



## L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1 UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

### **MKME : Simulation d'un système complexe, de la cavité à l'électronique.**

### **MKME: Complex system simulation, from the cavity to the electronic.**

---

*Maxime BREANT*

\*GERAC, [maxime.breant@gerac.com](mailto:maxime.breant@gerac.com)

---

Mots-clefs : MKME, cavité, couplage, champ électromagnétique, ligne de transmission

Keywords : MKME, cavity, coupling, EM field, transmission line

---

#### **Résumé**

Cet article présente les conclusions d'une série d'expériences et de simulations dans le cadre d'une recherche de prédiction du comportement d'un équipement vis à vis d'une agression électromagnétique suite à une modification hardware de ce dernier. Toutes les simulations sont réalisées en utilisant la MKME (Méthode de Kron Modifiée pour l'Électromagnétisme) [1], le but étant de réduire les temps de calcul tout en conservant une bonne qualité de prédiction. Plusieurs étapes ont été nécessaires avant d'appliquer la méthode de calcul au système complexe. Une première série de mesures nous permet de conclure sur l'efficacité du modèle choisi pour simuler un système comprenant une cavité intégrant un câblage. Une seconde série de mesures permet de conclure sur le maintien des performances du système avant et suite à la modification.

#### **Introduction**

Les besoins industriels concernant la CEM sont aujourd'hui en pleine expansion et en pleine extension. Les matériels industriels récents intègrent tous des équipements électroniques. Ils deviennent alors des sources de perturbations et peuvent eux-mêmes être perturbés. Les matériels spécifiques, type militaire ou avionique, qui hier étaient durcis en fonction de leur environnement électromagnétique, doivent aujourd'hui répondre à ces contraintes CEM tout en cumulant des contraintes de coût et de fabrication. De fait, l'utilisation de matériel civil, moins onéreux et produit en grande série, devient une base de la conception pour ces grands systèmes. La maîtrise de la CEM du système peut être obtenue dans de nouvelles conditions, notamment par la simulation. En effet, la grande série doit permettre la création de modèle CEM des divers équipements.

La virtualisation de la CEM prend alors une part intégrante dans la conception d'un système. L'utilisation de la simulation des couplages des phénomènes électromagnétiques selon le design d'un équipement, les différents couplages entre les lignes de propagation selon les agressions de types impulsives ou dans le domaine fréquentiel ont été réalisés dans des cas d'études de ces phénomènes puis dans des premiers cas de prédiction. Mais tous les domaines existant sont traités séparément.

Les enjeux de la CEM d'aujourd'hui résident dans sa maîtrise au cours de la conception ou dans le cadre du réaménagement d'un matériel. Les modèles à construire doivent permettre de simuler la CEM depuis le design d'un système jusqu'aux composants électroniques. Il faut alors définir des modèles CEM généraux pour les cavités, les équipements, les câbles, les cartes et les composants ainsi que définir les liens et couplages qui interagissent entre les différents éléments et entre les différentes échelles du système. L'utilisation de la MKME permet cette étude, puisqu'il a été démontré depuis longtemps que l'écriture de n'importe quelle interaction entre système et plus largement entre tout domaine était envisageable par cette méthode de calcul.

Nous présentons dans cet article une manière différente d'appréhender le couplage d'un champ électromagnétique sur le design d'un système, puis le couplage résultant sur un des équipements de ce système et cela dans deux configurations afin de comprendre l'impact d'une modification d'un équipement sur les résultats CEM du système complexe.

**1. Design d'un système : Modélisation de cavité**

La simulation des cavités pose différentes questions depuis plusieurs années. Dans un cadre industriel, le choix de la simulation de ces cavités à l'aide de code électromagnétiques 3D s'est imposée. D'autres méthodes de simulation ont cependant été développées, notamment les méthodes de simulation par circuit électrique, que nous pouvons retrouver, par exemple, dans les travaux de Badoual [2] ou de Robinson [3].

Les cavités sont simulées selon cette seconde méthode, chaque fréquence de résonance de la cavité est considérée comme un circuit résonateur particulier couplé avec le signal perturbateur selon le type d'excitateur : antenne, fente ou ligne de transmission etc.

La méthode de Kron permet de créer des couplages en énergie via les inductances des circuits résonants, comme si un transformateur avec un port d'entrée possédait un nombre n de sortie. Le même type de connexion est ensuite réalisé entre le récepteur et la cavité. Ces différents couplages sont représentés en figure 1.

