

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

## وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Electrotechnique

N° :...../2024

### **MEMOIRE DE MASTER**

**DOMAINE: Sciences et Technologies**

**FILIERE: Electrotechnique**

**SPECIALITE: Electrotechnique Industrielle**

### **Thème**

***Evaluation de l'efficacité de blindage  
des matériaux composites utilisés en électronique de  
puissance***

**Présenté Par : BAHA DJAMAL**

**Encadré Par : Mr. M-C KIHAL**

**Date de soutenance : 15/09/2024**

#### **Jury de Soutenance**

**Président : Mr. M. KECHICHEB**

**Grade MCB**

**Univ MSB jijel**

**Encadreur : Mr. M-C KIHAL**

**Grade MCB**

**Univ MSB jijel**

**Examineur 1 : Mr. M. CHOUKI**

**Grade MCB**

**Univ MSB jijel**

**Promotion : 2023 /2024**

## ***Remerciement***

*J'e tiens à exprimer ma gratitude et ma profonde reconnaissance à Monsieur Mohammed Cherif Kihal, encadreur de m'avoir permis d'entreprendre ce projet, d'avoir fait l'honneur de me guider tout au long de la réalisation de ce travail et manifesté tant d'intérêt pour qu'il aboutisse.*

*Nos sincères remerciements vont également à l'ensemble de l'équipe pédagogique du département d'électrotechnique, ainsi qu'à nos enseignants, qui ont œuvré avec dévouement pour nous offrir une formation universitaire solide.*

*Cette formation nous a permis de préparer ce mémoire, qui s'avérera précieux pour notre avenir professionnel.*

*C'est avec un grand plaisir que je remercie vivement ma familles, qui nous ont soutenus et encouragés tout au long de la préparation de ce mémoire, ainsi qu'à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet.*

## Table des matières

Liste des figures .....	i
Liste des tableaux .....	iv
Introduction général.....	1

### *Chapitre I : Généralités sur le blindage en CEM*

I.1 Introduction .....	- 4 -
I.2 Topologie avec 2 niveaux de blindages .....	- 5 -
I.3 Fonctionnement du blindage .....	- 5 -
I.3.1 A haute fréquence.....	- 5 -
I.3.2 A basse fréquence.....	- 5 -
I.4 Différents types de blindage.....	- 6 -
I.4.1 Blindage magnétique.....	- 6 -
I.4.2 Blindage d'un champ électrostatique .....	- 6 -
I.4.3 Blindage composite .....	- 7 -
I.4.4 Blindage parfait .....	- 7 -
I.4.4.1 Pénétration d'un champ électromagnétique .....	- 8 -
I.4.5 Câbles blindés .....	- 9 -
I.4.5.1 Blindages sans mise à la terre .....	- 9 -
I.4.5.2 Mise à terre des blindages (mise à la masse du blindage d'un câble coaxial) ..	- 9 -
I.4.6 Autres forme du blindage .....	- 10 -
I.4.6.1 Fenêtres blindée transparentes .....	- 10 -
I.4.6.2 Boitiers plastic.....	- 10 -
I.5 La conception CEM .....	- 10 -
I.5. 1 Les perturbations électromagnétiques .....	- 10 -
I.5. 2 Modèle d'analyse de la CEM.....	- 11 -
I.5. 3 Sources de perturbations .....	- 11 -
I.5. 4 Niveaux de compatibilité .....	- 12 -
I.5. 5 Mécanismes d'action des perturbations électromagnétiques .....	- 13 -
I.6 Champ proche et champ lointain.....	- 13 -
I.7 Modes de couplage.....	- 15 -
I.8 Conclusion.....	- 18 -
Bibliographies.....	- 19 -

