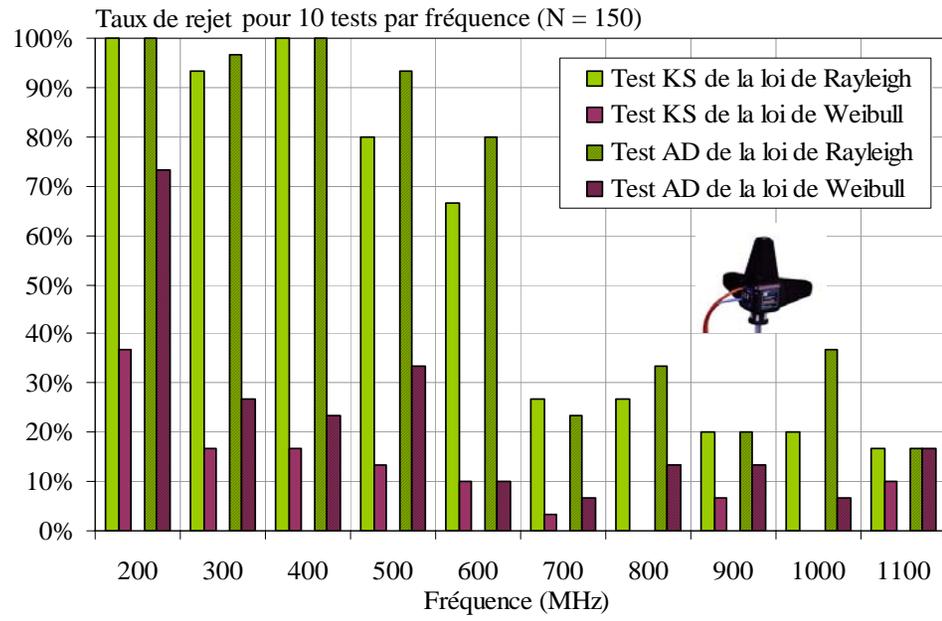


- Exemple de canal de Rayleigh -

- Résultats expérimentaux : tests d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov et de Anderson-Darling



- **Acceptation de Weibull pour le champ**



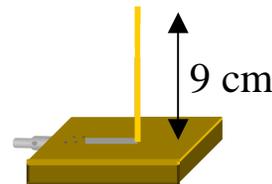
- $|ACF(1)| < 0,10$  pour chaque fréquence
- **Rejet** de Rayleigh pour le champ
- **Acceptation** de Rayleigh pour la puissance

