

Mesures cohérentes de susceptibilité d'un système en champ déterministe et en champ aléatoire

E. Amador, C. Miry

emmanuel.amador@edf.fr

EDF lab
Centre R&D des Renardières
Moret sur Loing



Sommaire

Contexte et motivations

Éléments de théorie

Rayonnement d'un système quelconque

Mesure statistique de l'immunité d'un système

Mode opératoire

Objet sous test

Simulation du rayonnement de l'objet

Mesures d'immunité

En chambre anéchoïque

En chambre réverbérante

Résultats

Conclusion

Contexte

Nous souhaitons transférer les essais réalisés depuis plus de 20 ans en chambre anéchoïque (CA) vers des essais en chambre réverbérante (CRBM).

- La fréquence maximale d'utilisation de la CA ne permet pas de couvrir tous les besoins,
- les mesures en CA sont longues,
- l'incertitude de mesure en CA est mal connue.

Motivations

La CRBM permet :

- des mesures entièrement automatisées,
- des mesures plus contraignantes (plus de chemins de couplages sont testés),
- une maîtrise de l'incertitude de mesure.

Problématique

Les mesures permettent la qualification d'un système pour son usage dans les sites de production d'EDF :

- les protocoles de mesure "maison" utilisant la CA doivent être adaptés à la CRBM,
- on doit assurer la continuité des résultats.

Problème

Les marges d'erreur et les quantités mesurées dans les normes IEC 61000-4-21 et 61000-4-22, empêchent toute inter-comparaison pertinente des mesures.

Solution

- En CRBM, le champ électrique rayonné est une quantité aléatoire dont les propriétés statistiques sont connues.
- En CA, le champ rayonné entre l'antenne d'émission et l'objet sous test (OST) est une quantité déterministe.

Solution ?

Si le diagramme de susceptibilité d'un système est aléatoire, l'essai en CA peut-il être considéré comme statistique ?

Pouvons nous utiliser une approche commune pour la mesure en CRBM et en CA ?

Statistique du champ rayonné d'un système quelconque

- Nous cherchons à caractériser le champ lointain rayonné par un objet complexe,
- une sphère de rayon a dotée de dipôles de Hertz quelconques placés aléatoirement à sa surface, simule un OST arbitraire [1],
- le nombre de dipôles n et la taille électrique $ka = \frac{2\pi}{\lambda}a$ sont les paramètres de l'OST,
- on génère un grand nombre d'OST afin d'extraire la statistique du champ rayonné par des objets sous test.

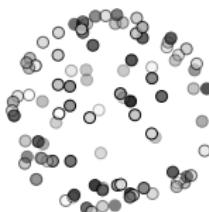
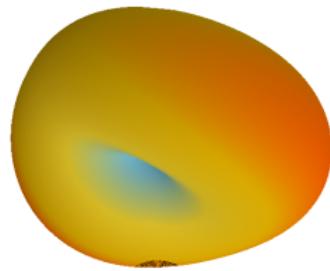


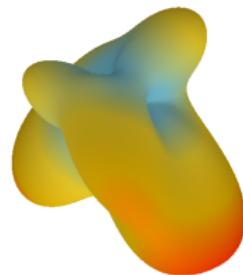
Figure: Un OST quelconque

Rayonnement d'un objet $a = 1$ m et $n = 100$ dipôles

$f = 20.0$ MHz, $ka = 0.4$, $D \approx 1.6$



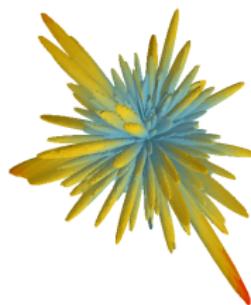
$f = 100.0$ MHz, $ka = 2.1$, $D \approx 2.3$