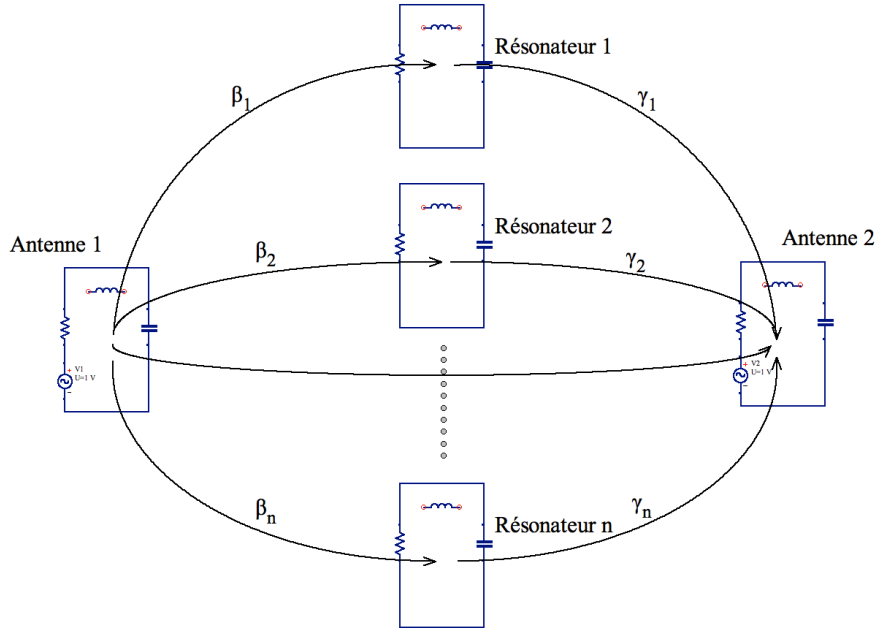


Figure 1 : Couplage entre deux antennes dans une cavité

Les antennes (excitateurs) d'émission et de réception sont ici représentées comme des circuits résonateurs. Il s'agit alors d'écrire les expressions du couplage (ici noté  $\beta$  à l'émission ou  $\gamma$  à la réception) en fonction de l'élément d'émission et de réception.

Dans le cas des antennes, les expressions de couplage doivent comprendre deux informations. D'une part le coefficient de couplage entre les éléments électriques Eq.1 et d'autre part les pertes liées à la position de l'antenne dans la cavité Eq. 2 où m et n correspondent aux modes de la cavité et a et b à ses dimensions.

$$\beta_1 = \sqrt{L_{antenne} L_{résonateur}} \quad \text{Équation 1}$$

$$\beta_2 = \sin\left(\frac{m\pi x_{ant}}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y_{ant}}{b}\right) \quad \text{Équation 2}$$

Le facteur de couplage  $\beta_1$  est pondéré par le coefficient lié au design  $\beta_2$ .

Des comparaisons entre simulations et mesures ont été réalisées pour des montages dans une cavité de petite dimension : des mesures d'impédance d'entrée (l'excitateur et le récepteur sont les mêmes dans la cavité) et des mesures du S21 (l'excitateur et le récepteur sont deux antennes placées dans la cavité).

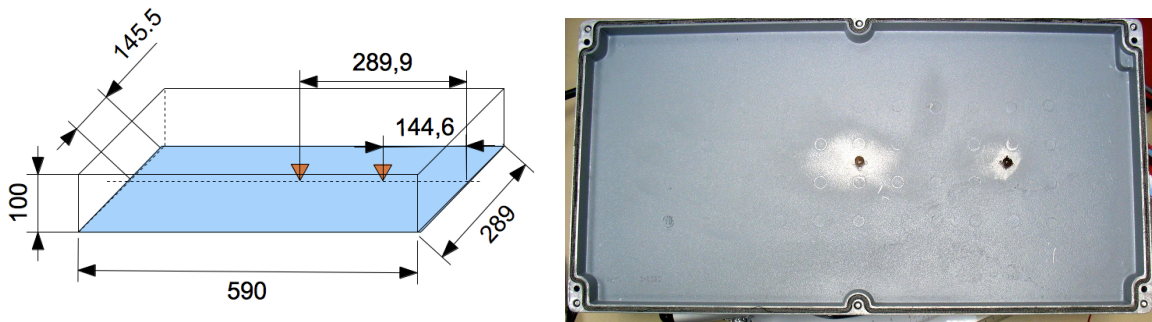


Figure 2 : Disposition des antennes dans la cavité – les dimensions sont en mm

La mesure de l'impédance d'entrée est réalisée sur l'antenne située au milieu du couvercle de la cavité.

