

Identification de sources multipolaires équivalentes par filtrage spatial

Benjamin Vincent, Olivier Chadebec, Jean-Luc Schanen⁽¹⁾
 Kévin Berger, Laurent Krahenbühl, Ronan Perrussel⁽²⁾

(1) G2Elab (CNRS UMR5269), ENSIEG BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères, France

(2) Ampère (CNRS UMR5005), Université de Lyon, Ecole Centrale de Lyon, F-69134 Ecully Cedex, France.

Résumé — De nouveaux capteurs d'induction magnétique en champ proche, dédiés aux études de Compatibilité Electromagnétique, sont proposés sur le principe des spires de la norme CISPR16-1. La forme des bobines proposées leur permet de n'être sensibles qu'à certaines composantes multipolaires du champ, ce qui réalise un filtrage spatial. Après une description de la méthode de synthèse de ces contours, une validation numérique est exposée.

I. INTRODUCTION

La construction de modèles du champ magnétique généré par tel ou tel sous-système permet de simplifier l'analyse des systèmes d'électronique de puissance du point de vue de la Compatibilité Electromagnétique. Pour cela, on identifie les paramètres du modèle à partir de la mesure du champ proche. Cela permet ensuite de représenter le champ partout dans l'espace au-delà de la distance de mesure.

Le développement multipolaire a démontré sa capacité à synthétiser des sources magnétiques complexes en éléments simples (dipôle, quadripôles...). Toutefois, la détermination expérimentale des paramètres de ce développement est très sensible aux erreurs de mesure. Plusieurs solutions sont envisageables pour les limiter.

Dans le cas de mesures ponctuelles, les auteurs de [1] [2] proposent de multiplier les points de mesures (jusqu'à 200), ou d'optimiser leurs positions.

D'autres méthodes font appel à la mesure du flux de l'induction dans de grandes bobines placées autour du système, parfois mobile [3], parfois statique : c'est l'approche de la norme CISPR 16-1 (valable pour la bande de fréquence 9kHz-30MHz qui correspond à nos applications), avec ses 3 bobines cadres de grand diamètre (Fig.1) [4]. Cette intégration spatiale permet en effet de réduire les erreurs de positionnement du capteur [3].

Par une approche rigoureuse, nous proposons ici de nouveaux contours de bobines, qui présentent des propriétés de filtrage spatial des composantes du développement multi-

polaire du champ : chaque bobine permet la mesure de l'une des 3 composantes dipolaires du champ, ou de l'une de ses 5 composantes quadripolaires (ordres 1 et 2 du développement), sans être perturbée par les 2 ordres suivants (3 et 4). Ces contours sont validés par des expériences numériques.

II. DEVELOPPEMENT MULTIPOLAIRE

Dans l'air et à l'extérieur d'une sphère (nommée sphère de validité) englobant toutes ses sources, chaque harmonique fréquentielle \mathbf{B} de l'induction dérive d'un potentiel scalaire magnétique Ψ . Dans un repère donné, ce potentiel admet un développement multipolaire unique :

$$\mathbf{B} = -\nabla\Psi \text{ avec : } \Psi(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{m=-n}^{+n} A_{nm} \frac{1}{r^{n+1}} Y_{nm}(\theta, \phi) \quad (1)$$

où les Y_{nm} sont les harmoniques sphériques d'ordre n , r est la distance au centre du développement, et les A_{nm} les coefficients recherchés du développement.

Ce développement est hiérarchique : les composantes d'ordre n du champ décroissent comme $1/r^{(n+2)}$. Une décomposition limitée à l'ordre 2 donne une précision jugée suffisante au-delà de la distance de mesure [4].

III. CREATION DES CAPTEURS DE FLUX

Identifier le développement multipolaire jusqu'à l'ordre 2 implique la réalisation de 8 capteurs de flux distincts. Le capteur idéal serait sensible à une seule composante du développement (1) mais il ne peut être réalisé exactement. L'étude systématique des symétries et périodicités¹ des Y_{1m} et Y_{2m} permet de construire des tableaux d'influence (Fig. 2), dans lesquels chacun des capteurs est constitué de contours arbitraires, mais respectant ces mêmes symétries et périodicités.