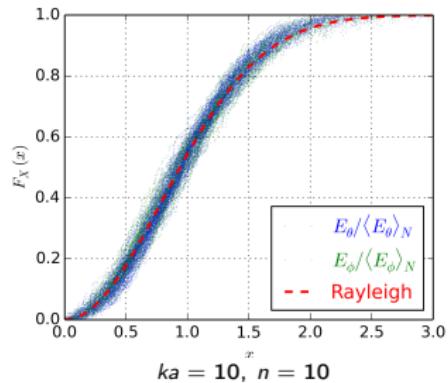
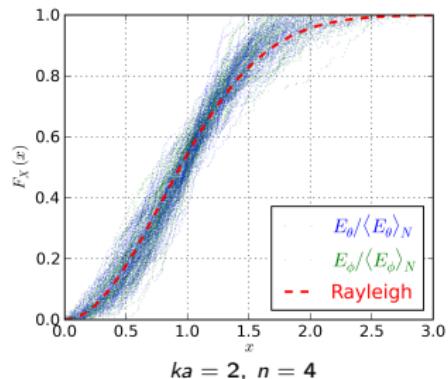
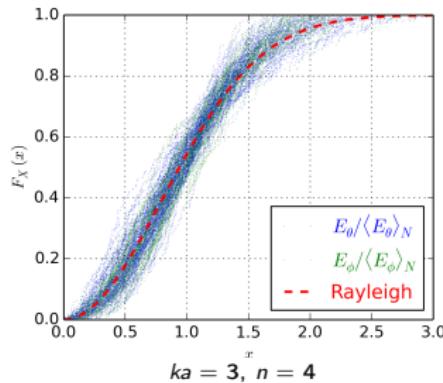
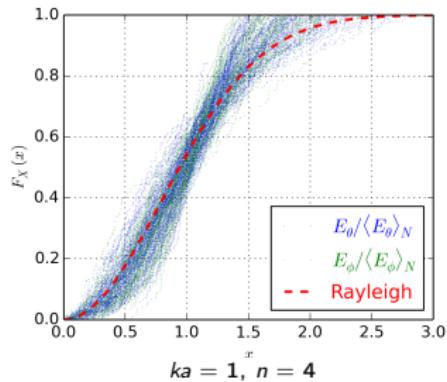
$f = 500.0$ MHz, $ka = 10.5$, $D \approx 5.2$



$f = 1000.0$ MHz, $ka = 21.0$, $D \approx 5.7$



Statistique du rayonnement d'objets quelconques



Les composantes de champ suivent-elles une distribution de Rayleigh ?

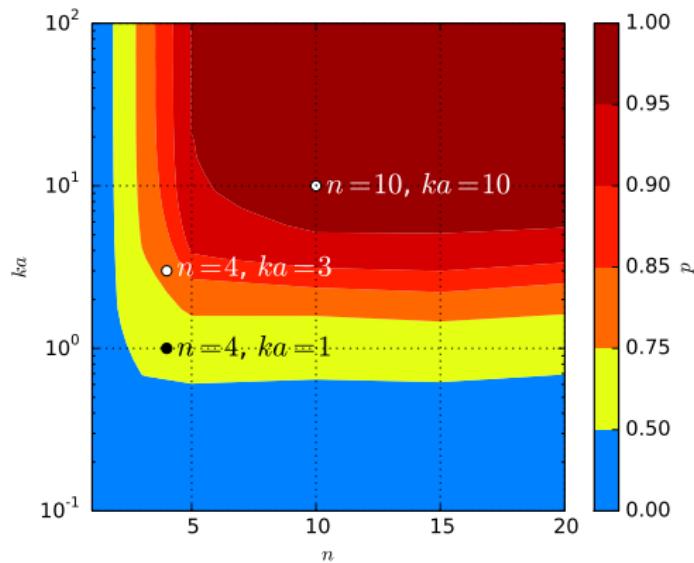


Figure: Probabilité d'observer une loi de Rayleigh, d'après le test d'Anderson-Darling sur 10^5 tirages de Monte Carlo.