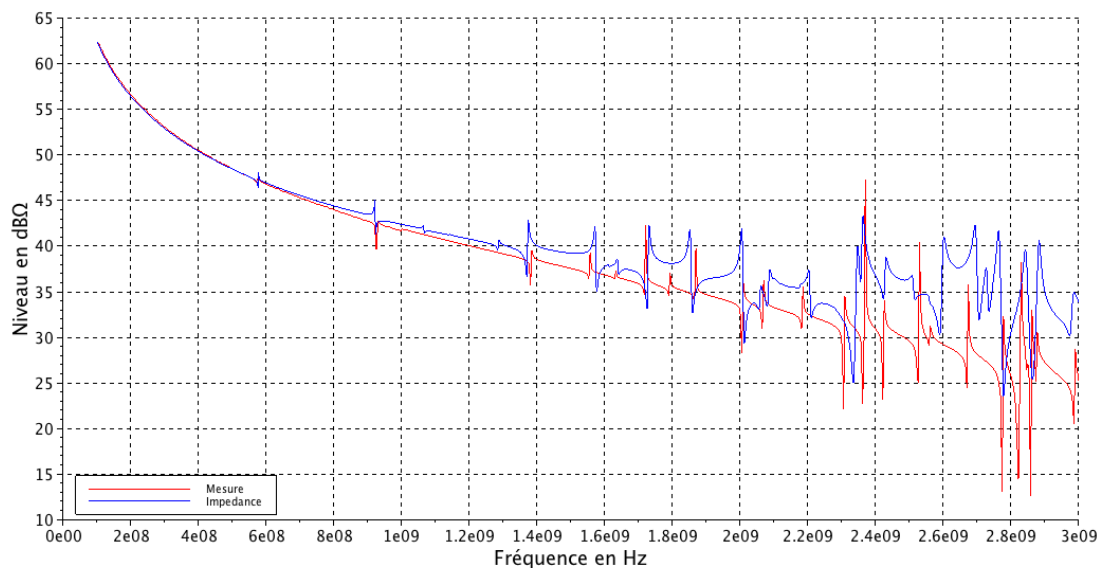


Figure 3 : Résultats de mesure et de simulation de l'impédance d'entrée

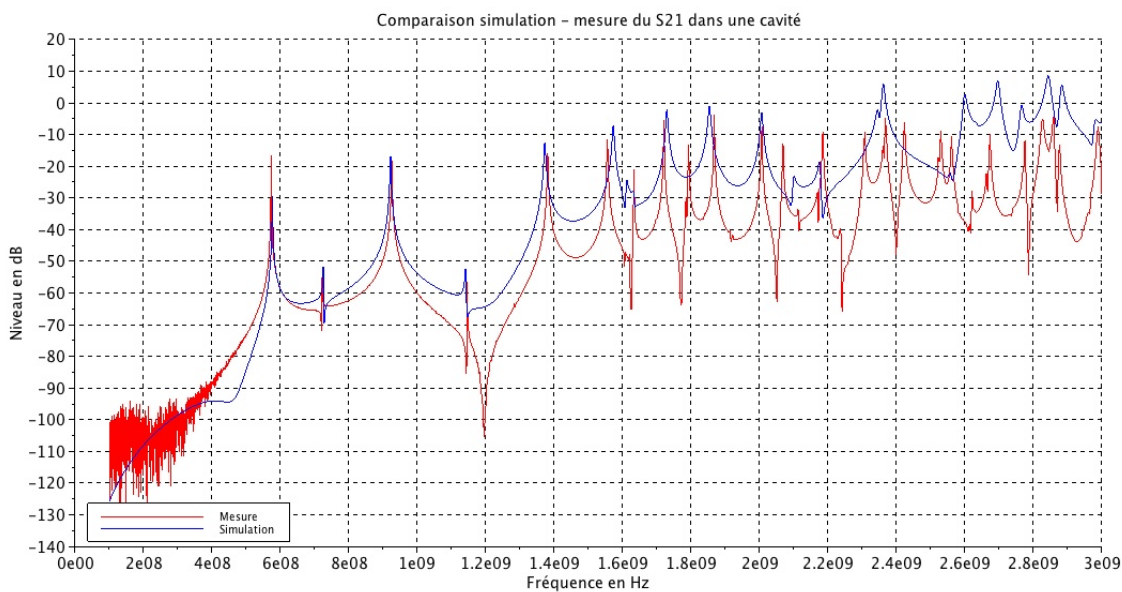


Figure 4 : Résultats de mesure et de simulation de S21

Dans les deux cas présentés, des disparités sont observées sur les fréquences de résonances au dessus de 1.4 GHz. Les résonances non prises en compte dans le modèle sont liées aux éléments parasites du montage, comme les vis de maintien des antennes ou les déformations liées aux vis de serrage de la cavité qui peuvent provoquer des diffractions du champ électromagnétique.

Néanmoins, les résultats sont satisfaisants. En effet, l'écart maximum est de 10 dB entre la mesure et la simulation. Et le temps de calcul, pour l'ensemble de la simulation, est inférieur à une seconde.

L'avantage extrait ici de la méthode de Kron est la facilité d'obtenir l'expression analytique des impédances. Ces impédances qui seront par ailleurs facilement utilisables dans le cadre d'autres simulations par cette même méthode de Kron.