On voit par exemple sur cette figure qu'un capteur qui possède les mêmes symétries que Y_{10} permet de mesurer

n=1	$Y_{1,0}$	$Y_{1,1}$				$Y_{1,0}$	$Y_{1,1}$			
n=2	$Y_{2,0}$	$Y_{2,1}$	$Y_{2,2}$			$Y_{2,0}$	$Y_{2,1}$	$Y_{2,2}$		
n=3	$Y_{3,0}$	$Y_{3,1}$	$Y_{3,2}$	$Y_{3,3}$		$Y_{3,0}$	$Y_{3,1}$	$Y_{3,2}$	$Y_{3,3}$	
n=4	$Y_{4,0}$	$Y_{4,1}$	$Y_{4,2}$	$Y_{4,3}$	$Y_{4,4}$	$Y_{4,0}$	$Y_{4,1}$	$Y_{4,2}$	$Y_{4,3}$	$Y_{4,4}$
m =	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4

Fig. 2 : tableau des influences (marquées par des flèches) pour chacun des 5 capteurs spécifiques

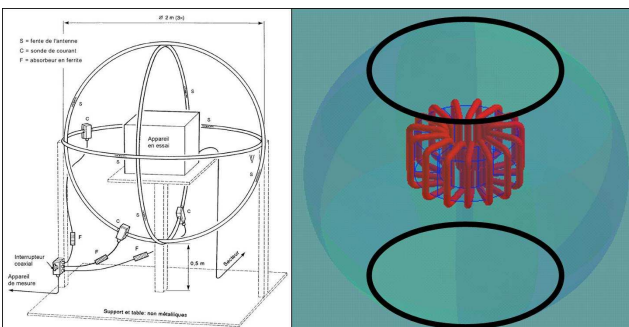


Fig. 1. A gauche, système de mesure de la norme CISPR16-1 : 3 spires de grand diamètre. A droite, une source typique et l'un de nos capteurs

¹ Y_{nm} est ou paire ou impaire suivant z ; sa seule dépendance suivant ϕ est en $\cos(m\phi)$ ou $\sin(m\phi)$.

cette composante, le résultat n'étant perturbée que par Y_{30} (et par des fonctions d'ordre 5 ou supérieur).

Il est possible d'éliminer toutes les influences de la Fig. 2 en modifiant des degrés de liberté restants, notamment la largeur et/ou la hauteur de chaque capteur. Huit premiers capteurs sont ainsi définis, ils correspondent à 5 formes distinctes² et permettent de caractériser entièrement les composantes di- et quadri-polaires du champ (ordres $n=1$ et 2) ; les composantes perturbatrices commencent seulement à l'ordre $n=5$. Ces premières formes sont liées aux coordonnées sphériques : les contours sont à θ ou ϕ constants.

En abandonnant cette contrainte, on trouve d'autres solutions. Il est par exemple possible d'utiliser uniquement des assemblages de spires circulaires³, constituant 2 capteurs différents : le premier, équivalent aux bobines de Helmholtz, permet en l'orientant suivant les 3 directions principales, de mesurer les composantes dipolaires ; le second donne les composantes quadripolaires, grâce à 5 orientations judicieusement choisies.

IV. EXEMPLE

Pour illustrer notre démarche, nous proposons de détailler la synthèse du contour permettant la détection de la composante Y_{10} et donc l'identification de A_{10} .

Cette composante est à symétrie de rotation autour de z , et est impaire en z : le capteur le plus simple qui respecte ces symétries est constitué de deux spires centrées sur Oz , symétriques par rapport au plan xy et connectées en série, dans le même sens ; le degré de liberté restant est l'écartement de ces spires [4]. Pour différentes valeurs de cet écartement, le flux total engendré par Y_{30} à travers ces spires varie ; il s'annule pour une valeur particulière, correspondant aux bobines de Helmholtz. Pour cette configuration, le capteur de Y_{10} filtre donc toutes les composantes d'ordres 2, 3 et 4 ; la première perturbation est d'ordre 5.

Pour un écartement nul, on retrouve la spire de la norme : ce choix-là maximise le flux créé par Y_{10} , mais la mesure est perturbée dès l'ordre 3 (composante Y_{30}) ; cela explique la grande taille exigée par la norme pour ce capteur.