Mesure statistique de l'immunité d'un système

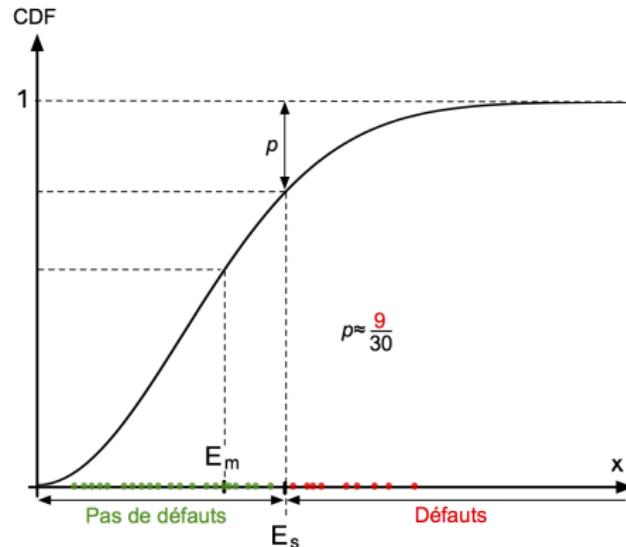


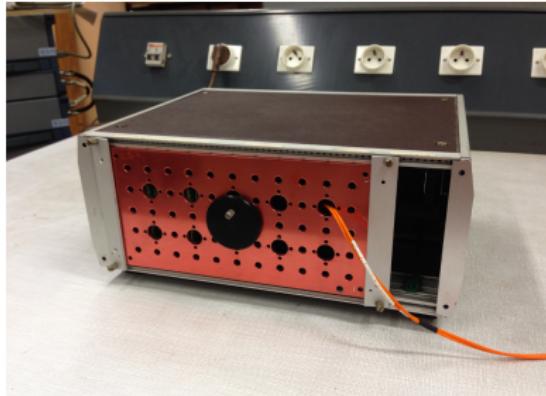
Figure: Mesure statistique de la susceptibilité E_s [2] d'un OST sous un champ dont les composantes suivent une loi de Rayleigh de moyenne E_m .

$$E_s = 2E_m \sqrt{\frac{\ln(1/p)}{\pi}} \left[\approx 2E_m \sqrt{\frac{\ln(30/9)}{\pi}} \approx 1.2E_m \right]$$

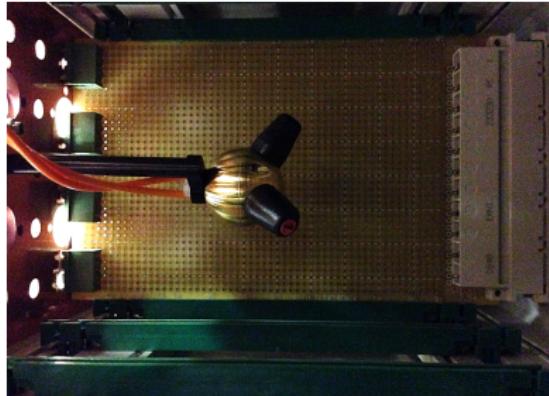
Équipements sous test typiques

- Les mesures en immunité concernent souvent des équipements de grandes dimensions électriques placés dans des armoires électriques,
- l'absence de plan de masse sur les cartes électroniques et les mises à la terre vieillissantes des armoires rendent ces équipements particulièrement vulnérables aux ondes radio (téléphonie sans fil, WiFi...).

Mise au point d'un objet sous test générique



(a)



(b)

Figure: Vues extérieure (a) et intérieure (b) de l'objet sous test générique.

“Si le champ de la composante z dépasse 10 V/m, on considère un défaut de l'OST.”

Simulation du rayonnement de l'objet

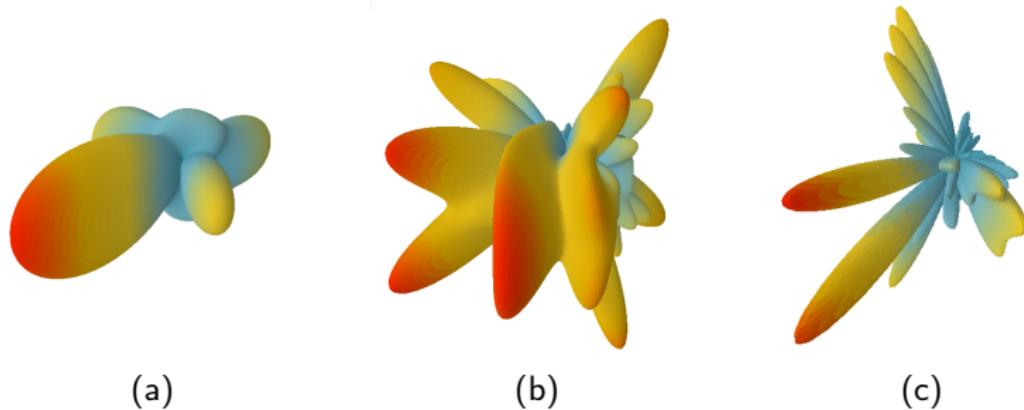


Figure: Diagrammes de susceptibilité simulés dans CST de l'OST à 800 MHz (a), 2 GHz (b) et 4 GHz (c).

