

Simulation conjointe thermique-CEM des harnais électriques dans le cadre de l'avion « plus électrique »

Florian MAHIDDINI^{1a*}, Philippe REULET^{1b}, David DONJAT^{1b}, Michael RIDEL^{1a}, Pierre MILLAN^{1b}

¹ ONERA – UFTMiP – 2 Avenue Edouard Belin, 31000 TOULOUSE – Florian.Mahiddini@onera.fr

^a Département Électromagnétisme et Radar

^b Département Modèles pour l'Aérodynamique et l'Énergétique

Résumé - Le déploiement d'architectures toujours plus électriques au sein des aéronefs nécessite de maîtriser encore plus précisément les contraintes liées aux problèmes de thermique ainsi que de compatibilité électromagnétique s'appliquant aux faisceaux de câbles. Dans ce papier, le calcul de l'échauffement d'un toron est réalisé parallèlement à celui de la détermination des paramètres primaires RLCG d'une ligne de transmission, le formalisme des équations intégrales permettant de conduire ces deux calculs au sein d'une même procédure.

Nomenclature

S	Source de chaleur [W/m^3]	CEM	Compatibilité Électromagnétique
ρ	Masse volumique [kg/m^3]	E	Champ électrique [V/m]
C_p	Capacité calorifique [$J/(kg.K)$]	H	Champ magnétique [A/m]
h	Coefficient d'échange [$(W/(m^2.K))$]	E_T	Champ électrique transverse [V/m]
λ	Conductivité thermique [$W/(m.K)$]	H_T	Champ magnétique transverse [A/m]

1. Contexte

Bien que la part d'énergie électrique utilisée à bord des aéronefs n'ait cessé d'augmenter depuis les débuts de l'industrie aéronautique, on note ces deux dernières décennies un très net accroissement des puissances embarquées. Cette tendance qui s'explique en partie par l'amélioration du confort à bord des appareils est la conséquence directe d'une démarche plus ambitieuse consistant au remplacement de systèmes hydrauliques et/ou pneumatiques par des systèmes électromécaniques tout aussi fiables et ce, pour un nombre croissant de fonctions essentielles de vol (freinage, commande de vol, taxiing au sol). L'intérêt pour les industriels et les exploitants est que ces nouveaux moyens présentent des gains en masse substantiels tout en offrant une réduction sensible des coûts de maintenance. Cependant, de part la densification du réseau de câblage, de nombreuses contraintes d'intégration compliquent le développement et la mise sur le marché d'architectures massivement électriques (*Fig. 1*). Il est donc nécessaire de disposer d'outils permettant de maîtriser encore plus précisément ces dernières par une meilleure compréhension des phénomènes physiques sous-jacents.

Une analyse rapide montre que l'intégrité globale du système est conditionnée par trois difficultés majeures étroitement liées entre elles, à savoir : les problématiques électriques (pertes en ligne/stabilité réseau), les exigences en terme de compatibilité électromagnétique (émissions conduites, rayonnées) ainsi que de thermique (échauffement des câbles). Pourtant, actuellement, ces contraintes sont considérées individuellement et non pas de manière globale ce qui laisse supposer que l'on puisse négliger des optimisations conduisant à de meilleures performances du câblage, tant du point de vue fonctionnel que de son poids.

