

# AFSCET

## Res-Systemica

Revue Française de Systémique

Fondée par Evelyne Andreewsky

Volume 20, printemps 2020

**Modélisation systémique  
de systèmes cyber-physiques**

**Res-Systemica, volume 20, article 04**

De l'usage des outils de simulation en CEM

Olivier Maurice, Gérard Labrosse, Christophe Castanié

14 pages

contribution reçue le 14 mars 2020



Creative Commons

---

# DE L'USAGE DES OUTILS DE SIMULATION EN CEM

---

A PREPRINT

**Olivier MAURICE**  
ARIANE Group  
olivier.maurice@ariane.group

**Gérard LABROSSE**  
Tchebyflow  
gerard.labrosse@tchebyflow.eu

**Christophe CASTANIÉ**  
ARIANE Group  
christophe.castanié@ariane.group

February 19, 2020

## ABSTRACT

Avec les progrès et la large diffusion des outils de simulation résolvant les équations de Maxwell avec maillages, leur emploi devient de plus en plus systématique en même temps qu'il est source de déceptions et d'incompréhensions. Pourtant ces outils offrent la capacité de réaliser des expérimentations virtuelles, et pour peu que leurs limites soient bien comprises, et leur emploi pertinent, ils donnent un accès inespéré à des moyens virtuels de validation dans les choix de conception avant réalisation d'un premier prototype concret. Nous discutons dans cet article des conditions de ce qui nous semble être du bon emploi de ces codes de calculs en rappelant certains points fondamentaux et en proposant une méthodologie d'utilisation qui se combine à d'autres approches amonts qui vont permettre d'arriver à une conviction de qualité des résultats et une confiance dans l'engagement de conception.

**Keywords** CEM · modélisation · simulation 3D · Chebyshev

## 1 Ordres faibles

Les outils numériques qui maillent l'espace discrétisent l'espace et le temps pour résoudre les équations de Maxwell sous formes différentielles. Le résultat des opérations effectuées par le code est l'intégration de ces équations différentielles dont on cherche à assurer une convergence vers une solution analytique connue avec plus ou moins de précision et d'efforts (nous reviendrons sur ce point). Le code de fait reproduit les processus microscopique de la physique de l'électromagnétisme. L'intégration des phénomènes discrets microscopiques doit tendre vers la solution continue macroscopique. Ainsi un logiciel (sous entendu utilisant un maillage) résolvant les équations de Maxwell est dit "rigoureux" s'ils résout le système complet de ces équations sans approximations ni comportements aux limites. Pour autant cela ne garanti en rien que la convergence vers la primitive théorique est assurée.

Nous pouvons prendre un exemple simple pour illustrer ce problème. Considérons la propagation d'une onde guidée dans des lignes droites de diélectrique vide et d'impédance itérative constante et unique. Peu importe la méthode numérique employée, par contre une première ligne est partagée en  $N_1$  cellules et une seconde ligne en  $N_2$  cellules. Si la première ligne est de longueur  $L_1$  et la seconde de longueur  $L_2$ , un pas de temps est choisi sur la base de la première ligne :

$$dt = \frac{L_1}{cN_1} \quad (1)$$

( $c$  est la célérité). Le temps de propagation d'un bout à l'autre de la seconde ligne est alors donné par :  $t_2 = N_2 dt$  soit :

$$t_2 = N_2 \frac{L_1}{cN_1} \Rightarrow \frac{L_2}{L_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2)$$

Il est clair que dans tous les cas où les rapports des longueurs sont réels et non entiers, cette égalité est inaccessible strictement. Ainsi toute interaction mettant en jeu les deux lignes simultanément seront faussées par un défaut de phase lié à la discrétisation spatiale et au pas de temps commun, même si cette erreur est minimisée.

