

SUSCEPTIBILITE ELECTROMAGNETIQUE D'UN DEPLOIEMENT COMPLEXE DE STRUCTURES

J. Geiswiller², E. Kerhervé¹, W. Tabbara³, B. Pecqueux¹, M. Hélier⁴, J-C Joly¹,
D. Lecointe³, J. P. Vannel⁵, N. Rouvrais⁵, D. Asfaux², Y. Béniguel²

¹Centre d'Etudes de Gramat, DGA/DCE/CEG, 46500 Gramat, France

²IEEA, 2, avenue Georges Pompidou, 46500 Gramat, France

³Supélec, Plateau de Moulon, 91192 Gif/Yvette, France

⁴LISIF, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France

⁵GERAC, B.P. 19, Longayrie, 46500, Gramat, France

1. Introduction

L'étude d'un déploiement de structures, illuminé par une impulsion électromagnétique, présente 2 difficultés: l'une consiste en la perte d'interprétation physique des signaux observés dans le domaine temporel et fréquentiel, du fait du grand nombre de structures présentant des états différents d'étanchéité, toutes connectées entre-elles *via* des réseaux de fils de longueurs différentes; la seconde difficulté se chiffre en terme de temps et de puissance de calcul nécessaire à la réalisation d'une analyse statistique de l'influence des divers paramètres internes du système.

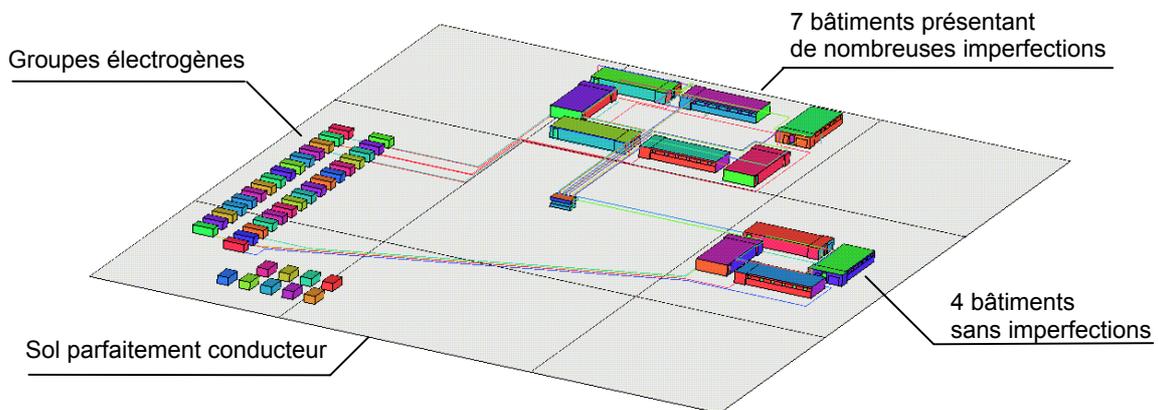


Figure 1 : Déploiement de 11 bâtiments non-faradisés interconnectés par 2 réseaux filaires (informatique et communication). Chaque bâtiment est relié à son groupe électrogène.

Nous présentons ici la méthodologie employée pour l'analyse statistique de systèmes complexes et l'illustrons par l'étude d'un déploiement de bâtiments non-faradisés, comme celui présenté sur la figure 1. La simulation du problème électromagnétique est réalisée par un code numérique utilisant la méthode de Différences Finies dans le Domaine Temporel (D.F.D.T.). Le déploiement s'étend sur un rayon de 150 m. Il est agressé par une onde électromagnétique dans la bande de fréquences [500 kHz, 30 MHz], dont la plus courte longueur d'onde λ_{\min} vaut quelques longueurs d'un bâtiment et la plus longue, quelques dizaines de fois λ_{\min} .

2. Méthodologie

La méthode d'étude de systèmes complexes utilisée ici a consisté à réaliser un plan d'expériences qui tend à minimiser les temps de calcul informatiques en réduisant le nombre n des composantes du vecteur des facteurs externes au système. On note $\mathbf{F}=(\mathbf{f}^1, \dots, \mathbf{f}^n)$ ce vecteur des facteurs, où \mathbf{f}^i sont ses composantes qui, dans le cas présent, sont tous les triplets de valeurs angulaires $\{\theta, \phi, \varphi\}$, respectivement l'azimut, la polarisation et l'élévation de l'onde électromagnétique qui agresse le déploiement.