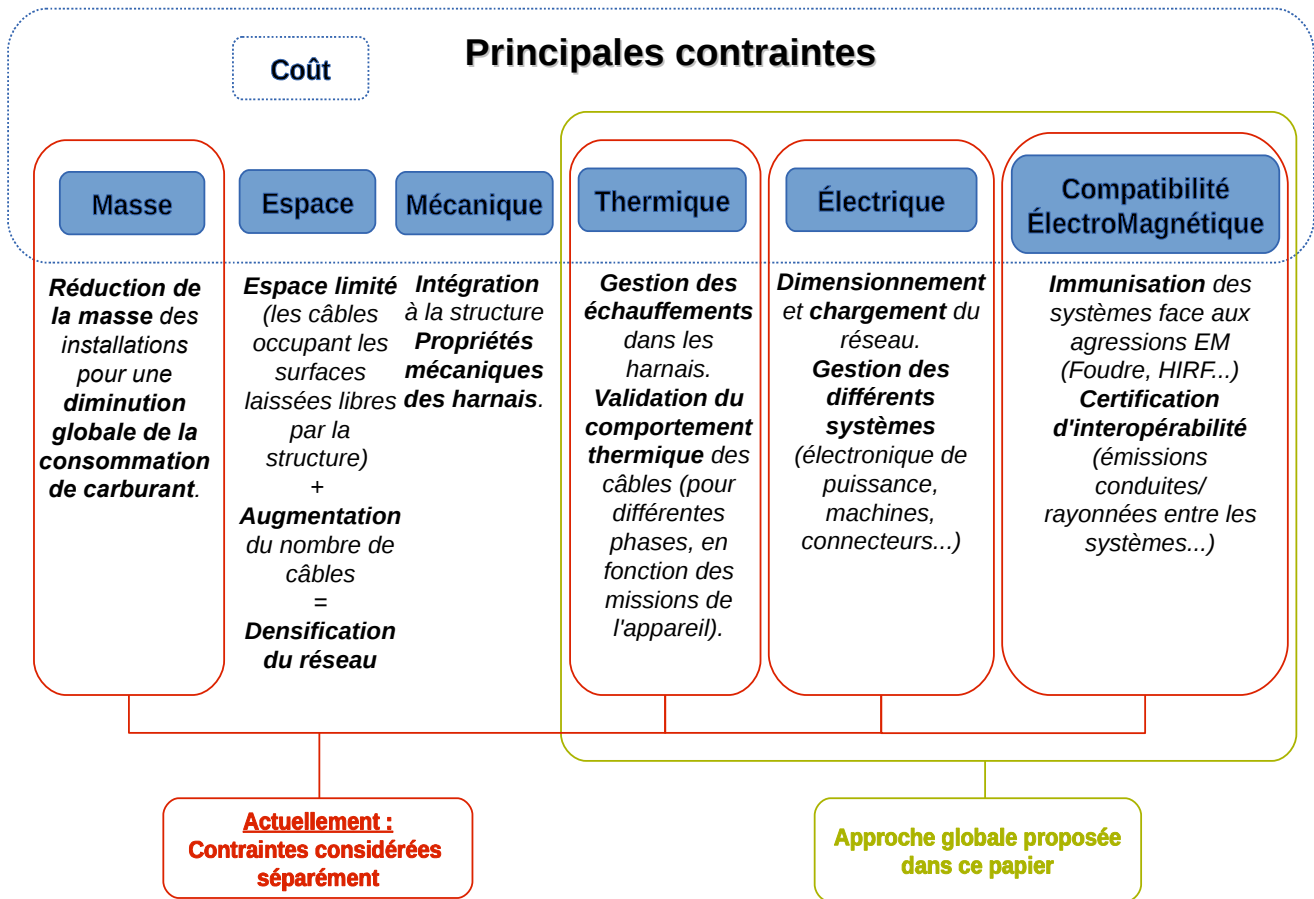


Fig. 1: Principales contraintes s'appliquant aux harnais de câbles

Dans ce papier, nous décrivons la mise en œuvre d'une telle approche permettant de réunir, au sein d'un même outil de calcul, simulations thermiques et CEM de torons de câbles. A cet effet, nous présenterons dans un premier temps les modèles et outils développés à l'ONERA puis nous appliquerons notre approche à une géométrie complexe de toron.

2. Étude Thermique

La simulation thermique a pour objectif la prédiction de l'échauffement de harnais de câbles à partir de la représentation géométrique et topologique du réseau électrique embarqué. Bien que de nombreux abaques existent, ces derniers se révèlent incapables de fournir des résultats précis dans de nombreux cas d'application concrets, conduisant ainsi à une surévaluation des flux de chaleur calculés et, par voie de conséquence, au surdimensionnement systématique des câbles à déployer [1]. La stratégie suivie a donc été celle d'une résolution directe de l'équation de la chaleur, dont l'expression est donnée par :

$$\Delta(\lambda \cdot T) + S = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Après une première phase d'étude paramétrique, l'équation (1) sera réécrite, en condition stationnaire, sous sa forme intégrale afin de permettre un couplage aisé aux équations des lignes de transmission utilisées en CEM, ce dernier point constituant l'originalité de ce travail.

