

Apport de la simulation au dimensionnement des contraintes CEM en haute fréquence dans un environnement complexe

Mots clés

Electromagnetic
Compatibility,
Statistics,
Kriging

■ Par A. BERGES¹, J. LATGER², H. J. MAMETSA¹, Jean-Philippe PARMENTIER¹

¹ ONERA/DEMR, ² OKTAL SE

En haute fréquence, la modélisation asymptotique permet de modéliser globalement et efficacement l'environnement électromagnétique nécessaire à l'évaluation des phénomènes de compatibilité électromagnétique intersystème (CEMIS) dans un environnement complexe de grandes dimensions. Cet article décrit la technique de simulation utilisée et présente des résultats qui montrent comment elle peut être appliquée à différents domaines de l'électromagnétisme.

1. Introduction

Dans la dénomination « CEM », une définition générale consiste à évoquer la compatibilité des systèmes avec l'environnement. Les systèmes sont alors définis comme récepteurs de perturbations et on parle alors de susceptibilité EM (conduite ou rayonnée) ou comme des émetteurs de perturbation et on parle alors d'émission EM.

Par conséquent, il va de soi que tout équipement électrique peut être générateur d'un environnement EM, perturbateur pour un autre équipement victime. Dans le cas particulier des antennes, ces problèmes sont accrus de

par leur définition fonctionnelle. On utilise alors le terme CEMIS, compatibilité intersystèmes, qui restreint essentiellement le domaine d'application de la CEM à des problèmes de compatibilité entre aériens, et donc à des problèmes externes.

Le domaine d'application de la CEMIS concerne ainsi plus particulièrement les plates-formes ou les sites à forte intégration d'aériens en émission ou en réception (navires, aéroports).

La prédiction et la prévention de ces interférences dommageables nécessitent des moyens de calcul performants pour le dimensionnement des champs élec-

L'ESSENTIEL

Les perturbations inter systèmes sur une plate-forme à forte intégration (type navire) ou dans un environnement riche en équipements radioélectriques variés (type aéroport) sont fréquentes et peuvent compromettre le fonctionnement de certaines de ses composantes. En haute fréquence, la modélisation asymptotique permet une prise en compte globale et efficace de la compatibilité électromagnétique intersystèmes (CEMIS).

C'est dans ce cadre que l'ONERA et la société OKTAL-SE développent, en partenariat, l'outil de simulation FERMAT qui permet de calculer des champs électromagnétiques diffractés en haute fréquence (objets grands devant les longueurs d'onde) dans un environnement 3 D virtuel complexe d'objets naturels ou construits et physiquement renseignés.

SYNOPSIS

Inter-system EM interference on high level integration platforms or in EM environments produced by various RF equipments (airport type or ship type) may affect significantly functional system-performance. At high frequency, asymptotic modeling, aiming at the prediction of EM field constraints at equipment level in a complex environment, allows one to account globally and efficiently for inter-systems EMC.

ONERA and OKTAL SE are cooperating on the development of the FERMAT numerical simulation tool with the ambition to calculate scattered electromagnetic fields at high frequency (the size of the objects is supposed large compared to the wavelength), in a modeled complex environment including grounds and building with their physical properties.



Figure 1. Base de données véhicule ZSU.



Figure 2. Base de donnée terrain type Bretagne.

tromagnétiques émis par chacun des différents éléments rayonnants, en interaction avec l'environnement, sur l'ensemble des autres. Du point de vue des équipements radioélectriques, une fois déterminé l'environnement de champ, leur susceptibilité au champ électromagnétique perturbateur peut alors être résolue indépendamment comme un problème classique de tenue aux normes (CEM).

En haute fréquence, le calcul des champs électromagnétiques sur de très grands volumes, comprenant des objets complexes, n'est pas accessible, par des techniques de résolution numérique directe des équations de Maxwell, même avec les plus gros moyens de calculs disponibles à ce jour.