Loi de Weibull :  $f(x) = abx^{b-1}e^{-ax^b}$

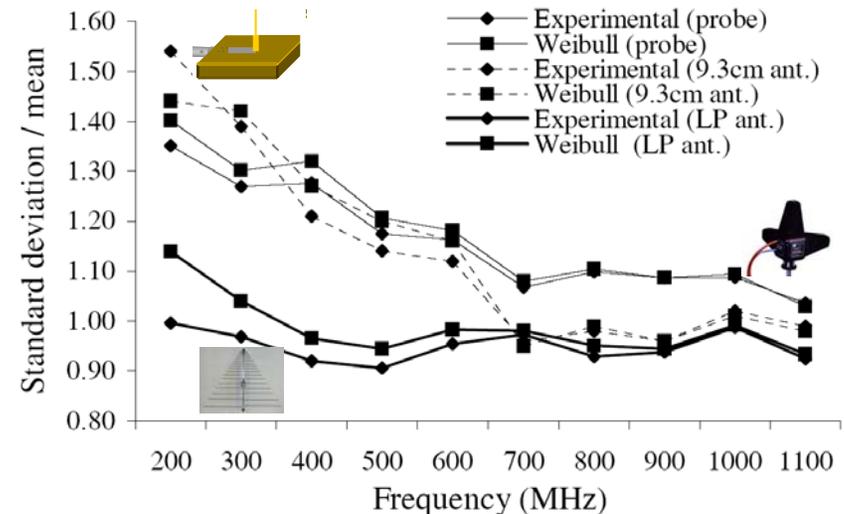
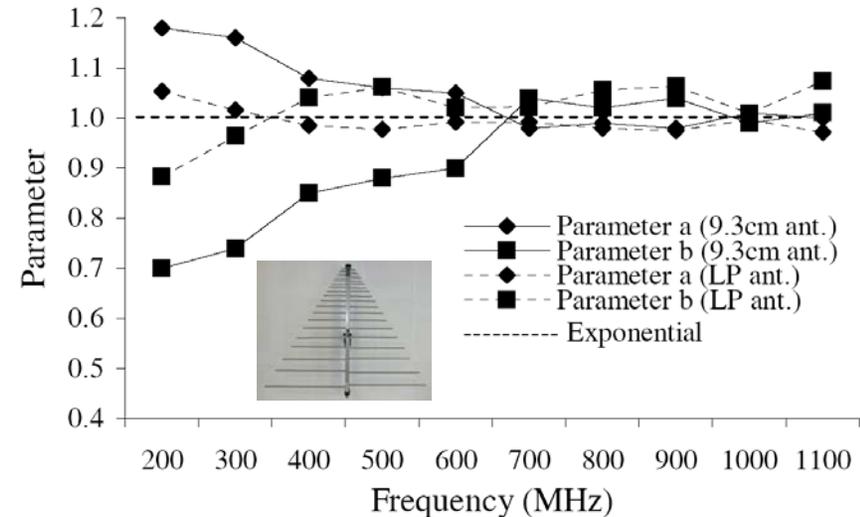
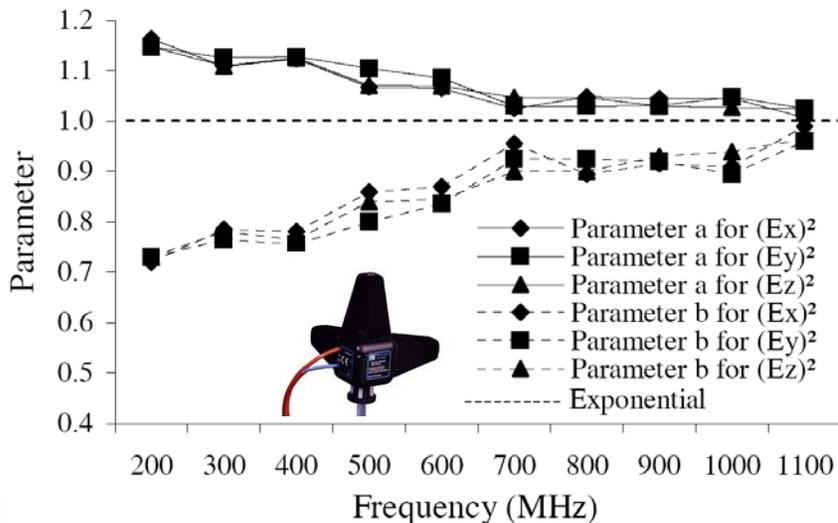
Exponentielle  $\begin{cases} a = 1 \\ b = 1 \end{cases}$       Rayleigh  $\begin{cases} a = \pi/4 \\ b = 2 \end{cases}$

- le canal est fonction du récepteur de mesures
- le résultat des tests d'ajustement est cohérent avec les propriétés suivantes de la distribution théorique :