## 2. Modélisation du couplage d'un champ électromagnétique sur un câble dans une cavité

Le modèle choisi pour simuler un câblage est celui de Branin [4], cette modélisation possède la particularité de décrire le câble et les effets de propagation qui lui sont liés de manière analytique et sans l'utilisation des impédances ramenées. Elle s'adapte aisément sous le formalisme de la méthode de Kron et permet l'insertion de sources extérieures

comme le couplage de parasites électromagnétique. Par exemple, le couplage du champ électromagnétique sur un câble est exprimé de façon analytique (Eq. 3) et intégré à la modélisation de Branin pour les câblages comme deux sources ramenées à chaque extrémité du câble (Fig.5). Ces nouvelles sources sont calculées comme l'intégration du champ électromagnétique couplé sur le câble.

$$\begin{cases} e_d = -\frac{b}{2} \int_0^{L_0} \frac{\partial E_x}{\partial y} \cdot dy \cdot e^{-\left(\frac{L_0-y}{v}\right)p} \\ e_g = -\frac{b}{2} \int_0^{L_0} \frac{\partial E_x}{\partial y} \cdot dy \cdot e^{-\left(\frac{x-L_0}{v}\right)p} \end{cases} \quad \text{Équation 3}$$

$L_0$  est la longueur du câble,  $b$  la distance entre le fil conducteur et la masse.

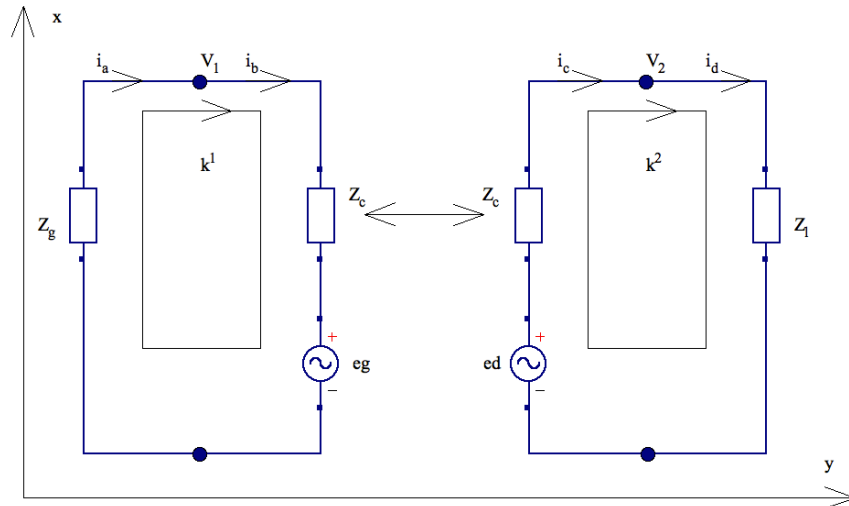


Figure 5 : Insertion des générateurs équivalents de couplage du champ dans le modèle de Branin

Les résultats de simulation du couplage sur un câble blindé ont été réalisées et rapportent des résultats convaincants bien que les pertes ne soient pas intégrées aux calculs. Les niveaux en hautes fréquences ne sont donc pas estimés de manière précise mais l'ensemble des résonances sont présentes dans les résultats de calculs.

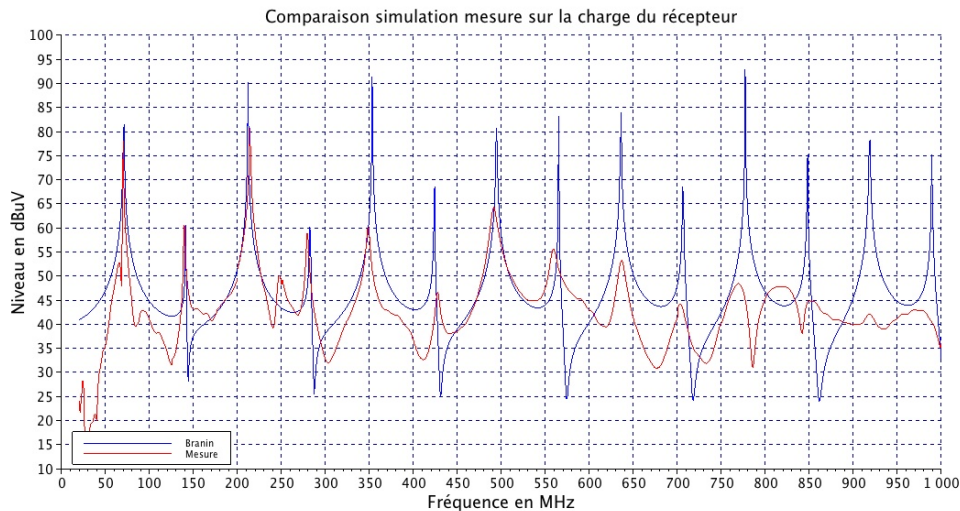


Figure 6 : Comparaison mesure – simulation du couplage d'un champ électromagnétique sur un câble blindé

En intégrant le modèle du câble aux modèles de la cavité, nous pouvons recomposer le schéma topologique de la Fig.1 en remplaçant l'antenne de réception par le modèle de fil défini précédemment. Le champ électromagnétique dans la cavité est calculé en fonction des courants dans les résonateurs et couplé vers le modèle du câble. Les fonctions de couplage du champ électromagnétique sur un fil parcourant la cavité en ligne droite (soit dans un plan à deux dimensions Fig.7) s'écrivent alors comme en Eq.4. Cette équation reprend les informations du couplage du champ électromagnétique sur le câble ainsi que celles concernant la position du câble dans la cavité. Le couplage est donné sous la forme d'une impédance liant le courant des circuits résonateurs et la tension créée dans les circuits du modèle de Branin.