C'est pourquoi, depuis quelques années, et initialement pour des besoins de simulation radar, le département électromagnétique et radar (DEMR) de l'ONERA développe en partenariat avec la société OKTAL-SE une nouvelle approche de calcul de champs électromagnétiques dans un environnement virtuel 3 D d'objets et de paysages naturels. Cette approche exploite des développements asymptotiques des équations de Maxwell associés à la technique informatique du lancer géométrique de rayons. Dans ce partenariat, officialisé en 2002, l'ONERA se concentre plus sur les aspects physiques (notamment au travers de travaux de thèses) alors que OKTAL-SE se concentre plutôt sur les aspects informatiques de la plate-forme de calcul et sur les techniques de lancer de rayons. Dans l'optique d'une application CEMIS, les deux partenaires travaillent sur une formulation unifiée permettant, en tout point de la scène (zone proche ou lointaine des obstacles), le calcul des champs électromagnétiques et des courants sur les surfaces.

L'outil de calcul FERMAT qui intègre l'ensemble des développements supportant ces travaux doit s'appuyer sur des outils de modélisation géométrique 3 D des systèmes et des terrains, ainsi que des outils ergonomiques de visualisation des objets et des signaux résultants (champs

et courants). L'ensemble ainsi développé doit permettre de calculer, de manière réaliste, l'impact des systèmes les uns sur les autres, dans l'environnement de simulation.

2. Composantes de l'outil de simulation EM

En plus de la partie calcul des modèles électromagnétiques de propagation, réflexion, diffusion, diffraction utilisant les formulations de l'optique géométrique (OG), de l'optique physique (OP) et de la théorie physique de la diffraction (TPD), la simulation numérique associe différentes techniques ou outils :

1) Des bases de données (BDD) géométriques, virtuelles 3 D, des objets, des terrains ou des scènes d'intérêt, renseignées des propriétés physiques des matériaux dans différents domaines spectraux, dont le visible et le domaine électromagnétique des ondes métriques, centimétriques et millimétriques. Du point de vue électromagnétique, les renseignements utiles sont généralement les paramètres diélectriques ou métalliques, la rugosité, le coefficient de rétrodiffusion radar et éventuellement des coefficients de transmission. Ces paramètres physiques dépendent de la fréquence. Les bases de données comportent un très grand nombre d'éléments décrivant des objets ou des paysages restitués en plusieurs milliers de faces géométriques planes. A titre d'exemple, le véhicule représenté sur la figure 1 comporte 600 000 facettes, et la scène représentée sur la figure 3 comporte 500 000 facettes. Ces deux BDD en exemples ont initialement été développées pour des applications SER mais elles pourraient tout à fait être utilisées dans une problématique CEMIS.

La BDD dans son réalisme doit être cohérente des besoins de la simulation globale et doit s'appuyer pour sa construction sur des outils spécifiques et des mesures de référence pour informer sur les matériaux qui la constituent. Les informations physiques sur les matériaux de

constitution de l'environnement réel sont essentielles aux renseignements des BDD géométriques. L'homogénéité, entre la représentation de la réalité par la précision de la quantification et le raffinement des méthodes de calcul, est primordiale pour le réalisme du calcul prédictif de champs électromagnétiques.

2) Une technique optimisée de lancer géométrique de rayons, calculant les intersections et le suivi géométrique entre les rayons provenant de la source, la base de données et le point de réception. Cette technique permet de calculer l'intervisibilité, au sens électromagnétique, des points à travers la BDD.

Par rapport aux techniques classiques de « tracé de rayons » très fréquemment utilisées en simulation asymptotique, et qui cherchent à relier un point d'émission à un point d'observation par tous les chemins possibles (directs ou réfléchis), la technique de lancer de rayons appliquée dans la plate-forme repose sur un algorithme adaptatif à la géométrie dit « paresseux », dans lequel les rayons sont lancés en « aveugle ». Des tests d'interceptions avec les surfaces de contact environnant le point d'observation permettent de faire converger rapidement l'algorithme (figure 8).