Étude Préliminaire

Pour appréhender au mieux les phénomènes physiques relatifs à l'échauffement des câbles électriques, la première partie de notre étude s'est attachée à déterminer les paramètres ayant une influence significative sur leur montée en température. Le câble coaxial, en tant qu'exemple le plus élémentaire de ligne de transmission, a servi de base à cette étude paramétrique. A partir d'éléments relevés dans la littérature, nous avons adapté une méthode de type Volumes Finis de [2] et [3] pour la résolution de (1) en deux dimensions. L'hypothèse faite sur les conditions aux limites étant la convection en espace libre, les corrélations ont été tirées de [1]. La partie radiative du transfert de chaleur vers le milieu ambiant a été linéarisée puis intégrée au coefficient global de transfert, noté h . Ces premières simulations ont permis de souligner la forte dépendance des transferts thermiques aux conditions environnementales extérieures représentées par ce coefficient h . L'application dissymétrique des conditions aux limites en différents points de la frontière vise à reproduire certains effets d'installation (écoulement bloqué à proximité d'une paroi par exemple). On montre que ces effets ont eux aussi un impact significatif sur la montée en température à chargement en courant identique (Fig. 2).

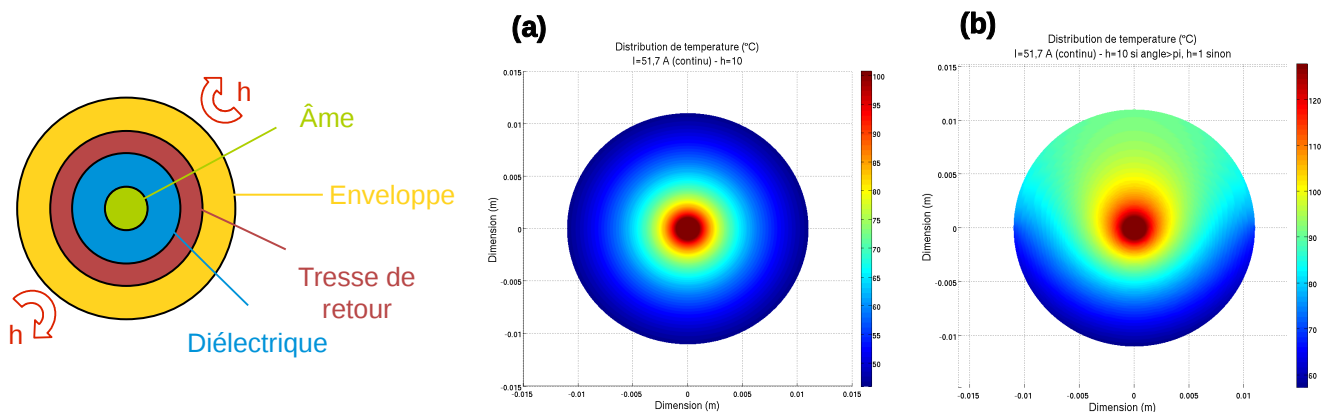


Fig. 2: Simulation de l'échauffement d'un câble coaxial (volumes finis) (a) : Conditions aux limites identiques en chacun des points de la surface (b) : Conditions aux limites dissymétriques

Ces corrélations sont toutefois difficilement accessibles par calcul ou mesure et dépendent fortement des conditions d'installation du câblage. Afin de pallier ces difficultés, une étude expérimentale est prévue dans le courant de l'année 2016 avec pour objectifs principaux d'une part la validation des codes de calcul développés et, d'autre part, la formation d'une base de référence pour des cas d'applications d'intérêt CEM (câbles en espace libre, au dessus d'un plan de masse ou placés dans une goulotte).

Expression intégrale de l'équation de la chaleur

La réécriture de l'équation de la chaleur (1) sous forme d'une équation intégrale est présentée en (Fig. 3). Après application des conditions aux limites de type Robin pour la prise en compte des phénomènes de convection et de rayonnement, le système d'équation obtenu est résolu selon la méthode des éléments de frontières constants comme décrit dans [4]. Dans ce formalisme, l'équation est formée par la réunification des représentations intégrales de chacun des sous-domaines homogènes. La température est ensuite calculée sur les différentes frontières et une opération de post-traitement est nécessaire pour accéder aux températures à l'intérieur des différents domaines.

Le code thermique développé sur la base de ces équations intégrales a fait l'objet d'une validation numérique à l'aide d'un code éléments finis « commercial ».