Considérons une seconde illustration sur le problème de l'intégration des équations de Maxwell. Nous regardons la dispersion du champ dans un milieu conducteur auquel on imprime un champ constant. Les équations de Maxwell se réduisent au couple :

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial x} = -pB \\ \frac{\partial B}{\partial x} = \mu\sigma E \end{cases} \quad (3)$$

( $p$  est l'opérateur de Laplace) d'où nous déduisons après intégration  $E = \exp(-p\mu\sigma x^2)$ , soit une distance de pénétration du champ engendrant une impédance résistive normalisée définie par :

$$R = \frac{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}{\sigma} \quad (4)$$

L'intégration des équations de Maxwell conduit déjà sur cet exemple simple à une expression comportant un terme en racine de la fréquence  $f$ . Pour un outil numérique assurer la convergence vers cette fonction avec un balayage en fréquence n'est évidemment pas trivial. Et cet exemple est simple ! Que penser de l'intégration d'un problème comportant des milliers d'inconnues primaires (avant maillage). Que pouvons-nous supposer des formes des équations le représentant si nous n'avons pas fait l'effort de les élaborer ? Comment pouvons-nous vérifier la convergence entre théorie et application numérique sans même connaître les formes de cette première ? Il semble bien indispensable de fournir un travail préalable au moins d'établissement de ce système d'équations.

Une astuce utilisée par les codes pour pallier dans certains cas à ce problème d'intégration est d'accepter cette incapacité et de la compenser par l'utilisation de macro-modèles locaux qui vont pré-intégrer les équations. L'utilisation d'impédance de surface suit cette stratégie. Il n'en reste pas moins que tous les cas possibles sont inenvisageables et inimaginables !

## 2 Le retour de l'expérience virtuelle parfaite

Imaginons même que nous disposions d'un code de calcul parfait avec maillage : il simule l'ensemble d'un système avec perfection et dans des temps courts. Cet outil permettrait de réaliser des expériences virtuelles parfaites, avec cet avantage par rapport à l'expérience réelle de pouvoir positionner des sondes où l'on veut. Pour autant quelle serait la plus-value pour l'ingénieur en CEM ? S'il n'a pas de modèles pour comprendre et théoriser le fonctionnement du système qu'il étudie, il devra reconstruire cette connaissance par de nombreuses expériences et le risque d'interprétation intuitive complètement erronée. C'est bien ce que nous observons : de nombreux cas de résultats douteux ont donné lieu à des interrogations et des développements pour essayer de confirmer leur pertinence par comparaisons relatives. Comme l'exploitant ne dispose souvent pas d'éléments de comparaison, il ne peut que se raccrocher au calcul effectué et essayer de le confirmer par simple références aux attendus intuitifs, ce qui est clairement insuffisant pour garantir et s'engager avec robustesse.

Nous comprenons que la discussion n'est pas dépendante des défauts ou qualités des logiciels, elle pose dans tous les cas la capacité d'interpréter rationnellement et scientifiquement les résultats et pouvoir les comparer à des calculs analytiques ou autres pour rechercher une convergence des valeurs.

## 3 Le concept de garantie

Une expérience quelle soit réelle ou virtuelle ne démontre rien. Seule les recoupements entre expériences et théories permettent d'asseoir l'interprétation des résultats sur une base d'équations qui constitue le problème bien posé. Peut-on prouver qu'un résultat est correct ? Nous pouvons démontrer des convergences, pour autant est-ce suffisant ? En fait nous n'avons pas le choix. Soit la convergence est atteinte entre les expériences et les calculs soit non. Si elle n'est pas atteinte, il faut soit revoir la simulation, soit remettre en cause les calculs et les modèles associés. Dans le cas de la CEM cependant, les modèles sont pour la plupart validés depuis longtemps, il s'agit donc plus souvent de réviser les simulations réalisées.

Le challenge pour les systèmes d'aujourd'hui est à la fois de garantir une fiabilité accrue tout en optimisant la conception : réduire les coûts, poids, contrôles, etc. La simulation ne doit donc pas tant permettre d'obtenir un résultat identique à l'expérience réelle mais bien permettre d'évaluer l'enveloppe non margée donnant les maxima ou minima

non dépassable si l'on effectuait un très grand nombre d'expériences. Dans ce cas la simulation aura donnée toute l'information nécessaire en conception et aura apporté toute sa plus-value.

