



## **Optimisation des distances de ségrégation entre torons installés dans une structure**

Isabelle Junqua, Solange Bertuol, Jérôme Morio, Jean-Philippe Parmantier, Jullien C.

### **► To cite this version:**

Isabelle Junqua, Solange Bertuol, Jérôme Morio, Jean-Philippe Parmantier, Jullien C.. Optimisation des distances de ségrégation entre torons installés dans une structure. CEM 2021 20ème congrès de Compatibilité Electromagnétique, Apr 2021, Lyon, France. <hal-03236125>

**HAL Id: hal-03236125**

**<https://hal.science/hal-03236125v1>**

Submitted on 26 May 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# OPTIMISATION DES DISTANCES DE SEGREGATION ENTRE TORONS INSTALLES DANS UNE STRUCTURE

I. Junqua<sup>1</sup>, S. Bertuol<sup>1</sup>, J. Morio<sup>1</sup>, J-P. Parmantier<sup>1</sup>, C. Jullien<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ONERA / DEMR Université de Toulouse, F-31055 Toulouse - France, isabelle.junqua@onera.fr

<sup>2</sup>Div. EWISe, Dep Technique & Innovation, Safran Electrical & Power, Blagnac, France

**Résumé.** Ce papier présente les axes d'étude et pistes de réflexion afin d'optimiser la distance de ségrégation entre des torons de câbles installés dans une structure. Après une présentation de la problématique et de sa mise sous forme mathématique, on traite le cas analytique de deux câbles élémentaires court-circuités et on évalue explicitement la distance de ségrégation optimisée. On envisage ensuite un cas plus complexe. Ce cas test est dans un premier temps résolu par la méthode classique de Monte-Carlo. Dans un second temps, on montre comment une méthode non intrusive basée sur le krigeage peut être mise en œuvre. On conclut par les perspectives envisagées pour ces travaux de recherche.

## I. CONTEXTE DE L'ETUDE

Pour éviter les problèmes de CEM, l'allocation des câbles électriques élémentaires dans un toron et l'installation des harnais de câbles dans les structures doivent être maîtrisées et respecter des règles de ségrégation fixées aujourd'hui par les intégrateurs. Par ailleurs, dans le domaine aéronautique, le câblage, que l'on nomme EWIS (Electrical Wiring Interconnection System), est maintenant considéré comme un système à part entière et doit suivre les spécifications de la subpart H de la CS25.

L'ensemble de ces contraintes doit être pris en compte en phase amont de programme, au moment de la conception des harnais alors que de nombreuses données d'entrée sont encore entachées d'incertitude, voire inconnues (la longueur des câblages, la position relative des harnais entre eux, leur position par rapport à la structure, l'espace réservé à leur cheminement). Pour cela des « routes » sont définies dans lesquelles des harnais peuvent être regroupés et cheminer ensemble. En fonction du type de signal et de la puissance transportée, des distances sont définies afin d'assurer l'intercompatibilité entre deux routes. De plus, une fois les règles d'installation définies, il est nécessaire de les valider pour la certification. Enfin, la mise à jour de la maquette 3D suite à des modifications de conceptions et l'installation des harnais dans la structure peuvent conduire à déroger aux règles d'installation, notamment en diminuant la distance entre deux harnais par rapport à la distance de ségrégation réglementaire. Dans ce cas, il faut être capable d'évaluer le risque potentiel lié à cette dérogation afin de pouvoir la justifier et la faire accepter.

C'est dans ce contexte que le projet CS2-ANALYST (CFP07 GA 821128) a été initié par Safran Electrical &

Power ; il regroupe deux partenaires italiens (IDS - Ingegneria Dei Sistemi et l'Université d'Aquila) et deux partenaires français (AxesSim et l'ONERA). L'objectif est de développer un outil de modélisation permettant, dans un temps de calcul compatible avec les exigences des équipes de conception de câblage, d'évaluer la distance de ségrégation optimale  $d_{opt}$  entre deux harnais A et B connectant des équipements afin d'assurer leur inter-compatibilité à partir de la connaissance :

- des câbles électriques élémentaires constituant chacun des deux harnais A et B,
- des impédances d'entrée de chacun des équipements d'extrémité (charges des équipements :  $Z_{A,NE}, Z_{A,FE}, Z_{B,NE}, Z_{B,FE}$ ),
- des générateurs sources ( $V_{0,A}, I_{0,A,i}, V_{0,B}, I_{0,B,i}$ ) à une des deux extrémités des deux harnais (signal perturbateur pouvant inclure le signal utile et le signal parasite généré par l'équipement),
- des seuils de susceptibilité EM des équipements à l'extrémité opposée ( $S_{A,i}$  et  $S_{B,i}$ ) des générateurs sources, exprimés en termes de tensions ou courants.