Contribution volumique

Dans Ω_i

$\left(\lambda_i, \frac{\lambda_i}{2}, \frac{\lambda_i + \lambda_j}{2}, 0 \right) \cdot T(x) = - \int_{\Omega = \sum \Omega_i} G \cdot S dV + \lambda \oint_{\Gamma_d} G \cdot \frac{\partial T}{\partial n} - T \cdot \frac{\partial G}{\partial n} dS$

Sur Γ_c Sur Γ_d

Contribution surfacique des frontières de discontinuités

Contribution surfacique de la frontière du domaine

Fig. 3: Représentation intégrale de l'équation de la chaleur

3. Étude CEM

La multiplication des sources d'émissions électromagnétiques, intentionnelles ou non, ainsi que l'élévation des fréquences de travail des systèmes électroniques peuvent être à l'origine de dysfonctionnements critiques ou de sévères incompatibilités inter-équipements. Les câblages en tant qu'éléments conducteurs déployés sur de grandes distances sont susceptibles de se coupler au champ électromagnétique environnant (conduisant ainsi ces perturbations sur l'ensemble du réseau) ou bien de rayonner eux-mêmes de manière inopportune vers d'autres équipements. Dans le but d'empêcher que de tels phénomènes ne mettent en jeu la sécurité de l'appareil, une étude de la compatibilité électromagnétique (CEM) doit-être entreprise dès la phase amont de conception de l'architecture électrique.

Afin de limiter le recours aux moyens expérimentaux, l'ONERA continue d'améliorer sa suite logicielle de simulation *CRIPTE*, dont les objectifs sont de prédire et de quantifier la propagation des signaux et les phénomènes de couplage sur l'ensemble d'un réseau électrique embarqué (ou *EWIS : Electrical Wiring Interconnection System*). Le modèle théorique employé est celui des Lignes de Transmission Multiconducteurs dont les principes ont été couplés à ceux de la topologie électromagnétique [5]. A l'aide de cet outil, aujourd'hui mature pour des applications industrielles, l'analyse CEM se décompose en trois étapes majeures détaillées ci-après.

Description topologique du réseau

Le découpage topologique du réseau se fonde sur l'analyse des conditions d'installation des harnais. Ainsi chaque groupe de câble ayant des caractéristiques environnementales communes (plan de masse de référence, zone aéronef, distance entre harnais) sont placés au sein d'un même élément appelé « tube ». Les caractéristiques géométriques liées aux tubes permettent de définir une cross-section équivalente de chacune des branches de harnais. Les jonctions du réseau connectant les différents tubes sont représentés par des nœuds dans l'arbre topologique.

Actuellement les critères environnementaux définissant le réseau de tubes se basent sur des considérations purement électromagnétiques. Dans la démarche présentée dans ce papier, cette classification topologique intègre les paramètres thermiques de température et pression ambiante ayant une influence sur les transferts de chaleur au niveau du harnais.

Détermination des paramètres primaires RLCG de la ligne

La Théorie des Lignes de Transmission repose sur l'hypothèse que la propagation des ondes le long du câblage se fait suivant le mode transverse électromagnétique (TEM) ou plus

généralement quasi-TEM. Cette approximation, qui limite théoriquement l'application de ce formalisme à quelques centaines de MHz, se justifie par le fait que les dimensions transversales du câblage sont négligeables devant la longueur d'onde des signaux. Cela signifie que les champs électromagnétiques modélisés par cette approche sont transverses par rapport au vecteur de propagation, ce qui simplifie singulièrement leurs expressions, celles-ci dérivant directement des équations de Maxwell :

$$\begin{aligned} H_T &= \frac{1}{\eta} z \times E_T \\ \nabla_T \times E_T &= 0 \text{ et } \nabla_T \cdot E_T = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

