

# Statistique de l'efficacité de blindage de matériaux composites pour la 5G: méthodes avancées d'échantillonnage

*Sébastien Lalléchère<sup>1</sup>, Sébastien Girard<sup>1</sup>, Jérôme Rossignol<sup>2</sup>, Didier Stuergera<sup>2</sup>, and Gilles Clément<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Université Clermont Auvergne, Institut Pascal, SIGMA Clermont, CNRS UMR 6602, sebastien.lallechere@uca.fr*

<sup>2</sup> *Université de Bourgogne, ICB, Equipe GERM, jerome.rossignal@u-bourgogne.fr*

<sup>3</sup> *Tresse Industrie, Texprotec, g.clement@tresse.com*

**Mots-clés :** blindage électromagnétique, méthode d'homogénéisation, statistique, matériaux composites, fibres de carbone

## Résumé :

Cette proposition présente une méthodologie pour l'estimation statistique du niveau de protection offert par des matériaux composites constitués par des fibres de carbone sur une large gamme de fréquences contenant la bande 5G. La variabilité géométrique des nanostructures de carbone (essentiellement en termes de formes et de dimensions) impose, dans un premier temps, une caractérisation fréquentielle précise de la distribution statistique des propriétés diélectriques des matériaux. La propagation, dans un second temps, des incertitudes précédentes au niveau de l'efficacité de blindage des matériaux apporte des contraintes particulières quand aux méthodes statistiques à mettre en œuvre. Ainsi, cette contribution vise à démontrer l'apport de méthodes de "clustering" pour réduire la complexité de problèmes impliquant un nombre important de paramètres aléatoires corrélés. L'estimation des niveaux de protection électromagnétique de matériaux composites pour des fréquences 5G sub-6GHz permettra de valider l'approche proposée.

## 1 Introduction

Le futur déploiement des systèmes de communication de cinquième génération (5G) et la part croissante prise par les objets communicants (internet des objets, IoT en anglais) complexifient l'analyse de la compatibilité électromagnétique (CEM) des systèmes électroniques. En effet, les modifications imposées sur la nature des sources de rayonnement électromagnétique (types, niveaux, usages), les chemins de couplages et les victimes potentielles des perturbations nécessitent une analyse fine de la CEM de ces systèmes [1]. Dans le cadre de la protection des victimes, l'utilisation de fibres et de nanotubes de carbones (CNT en anglais) pour les matériaux composites a connu un intérêt croissant ces quinze dernières années [2]. Ainsi, les travaux initiés dans [3] ont permis de montrer l'importance d'une caractérisation multi-échelles et multi-physiques pour des applications de blindage électromagnétique large bande.

## 2 Problème considéré

Dans cette contribution, on s'intéresse à la réalisation d'un mélange entre des fibres de carbone et une matrice en PMMA (Polyméthacrylate de méthyle, basé sur un modèle de Debye). Pour les besoins de la démonstration, le choix des matrices (PMMA) et inclusions (fibres de carbone) se base sur le cas déterministe explicité dans [2]. L'étude récente des propriétés pour une application en protection des systèmes électroniques fait apparaître des composites différents et l'utilisation de PET (Polytéréphtalate d'éthylène) et de CNTs [3], plus en phase avec les propriétés d'usage (niveau matériau) pour la réalisation de tresses de protection EM [4]. Dans la suite, on supposera que les fibres de carbone présentent des dimensions micrométriques avec une forme générique cylindrique. On considère dans la suite que les mélanges réalisés incluent une part d'incertitudes quant à la répartition des classes de fibres aux dimensions variables (longueur  $L$  et diamètres  $2*R$ ), et le niveau d'incertitude des longueurs/diamètres de fibres (voir la Fig. 1).

### 2.1 Méthodologie

La méthodologie suivie dans cette étude est synthétisée suivant les quatre étapes représentées dans les figures 1 et 2 :

- Étape A : génération de collections d'échantillons (plusieurs milliers, dizaines de milliers :  $n_{mc}$ ) comprenant des classes de fibres de carbone dont les paramètres sont définis aléatoirement (voir Fig. 1). La Fig. 3(1)

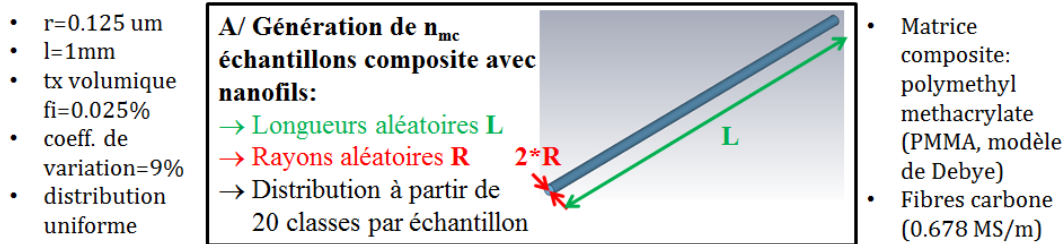


Figure 1 – Méthodologie : description de la génération des échantillons composites (étape A).

donne une représentation d'un échantillon de matériau composite contenant quatre classes de fibres aux longueurs et diamètres aléatoires dans les limites évoquées précédemment. L'effet sur la distribution de la permittivité complexe est illustrée dans la Fig. 3(2) avec les parties réelle [A] et imaginaire [B].