## ***Chapitre II : Etat de l'art sur les méthodes d'évaluation l'efficacité de blindage***

II.1 Introduction.....	- 21 -
II.2 L'efficacité d'un blindage.....	- 21 -
II.3 Théorie du blindage : .....	- 22 -
II.3.1 Réflexion et absorption.....	- 22 -
II.3.1.1 Effet de peau .....	- 23 -
II.4 Les paramètre influence sur l'efficacité de blindage .....	- 26 -
II.4.1 Matériaux de blindage .....	- 26 -
II.4.1.1 Critères du choix de la matière .....	- 26 -
II.4. 1.2 Matériaux ferromagnétiques .....	- 28 -
II.4. 1.3 Matériaux ferroélectriques .....	- 28 -
II.4.1.4 Matériaux composites et structures hybrides pour le blindage EMI.....	- 28 -
II.4.1.4.1 blindages composés ou multiples : .....	- 29 -
II.4.1.4.2 L'efficacité d'un blindage multicouche en champ lointain .....	- 30 -
II.4.1.5 Blindage des coffrets plastiques par métallisation :.....	- 32 -
II.4.1.6 Polymères Thermoplastiques et Thermodurcissants.....	- 33 -
II.4.1.6.1 Charges Conductrices .....	- 33 -
II.4.1.7 Couches minces .....	- 35 -
II.4.2 Prise en compte des ouvertures et des discontinuités d'un blindage.....	- 35 -
II.4.2.1 Ouvertures rectangulaires dans le blindage .....	- 37 -
II.4.2.2 Fenêtres et fentes d'aération .....	- 38 -
II.5 Méthodes d'évaluation du blindage électromagnétique .....	- 38 -
II.5.1 Méthodes théoriques .....	- 38 -
II.5.1.1 Méthodes numériques : .....	- 38 -
.II.5.1.2 Calculs analytiques : .....	- 39 -
II.5.2 Méthodes expérimentales .....	- 39 -
II.5.2.1 Champ ouvert ou d'espace libre .....	- 40 -
II.5.2.2 Boite blindée .....	- 40 -
II.5.2.3 Méthode de la ligne de transmission coaxiale .....	- 41 -
II.5.2.4 Chambre blindé.....	- 42 -
I.6 Conclusion.....	- 43 -
Bibliographies.....	- 44 -

### ***Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel***

III.1 Introduction .....	- 47 -
III.2 Représentation des Signaux dans le Domaine Temporel .....	- 47 -
III.3 Différence entre le domaine temporel et le domaine fréquentiel .....	- 47 -
III.4 Bases de l'électromagnétisme : équations de Maxwell .....	- 48 -
III.4.1 Différentes méthodes numériques pour résoudre les équations de Maxwell dans le domaine temporel .....	- 49 -
III.4.1.1 Méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD).....	- 50 -
III.4.1.2 Méthode des Intégrales Finies dans le Domaine Temporel (FITD) .....	- 51 -
III.4.1.3 Méthode des Volumes Finis dans le Domaine Temporel (FVTD).....	- 51 -
III.4.1.4 Méthode des Éléments Discontinus de Galerkin dans le Domaine Temporel (DGTD) .....	- 51 -
III.4.1.5 Méthode des Lignes de Transmission (TLM) .....	- 51 -
III.4.1.5.1 Maillage TLM.....	- 53 -
III.4.1.5.2 Organigramme de la méthode TLM .....	- 54 -
III.4.1.5.3 Les nœuds 3D-TLM .....	- 56 -
III.4.1.5.4 Discrétisation des équations de Maxwell .....	- 57 -
III.5 Conclusion .....	- 67 -
Bibliographies.....	- 68 -

### ***Chapitre VI : Applications et résultats numériques***

IV.1 Introduction .....	- 70 -
IV.1.1 Description du logiciel de simulation CST Studio Suite.....	- 70 -
IV.1.1.1 Définition .....	- 70 -
IV.2 Caractéristiques du logiciel CST Microwave Studio .....	- 70 -
IV.3. Les module d'exécution .....	- 71 -
IV. 4 Modules de solveur CST .....	- 71 -
IV. 4.1 Un solveur transitoire .....	- 71 -
IV. 4.2 Un solveur fréquentiel.....	- 72 -
IV. 4.3 Un solveur intégral .....	- 72 -
IV. 4.4 Un solveur modal .....	- 72 -