La seconde série d'expression implique que E_T peut-être exprimé comme le gradient d'un potentiel scalaire Φ dont l'expression est solution de l'équation de Laplace du problème électrostatique équivalent suivant :

$$\Delta_T(\epsilon\Phi) = 0 \quad (3)$$

Les phénomènes de propagation et de couplage d'une ligne de transmission multiconducteurs sont liés aux paramètres électriques primaire de la ligne (résistance R , inductance L , capacité C et conductance G). La détermination de ces paramètres se fait par la résolution de l'équation de Laplace (3). On trouve l'expression du potentiel scalaire par Méthode des Moments à partir d'une représentation intégrale de ce même potentiel. Le schéma électrique d'une portion infinitésimale de ligne étant donnée en (*Fig.4a*), les équations de propagation sont une généralisation de l'équation dite « des télégraphistes » :

$$\frac{\partial(V(z))}{\partial z} = -[Z] \cdot (I(z)) + (V^s(z)) \text{ et } \frac{\partial(I(z))}{\partial z} = -[Y] \cdot (V(z)) + (I^s(z)) \quad (4)$$

Résolution de l'équation du réseau

A partir de la description topologique du réseau, l'équation de Baum-Liu-Tesche (BLT) décrit les phénomènes de propagation sur les lignes ainsi que la dispersion au niveau de chacune des jonctions. En déterminant pour chaque jonction les ondes W transmises et réfléchies (*Fig.4b*), cette équation permet alors de déterminer les ondes parcourant l'ensemble de l'architecture et ainsi de remonter jusqu'aux grandeurs électriques tensions-courants sur chaque fil du réseau.

4. Stratégie de résolution commune

La détermination des paramètres primaires RLGC de la ligne implique la résolution de l'équation de Laplace (3), cas particulier de l'équation de POISSON sans second membre, mathématiquement identique à l'équation stationnaire de conduction de la chaleur (1).

En effet, température et champ électrostatique découlent de la même notion de potentiel. Ainsi, le calcul de l'échauffement spécifique des câbles peut totalement s'inscrire dans une stratégie de résolution commune consistant au partage d'un même outil numérique à partir d'une unique représentation topologique du réseau. Le couplage des phénomènes thermiques et électromagnétiques est alors totalement assuré par la connaissance de la nature des courants (intensité, fréquence), des propriétés thermophysiques des matériaux conducteurs et diélectriques et des échanges thermiques et électromagnétiques avec l'environnement.

Les équations étant exprimées dans leur formulation intégrale, certains termes, notamment ceux liés à la fonction de Green, sont communs aux deux procédures de calcul et sont fixés

par la géométrie. Ces blocs matriciels sont déterminés une unique fois et la différentiation entre les deux résultats finaux que sont les transferts de chaleur et le champ électromagnétique se fait à l'aide d'un jeu de coefficients propre aux deux physiques. Cette procédure de calcul pourra être réitérée jusqu'à la convergence des résultats vers une solution optimale en terme de masse (par la réduction systématique des gauges conductrices) et de transfert de chaleur vers le milieu ambiant (géométrie des harnais) comme exposé dans [1].

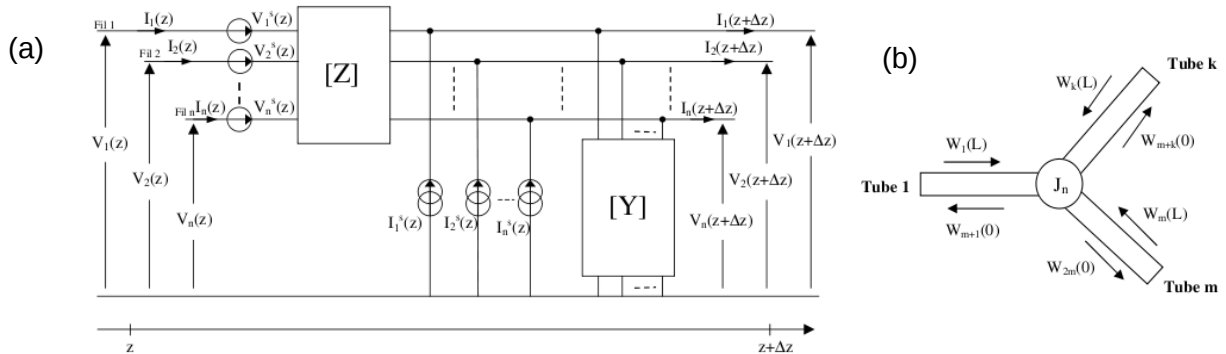


Fig. 4: (a) Schéma électrique équivalent d'une ligne de transmission multiconducteurs. (b) Ondes transmises et réfléchies par les jonctions du réseau topologique

La stratégie mise en œuvre est résumée en (Fig.5). Pour une même cross-section un calcul thermique et électrostatique est conduit à partir des équations intégrales propres aux deux physiques. L'utilisation d'un outil de résolution numérique commun basé sur la Méthode des Moments autorise, comme évoqué précédemment, une réutilisation des blocs matriciels non liés aux conditions aux limites. Un couplage des équations, notamment par la prise en compte de la dépendance à la température de la résistance électrique, impose un bouclage entre les deux calculs. Cette procédure sera, lors de développements futurs, à la base d'un processus d'optimisation des transferts de chaleur au sein des harnais.