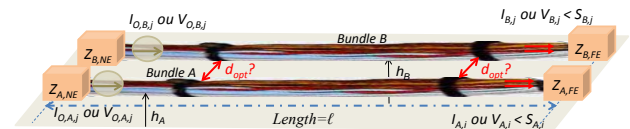


Fig. 1. Problème électromagnétique à résoudre

La distance de ségrégation optimale  $d_{opt}$ , doit être valable pour des longueurs de câblage,  $\ell$  (supposées ici identiques pour les deux harnais) et pour des hauteurs des deux harnais,  $h_A$  et  $h_B$  variables dans des intervalles fixés par l'utilisateur. On admettra aussi que les harnais A et B ont été correctement constitués, à savoir qu'ils sont « autocompatibles », dans le sens où les câbles d'un même harnais n'induisent pas des niveaux supérieurs aux seuils de susceptibilité des autres câbles de ce harnais.

Evidemment, ce problème a une solution si la cohérence entre les seuils de susceptibilité et les générateurs sources est assurée.

## II. REPRESENTATION MATHÉMATIQUE

Nous avons alors défini un critère mathématique élémentaire  $G$ , fonction de la distance de ségrégation, de la longueur de couplage  $\ell$ , et des hauteurs  $h_A$  et  $h_B$  des deux harnais selon :

$$G(d, \ell, h_A, h_B) = \text{Max}_{f, nA, nB} \left[ \frac{O_{A,i} - S_{A,i}}{S_{A,i}}, \frac{O_{B,j} - S_{B,j}}{S_{B,j}} \right] \quad (1)$$

où  $O_{A,i}$  et  $O_{B,j}$  représentent soit les tensions, soit les courants selon la définition des seuils de susceptibilité, qui sont induits sur chacun des câbles élémentaires  $i$  du harnais A et  $j$  du harnais B par les générateurs sources dans la configuration traitée. La normalisation des courants/tensions induits au seuil de susceptibilité permet d'obtenir un critère  $G$  sans dimensions et donc indépendant de la définition de la nature des seuils de susceptibilité en tension ou en courant. D'après (1), si  $G$  est négatif, alors les harnais sont « compatibles » et la non-susceptibilité est assurée.

La solution du problème électromagnétique consiste à trouver la plus petite valeur de  $d$ ,  $d_{opt}$  telle que :

$$G(d_{opt} / \ell_{\min} < \ell < \ell_{\max} / h_{\min} < h_A, h_B < h_{\max}) < 0 \quad (2)$$

Dans la section III, pour mieux appréhender le problème, nous traitons le cas simplifié de deux harnais réduits à un seul conducteur dans des conditions de charges et de sources simples. Par cet exemple explicite, nous mettons en évidence les difficultés mathématiques de résolution pour traiter des configurations réalistes de harnais.

Cette analyse conduit à la conclusion que, dans le cas de harnais complexes comportant un grand nombre de câbles élémentaires et des liaisons chargées par des impédances représentatives, il n'est pas envisageable de mener une analyse explicite déterministe. Dans ces conditions, la voie d'analyse statistique apparaît comme la méthode la plus efficace pour atteindre la solution avec des temps de calcul a priori raisonnables. Néanmoins, l'analyse statistique donnera accès à une distance de ségrégation optimale pour un niveau de risque fixé par l'utilisateur (TRL : Targeted Risk Level). Dans ce cas, l'expression (2) sera réécrite sous la forme suivante, où on évaluera  $d_{opt}$  pour :

$$P[G(d_{opt} / \ell_{\min} < \ell < \ell_{\max} / h_{\min} < h_A, h_B < h_{\max}) < 0] > \text{TRL} \quad (3)$$

Où  $\ell$ ,  $h_A$  et  $h_B$  sont des variables aléatoires uniformes entre leurs bornes. Il s'agit alors d'un problème d'optimisation sous contraintes de fiabilité. Dans la section IV, nous montrerons une application numérique de l'approche statistique sur un cas test complexe proposé par Safran Electrical & Power.