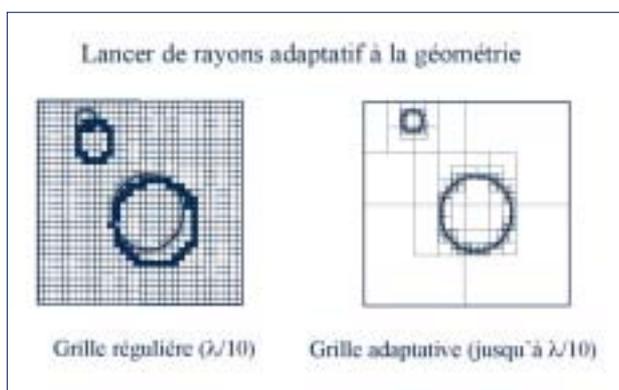


Figure 3. Principe de convergence de la méthode de lancer de rayon.

3) Des outils de génération et de gestion de scénarios pour positionner les sources émettrices et calculer les champs électromagnétiques rayonnés aux points d'intérêt.

4) Des outils conviviaux de présentation des résultats de calcul. Il est en effet indispensable d'assister l'utilisateur dans son analyse de résultats volumineux. Les domaines de calculs de champs peuvent, suivant les applications, être ponctuels, volumiques ou surfaciques. Les champs électromagnétiques vectoriels peuvent directement être calculés dans de très grands volumes et jusque très près des obstacles. Différents exemples illustreront ce point dans la suite de l'article.

3. Stratégie de calcul

Les modèles électromagnétiques asymptotiques développés et exploités dans l'outil FERMAT reposent sur une méthodologie traitant de manière unifiée, et quelles que soient les distances aux obstacles, les calculs de champs électromagnétiques.

La simulation exploite donc d'une part des modèles asymptotiques de l'électromagnétique pour la réflexion, la diffusion et la diffraction sur différents types de matériaux, et d'autre part des informations géométriques et physiques de la base de données.

Ces modèles électromagnétiques sont des modèles asymptotiques de rayons : optique géométrique (OP) et théorie uniforme de la diffraction (TUD) et de courants : optique physique (OP) et théorie physique de la diffraction (TPD) applicables sur tout type de matériaux. Une stratégie d'utilisation des modèles, suivant la distance aux obstacles perturbant le champ électromagnétique, est incorporée au calcul.

La contribution au rayonnement de chaque élément de surface de la BDD est calculée au point de réception par l'OP en respectant des conditions de zone lointaine, au sens électromagnétique, de cette surface. Cette condition est réalisée par un découpage adaptatif, permis par le lancer de rayons, de la surface en question. Cette stratégie permet un calcul du champ électromagnétique en tout point de la scène et quelle que soit la distance à l'obstacle rayonnant. Une stratégie analogue est mise en œuvre pour le calcul de la diffraction des arêtes rayonnantes par la TPD. Le couplage entre éléments de la scène est calculé par l'OG, sous des hypothèses de champ proche, c'est-à-dire de fort couplage.

Différents domaines de l'électromagnétisme exploitent ce type de calcul : radar, antennes sur structures, compatibilité électromagnétique inter système (CEMIS), calcul de champs autour d'antennes émettrices. Cette méthode, pour être appliquée, nécessite que les obstacles soient grands devant la longueur d'onde.

4. Validations et applications

La validation consiste essentiellement à comparer les modèles électromagnétiques utilisés soit à d'autres méthodes de référence, soit à des mesures sur des objets simples dits canoniques.

Ces comparaisons s'effectuent lors de « workshop » spécialisés, sur des objets à géométrie simple, permettant de tester les différentes interactions électromagnétiques. À titre d'exemples, des calculs à très hautes fréquences ont été effectués sur un trièdre non conventionnel à faces



Figure 4. Cas du test de trièdre modifié.

inclinées et matériaux divers, sur lequel ont aussi été réalisées des mesures exhaustives de références. De très bonnes correspondances calculs-mesures ont pu être établies.

Cette approche permet, avec les mêmes modèles, de calculer les champs électromagnétiques, dans des bases de données virtuelles 3 D précisées physiquement, sur des objets très divers et pour des applications très différentes.