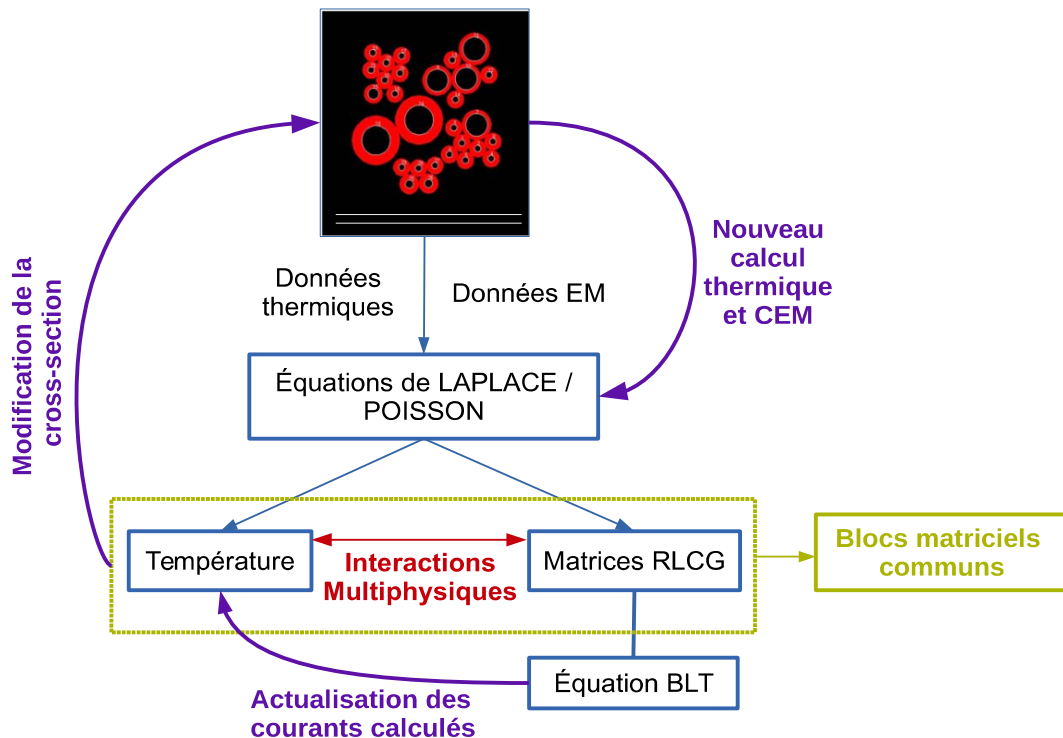


Fig. 5: Stratégie de résolution commune et boucle d'optimisation

5. Application : simulation conjointe thermique-CEM sur un toron de câbles complexe

Le cas d'application consiste en un toron de 11 câbles insérés dans une gaine diélectrique placé en espace libre. Afin de visualiser les courants induits par diaphonie, application clé des simulations CEM, seul trois câbles sont alimentés par des signaux TTL de fréquence 200 kHz, de rapport cyclique 0.75, et d'intensité efficace respective de 11, 8 et 33 ampères sur les câbles 2, 7 et 9 (fig. 7). Les câbles restants sont alors mis en court-circuit pour accentuer les couplages et les niveaux de courants induits dans ceux-ci. Les amplitudes des courants d'injection sont imposés bien au-delà des niveaux normalement admis et ce, dans le but de visualiser les effets thermiques causés par un surchargement de quelques lignes seulement sur l'ensemble du toron.