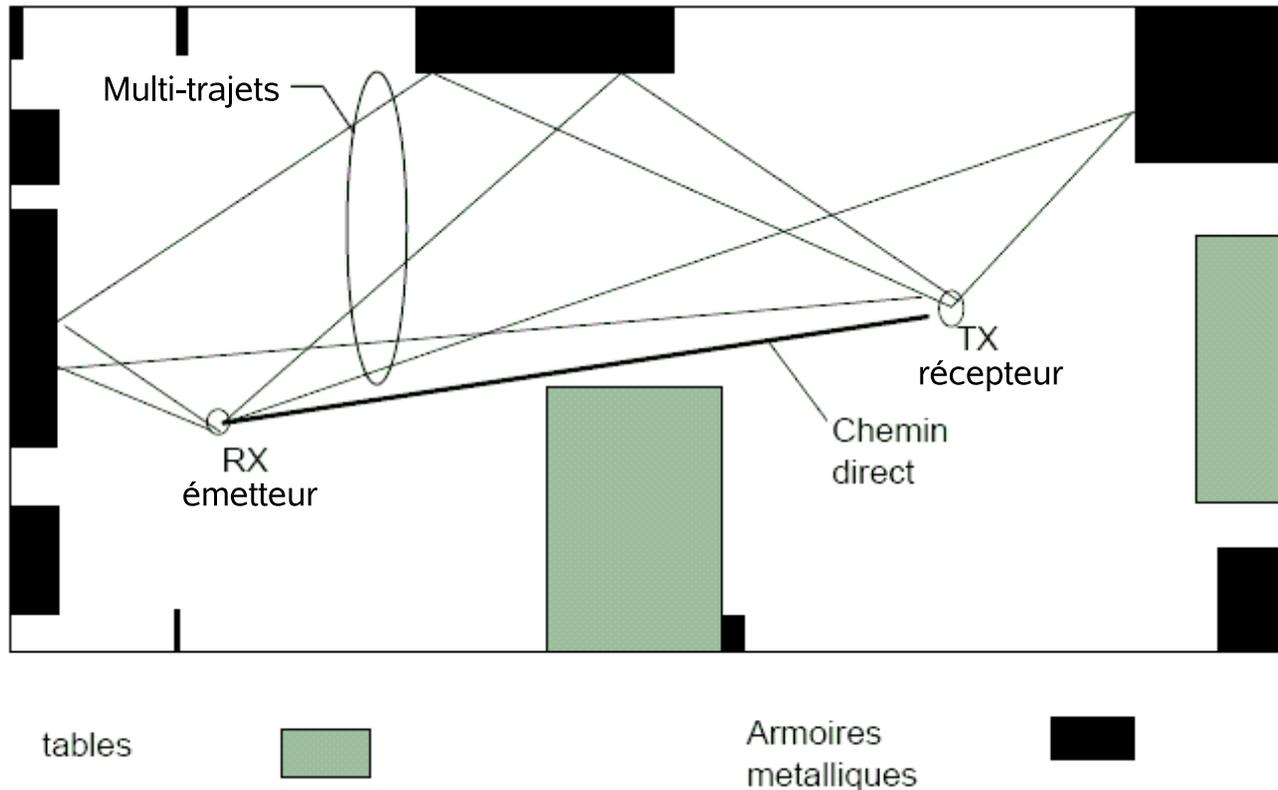
- Evolution du couple (a,b)



- Evolution du ratio écart type / moyenne



- Un canal de Rice est caractéristique d'une propagation LOS (*Line-Of-Sight*)



- Densité de probabilité de la distribution de Rice :  $f(x, v) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + v^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{xv}{\sigma^2}\right)$   
 $v$  représente l'onde directe  
 $\sigma$  représente la dispersion du signal due aux trajets multiples

## ▪ Nouvelle méthode statistique d'estimation du canal de Rice :

- ✦ Les paramètres complexes en transmission  $S_{21r}$  et  $S_{21i}$  sont distribués selon une loi normale.

Le canal peut être caractérisé par la distribution du module du paramètre en transmission :

$$|S_{21}| = \sqrt{S_{21r}^2 + S_{21i}^2}$$

- ✦ Soient  $X$  et  $Y$  deux v.a. distribuées selon des lois normales indépendantes et définies par :

$$\begin{cases} X \sim N(\nu \cos \alpha, \sigma) \\ Y \sim N(\nu \sin \alpha, \sigma) \end{cases} \quad \text{et} \quad \nu^2 \cos^2 \alpha + \nu^2 \sin^2 \alpha = \nu^2$$