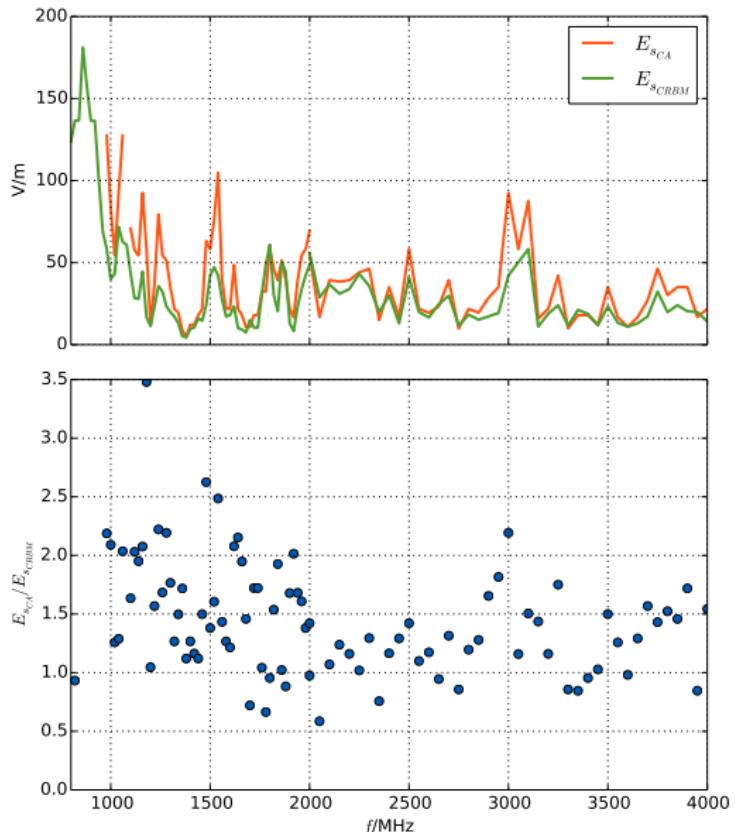
Mode opératoire en chambre anéchoïque

- Mesure réalisée entre 800 MHz et 4 GHz (la fréquence maximale théorique de la CA est de 2 GHz),
- pour garantir une homogénéité du champ maximale, l'étalonnage de la chambre se fait pour toutes les fréquences testées,
- on tire aléatoirement n angles d'incidence et une polarisation (verticale ou horizontale), dans l'un des trois plans orthogonaux coupant l'OST,
- un champ de consigne E_m est appliqué à l'OST (5, 10, 20, 40, 80 V/m).

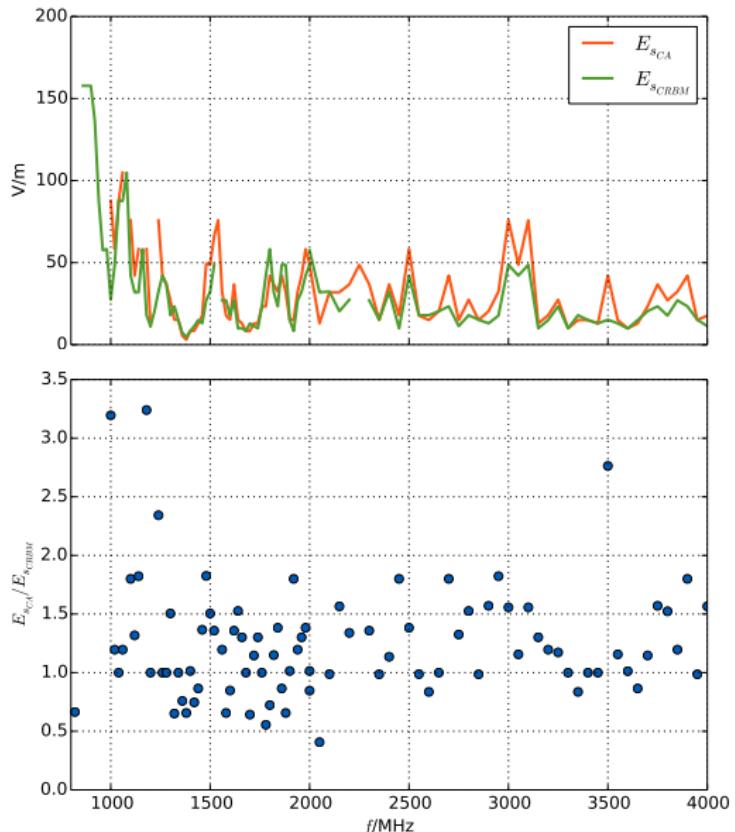
Mode opératoire en chambre réverbérante

- Mesure réalisée entre 800 MHz et 4 GHz,
- le facteur de qualité est mesuré pour chaque fréquence testée afin d'améliorer l'incertitude des mesures,
- on réalise la mesure en n positions de brasseur,
- les valeurs moyennes d'une composante cartésienne du champ électrique E_m sont appliquées successivement à l'OST (5, 10, 20, 40, 80 V/m).