Dans un premier temps, la description topologique du réseau est assurée à l'aide du logiciel *CRIPTE*. Dans l'unique tube défini, les câbles non alimentés sont placés en court-circuit tandis que ceux alimentés sont reliés à des impédance de 1 Ohm à chacune de leur extrémité, avant liaison à un plan de masse parfaitement conducteur. Les injections de courant devant être réalisées dans le domaine fréquentiel, on fournit au logiciel la FFT des signaux d'injections (Fig. 6)

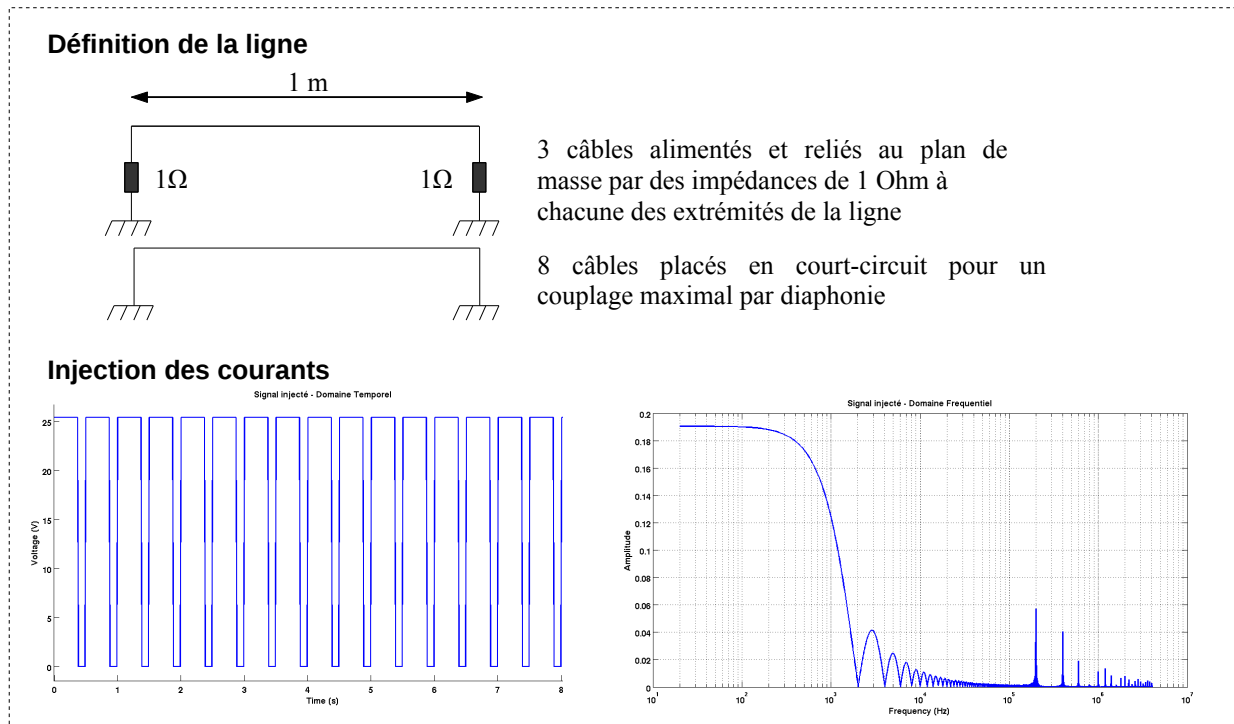


Fig. 6: Schéma de principe de la ligne d'étude et visualisation des signaux d'injection

Après la description topologique du réseau, la géométrie de la cross-section est générée à l'aide du code *CRIPTE* et de son outil intégré *ALEACAB*. Les principales caractéristiques physiques imposées sont les suivantes :

→ **Conductivité thermique** [W/(m.K)] : 401 (cuivre), 0.33 (diélectrique), 0.1 (gaine)
Température ambiante (°C) : 25 **Conductivité électrique** (S/m) : 59.6E+6 **Conditions aux limites** : convection/radiation en espace libre [1].

D'un point de vue purement thermique, les résultats présentent un comportement physique cohérent. La puissance dégagée par effet Joule étant proportionnelle à la section des conducteurs ainsi qu'au carré de l'intensité, le câble le plus chaud n'est pas celui d'intensité la

plus élevée. Les courants induits calculés par CRIPTE sont injectés comme source de chaleur dans le calcul thermique comme le montre les résultats finaux donnés en (Fig.7).