Finalement nous dresserons un premier bilan de ces travaux et des pistes de réflexions à engager pour parfaire l'analyse statistique et la généraliser à des configurations représentatives et complexes rencontrées par Safran E&P.

### III. CAS SIMPLIFIÉ DE 2 HARNAIS MONOFILAIRES : ANALYSE EXPLICITE

Considérons deux conducteurs, A et B, identiques, de résistance linéique  $R$ , de rayon  $a$ , sans diélectriques, parallèles, séparés d'une distance  $d$ , de longueur  $\ell$ , placés à une hauteur  $h$  au dessus d'un plan de sol infini

parfaitement conducteur et court-circuités à leurs extrémités (Fig. 2). A une des extrémités, on applique sur le conducteur A un générateur de tension localisé  $E$ . L'objectif est de trouver la distance  $d_{opt}$  entre les deux conducteurs telle que le courant induit sur le conducteur B à l'extrémité opposée,  $I_B$ , ne dépasse pas une certaine valeur  $S_B$  (seuil de susceptibilité EM), définie entre la fréquence minimale  $F_{\min}$  et la fréquence maximale  $F_{\max}$ , pour des plages de variations de  $\ell$  et  $h$  données.

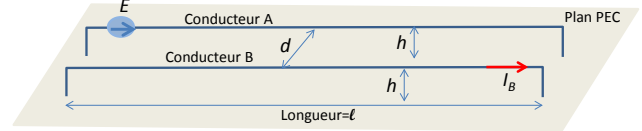


Fig. 2. Cas simplifié de deux lignes monofilaires couplées

Par la suite, on se placera dans l'hypothèse d'application de la théorie des lignes de transmission et sous des hypothèses complémentaires de variation des paramètres qui nous permettront de simplifier l'étude analytique, à savoir :

- $\ell \gg h$
- $h < (v/5F_{\max})$  où  $v=3.10^8$  m/s
- $a \ll d$
- $a < h$  et  $d \gg h$
- conducteurs à faibles pertes :  $R < 2\pi L F_{\min}$ , où  $L$  est l'inductance linéique de chacun de conducteurs.

Sous ces hypothèses et à partir de la théorie des lignes de transmission [1], on peut calculer analytiquement, à la fréquence  $f$ , l'amplitude du courant induit sur le conducteur B par le générateur  $E$  placé sur le conducteur A, soit :

$$I_B = \frac{EM}{c(L^2 - M^2) \sinh(\gamma \ell)} \quad (4)$$

- $L$  et  $M$  sont respectivement l'inductance linéique propre de ligne des conducteurs et la mutuelle inductance linéique entre les deux conducteurs.
- $\gamma$  est la constante de propagation complexe qui peut s'écrire sous la forme  $\gamma = \alpha + j\beta$ , où  $\alpha$  représente l'atténuation linéique et  $\beta$  la constante de propagation égale, suivant nos hypothèses, à  $\beta = 2\pi f/v$

La Fig. 3 illustre l'allure fréquentielle de ce courant induit dans la configuration où  $a=1\text{mm}$ ,  $d=30\text{cm}$ ,  $h=5\text{cm}$ ,  $\ell=10\text{m}$ ,  $R_{lin}=200\text{m}\Omega/\text{m}$ ,  $E=1\text{V}$ . La plage de fréquences est assez large pour visualiser le comportement basse fréquence et le système de résonances/ antirésonances.

On peut retrouver les maxima de courant sur la bande de fréquences d'après (4) :

$$\text{– Si } F_{\min} < \alpha v / 2\pi, \text{ alors } I_B^{\text{MAX}} = \frac{EM}{v(L^2 - M^2)\alpha \ell} \quad (5)$$

$$\text{– Si } \alpha v / 2\pi < F_{\min} \text{ et } F_{\max} < v/4\ell \text{ alors } I_B^{\text{MAX}} = \frac{EM}{(L^2 - M^2)2\pi F_{\min} \ell} \quad (6)$$

$$\text{– Si } F_{\max} > v/2\ell, \text{ alors } I_B^{\text{MAX}} = \frac{EM}{v(L^2 - M^2)\alpha \ell} \quad (7)$$

puisque le courant est maximal aux résonances, soit quand  $\beta\ell = k\pi$  (où  $k$  est un entier naturel non nul).