Les observables du système sont définies comme les valeurs scalaires représentatives du niveau de couplage du système ou de ses sous-systèmes avec l'onde électromagnétique. Les valeurs maximales des modules des champs E et H , des courants I , ainsi que leurs valeurs à des fréquences particulières sont communément exploitées pour les structures réelles. Néanmoins, l'étude de cas singuliers (sous-système simplifié) constitue une bonne approche pour définir les observables pertinentes [1]. Ces cas simples permettent entre autre une bonne interprétation physique des signaux temporels et fréquentiels. Le vecteur des observables du système est noté $\mathbf{y}(\mathbf{F})$.

3. Le krigeage: estimateur et prédicteur

De précédentes études ont montré que l'approche prédictive du krigeage est bien adaptée au couplage onde/structure lorsque le nombre de paramètres variables internes (complexité) et externes du système est grand [2]. Le krigeage est utilisé comme méthode d'interpolation des observables y du système par combinaison linéaire des observables déjà calculées, $y(\mathbf{f}^i)$, à laquelle est ajoutée une partie aléatoire. Avec quelques hypothèses relatives au degré de corrélation des observables entre-elles [2, 3], il est possible :

- de prédire les valeurs des observables pour n'importe quel vecteur de facteurs, \mathbf{f}_0 ; on note $y^*(\mathbf{f}_0)$ cette prédiction;
- d'estimer l'erreur quadratique moyenne $\sigma_{y^*}^2$ entre $y^*(\mathbf{f}_0)$ estimé et $y(\mathbf{f}_0)$ calculé *a posteriori*.

Prédiction et estimation de l'erreur conduisent naturellement à l'interpolation des observables, lorsque $\sigma_{y^*}^2 < \varepsilon$, où ε est la précision définie arbitrairement par l'utilisateur. Chaque nouveau cas de calcul enrichit la base de données et améliore la précision de l'estimation.

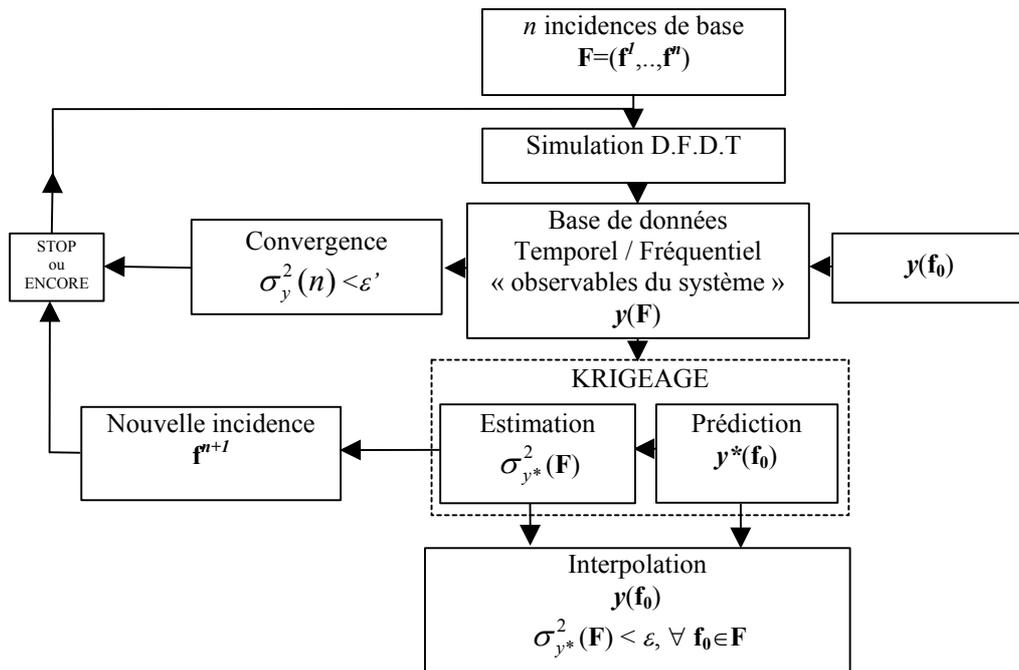


Figure 2 : Méthodologie d'étude paramétrique de systèmes par l'approche du krigeage.