Résultats pour $n = 30$ observations



Résultats pour $n = 10$ observations



Conclusion

- La méthode de mesure de susceptibilité développée pour la CRBM [2] peut s'appliquer à la CA et permet d'obtenir des mesures cohérentes :
 - à condition de disposer d'un OST suffisamment grand et "complexe",
 - en réalisant un étalonnage des moyens d'essais plus précis que ce que préconisent les normes 61000-4-21/22.
- avec cette approche plus robuste des mesures, nous pouvons réaliser des essais au delà de la fréquence maximale théorique de la CA,
- ces mesures peuvent être intégrées facilement à un essai normatif à condition de ne pas s'arrêter au premier défaut constaté pour estimer une probabilité de défaut.

Perspectives

- Cette méthode de mesure est utilisée en CA et CRBM afin d'obtenir des mesures concordantes sur les mêmes OST,
- en donnant une dimension statistique aux mesures en CA, on est en capable de réduire les incertitudes de mesure et de mesurer des dérives légères de l'immunité d'un système, on pense appliquer cette approche pour mesurer l'effet du vieillissement d'un composant sur ses propriétés électromagnétiques.

- [1] P. Wilson, D. Hill, and C. Holloway, "On determining the maximum emissions from electrically large sources," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 44, pp. 79 – 86, feb 2002.
- [2] E. Amador, H. Krauthäuser, and P. Besnier, "A binomial model for radiated immunity measurements," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 55, pp. 683–691, Aug. 2013.

- Mesures réalisées avec Python et PyVisa, simulations de Monte Carlo réalisées avec Python/Numpy et Julia :



- Cette présentation, les données et les codes numériques sont disponibles à cette adresse :

<https://github.com/manuamador>

Incertitude de l'estimation

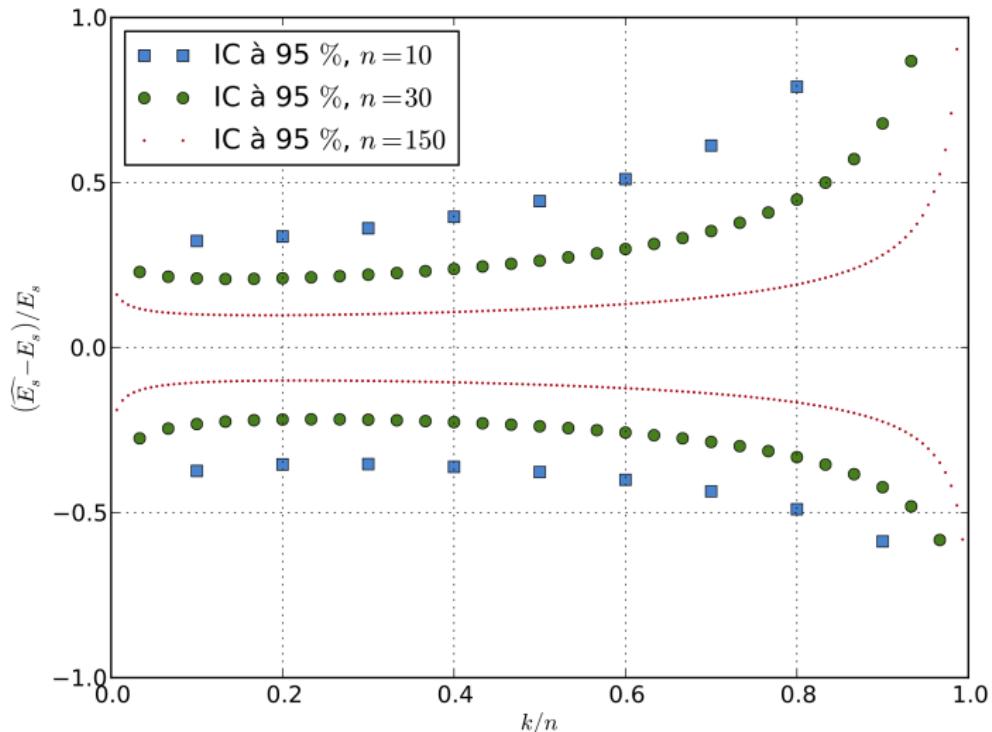


Figure: Intervalles de confiance à 95% pour $n = 10, 30$ et 150 observations.