- Étape B : évaluation des propriétés diélectriques des composites selon [2].
- Étape C : définition des plans d'expériences classiques (étape C1 dans la Fig. 2 ; choix aléatoires de  $n_{boot}$  réalisations parmi les  $n_{mc}$  de la population initiale (étape A)) ou optimums (étape C2 dans la Fig. 2 ; SROM,  $n_{srom}$ ).
- Étape D : Post-traitement final (estimation de l'efficacité de blindage du matériau soumis à une onde plane en incidence normale : moyenne et écart-type).

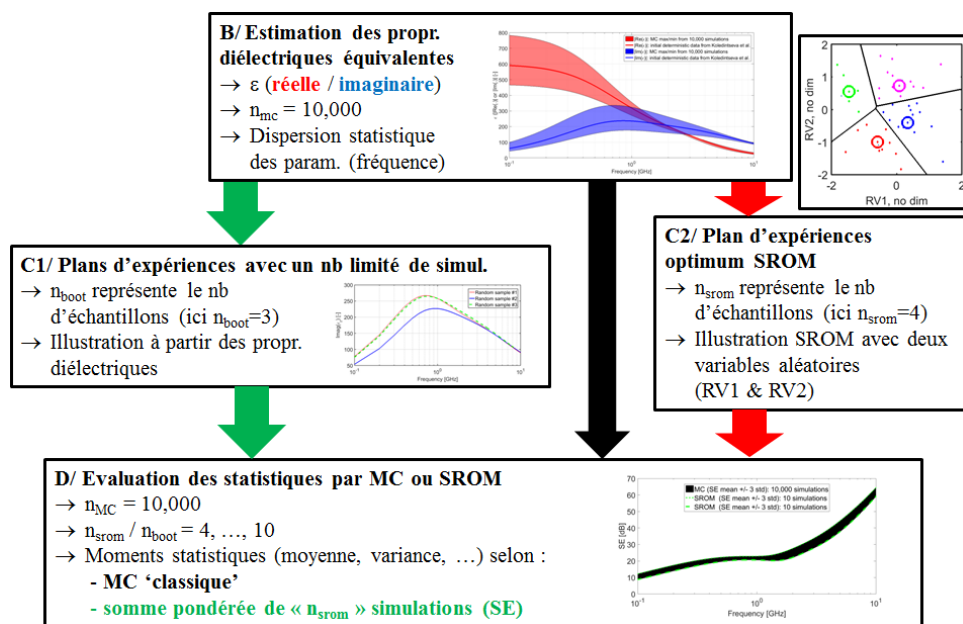


Figure 2 – Méthodologie : choix des échantillons et post-traitements (étapes B-D).

Comme évoqué précédemment, on constate que les différentes contraintes aléatoires (taille des fibres de carbone, définition de classes de fibres de tailles différentes pour un même échantillon) entraînent des variations importantes des propriétés diélectriques du matériau en fonction de la fréquence (voir Fig. 3(2)). On constate ainsi, pour trois fréquences distinctes (à savoir  $f_1 = 100\text{MHz}$ ,  $f_2 = 1\text{GHz}$ , et  $f_3 = 2.5\text{GHz}$ , données non représentées ici) une distribution des parties réelles et imaginaires de la permittivité diélectrique très variable incluant des distributions de type Weibul, normale, et/ou log-normale. Ceci impose, a priori, de traiter ce problème de quantification d'incertitudes selon deux stratégies bien distinctes :

- Fréquence par fréquence : il faut pour cela traiter l'identification des paramètres des lois de distribution de la permittivité complexe (parties réelle et imaginaire) pour chaque fréquence ; des stratégies peuvent alors être mises en œuvre incluant ou non le recours à Monte-Carlo. Cette méthodologie est bien adaptée si le calcul des propriétés de protection CEM (shielding effectiveness en anglais) inclut un code fréquentiel.
- En tenant compte de l'ensemble des données fréquentielles. Dans ce cas, l'utilisation de codes de calculs temporels est envisageable en intégrant la dépendance concernant les propriétés diélectriques du matériau

d'une fréquence à une autre. C'est cette méthodologie qui est privilégiée en s'appuyant sur la technique SROM (voir dans la suite).