Dans cette valorisation il ne faut surtout pas négliger l'apport de la théorie. Sans même faire une application numérique, l'utilisation de formalisme comme l'analyse tensorielle des réseaux permet de poser le système d'équations associé au problème. Il devient alors possible d'une part de confirmer que le code de calcul maillé est à même de résoudre ces équations, et d'autre part si la solution numérique suit les comportements prédits par la théorie. La garantie est donc atteinte par d'une part le respect du comportement théorique attendu et la confrontation à une seconde application numérique de type différent où les résultats convergent. Trois étapes vont donc constituer un embryon de méthode scientifique pour l'usage des outils numériques maillés :

- élaborer le système d'équation associé au problème ;
- réaliser une résolution de ce système (qui peut être par partie) ;
- réaliser la simulation du problème avec les choix les plus pertinents de maillages, schémas numériques et une vérification de convergence.

#### 4 Le besoin d'une seconde référence

Un autre argument qui peut sembler évident et le besoin de conforter le résultat de simulation par un second résultat obtenu dans des conditions différentes. Nous n'attendons pas de cette confrontation des courbes qui se recoupent, ce qui n'a pour seul intérêt que de valider des modèles, mais bien des confirmations d'ordres de grandeurs et des profils temporels similaires. Obtenons-nous des sinusoides amorties de pseudo-fréquences proches ? D'amortissements similaires ? Ou attend-on un comportement intégrateur ? etc.

La recherche d'enveloppe viendra lors de l'usage de la simulation finale, optimisée et au plus complète où l'on pourra limiter à deux passes, ayant déterminé lors de l'analyse théorique les éléments influents et les intervalles d'appartenances. Tant les applications numériques avec des outils rapides que ces deux simulations devront mener aux mêmes enveloppes qui conduiront aux calculs de risques de défaillances.

#### 5 Une nouvelle génération d'outils numériques

Dans leur immense majorité, les outils numériques actuels sont basés sur des méthodes d'approximation construites pour résoudre des problèmes complexes sur les premiers ordinateurs, ceux des années 60. Les machines d'aujourd'hui permettent de faire infiniment mieux. Car elles permettent enfin d'exploiter la Théorie de l'Approximation, datant du 19<sup>ème</sup> siècle, dont les bases mathématiques garantissent scientifiquement une série d'avantages d'une valeur inestimable par rapport aux incertitudes qui accompagnent les résultats des outils actuels. Cette technique peut être employée pour des applications numériques des systèmes d'équations précédemment construits sur des bases analytiques [1]. Citons brièvement ces avantages.

- La discrétisation de tout problème continu intégral-différentiel est 100% fidèle à ce problème;
- Le solveur numérique respecte le caractère global de toute solution de problème intégral-différentiel;
- La solution numérique est scientifiquement garantie de converger exponentiellement, par raffinement du maillage, vers la solution continue, lequel maillage est de structure unique, de type Gauss;
- La variable "temps" peut se traiter comme n'importe quelle autre variable, et l'intégration temporelle peut se faire sans "marcher dans le temps", en tenant compte pour chaque temps de ce qui se passe avant et après (traitement global);
- La cohérence interne de cette Théorie permet de (1) évaluer l'erreur commise sur la solution numérique (alors que la solution n'est pas connue), (2) déceler la présence de singularité(s) ou d'incompatibilité(s) dans le modèle mathématique.

La fiabilité physique de ces résultats numériques est garantie. Aucun biais n'est introduit. Et tout écart significatif entre les résultats numériques et la réalité doit s'imputer au modèle mathématique de départ.

#### 6 Le problème posé par la dimension des grands systèmes

La complexité apparaît aujourd'hui à presque toutes les échelles. Même la domotique intègre de plus en plus d'électronique. Il est impensable de gérer un système dans son ensemble. Nous arriverions à des systèmes d'une telle

dimension que l'esprit humain serait incapable de les interpréter ou de les exploiter. Comment procéder dès lors ? Une méthode pour la CEM comporte des étapes clés conduites sous la rigueur de l'analyse théorique :

- la ségrégation analysée dans la diversité des situations permet de créer des sous-système d'étude ;
- les sous-ensembles reliés par des échanges de signaux par câbles peuvent être étudiés séparément, en reportant en sources les signaux transmis, incluant les couplages avec l'environnement ou les voisins. Chaque liaison câblée constitue une frontière séparable potentielle ;
- il en va de même des liaisons radio en champ lointain qui permettent une séparation des sous-ensembles
- nous pouvons exploiter les invariants comme par exemple les sources exogènes, indépendantes des propriétés intrinsèques du système étudié.