Parmi ces applications, démontrant le caractère unificateur de la stratégie de calcul, on peut citer :

- La simulation du comportement de radars, en onde centimétrique ou millimétrique, dans des scénarios d'utilisation prédéfinis face à des cibles et à l'environnement naturel. Par rapport aux outils basés sur le tracer de rayons, le lancer de rayons offre des performances bien supérieures.
- Le calcul de la surface équivalente radar de cibles complexes en onde centimétrique et millimétrique.
- Le calcul de diagrammes d'antennes en présence des structures environnantes :
 - diagramme d'antenne sur porteur,
 - calculs de champs rayonnés autour d'antennes émettrices pour définir les zones de sécurité dans des applications de télécommunications urbaines.
- Le calcul de champs électromagnétiques rayonnés, pour des applications de couplage électromagnétique externe ou CEMIS. Dans cette application les champs EM émis par un émetteur sont calculés sur les surfaces de couplage et d'interface avec un élément susceptible d'être perturbé, en prenant en compte tout l'environnement.

5. Exemples de résultats

5.1. Exemple 1 : calcul de champ sur une structure complexe

Dans des environnements pour lesquels la densité des aériens pose des problèmes de CEMIS nombreux et pénalisants en phase d'exploitation, une simulation numérique offre la perspective d'optimiser le positionnement des aériens tout en garantissant leur performance. C'est le cas de l'environnement du navire, représenté sur la Figure 5, dans laquelle une antenne émettrice est positionnée sur la

structure et crée en tout point de la surface du navire un champ électromagnétique, susceptible de perturber et compromettre le fonctionnement de tout équipement radio électrique. L'antenne de type demi-onde, par son rayonnement, génère des courants sur la surface du navire représenté en plan par un code de couleur. Une fois l'environnement local de champ EM déterminé, le problème de susceptibilité de cet équipement à ce champ perturbateur peut être résolu séparément, comme un problème de norme en CEM. Dans cette optique, la base de données physique décrivant l'environnement EM doit être complétée par une base de données d'aériens dans laquelle leurs performances en émission et en réception ainsi que leurs caractéristiques géométriques sont précisées.

Dans la représentation ci dessous l'intensité du champ électromagnétique, est directement « déposée » sur la surface de la BDD de l'objet.

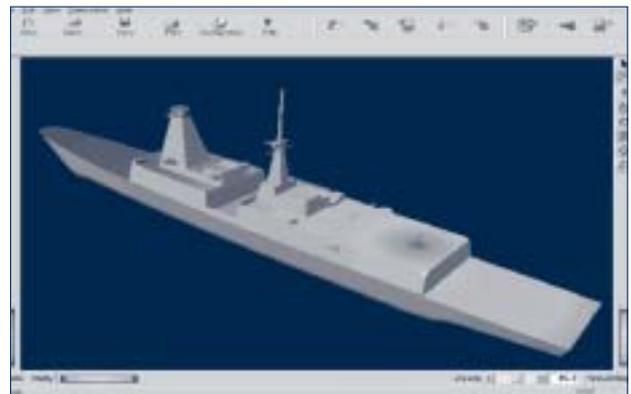


Figure 5. Calcul de champ créé par une antenne émettrice sur un navire.

5.2. Exemple 2 : calcul de champ électromagnétique autour d'une antenne émettrice

Dans cet exemple, le calcul du champ électromagnétique est effectué en milieu urbain, en interaction avec l'immeuble, dans un volume autour de l'antenne émettrice. L'objectif est de déterminer autour de l'antenne une zone de sécurité quantifiée en intensité de champ, selon les recommandations réglementaires (implantation d'émetteurs GSM). Dans le contexte actuel de questionnement sur les effets biologiques des ondes EM, la simulation numérique représente un outil particulièrement intéressant de prédiction de niveaux de champ EM, dans un environnement urbain, avant toute implantation physique d'antenne.

Dans l'exemple figure 6, les antennes émettrices concernées sont des réseaux de dipôles et le calcul s'effectue jusqu'en zone proche des antennes et des obstacles. Dans ce cas, le calcul de l'intensité des champs électromagnétiques est volumique, et le mode d'exploitation

permet de calculer des surfaces isodensité, représentées en figure 6, et de définir des volumes de sécurité au sens de la norme.