Le plan d'expériences schématisé sur la figure 2 utilise deux critères pour minimiser le nombre M de cas de calcul nécessaires à la réalisation d'une étude statistique fiable :

1. Le premier consiste à calculer, après chaque cas de calcul, la variance σ_y^2 de l'observable $y(\mathbf{f}^i)$, moyennée sur l'ensemble des vecteurs de facteurs appartenant à \mathbf{F} et d'étudier son évolution avec M .

$$\text{Si } \langle y \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y(\mathbf{f}^i) \text{ et } \sigma_y^2(M) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [y - \langle y \rangle]^2 \text{ alors, la convergence de } \sigma_y^2 \text{ vers 0 conduit au}$$

nombre minimum (mais suffisant) de cas de calcul qui vaut alors M_{\min} , tel que $\sigma_y^2(M_{\min}) < \varepsilon'$, où ε' est fixé arbitrairement par l'utilisateur. Cet estimateur a pour avantage de faire abstraction de la fonction de distribution de l'observable.

2. Le second critère se déduit du krigeage. L'estimateur $\sigma_{y^*}^2 < \varepsilon$ est alors utilisé comme précédemment. Outre la propriété de déterminer s'il faut ou non ajouter un cas de calcul supplémentaire, le krigeage prédit également les valeurs des composantes du vecteur \mathbf{f}^{n+1} qui minimiseront $\sigma_{y^*}^2$. En effet, \mathbf{f}^{n+1} est

choisi tel que l'erreur quadratique moyenne soit maximale pour ce vecteur de facteurs : $\sigma_{y^*}^2(\mathbf{f}^{n+1}) = \text{Max}[\sigma_{y^*}^2(\mathbf{F})]_{\mathbf{F}}$.

Cette méthodologie d'étude paramétrique de systèmes est tout à fait générale. Elle permet la réalisation rapide de la base de données minimale nécessaire à l'interpolation réaliste d'observables, pour peu que la base initiale des facteurs soit judicieusement choisie. Illustrons cette méthode par le cas du déploiement de la figure 1.

4. Etude d'un déploiement de structures

Cette approche méthodologique pour l'étude paramétrique de systèmes est appliquée ici à la prédiction de la susceptibilité électromagnétique de structures complexes, interconnectées et soumises à une impulsion électromagnétique. L'influence des paramètres tels que l'état d'étanchéité des bâtiments, les défauts de blindage des câbles et la présence d'antennes de grandes dimensions est analysée. Nous présentons des résultats relatifs au sous-système composé par 11 bâtiments non-faradisés [1]. L'accent est mis sur l'influence de la mise en réseau d'un bâtiment avec le reste du déploiement. Cette modélisation constitue la première étape dans la simulation complète d'un centre de commandement sur un théâtre d'opérations soumis à une agression réelle.

La base initiale des facteurs du plan d'expériences est constituée par M incidences $\{\theta_i, \phi_i, \varphi_i\}_{i=1, \dots, M}$ de l'agression, choisies de manière isotrope dans le $\frac{1}{2}$ espace des structures. Les observables y du système sont les courants crêtes à l'entrée des plaques collectrices, les valeurs maximales E_{\max} et H_{\max} des modules des champs et la moyenne spatiale \bar{E}_{\max} aux N points de mesure dans le bâtiment, *i.e.*

$$\bar{E}_{\max}(\theta, \phi, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{E}_{\max}(\theta, \phi, \varphi, x_i, y_i, z_i).$$