$$\begin{cases} \gamma_{d_{m,n}} = \frac{e_{d_{m,n}}}{I_{m,n}} = -\frac{c}{2 \epsilon_0 p S} \sin\left(\frac{m\pi x_{fil}}{a}\right) \frac{n\pi}{b} \left(\frac{v}{p}\right)^2 \frac{\cos(n\pi) - e^{-\frac{b}{v}p}}{1 + \left(\frac{n\pi v}{bp}\right)^2} \\ \gamma_{g_{m,n}} = \frac{e_{g_{m,n}}}{I_{m,n}} = -\frac{c}{2 \epsilon_0 p S} \sin\left(\frac{m\pi x_{fil}}{a}\right) \frac{n\pi}{b} \left(\frac{v}{p}\right)^2 \frac{\cos(n\pi) - e^{-\frac{b}{v}p}}{1 + \left(\frac{n\pi v}{bp}\right)^2} \end{cases} \quad \text{Équation 4}$$

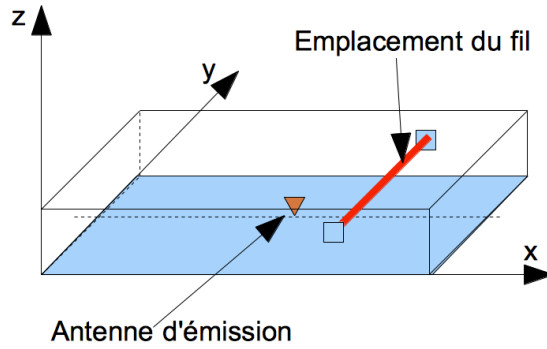


Figure 7 : Disposition du fil dans la cavité

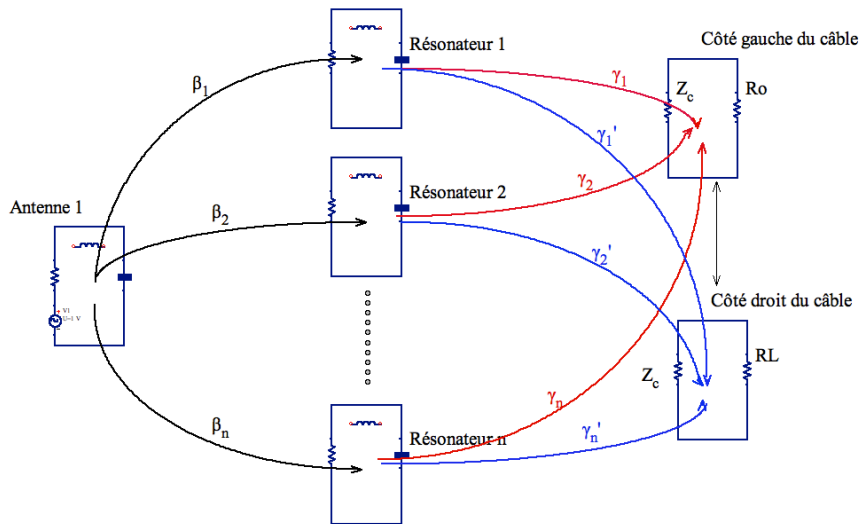


Figure 8 : Insertion du modèle de câble dans le modèle de la cavité

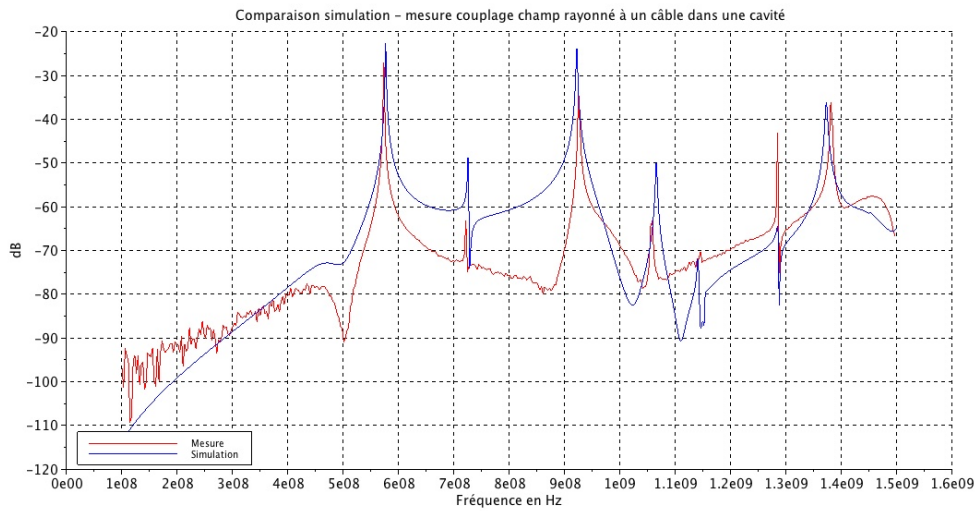


Figure 9 : Comparaison mesure simulation du couplage d'un champ électromagnétique sur un câble dans une cavité