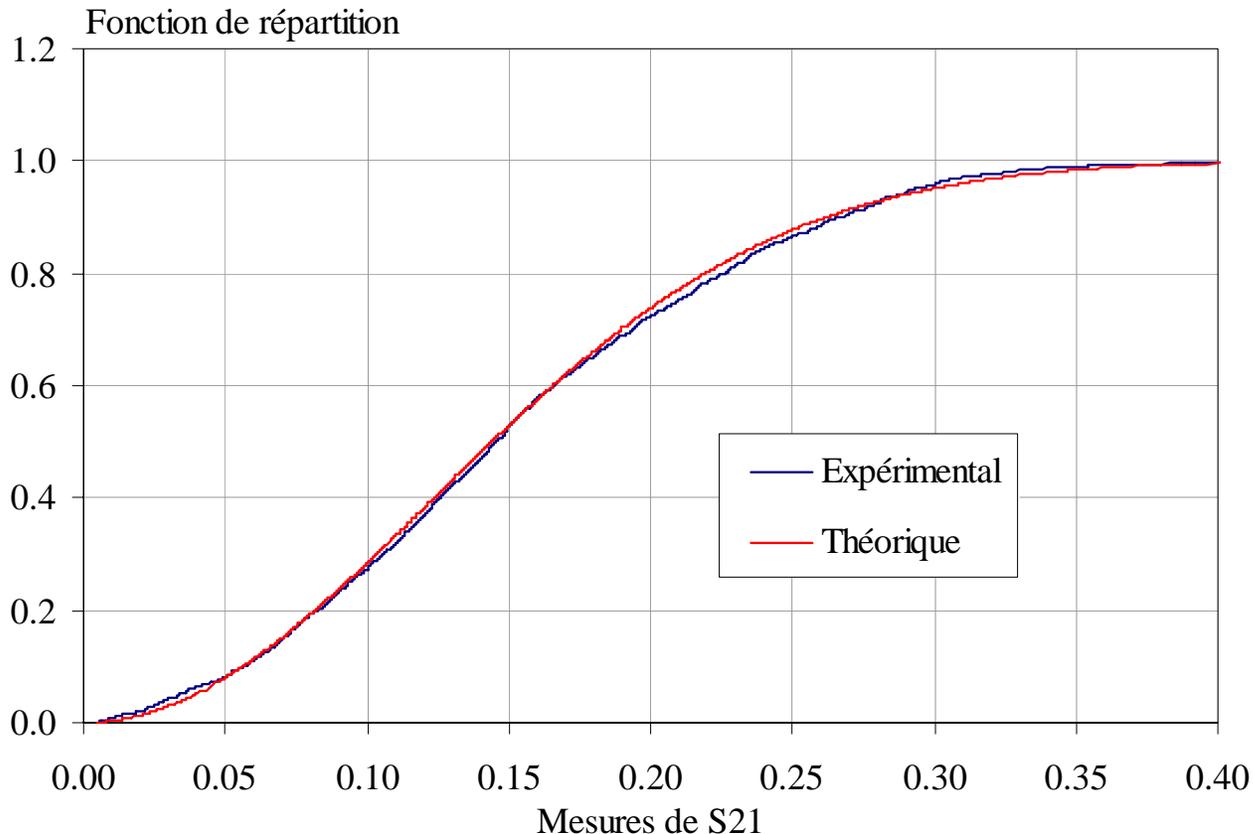
Alors, on peut montrer que la v.a.  $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$  suit une distribution de Rice de paramètres  $(\nu, \sigma)$

- ✦ A l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance on détermine  $(\nu, \sigma)$  :

$$\text{avec } N(\mu_z, \sigma_z) \text{ une distribution de la loi normale : } \hat{\mu}_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \quad \hat{\sigma}_z = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \mu_z)^2}$$

A l'aide de tests d'ajustement adaptés à la loi normale (KS ou AD), on vérifie que  $S_{21r}$  et  $S_{21i}$  sont distribués selon les lois normales respectives  $N(\nu \cos \alpha, \sigma)$  et  $N(\nu \sin \alpha, \sigma)$

- Exemple de distribution de Rice obtenue en CRBM et validée par les tests d'ajustement :



Paramètres de la loi de Rice  
estimés théoriquement :