V. VALIDATION

La validation expérimentale (en cours) nécessite la fabrication d'un dispositif assez délicat à mettre en place. En attendant ses résultats, nous avons procédé à des expériences numériques. Il s'agit d'une part de retrouver, à partir de calculs de flux sous Matlab®, les coefficients du développement de champs tests construits suivant (1), expériences naturellement concluantes ; d'autre part de simulations de mesures sur un dispositif réaliste à l'aide du logiciel Flux3D® [5], qui utilise la méthode des éléments finis (M.E.F.).

L'objet choisi (Fig. 1) est une inductance torique appartenant au filtre de mode commun d'entrée d'un variateur de vitesse. L'identification se fait à l'extérieur d'une sphère de

² Les capteurs de $Y_{1,1}$ et $Y_{2,1}$ sont utilisés également pour $Y_{1,-1}$, $Y_{2,-1}$ moyennant une rotation de 90° autour de Oz ; le capteur de $Y_{2,2}$ est utilisé pour $Y_{2,-2}$ après rotation de 45° .

³ La spire circulaire est le seul contour *sur la sphère* qui est aussi situé *dans un plan* : cela peut faciliter sa réalisation pratique.

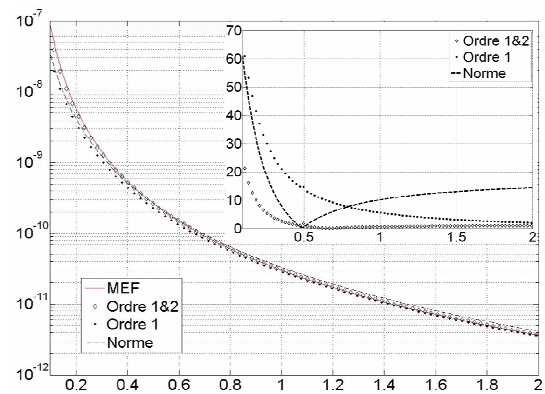


Fig.3. Décroissances du module du champ (en T) de 0,1 à 2 mètres. En haut à droite, erreurs relatives par rapport à la solution par éléments finis.

validité de 5 cm de rayon. Les conditions aux limites dans la région air sont assurées par une transformation « boîte infinie ». Les flux sur des surfaces sphériques sont calculés en post-traitement grâce aux outils d'intégration du logiciel. La Fig. 3 présente les identifications du champ obtenues avec les nouveaux capteurs aux ordres 1 et 2, et avec le capteur de la norme (ordre 1 perturbé dès l'ordre 3). Ces identifications représentent à première vue convenablement les variations du module du champ. Le tracé d'erreur montre cependant que les capteurs normatifs sont moins performants, l'erreur d'identification du dipôle se traduisant ici par 13% d'erreur sur le champ, même loin de la source. Avec notre méthode, cette erreur systématique disparaît : l'erreur relative diminue bien avec la distance. Dans ce cas particulier, inclure les quadripôles permet une description quasi exacte du champ donné par la méthode des éléments finis à 0,4m déjà (8 fois le rayon de la sphère de validité).

VI. CONCLUSION

Nous avons montré qu'il est possible d'améliorer le dispositif de mesure des composantes dipolaires du champ proposé par la norme. Il est également possible de créer des systèmes de bobines qui mesurent les composantes di- et quadri-polaires en filtrant exactement les deux ordres supérieurs.

Nos travaux en cours portent sur la comparaison théorique des différentes réalisations possibles en termes de sensibilité et de robustesse ; sur l'amélioration des stratégies de mesure, en particulier quant à la détermination du centre du développement en harmoniques sphériques ; sur l'extraction automatique des développements harmoniques à partir des résultats de simulations par éléments finis ; et naturellement sur une mise en œuvre expérimentale.

REFERENCES

- [1] J.P. Keradec et al., "Nano-teslameter for characterization of the fields emitted and received by wound electronic components," IMTC, vol.1, pp. 124-129, May 2003.
- [2] L.-L. Rouve et al., "Optimal magnetic sensor location for spherical harmonic identification applied to radiated electrical devices," IEEE T-Mag., 42-4, pp. 1167-1170, April 2006.
- [3] A.V. Kildishev, S.A. Volokhov, J.D. Saltykov, "Measurement of the Spacecraft Main Magnetic Parameters," IEEE Autotestcon, Proceedings, 1997, pp. 669-675.
- [4] Norme CISPR 16-1, annexe P, 2002, pp. 230-237 et 396-409.
- [5] <http://www.cedrat-groupe.com/>