Les résultats présentés, dans la bande de fréquences 100 MHz à 1.5 GHz, comportent l'ensemble des résonances mesurées. Les variations de niveaux sont, en général, favorables à la simulation. En effet, ils sont pour la plupart majorants ce qui entraîne une prise de précaution, qui est, certes, supérieure à celle requise, mais qui suit le sens de la prédiction de la CEM d'un système. Les différences entre la mesure et la simulation peuvent être liées à certaines variations dues à l'installation comme la disposition parfaitement rectiligne du fil dans la cavité mais ceci reste représentatif d'une installation industrielle.

### 3. Présentation et caractérisation du système complexe

Le système choisi comprend une enveloppe, type carrosserie de voiture, dotée d'un grand nombre de larges ouvertures. A l'intérieur de cette cavité se trouve un équipement dont le fonctionnement s'approche de celui d'un clignotant. Il est composé d'un générateur de crête, situé sous le capot du véhicule et isolé de manière mécanique de l'habitacle. Ce générateur est relié via un câble à une carte électronique (de marque Arduino) située à l'arrière du véhicule. Cet équipement permet de faire clignoter une diode.

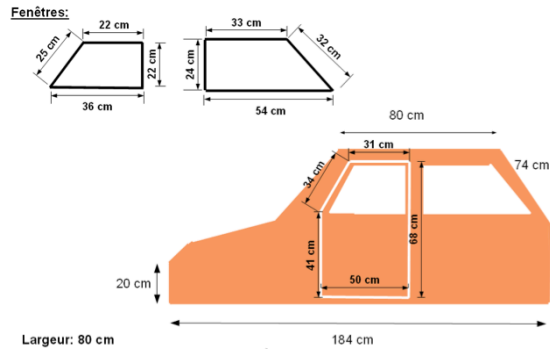


Figure 10 : Dimensions de la face du système illuminé

Le système est soumis à un champ électromagnétique calibré de 10 V/m. Le générateur est coupé et sert de charge adapté au circuit. La diode s'allume lorsqu'un signal supérieur à 100 mV est présent sur l'entrée de la carte. La carte émet alors un signal de 2 V qui est enregistré et donne les zones de susceptibilité dans la bande de fréquences (Fig. 12). Cette expérience est réalisée pour deux configurations de routage du câble dans la cavité.

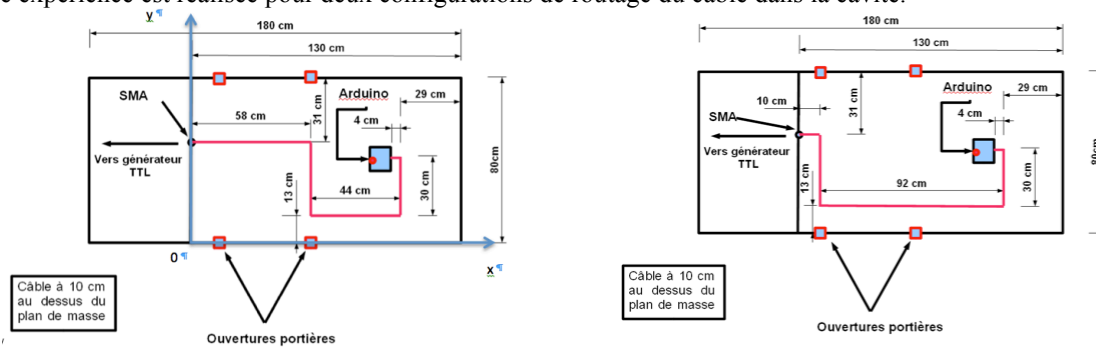


Figure 11 : Disposition du câble selon les deux configurations

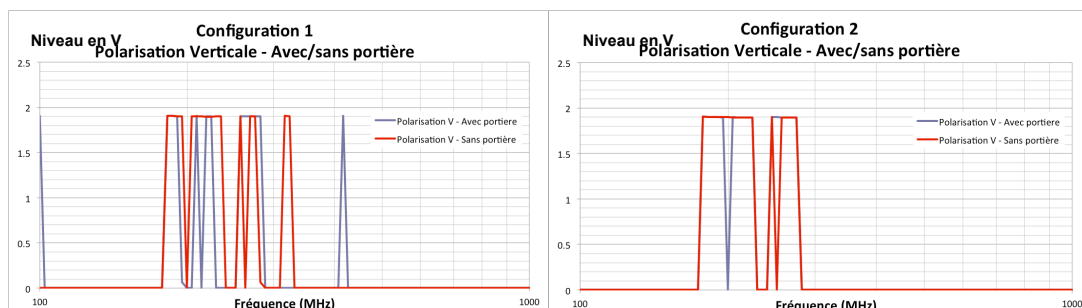


Figure 12 : Susceptibilité en configuration 1 et 2

La simulation du système se décrit comme un couplage entre le champ et une des ouvertures de la cavité, cette ouverture est modélisée par un circuit résonateur dont la fréquence de pulsation est la première résonance de l'ouverture. Ce réseau est couplé à ceux de la cavité et le champ établi pour chaque circuit résonateur est couplé au câble la traversant selon sa position, configuration 1 ou 2, cf. Fig. 13.