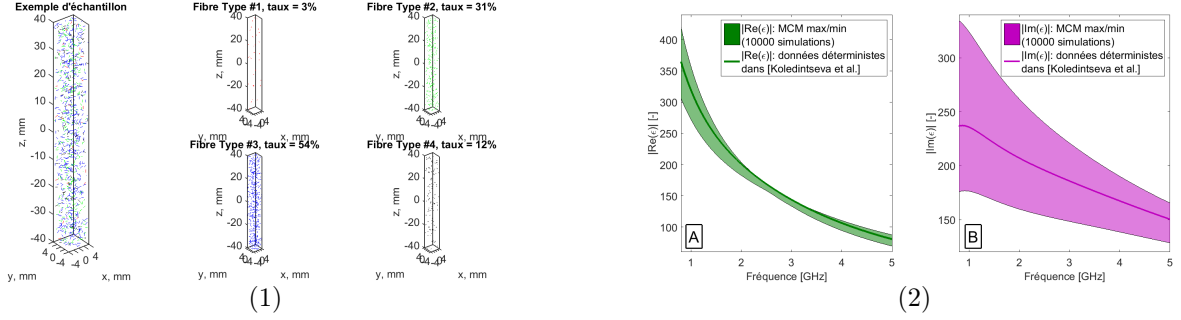


Figure 3 – (1) Distribution aléatoire des fibres dans l'échantillon composite. (2) Distribution de la permittivité complexe du matériau composite : parties réelle [A] et imaginaire [B].

## 2.2 Méthode d'échantillonnage : technique SROM

Les constatations précédentes (Fig. 3) justifient l'intérêt de proposer une stratégie alternative à la méthode Monte-Carlo (MC) permettant de tenir compte naturellement de paramètres aléatoires sur une large gamme de fréquences (les distributions évoluant en fonction de la fréquence). La méthode retenue est basée sur l'approche SROM (stochastic reduced order method) d'échantillonnage avancé (voir son utilisation dans le domaine des mathématiques appliquées dans [5]) et permet de sélectionner le plan d'expérience optimal pour un nombre de simulations réduit (10 maximum ici).

La méthodologie développée autorise un choix automatisé de l'ensemble de données  $(\hat{x}_i, w_i)$  avec  $i = 1, \dots, n_{srom}$ ,  $\hat{x}_i$  le numéro d'échantillon à partir de l'ensemble initial de taille  $n_{mc}$ . Le choix est basé en considérant chaque valeur des parties réelle et imaginaire de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence comme une variable aléatoire à part entière (ici 202 variables, 101 fréquences étant discrétisées entre 100MHz et 5GHz). Au final, on calcule la valeur moyenne de la grandeur d'intérêt (à savoir l'efficacité de blindage EM, notée  $S$  ici) selon :

$$\langle S(f) \rangle = \sum_{i=1}^{n_{srom}} w_i S_{\hat{x}_i}(f), \quad (1)$$

où  $\langle S(f) \rangle$  est la donnée moyenne de l'efficacité de blindage à la fréquence  $f$ , et  $S_{\hat{x}_i}(f)$  représente l'efficacité de blindage calculée à partir de la simulation avec le composite numéro  $\hat{x}_i$  (généré lors de l'étape A du processus, voir Fig. 1).

L'évaluation de la variance de l'efficacité de blindage fait intervenir les paires pondérées SROM  $(\hat{x}_i, w_i)$  comme dans le cas de la relation (1) :

$$\text{var}(S(f)) = \sum_{i=1}^{n_{srom}} w_i (S_{\hat{x}_i}(f) - \langle S(f) \rangle)^2. \quad (2)$$

## 3 Résultats numériques

Afin d'estimer la qualité des résultats fournis par SROM, on propose de réaliser deux types de traitements :

- une sélection aléatoire d'un nombre réduit ( $n_{boot} = 10$ ) d'échantillons générés initialement (i.e. parmi  $n_{mc} = 10000$ ) avec une répétition du choix des échantillons (voir l'étape C1 dans Fig. 2),
- la sélection des  $n_{srom} = 10$  échantillons les plus représentatifs de la population initiale ( $n_{mc} = 10000$ ).

Le calcul qui en découle de l'efficacité de blindage permet d'estimer l'erreur relative par rapport à la moyenne et à l'écart-type obtenu par MC (respectivement suivant les relations 1 et 2).