IV. 4.5 Un solveur multicouche.....	- 72 -
IV. 4.6 Un solveur Asymptotique.....	- 72 -
IV. 5 Choix du logiciel et du solveur.....	- 72 -
IV.6 Outils de simulation .....	- 73 -
IV. 6.1 le choix de méthodes de résolution .....	- 73 -
IV.7 Géométrie de la structure étudiée.....	- 73 -
IV.8 Détermination de l'efficacité de blindage d'une enceinte.....	- 75 -
IV.8.1 L'excitation .....	- 75 -
IV.9 Étude de l'efficacité de blindage en fonction du matériau .....	- 76 -
IV.9.1 Modélisation d'une enceinte .....	- 76 -
IV.10 Evaluation temporelle l'efficacité du blindage .....	- 77 -
IV.11 Étude de l'efficacité du blindage avec une paroi monocouche.....	- 78 -
IV.11.1 L'effet du changement de type de matériau conducteur.....	- 78 -
IV.11.2 L'effet du changement de type de matériau isolant .....	- 79 -
IV.11.3 L'effet d'ajoutée et changement la conductivité électrique de matériau isolant .....	- 80 -
IV.11.3.1 Interprétation de la variation de l'efficacité du blindage avec d'augmenter la conductivité électrique de matériau .....	- 81 -
IV.12 Étude de l'efficacité du blindage multicouches .....	- 82 -
IV.12.1 Modélisation EMI d'une enceinte bicouches.....	- 82 -
IV.12.2 Modélisation EMI d'une enceinte deux couches stratifiée .....	- 84 -
IV.12.3 Interprétation de la variation de l'efficacité du blindage avec l'utilisation de deux matériaux de différentes propriétés.....	- 85 -
IV.12.4 Modélisation EMI d'une enceinte bicouche hybride .....	- 85 -
IV.12.5 Modélisation EMI d'une enceinte trois couches.....	- 87 -
IV.12.6 Modélisation EMI d'une enceinte trois couches hybride .....	- 88 -
IV.13 Amélioration de l'efficacité du blindage.....	- 90 -
IV.14 Conclusion.....	- 91 -
Bibliographies.....	- 92 -
Conclusion Générale.....	- 94 -
ANNEXES	

## Liste des Figures

Figure I.1 : Contenir les émissions rayonnées à l'intérieur de l'enceinte blindée. ....	- 4 -
Figure I. 2 : Exclure les émissions rayonnées de sources se trouvant à l'extérieur de l'enceinte. ....	- 4 -
Figure I.3 : Blindage d'un champ électrostatique .....	- 6 -
Figure I.4 : Composites polymères conducteurs avec interface multiple pour le blindage .....	- 7 -
Figure I. 5 : Blindage parfait .....	- 8 -
Figure I.6 : Blindage réel.....	- 8 -
Figure I. 7 : Pénétration d'un champ électromagnétique.....	- 9 -
Figure I.8 : Méthode générale d'analyse de la CEM. ....	- 11 -
Figure I.9 : Sources de perturbations électromagnétiques.....	- 12 -
Figure I.10 : Niveaux de perturbation en CEM.....	- 13 -
Figure I.11 : Mécanismes du couplage.....	- 13 -
Figure I.12 : Évolution de l'impédance d'onde en fonction de la distance .....	- 14 -
Figure. I.13 : Modes de couplages électromagnétiques.....	- 15 -
Figure.I.14.a : Mode différentiel .....	- 16 -
Figure.I.14.b : Mode commun.....	- 16 -
Figure.I.15 : Couplage champ magnétique à câble en mode commun.....	- 17 -
Figure. I.16 : Couplage champ magnétique à câble en mode différentiel .....	- 17 -
Figure. I.17 : Couplage champ électrique à câble en mode commun.....	- 18 -
Figure. I.18 : Couplage en champ proche.....	- 18 -
Figure II.1 : Atténuation d'une onde électromagnétique.....	- 22 -
Figure. II.2 : Réflexion et absorption dans une barrière infinie .....	- 23 -
Figure II.3 : l'effet de peau dans un conducteur.....	- 23 -
Figure. II. 4 : Pertes par réflexion.....	- 24 -
Figure II. 5 : Dispersion de l'épaisseur de peau pour différents matériaux .....	- 27 -
Figure II. 6 : Principe de réflexions multiples dans une structure multicouche .....	- 30 -
Figure II.7 : Représentation schématique d'onde électromagnétique pénétrant une structure multicouche. ....	- 31 -
Figure II.8 : Charges conductrices utilisées pour le blindage électromagnétique ces dernières années.....	- 34 -