Le critère de convergence σ_y^2 appliqué à \bar{E}_{\max} s'écrit $\sigma_{\bar{E}_{\max}}^2(M) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M [\bar{E}_{\max}(\theta_j, \phi_j, \varphi_j) - \langle \bar{E}_{\max} \rangle]^2 < \varepsilon$,

avec $\langle \bar{E}_{\max} \rangle = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \bar{E}_{\max}(\theta_j, \phi_j, \varphi_j)$. Il est utilisé ici afin de minimiser le nombre de cas de calcul. La

figure 3 montre l'évolution de $\sigma_{\bar{E}_{\max}}$ autour de la moyenne $\langle \bar{E}_{\max} \rangle$ (normalisée à 0), en fonction du nombre d'incidences considérées. Le critère de convergence indique, sans qu'aucune hypothèse ne soit faite sur la fonction de distribution du champ dans le bâtiment, que 70 incidences, prises de manière isotrope permettent d'obtenir des valeurs réalistes du champ interne moyen. Il est désormais possible de réaliser une étude de vulnérabilité du système en fonction de l'incidence de l'onde, *i.e.* les fonctions de distribution des observables sont représentatives du niveau de couplage onde/structure.

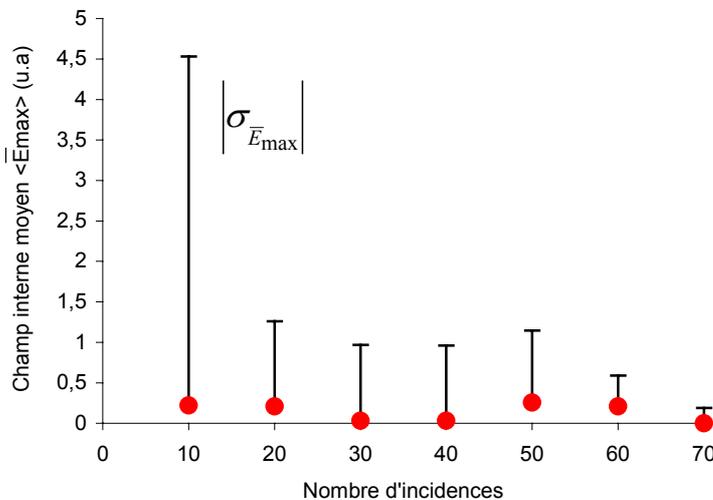


Figure 3 : Moyenne normalisée du champ E moyen dans un bâtiment du déploiement (en rouge) pour un nombre d'incidences variant entre 10 et 70. La valeur absolue de l'écart-type $|\sigma_{\bar{E}_{\max}}|$ autour de cette moyenne est représentée par les barres d'erreur.

La base de données électromagnétique du déploiement et l'interpolation par le krigeage permettent dorénavant la prédiction des formes temporelles des observables τ telles que les composantes des champs électromagnétiques et des courants, pour n'importe quelle incidence $\{\theta, \varphi\}$ de l'onde. L'influence de la polarisation de l'onde quant à elle, est déduite de celles calculées pour deux polarisations perpendiculaires $\phi_{//}$ et ϕ_{\perp} selon l'expression: $\tau(\{\theta, \phi_0, \varphi, t\}) = \tau(\{\theta, \phi_{//}, \varphi, t\}) \times \cos(\phi_{//}) + \tau(\{\theta, \phi_{\perp}, \varphi, t\}) \times \sin(\phi_{\perp})$. Ainsi toute observable se déduisant de τ peut être calculée par interpolation et non plus par un calcul coûteux en temps et en ressources numériques.