Prenons une illustration simple. Soit un premier circuit défini par l'équation  $e_1 = aJ_0^1$  et un second circuit défini par l'équation  $e_2 = bJ_0^2$ . Les indices "0" pointant ces conditions de circuits séparés. Nous couplons ces deux circuits par l'intermédiaire d'une interaction  $\alpha$ . Le système d'équation du problème couplé est alors donné par :

$$\begin{cases} e_1 = aJ^1 - \alpha J^2 \\ e_2 = -\alpha J^1 + bJ^2 \end{cases} \quad (5)$$

$e_1$  et  $e_2$  étant les invariants, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} aJ_0^1 = aJ^1 - \alpha J^2 \\ bJ_0^2 = -\alpha J^1 + bJ^2 \end{cases} \quad (6)$$

En définissant  $\Delta = (1 - \alpha^2/ab)$  nous obtenons :

$$\begin{cases} J^1 = \frac{1}{\Delta} (J_0^1 + \frac{\alpha}{a} J_0^2) \\ J^2 = \frac{1}{\Delta} (\frac{\alpha}{b} J_0^1 + J_0^2) \end{cases} \quad (7)$$

Nous comprenons que les valeurs des courants du système couplé sont obtenues à partir des courants des systèmes séparés.

## 7 Proposition d'une méthodologie basée calculs & simulations

Pour les projets nécessitant une démonstration de robustesse et de fiabilité en CEM avec une capacité de garantie des résultats, il est nécessaire de mettre en place une méthodologie stricte qui se décline en 7 étapes :

1. recensement des composants du système ;
2. travail de découpage système & établissement des matrices d'interactions ;
3. établissement de la partition d'activités ;
4. établissement du tenseur fondamental de la variété associée au système ;
5. vérification des solutions en régimes statiques, dynamiques limites et transitoires ;
6. applications numériques par des outils adaptés pour avoir des valeurs guides ;
7. choix des méthodes numériques maillées adaptées et réalisation de la simulation numérique ;
8. calcul des risques de défaillances.

Pour les projets de moindre envergure, cette méthodologie reste complètement applicable mais avec des actions qui pourront être réalisées plus à la volée et moins formalisées.

La méthodologie peut s'appuyer avec intérêt sur l'approche *BISE*[2] : "bio inspired system engineering". L'intérêt de cette approche d'ingénierie système est de proposer un découpage du système qui aide à sa compréhension profonde et qui est en accord avec les besoins de la CEM. Le système est ainsi découpé en ses :

- composantes d'énergie ;
- composantes de communication & traitement ;

- composants pour la perception ;
- composants pour la motricité.

En identifiant chacun de ces réseaux, les opérations de ségrégation, modèles équivalents, famille de signaux, etc., sont grandement facilitées.

## 8 Conclusion

Les outils numériques constituent aujourd'hui une capacité à valider une conception d'un système vis à vis de la CEM. Mais ces mêmes systèmes étant de complexité croissante alors que les électroniques progressent à une vitesse qui dépasse l'imagination et que de nouveaux matériaux électronisés apparaissent, les outils maillés sont dépassés et doivent travailler à rattraper ces évolutions qui induisent de nouveaux modèles et schémas numériques. Néanmoins leur bon usage permet de disposer d'une confirmation supplémentaire, d'autant si ce travail est réduit au strict nécessaire, préalablement complété d'une analyse théorique conduite sous l'analyse tensorielle des réseaux et de techniques numériques sans maillage (spatial ou temporel) permettant de premières applications numériques sans conditions de types de fonctions.

Une méthodologie passant par ces trois étapes de théorisation, calculs et simulation massive permet de maîtriser la conception et d'avancer avec sérénité vers la fabrication du premier prototype.

## References

- [1] W.GUO, G.LABROSSE, R.NARAYANAN, *The application of the Chebyshev-Spectral Method in Transport Phenomena*. Lecture Notes in Computational and Applied Mechanics, vol.68, Springer-Verlag, Berlin. Heideberg, 2013.
- [2] Olivier Maurice. TACS 4 BISE & SUEAN: Birth of concepts. 2018. hal01799601