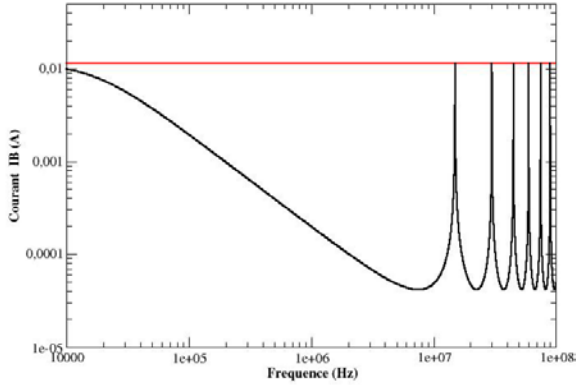


Fig. 3. Allure fréquentielle de  $I_B$  dans le cas simplifié

Finalement, puisque  $d \gg h$ , on peut approximer le facteur  $(L^2 - M^2)$  au dénominateur par  $L^2$ . Si on remplace  $\alpha$  par son expression sous conditions de faible perte, on obtient la relation (8) du courant maximal valable sur toute la gamme de fréquence :

$$I_B^{MAX} = \frac{2EM}{R.L\ell} \quad (8)$$

On constate que ce courant maximal est inversement proportionnel à la longueur et ne dépend de la distance de ségrégation  $d$  que par la mutuelle  $M$  au numérateur, et de la hauteur  $h$  dans le coefficient  $M/L$ .

Sachant qu'il faut trouver une distance de ségrégation qui assure un courant maximal inférieur au seuil  $S_B$  sur toutes les plages de variations de la longueur  $\ell$  entre  $\ell_{min}$  et  $\ell_{max}$  et de la hauteur  $h$  entre  $h_{min}$  et  $h_{max}$  et ces deux variables étant indépendantes, il faut que  $I_B^{MAX}$  soit inférieur à  $S_B$  pour  $\ell = \ell_{min}$  et pour  $h = h_{max}$  puisque  $M/L$  croît lorsque  $h$  augmente. Sous ces hypothèses géométriques, on peut exprimer les inductances  $L$  et  $M$  selon [2]:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_{max}}{a}\right) \quad M = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{\sqrt{4h_{max}^2 + d_{opt}^2}}{d_{opt}}\right) \quad (9)$$

On obtient alors la distance de ségrégation  $d_{opt}$  satisfaisant l'ensemble des contraintes selon l'expression suivante :

$$d_{opt} = \frac{2h_{max}}{\sqrt{(2h_{max}/a)^{S_B R \ell_{min}/E} - 1}} \quad (10)$$

**Exemple d'application :** si on souhaite un seuil de susceptibilité  $S_B$  de 10mA, pour une longueur de 20m et une hauteur de 3cm, on trouverait d'après (10) une distance optimale égale à 14cm. Pour une longueur de 10m, on trouverait une distance plus grande, 30cm.

#### IV. CAS COMPLEXE : ANALYSE STATISTIQUE

On voit donc que malgré la généricité du cas d'étude simplifié et les hypothèses associées, l'analyse est loin d'être immédiate notamment parce qu'elle fait intervenir de nombreux paramètres soit indépendants comme la longueur et la hauteur, soit partiellement liés comme la longueur et la fréquence, sans oublier la possibilité que

les charges puissent varier avec la fréquence. Il faut donc passer par une analyse statistique à partir de simulations numériques de calculs d'interactions sur câblages pour espérer pouvoir traiter des cas à plusieurs fils et présentant une complexité représentative de celle rencontrée par Safran Electrical & Power. Le code numérique CRIPTE, développé par l'ONERA et basé sur la résolution de la théorie des lignes de transmission multiconducteur dans le domaine fréquentiel sous formalisme de topologie électromagnétique, a donc été choisi comme code de calcul pour répondre à cette complexité. Tout l'enjeu a été ensuite de développer la méthode statistique la plus efficace, c.a.d. nécessitant un nombre minimum d'appels au code CRIPTE, afin de respecter les contraintes de temps calcul identifiées par Safran Electrical & Power.