Figure II.9 : Composites polymères renforcés de fibres métalliques. (Modifié de Wetherhold et Patra, 2004.).....	- 34 -
Figure II.10 : Modification des courants induits dans le blindage par la présence des ouvertures .....	- 37 -
Figure II.11 : Réseau d'ouverture sur un boîtier .....	- 38 -
Figure II.12 : Test de l'efficacité du blindage avec un champ ouvert. ....	- 40 -
Figure II.13 : Mesure de l'efficacité du blindage par boîtier blindé .....	- 41 -
Figure II.14 : Spectre de ligne de transmission coaxiale.....	- 42 -
Figure II.15 : Test de l'efficacité de blindage avec une chambre blindé. ....	- 43 -
Figure III.1 : Représentation dans le domaine temporel d'un signal électrique. ....	- 47 -
Figure III.2 : Onde sinusoïdale d'une amplitude de 1 et d'une fréquence de 1 Hz .....	- 48 -
Figure III.3 : Méthodes pour passer du domaine temporel au domaine fréquentiel... ..	- 48 -
Figure III.4 : Propagation de l'onde EM dans un milieu.....	- 49 -
Figure III.5 : Exemple d'un volume de calcul FDTD.....	- 50 -
Figure.III.6 : Principe de Huygens .....	- 52 -
Figure III. 7 : Principe de Huygens dans réseau TLM 2D .....	- 53 -
Figure III.8 : Les nœuds TLM 3D. ....	- 54 -
Figure III. 9 : L'organigramme de la méthode TLM.....	- 55 -
Figure III. 10 : (a) Maillage spatial 3D ; (b) Noeud TLM 3D symétrique condensé (SCN).....	- 56 -
Figure III. 11 : Maillage cartésien 3D. ....	- 58 -
Figure IV.1 : Les modules d'exécution du logiciel CST.....	- 71 -
Figure IV.2 : Illustration de l'outil CST.....	- 73 -
Figure IV.3 : Boîtier de blindage.....	- 74 -
Figure IV.4 : Excitation impulsionnelle pour TLM. ....	- 76 -
Figure IV.5 : Géométrie de l'enceinte illuminée par une onde plane.....	- 77 -
Figure IV.6 : Evaluation temporelle l'efficacité du blindage de nickel et aluminium- .....	- 77 -
Figure IV.7 : Boîtier de blindage avec une paroi monocouche d'un 1mm. ....	- 78 -
Figure IV.8 : Résultat obtenu le champ électrique pour des matériaux conducteurs. - .....	- 78 -
Figure IV.9 : Résultat obtenu le champ électrique pour des matériaux isolants .....	- 79 -



Figure IV.10 : Résultat obtenu le champ électrique changement la conductivité électrique .....	- 80 -
Figure IV.11 : Atténuation d'une onde électromagnétique .....	- 81 -
Figure IV.12.a Boîtier de blindage avec.....	- 83 -
Figure IV.12.b La disposition des matériaux .....	- 83 -
Figure IV.13 : Résultat obtenu le champ électrique composé de deux couches : aluminium et nickel .....	- 83 -
Figure IV.14 : La disposition de deux couches stratifiée aluminium et nickel. ....	- 84 -
Figure IV.15 : Résultat obtenu le champ électrique deux matériaux en bicouches stratifiées : aluminium et nickel.....	- 84 -
Figure IV.16 : La disposition des matériaux : aluminium et polyamide .....	- 85 -
Figure IV.17 : Résultat obtenu le champ électrique deux matériaux en bicouches : aluminium et polyamide .....	- 86 -
Figure IV.18 : La disposition des matériaux : nickel et polyamide.....	- 86 -
Figure IV.19 : Résultat obtenu le champ électrique deux matériaux en bicouches : nickel et polyamide.....	- 86 -
Figure IV.20 : La disposition des matériaux : aluminium et nickel .....	- 87 -
Figure IV.21 : Résultat obtenu le champ électrique avec une paroi multicouches : aluminium et nickel .....	- 88 -
Figure IV.22 : La disposition des matériaux avec trois couches : polymade et alumnuime .....	- 88 -
Figure IV.23 : Résultat obtenu le champ électrique avec une paroi multicouches : polymade et alumnuime.....	- 89 -
Figure IV.24 : La disposition des matériaux avec trois couches :.....	- 89 -
Figure IV.25 : Résultat obtenu le champ électrique avec une paroi multicouches : ..	- 89 -
Figure IV.26 : Comparaison les résultats obtenus.....	- 91 -