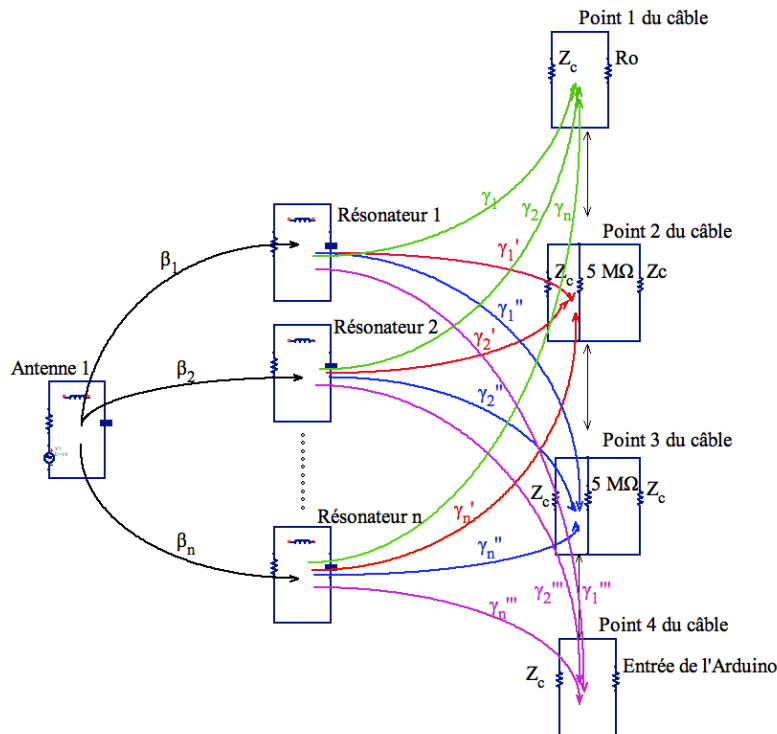


Figure 13 : Présentation de la topologie du cas test

Les simulations sont ensuite réalisées pour les deux configurations du câble dans la cavité et c'est la différence entre les deux résultats de simulation qui permet de conclure sur l'amélioration, la dégradation ou le maintien des performances de la CEM du système. Les résultats sont donnés sous la forme de la tension sur l'entrée de la carte arduino et comme une différence entre les deux mesures.

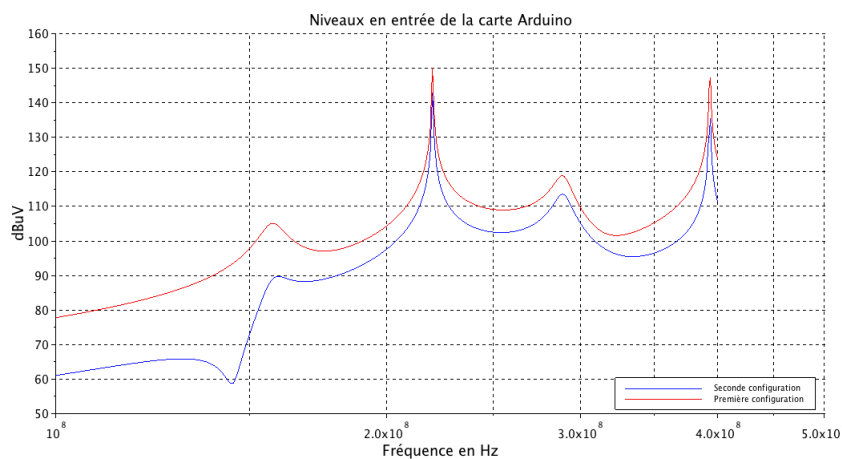


Figure 14 : Niveaux en entrées de la carte Arduino selon les deux configurations de câblage dans l'enceinte

Si nous considérons un cas industriel de ce type d'étude dans le cadre d'un rétrofit, nous connaissons donc les premiers résultats d'essai dans la configuration 1. Le jour où celle-ci doit être modifiée (configuration 2), l'analyse des couplages sur le câble, sans considérer la valeur absolue des perturbations sur les circuits, peut suffire pour justifier des modifications sur la CEM du système qui peuvent être liées au changement de configuration.