#### IV.1. Description du cas d'étude

Parmi l'ensemble des cas tests soumis par Safran Electrical & Power, nous avons isolé un cas de complexité raisonnable en termes de nombre de conducteurs (12 conducteurs pour le harnais A et 24 conducteurs pour le harnais B); on suppose que :

- tous les conducteurs sont chargés par une impédance de  $9\Omega$  à leurs deux extrémités,
- un générateur de tension de 115V (constant entre  $F_{min}=10\text{kHz}$  et  $F_{max}=200\text{MHz}$ ) est appliqué sur chacun des 12 conducteurs du harnais A.
- le seuil de susceptibilité  $S_B$  sur chacun des 24 conducteurs du harnais B est fixé à  $S_B = 1.5\text{A}$ .
- le calcul est effectué sur 60 fréquences entre  $F_{min}$  et  $F_{max}$ .

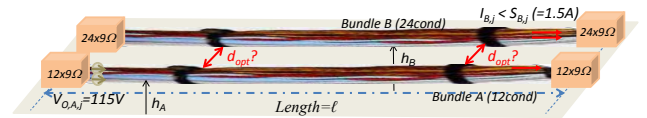


Fig. 4. Cas Safran E&P

L'objectif est d'évaluer la distance optimale entre les deux harnais afin que le courant induit sur chacun des conducteurs du harnais B soit inférieur à  $S_B$  entre  $F_{min}$  et  $F_{max}$ , pour des longueurs  $\ell$  de harnais comprises entre 10m et 70m et des hauteurs  $h_A$  et  $h_B$  des harnais comprises entre 5mm et 20cm. La plage de variation de la longueur et la bande de fréquences à considérer impliquent que les courants induits sur le harnais B ont une allure fréquentielle incluant un comportement basse fréquence et un système de résonances/antirésonances.

#### IV.2. Implémentation du calcul

Le calcul de la distance optimale de ségrégation repose sur un calcul de type Monte-Carlo. L'optimisation est basée sur un algorithme d'optimisation sous contraintes - de type COBYLA. Les sections droites élémentaires des harnais A et B sont déterminées en début de calcul et ensuite assemblées à chaque tirage en respectant la distance  $d$  et les hauteurs  $h_A$  et  $h_B$  au dessus du plan de référence.

Sur la Fig. 5 nous illustrons les courants calculés par CRIPTE sur les 60 fréquences sur chacun des conducteurs du harnais B pour une configuration  $(d, \ell, h_A, h_B)$ . Notons que cette configuration n'induit pas de susceptibilité sur le harnais B ( $G < 0$ ).

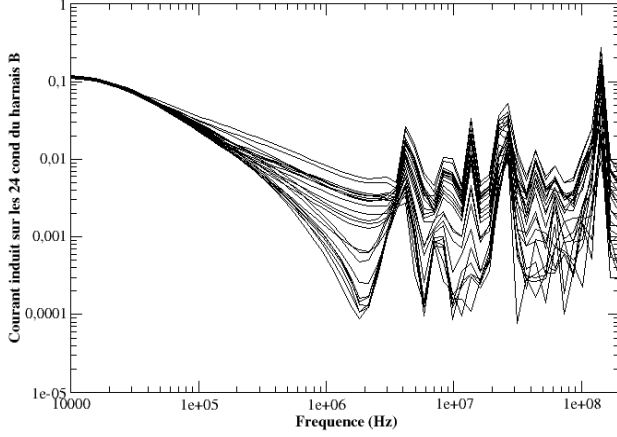


Fig. 5. Calcul CRIPTE pour un tirage de  $(d, \ell, h_A, h_B)$

#### IV.3. Résolution par analyse de Monte-Carlo

En amont du processus d'optimisation, une analyse Monte-Carlo a été menée en lançant 1000 simulations (soit 1000 triplets  $\ell, h_A, h_B$ ) pour 4 distances  $d$ , 4cm, 10cm, 15cm, 30cm entre  $F_{min}$  et  $F_{max}$ . La Fig. 6 illustre sur les 600 premiers tirages le courant maximal sur le harnais B pour les 4 distances  $d$ . Il apparaît que le courant max absolu possible est atteint quelle que soit la distance mais la probabilité d'atteindre ce courant maximal absolu ou de dépasser le seuil  $S_B$  augmente lorsque la distance diminue. Plus les distances sont importantes, plus l'étendue en amplitude de ce courant est importante.