## Liste des Tableaux

Tableau II. 1 : Épaisseur de peau (en mm) pour quelques matériaux courants.....	- 24 -
Tableau II.2 : Valeurs de perméabilité et de conductivité pour des matériaux .....	- 27 -
Tableau II. 3 : Conductivité et intervalle de la perméabilité magnétique relative des trois matériaux ferromagnétiques les plus courants .....	- 28 -
Tableau II. 4 : Atténuation d'un blindage à double isolation électrique (en dB) .....	- 29 -
Tableau II. 5 : Comparaison entre les simples écrans, les doubles isolés et les doubles non isolés .....	- 29 -
Tableau II.6 : Efficacité de blindage de quelques revêtements conducteurs.....	- 32 -
Tableau II.7 : Efficacité de blindage des polymères dans la bande X à 8,2 GHz.....	- 35 -
Tableau IV.1 : Étude comparative spécifique aux onduleurs .....	- 74 -

# **Introduction Générale**

### Introduction Générale

Ces dernières années, les interférences électromagnétiques sont devenues un problème majeur, exacerbées par le développement accru d'appareils électriques et électroniques, y compris les dispositifs d'électronique de puissance utilisés dans les secteurs commerciaux, militaires et scientifiques. Ces dispositifs émettent des ondes électromagnétiques, provoquant des perturbations qui dégradent non seulement les performances des équipements, mais posent également des risques pour la santé humaine en raison des effets potentiellement nocifs de ces rayonnements.

Le développement des technologies d'électroniques de puissance, sensibles aux variations rapides des signaux, combinés à l'accroissement de la complexité des agencements internes des dispositifs, intensifie les problèmes d'interférences électromagnétiques (EMI). Par ailleurs, la miniaturisation des équipements, qui génèrent des champs électromagnétiques de forte intensité, ainsi que l'emploi de signaux de plus en plus rapides, accroissent la susceptibilité des appareils aux EMI. Les composants électroniques de puissance, alimentés par des sources de puissance, peuvent ainsi devenir à la fois des émetteurs et des victimes potentielles d'interférences électromagnétiques en raison des processus de commutation rapide qu'ils subissent.

Pour relever ces défis, des solutions de blindage électromagnétique ont été développées afin de protéger les personnes et leurs équipements des rayonnements indésirables. Les matériaux à haute conductivité électrique, tels que le cuivre, l'aluminium et le nickel, sont généralement efficaces pour le blindage. Cependant, dans certaines applications, notamment dans le secteur aéronautique, automobile, ou pour les appareils électroniques et d'électronique de puissance, il est essentiel que les matériaux de blindage soient non seulement efficaces, mais aussi légers et flexibles. Les matériaux composites sont ainsi de plus en plus considérés comme une option viable en raison de leur capacité à offrir un bon équilibre entre poids, flexibilité et efficacité de blindage.

Pour maximiser les avantages des différents matériaux de blindage, qu'ils soient des conducteurs traditionnels ou des polymères conducteurs, une approche consiste à les combiner dans des structures multicouches. En outre, l'utilisation d'enceintes métalliques de blindage permet de contenir et de limiter les émissions rayonnées. Toutefois, ces enceintes doivent souvent comporter des ouvertures pour la ventilation,

l'affichage ou les connexions, ce qui peut diminuer leur efficacité de blindage. L'évaluation de l'efficacité du blindage électromagnétique (SE) repose sur la mesure de l'atténuation de l'intensité des champs électriques ou magnétiques, déterminée à l'aide de méthodes numériques ou analytiques.

Pour anticiper les problèmes électromagnétiques dès la phase de conception, les ingénieurs recourent de plus en plus à des simulateurs numériques pour prédire les comportements électromagnétiques des dispositifs. Cette approche proactive vise à réduire les coûts associés à la résolution des problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM), qui peuvent être élevés en termes de temps, de ressources et de finances.

Ainsi, la recherche et le développement continuent de progresser pour améliorer l'efficacité du blindage électromagnétique et pour répondre aux exigences croissantes de la compatibilité électromagnétique (CEM) dans les environnements modernes, tout en tenant compte des défis posés par les appareils électroniques de puissance et les matériaux composites.