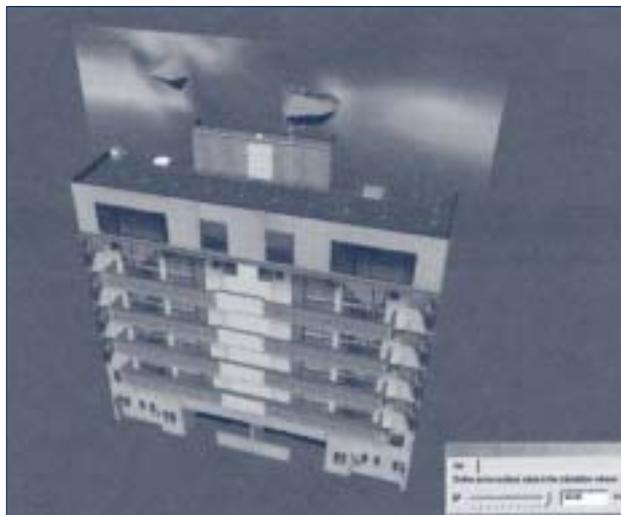


Figure 6. Calcul du champ EM dans le voisinage propre d'une antenne GSM sur un immeuble.

5.3. Exemple 3 : simulation de radar

À titre de démonstration du caractère multidisciplinaire de l'approche, l'exemple suivant montre comment l'outil est aussi exploité dans le cadre du projet ONERA « Aéroport du futur », pour paramétrer un radar exploitable dans les phases finales d'atterrissage pour une application de vision renforcée dans des conditions atmosphériques dégradées.

Pour cela, une base de données terrains de la zone aéroportuaire de Toulouse-Blagnac a été développée par la société OKTAL SE, et physiquement enrichie d'informations électromagnétiques utiles à la simulation de radars millimétriques (figure 7).



Figure 7. Base de données de l'aéroport de Blagnac dans le visible.

Pour exploiter les simulations dans des conditions réalistes d'approche et de descente, des trajectoires sous différentes conditions météorologiques ont été calculées par l'ONERA.

Le signal radar reçu dans le domaine distance - angle de gisement est transformé en un domaine angle - angle pour présenter une image radar dans un repère visuel habituel.

Les images en figure 8, ci-dessous, sont calculées à 500 m de la piste, dans un mode de représentation angle-angle avec des résolutions variables.

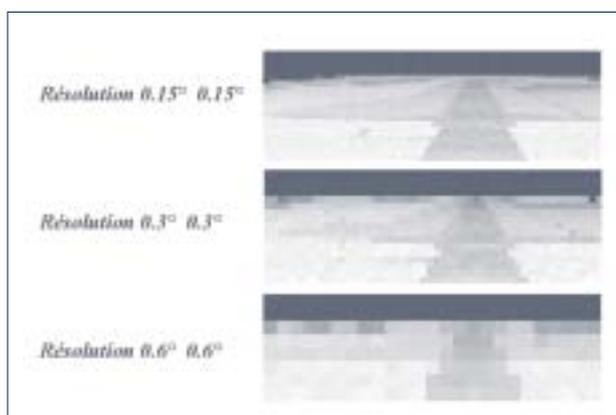


Figure 8. images radar à 500 m de la piste en différentes résolutions

Bien qu'aucune application CEMIS n'ait encore été encore effectuée sur la base de données de l'aéroport de Toulouse-Blagnac, il est envisagé dans des projets futurs de l'utiliser pour faire la démonstration de la possibilité de calculs aéroportuaires, et l'identification de problèmes de sécurité éventuels (notamment lors de l'implantation de nouveaux émetteurs).

6. Conclusions

À partir de mêmes modèles électromagnétiques asymptotiques exploités sur les mêmes bases de données 3 D géométriques et physiques, le code FERMAT permet de développer des outils pour des applications diverses de calculs de champs électromagnétiques. La mise en œuvre et l'exploitation spécifique différente des calculs permet de traiter des problèmes de type : radar, SER, propagation, télécommunications en milieu urbain, calcul de diagramme d'antenne, CEMIS.