A partir de la Fig. 7 représentant les fonctions cumulatives associées pour le critère  $G$ , on déduit les probabilités de non dépassement du seuil de 1.5 A – avec une distance d'optimisation de 15cm pour un TRL de 0.95 – suivantes :

- $d=4\text{cm}$  :  $P[G < 0] = 0.69$     -  $d=10\text{cm}$  :  $P[G < 0] = 0.87$
- $d=15\text{cm}$  :  $P[G < 0] = 0.95$     -  $d=30\text{cm}$  :  $P[G < 0] = 0.95$

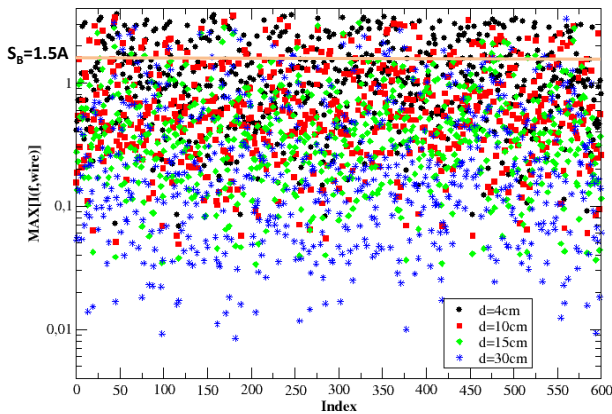


Fig. 6.  $I_B^{Max}$  - 600 configurations  $(\ell, h_A, h_B)$

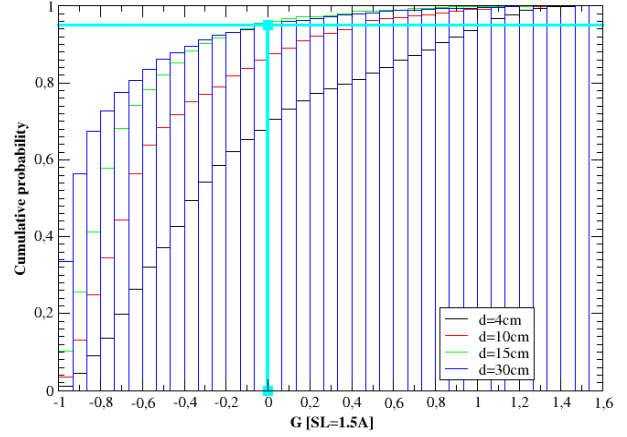


Fig. 7. Fonction cumulative de  $G(\ell, h_A, h_B)$

#### IV.4. Introduction du krigeage dans le processus

Finalement nous avons introduit dans le processus d'optimisation un modèle de krigeage du critère  $G$ . Avant la boucle d'optimisation, on procède à une phase d'initialisation par l'obtention du critère  $G$  pour des quadruplets  $(d, \ell, h_A, h_B)$  correctement choisis. Dans la boucle d'optimisation, soit le critère  $G$  est interpolé, soit la base est enrichie par de nouveaux calculs CRIPTE. Cette approche a été appliquée sur ce cas test avec une initialisation de 80 échantillons et une population finale de 200 échantillons et a permis d'obtenir une distance optimisée entre 12 et 15cm pour un TRL de 0.95. Elle permet de réduire considérablement le nombre de simulations CRIPTE élémentaires à envisager.

#### V. CONCLUSION - PERSPECTIVES

L'ensemble du processus d'évaluation de la distance de ségrégation optimisée a été défini et implémenté. Nous montrerons dans l'exposé les difficultés de mise en œuvre de méthodes de krigeage pour l'interpolation de la fonction  $G$  due à sa non régularité liée aux fluctuations fréquentielles des courants vis-à-vis des paramètres d'entrée et nous présenterons les moyens d'y remédier (fenêtre glissante sur  $\ell$  ou conducteur équivalent). Nous donnerons des exemples d'application du processus d'optimisation et de calcul de risque de dépassement de seuil lorsqu'il y a dérogation à cette distance optimale.

#### REFERENCES

- [1] C. R. Paul, "Introduction to Electromagnetic Compatibility", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.
- [2] K.S.H. Lee, "EMP Interaction: Principles, Techniques and Reference Data", SUMMA Book, Springer-Verlag, 1986