Le présent mémoire intitulé "**Évaluation de l'efficacité de blindage des matériaux composites utilisés en électronique de puissance.**", s'inscrit dans cette démarche en proposant une analyse approfondie des différentes méthodes de blindage et de leurs efficacités dans des conditions spécifiques à l'électronique de puissance.

Dans le premier chapitre, nous aborderons les généralités sur le blindage en CEM. Nous présenterons une introduction à la topologie avec le blindage et expliquerons le fonctionnement tant à haute qu'à basse fréquence. Nous détaillerons ensuite les différents types de blindages, notamment magnétique, électrostatique, composite et parfait. Enfin, nous décrirons les bases de la conception en CEM, en tenant compte des perturbations électromagnétiques, des mécanismes d'action de ces perturbations, ainsi que des modes de couplage entre les champs proches et lointains.

Dans le deuxième chapitre on va proposer un état de l'art des différentes méthodes d'évaluation de l'efficacité du blindage. Dont on va définir le concept d'efficacité du blindage et passer en revue la théorie du blindage, ainsi que les paramètres influençant cette efficacité, tels que les matériaux utilisés, les structures hybrides, les discontinuités, ainsi que les différentes configurations de matériaux et de dispositions de couches pour

## Introduction Générale

---

les parois d'enceinte de protection contre les CEM. On explore également les propriétés des matériaux, notamment leur conductivité et leur perméabilité magnétique. De plus, on présente les méthodes théoriques et expérimentales utilisées pour évaluer l'efficacité du blindage électromagnétique.

Le troisième chapitre est consacré à l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel. Nous y présentons les bases théoriques et les différentes méthodes numériques pour résoudre les équations de Maxwell dans ce domaine. Parmi ces méthodes, nous étudierons les techniques des Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD), des Intégrales Finies dans le Domaine Temporel (FITD), des Volumes Finis (FVTD), des Éléments Discontinus de Galerkin (DGTD), À la fin du chapitre, nous concentrerons plus en détail sur la méthode des Lignes de Transmission (TLM).

Le quatrième chapitre est dédié aux applications et aux résultats numériques. Nous y décrivons le logiciel de simulation CST Studio Suite, ses modules de solveurs, et les outils de simulation utilisés pour évaluer l'efficacité du blindage de différentes structures. Nous analyserons l'efficacité du blindage d'enceintes métalliques en fonction des matériaux et des configurations hybride et multicouches, afin de proposer des solutions optimisées pour les applications en électronique de puissance.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives de recherche, ouvrant la voie à des études futures sur l'amélioration des techniques de blindage et l'optimisation des matériaux composites dans le contexte de la CEM.