#### 4. Résultats

Nous pouvons constater que dans la bande de fréquences pour lesquelles le sous-système est susceptible, les niveaux calculés par la simulation sont supérieurs au critère de 100 mV défini au cours des expériences Fig.14. Dans cette même bande de fréquences, le niveau du delta, différence entre les résultats de calculs de chaque configuration, est de 6 dB. De fait, il n'y a pas d'amélioration du comportement en susceptibilité rayonné du système lié au changement de position du fil dans cette zone, puisque une erreur de 6 dB est une incertitude typique dans le cadre d'une expérience en mesure rayonnée.

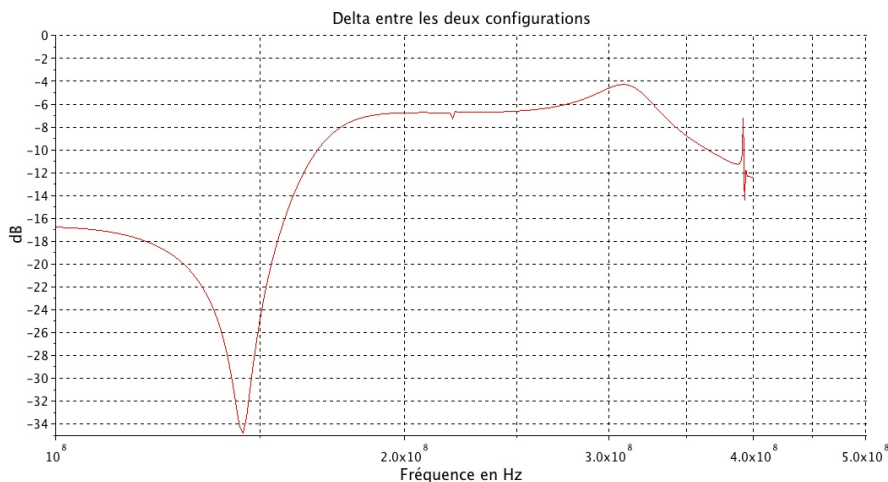


Figure 15 : Delta entre les deux niveaux d'entrées calculés

Néanmoins, l'écart est supérieur à 6 dB en début de bande et en fin de bande, or sur les relevés de susceptibilité (Fig.12), nous pouvons observer une présence de défaut au début de bande de fréquences et vers 400 MHz pour la première configuration alors que ces défauts disparaissaient avec la seconde configuration. L'amélioration constatée dans ces bandes de fréquences en simulation, est confirmée par des mesures.

#### 5. Conclusion et perspective

En conclusion, nous pouvons dire que la prédiction des effets de la modification d'un système sur son comportement CEM peut être réalisée par cette approche, sous hypothèse de connaître le comportement CEM de l'équipement avant les changements apportés dans le système.

Les perspectives se dirigent vers une amélioration d'un modèle de cavité avec de grandes ouvertures. Nous pouvons déjà considérer qu'augmenter le nombre d'ouverture élargie les fréquences de résonance détectée et ajoute de nouvelles résonances. La simulation de la cavité, comme si elle était complètement fermée, peut être modifiée en considérant cette cavité comme une ligne bi-plaque. Le but de ces améliorations étant d'apprécier d'une manière plus sûre les risques dus aux couplages d'une perturbation électromagnétique sur un système.

Ces premiers résultats, ainsi que les perspectives techniques, montrent toute la faisabilité d'anticiper les effets de modifications d'un système sur sa CEM dans un cadre industriel avec des moyens de calcul légers et rapides. Il faut alors réaliser des modèles simples d'après une première étude topologique permettant de définir les volumes des systèmes et les couplages qui leur sont liés. Mais aussi les modèles de sous-systèmes ou équipements pouvant être des issus de modèles électroniques ou plus simplement lorsque les dimensions du système sont plus importantes, des fonctions simulant le comportement CEM de l'équipement et l'aspect fonctionnel tel que les seuils de susceptibilité. Cet ensemble de mise en œuvre a pour but de réduire les risques de dégrader la CEM d'un système ainsi que les coûts liés aux pré-qualifications lors de rétrofit mais aussi lors de la conception d'un système. L'approche finale étant l'étude de la CEM des systèmes complexes par des essais virtuels. La maîtrise de la CEM lors de la conception et de la vie d'un système

#### Références bibliographiques

- 1- MAURICE O., 2003. La compatibilité électromagnétique dans les systèmes complexe. Lavoisier, Cachan, 256 p.
- 2- BADOUAL R. et al, 1992. Les micro-ondes. Tome 1 Circuits, micro-rubans, fibres, 2<sup>nd</sup> éd., Masson, Paris, 300 p.
- 3- ROBINSON M.P. et al. Analytical formulation of the shielding effectiveness of enclosures with apertures. In : IEEE Trans. On EMC, Vol 40, August 1998. 240-248 p.
- 4- BRANIN F.H. Transient analysis of lossless transmission lines. Proceeding of the IEEE, Vol 55, November 1967, 2012-2013 p.