En particulier, le caractère opératoire de l'outil permet d'envisager, en haute fréquence, la détermination de contraintes CEM dans un environnement complexe. Celles-ci peuvent, par cet outil, être quantifiées et prises en compte dès les conceptions de systèmes.

Les axes futurs de développement envisagés à ce jour sont les suivants :

- alimentation d'une banque de données d'antennes couplée à la base de données physique,

- amélioration des techniques de calcul de champ très proche des antennes,
- enrichissement des banques de données matériaux,
- établissement des limites basses fréquences de la méthodologie de calcul,
- amélioration de la prise en compte des états de surface.

Les Thèses ONERA UPS

- [1] *Prise en compte des aspects diélectriques et de la rugosité dans le couplage des méthodes asymptotiques et du lancer de rayons.* S. Laybros. Thèse de doctorat de l'UPS (Université Paul Sabatier à Toulouse), spécialité Microondes. En cours 2001 - 2004.
- [2] *Etude des diffusions de surface et de volume par une surface rugueuse diélectrique. Calcul des interactions entre un objet 3 D et une surface naturelle.* F. Koudogbo. Thèse de doctorat de l'UPS, spécialité Microondes, soutenue en octobre 2002.
- [3] *Couplage des méthodes asymptotiques et de la technique du lancer de rayons pour le calcul du champ rayonné par des objets métalliques 3 D complexes.* G. Ramière. Thèse de doctorat de l'UPS, spécialité Microondes, soutenue en septembre 2000.

Références

- [1] *Calcul et caractérisation du champ rayonné en zone très proche par une surface équiphasée.* S. Laybros, P.F. Combes, H.J. Mametsa. Journées Internationales de Nice sur les antennes, Nice, novembre 2002. Prix JINA 2002
- [2] *Apport de la simulation aux études de radar pour applications en vision renforcée.* A. Berges, H.J. Mametsa, T. Cathala, F. Rouas, B. Lamiscarre. REE, Revue de la Société de l'Electricité, de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication, n° 4, avril 2002.
- [3] *Calcul de la diffusion par une surface rugueuse naturelle ou urbaine.* F. Koudogbo, P.F. Combes, H.J. Mametsa. JCMM 2002, 7^{èmes} journées de caractérisation microondes, Toulouse, 20-22 mars 2002.
- [4] *Imaging radar simulation in realistic environment using shooting and bouncing rays technique.* H.J. Mametsa, F. Rouas, A. Berges, J. Latger. 8th International Symposium on Remote Sensing of SPIE, Toulouse, 17-21 September 2001.
- [5] *Realistic radar simulation package applied to multisensor scenarios.* H.J. Mametsa, T. Cathala, A. Berges, J. Latger. 3rd ONERA-DLR Aerospace Symposium, 20-22, Paris, June 2001.

- [6] *Electromagnétisme et lancer de rayons pour le calcul du champ rayonné par des objets métalliques 3 D complexes.* G. Ramière, P.F. Combes, H.J. Mametsa. 12^{èmes} Journées nationales des microondes. Poitiers, 16-18 mai 2001.
- [7] *Couplage du lancer de rayons et des interactions arête-surface pour une analyse 3 D rapide de cibles complexes.* G. Ramière, P.F. Combes, H.J. Mametsa, P. Pitot. Journal Annales des télécommunications, tome 55, n° 11-12, pp. 633-643, décembre 2000
- [8] *Airborne imaging radar simulation in realistic Environment using shooting and bouncing ray technique.* H.J. Mametsa, T. Cathala, A. Bergès, J. Latger. CEOS 99, Committee on Earth Observation Satellites, SAR Working Group, Toulouse, 26-29 Oct. 99.
- [9] *Shooting ray and multiple interaction coupling for complex 3 D radar cross section predictions.* G. Ramière, P. Pitot, P.F. Combes, H.J. Mametsa. 5th International Conference on Radar Systems, Brest, May 99.

Les auteurs