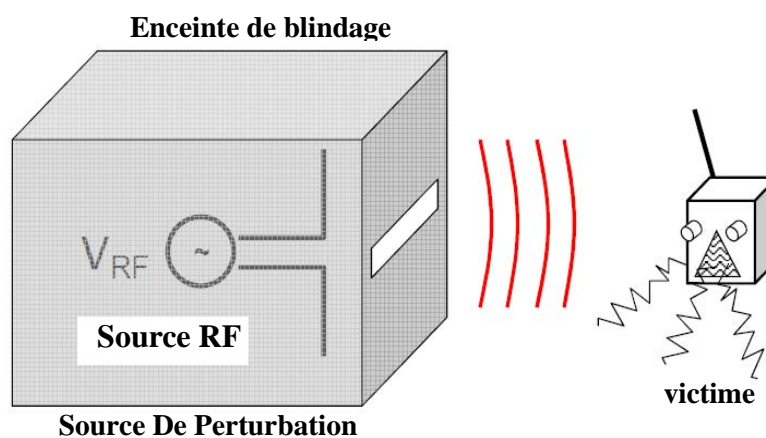
# **Chapitre I**

## **Généralités Sur Le Blindage En CEM**

### I.1 Introduction

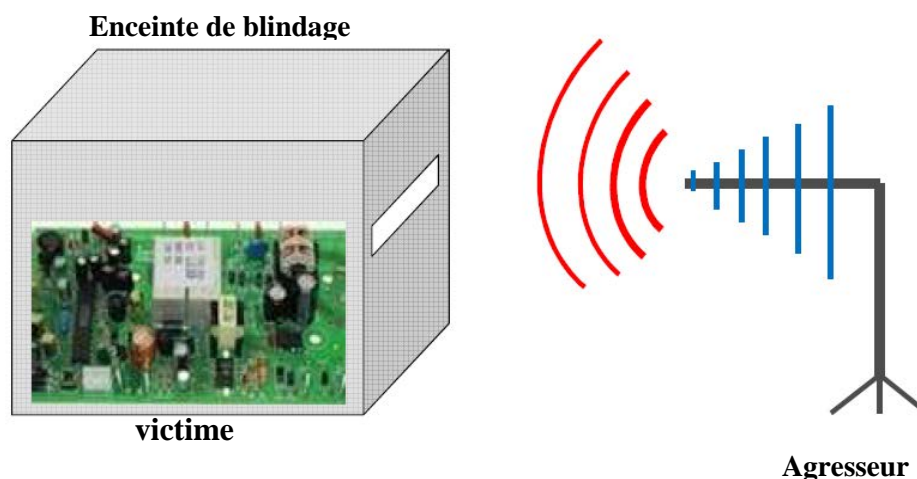
Le blindage électromagnétique, est constitué d'une enveloppe conductrice que l'on met autour de composants électroniques. Ceci pour constituer une barrière vis à vis des influences électrostatiques, magnétiques, ou électromagnétiques, et les protégeant contre les effets indésirables de certains couplages électromagnétiques. Comme le montre la figure I.1 et I.2, il existe deux situations de blindage électromagnétique :

- De point de vue émission, contenir les sources rayonnantes à l'intérieur d'une enceinte blindée



**Figure I.1 :** Contenir les émissions rayonnées à l'intérieur de l'enceinte blindée.

- De point de vue immunité, exclure les émissions rayonnées de la source se trouvant à l'extérieur de blindage



**Figure I.2 :** Exclure les émissions rayonnées de sources se trouvant à l'extérieur de l'enceinte. [1]



### I.2 Topologie avec 2 niveaux de blindages

Dans un cas conventionnel pour un blindage électromagnétique efficace on utilise une topologie à deux niveaux :

- Les circuits sensibles sont regroupés à l'intérieur d'une enveloppe blindée,
- Les circuits perturbateurs également, à l'abri d'une autre enveloppe blindée,
- Les circuits non critiques sont regroupés mais sans enveloppe,
- Tous ces groupes sont placés à l'intérieur d'une enveloppe blindée extérieure,

### I.3 Fonctionnement du blindage

#### I.3.1 A haute fréquence

Un champ électromagnétique consiste en un champ électrique et un champ magnétique variable et couplés.

Le champ électrique produit une force sur les porteurs de charge électrique des matériaux conducteurs (les électrons). Aussitôt qu'un champ électrique est appliqué à la surface d'un conducteur parfait, il produit un courant électrique, le déplacement de charge au sein du matériau diminue le champ électromagnétique à l'intérieur du matériau.

De la même façon, des champs magnétiques variables génèrent des vortex de courant électrique qui agissent de façon à annuler le champ magnétique. (Un conducteur électrique qui ne serait pas ferromagnétique laisse librement passer le champ magnétique). Le rayonnement électromagnétique est réfléchi entre l'interface d'un conducteur et d'un isolant. Ainsi, les champs électromagnétiques existant à l'intérieur du conducteur n'en sortent pas et les champs électromagnétiques externes n'y entrent pas.

#### I.3.2 A basse fréquence

En basse fréquence, les champs électriques ne posent pas beaucoup de problèmes : ils sont facilement maîtrisables. Il n'en est pas de même des champs magnétiques : en milieu perturbé (par ex : présence d'un gros transformateur), ils se manifestent notamment sur les écrans de visualisation par des déformations ou des ondulations de l'image.

Pour éliminer ce problème, il faut éloigner l'écran de la source de perturbation (plusieurs dizaines de cm) ou utiliser un écran métallique réalisé dans un alliage à forte perméabilité.