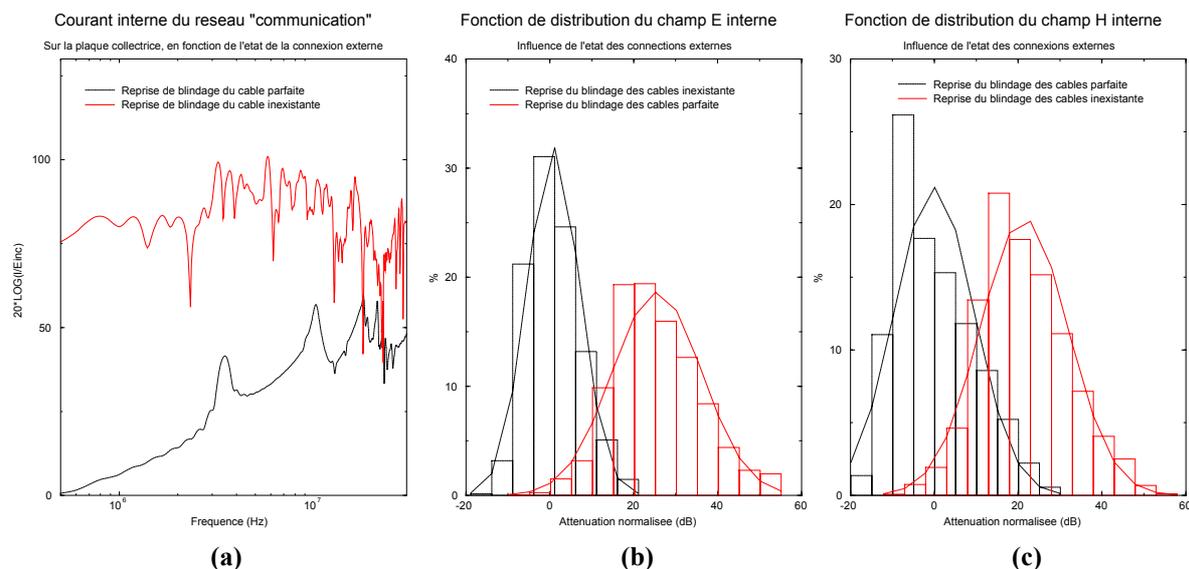


Figure 4 : Influence de la reprise du blindage des câbles à l'entrée de la plaque collectrice d'un bâtiment. Gabarit de courant en entrée de la plaque collectrice (a). Les fonctions de distribution des champs électrique (b) et magnétique (c) à l'intérieur d'un bâtiment non-faradisé indiquent une perte d'atténuation en champs de 25 dB lorsque la reprise de blindage des câbles externes est absente.

Les fonctions de distribution spatiales des champs internes (figures 4b et 4c) montrent qu'il existe un couplage direct de l'onde avec les bâtiments ainsi qu'un rayonnement important des câbles internes des réseaux énergie, communication et informatique. Lorsque la reprise de blindage des câbles à l'entrée des plaques collectrices du bâtiment est inexistante, les courants conduits à l'intérieur induisent un affaiblissement de l'atténuation (25 dB en moyenne) en champ E et H . La figure 4a montre que le gabarit en fréquence du courant sur un câble de communication est fortement influencé par la qualité de son blindage. Seul un éclateur haute tension dimensionné pour la forme fréquentielle du courant d'entrée calculée (figure 4a) permet de limiter les parasites induits.

5. Conclusion

L'étude de bâtiments interconnectés, soumis à une agression électromagnétique dans la bande de fréquences 500 kHz à 30 MHz, montre à l'évidence l'influence du réseau filaire réparti sur les 150 m du déploiement. Le système présenté ici est tout à fait représentatif des études de vulnérabilité par simulation numérique, nécessitant une approche statistique dans l'analyse de l'influence de paramètres internes au système, lorsque ceux-ci sont nombreux. L'utilisation d'un plan d'expériences est requise dans ces cas-là. L'apport du krigeage dans les plans d'expérience est judicieuse car il contribue à minimiser le nombre de cas d'analyse nécessaires à une interprétation statistique des données, tout en donnant une estimation de l'erreur engendrée. D'autre part, le krigeage permet une interpolation *a posteriori* des observables du système, par régression linéaire des données simulées et stockées dans la base de données. Une analyse des coefficients de la relation linéaire calculés par krigeage permet également de définir dans quel domaine de facteurs externes il est préférable d'analyser le système pour, par exemple, trouver les situations de pire ou de moindre contrainte.

Plan d'expérience et krigeage sont des outils très généraux, qui peuvent être utilisés dans une gamme étendue de problèmes d'analyse.

Références :

- [1] J. Geiswiller, Calcul des couplages électromagnétiques : le shelter déployable SAMD au dessus d'un sol réel, Rapport Interne IEEA, **240**, 36 p., 2002.
- [2] J. Lefèbvre, Roussel H., Walter E., Lecointe D. and Tabbara W., Prediction from wrong Models: The kriging approach, IEEE Ant. Propagation, **38**, 4, 1996.
- [3] H. Wackernagel, Multivariate Geostatistics, Springer, Berlin, 1995.