La Fig. 4 donne une vue de l'estimation des moyennes [C] et écart-types [A-C] obtenus par MC et SROM. On constate le très bon accord entre la méthode SROM et les données MC (même pour l'estimation de l'écart-type). On notera également que l'erreur relative de la méthode SROM est trente fois plus faible que celle obtenue en choisissant au hasard un même nombre de réalisations dans la population initiale MC (voir Fig. 4[B]).

Enfin, la comparaison des données issues de MC (gabarit impliquant moyenne  $\pm 3$  écart-types de l'efficacité de blindage) souligne la qualité des résultats SROM.

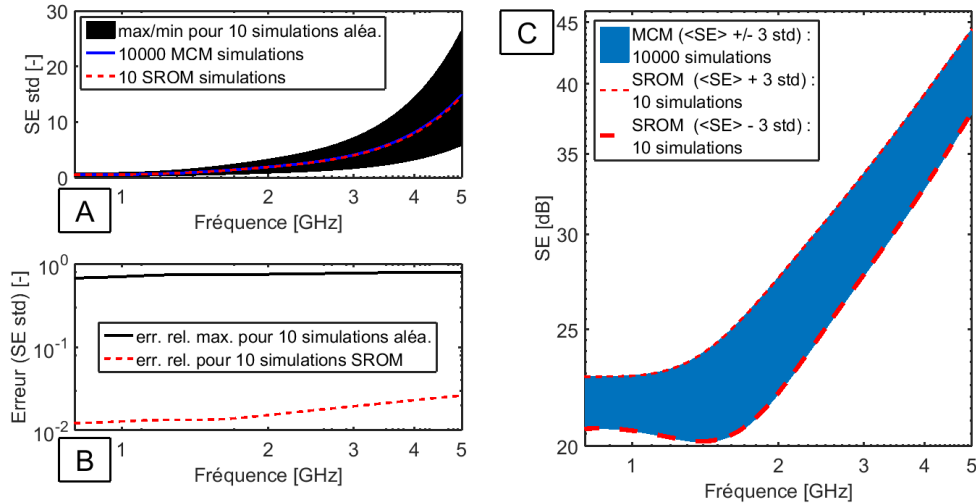


Figure 4 – [A] Ecart-type (std) SE par MC (référence et tirages aléatoires de 10 simulations, respectivement en bleu et noir) et SROM (rouge). [B] Erreur par tirage aléatoire de 10 simulations (noir) et SROM (rouge). [C] Évaluation statistique (moyenne  $\pm$  3 écart-types) de l’efficacité de blindage (SE) du matériau composite par MC (10000 simulations en bleu) et par SROM (10 simulations en rouge, traits discontinus).

## 4 Conclusion

Cette contribution a permis de détailler l’utilisation de la méthode SROM dans le contexte de la caractérisation des niveaux de protection induits par des matériaux composites jusqu’à 5GHz. La quantification des incertitudes liées à des aléas géométriques (tailles des fibres de carbone) a été réalisée sur une gamme de fréquence allant de 100MHz à 5GHz. La diversité des distributions statistiques caractérisant la permittivité diélectrique équivalente des échantillons composite a été prise en compte naturellement à travers la méthode SROM. La capacité naturelle de la méthode à intégrer la dépendance entre les variables aléatoires offre des perspectives intéressantes pour la simulation de ces matériaux dans des codes de calculs temporels permettant conjointement d’accéder à des résultats sur une large gamme de fréquences avec un degré de réalisme appréciable comparativement à des simulations Monte-Carlo. Le gain en temps de calcul (facteur 1000 ici) et l’estimation de l’erreur relative (1 à 3% pour l’estimation de la variance) produits par l’utilisation des plans d’expériences SROM offre des perspectives très intéressantes pour l’intégration de ces modèles dans des simulations “Full-wave”.

## 5 References

- [1] J. Vikstedt, The 5G New Radio - Implications for EMC and Antenna Testing, in proc. 2018 IEEE Symposium on EMC, SI & PI, Aug. 2018
- [2] M. Koledintseva, Engineering of composite media for shields at microwave frequencies, in proc. IEEE Int. Conf. on EMC, 2005
- [3] M. Michel, Élaboration d’un fil nanocomposite PET – nanotubes de carbone pour le blindage électromagnétique. Suivi de la microstructure induite par le procédé d’étirage et caractérisations des basses fréquences aux hyperfréquences (in French), PhD Thesis, Université de Bourgogne, Dijon, France, Oct. 2019
- [4] P. Omerin, G. Omerin, G. Clément, Gaine de blindage électromagnétique, à diamètre extensible (in French), Patent EP1348247B1, European Patent, 2009.
- [5] M. Grigoriu, Reduced order models for random functions. Application to stochastic problems, Appl. Math. Model., 2009