$$\begin{cases} \hat{\nu} = 0,03 \\ \hat{\sigma} = 0,15 \end{cases}$$

Fréquence d'excitation :  
700 MHz

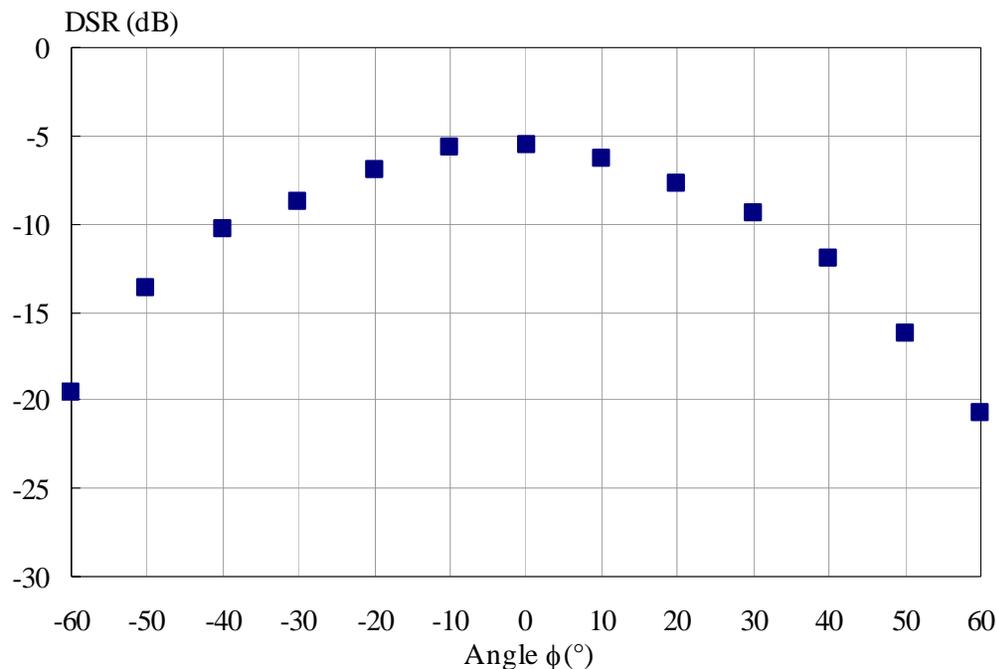
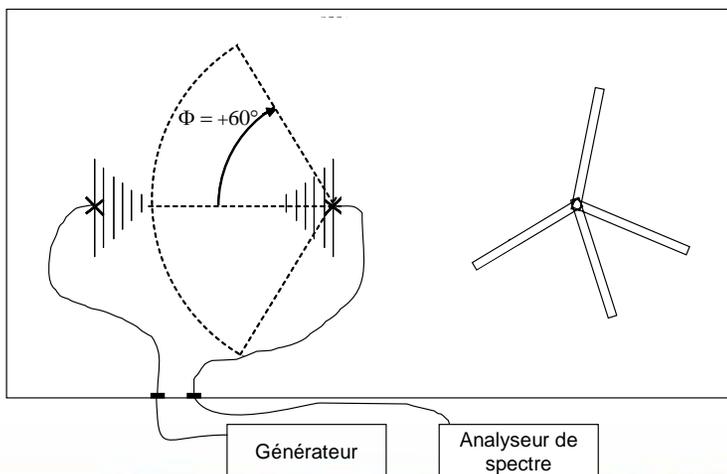
**Brassage mécanique :**  
30 positions de brasseur  
indépendantes



**Brassage électronique :**  
50 fréquences indépendantes  
dans  $\Delta f = 20$  MHz

**Avantage :** la loi de Rice est déterminée à partir d'outils statistiques. Son estimation est plus précise que par un ajustement visuel de la distribution théorique à la distribution expérimentale.

## Variation du DSR (Direct-to-Scattered Ratio)



$$DSR = 20 \log \left( \frac{V}{\sigma} \right) \quad [\text{dB}]$$

Trajet direct

Réflexions multiples

- La chambre réverbérante à brassage de modes permet de simuler différents scénarios de canaux de propagation
- C'est la diversité des champs créés par les différentes positions du brasseur qui engendre un champ statistiquement homogène et isotrope sur une rotation complète du brasseur
- L'estimation de la loi de distribution sous-jacente des mesures n'est pertinente que si l'on analyse une série d'échantillons non corrélés

$$N'_{AR(1)} = N \times \frac{1 - \Phi_{11}}{1 + \Phi_{11}} \times \left( \frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2 \times \left( \frac{\mu_y}{\sigma_y} \right)^2$$

$$N'_{AR(2)} = N \times \frac{1 - \Phi_{21} - \Phi_{22}}{1 + \Phi_{21} - \Phi_{22}} \times \left( \frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2 \times \left( \frac{\mu_y}{\sigma_y} \right)^2$$

- Simulation de canaux NLOS : Rayleigh, exponentielle, Weibull
  - ➔ Existence de tests d'ajustement adaptés
- Simulation de canaux LOS : Rice
  - ➔ Utilisation de tests d'ajustement sur les parties réelles et imaginaires de  $S_{21}$