Résultats

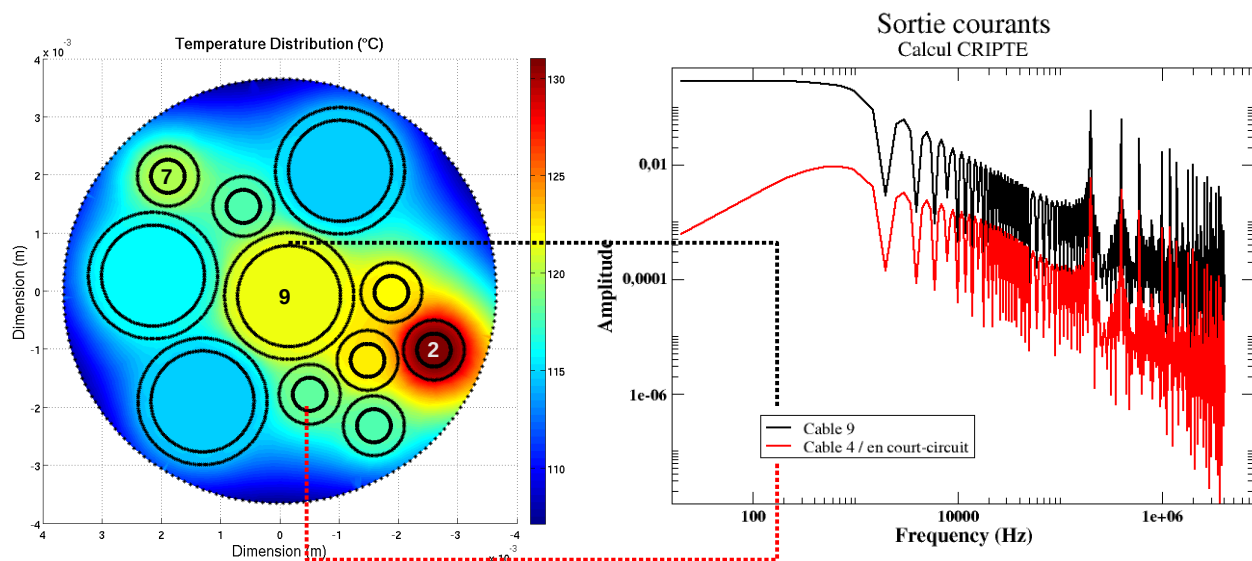


Fig. 7: Gauche → Champ de température calculé par équation intégrale. Droite → Courants calculés par le logiciel CRIPTE sur le câble 9 (injection) et 4 (en court-circuit)

Électromagnétiquement, les courants induits ont le comportement fréquentiel attendu et présentent, pour les fréquences de couplage multiples de 200 kHz, des amplitudes qui sont significatives sur le plan de la production de chaleur. Ces résultats illustrent de plus l'importance, lors de la conception des harnais, de s'assurer que tous les éléments seront capables de supporter non seulement leur échauffement propre mais aussi leur environnement thermique proche, comme cela est le cas pour ceux avoisinant le câble n°2.

6. Conclusions

La possibilité de conduire simulations thermiques et CEM au sein d'un même formalisme a été démontrée. Cette démarche originale doit se poursuivre avec l'intégration de l'outil de calcul thermique développé dans la suite logicielle CRIPTE de l'ONERA. En parallèle, une série d'expérimentations visant à valider les codes conçus va être menée prochainement. Enfin, sur la base de ces développements, une réflexion sur l'optimisation thermique et CEM sera conduite dans l'avenir.

Références

- [1] F. Loos, « *Joule Heating in Connecting Structures of Automotive Electric Devices – Modelling, Simulation and Optimization* », Universität des Bundeswehr München, 2014.
- [2] S.V. Patankar, « *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow* », Series in computational Method in mechanics and thermal sciences, McGraw-Hill, 1980.
- [3] A. Ilgevicus, « *Analytical and numerical analysis and simulation of heat transfer in electric conductors and fuses* », Universität des Bundeswehr München, 2004.
- [4] C.A Brebbia, « *The Boundary Element Method for Engineers* », Pentech Press, 1980.
- [5] J-P Parmantier, « *CRIPTE : Manuel d'utilisation, version 4.2* », rapport ONERA, 2006.