### I.4 Différents types de blindage

#### I.4.1 Blindage magnétique

Le blindage magnétique est constitué d'un matériau capable d'offrir un chemin de reluctance relativement faible aux lignes de force issue d'une source de champ magnétique, et d'en préserver les zones à protéger le tube d'un oscilloscope de l'influence d'un transformateur d'alimentation.

#### I.4.2 Blindage d'un champ électrostatique

Il est possible de blinder un champ électrostatique en utilisant une cage de Faraday. Le blindage électrostatique est créé par le fait que les charges électriques présentes sur la surface conductrice tendent à se distribuer de telle sorte qu'elles éliminent le champ électrique à l'intérieur du matériau conducteur. Par conséquent, un champ électrostatique ne pénètre pas un volume se trouvant à l'intérieur d'une enceinte conductrice. Les charges électriques sont totalement mobiles dans les matériaux conducteurs. Même dans des structures métalliques extrêmement minces, les charges mobiles sont présentes en quantité suffisante pour créer un blindage efficace. C'est la raison pour laquelle la densité du matériau de blindage est plus importante que son épaisseur dans son efficacité contre le champ électrostatique. [2]

Champ électrique externe

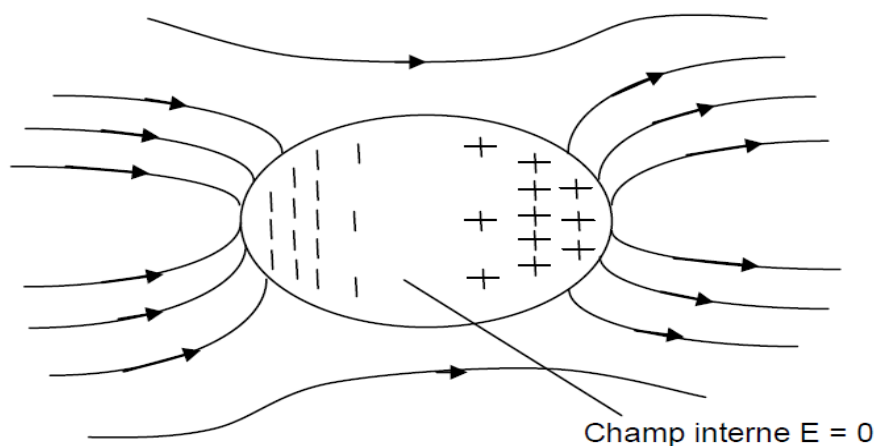
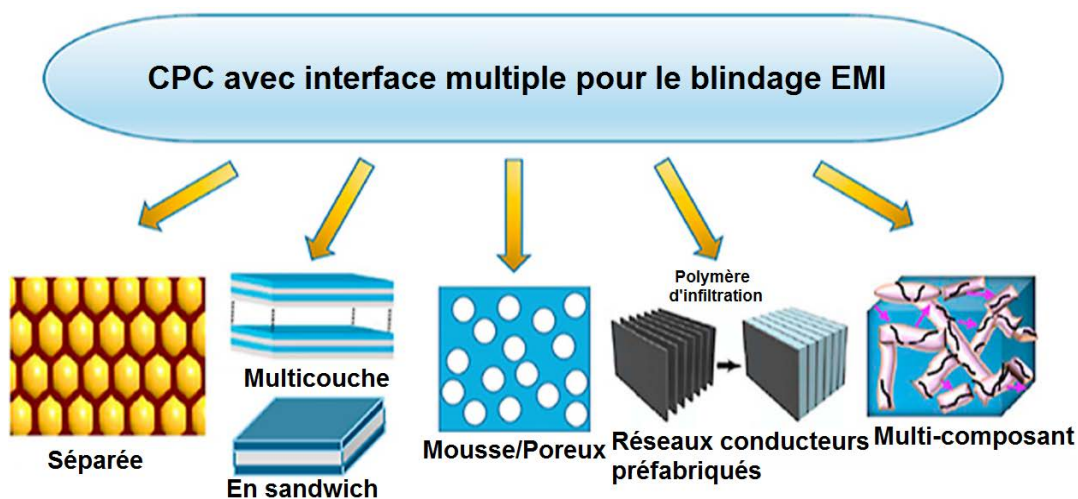


Figure I.3 : Blindage d'un champ électrostatique

### I.4.3 Blindage composite

Ce type de blindage est fait de couches de métal à haute densité/haute résistance et de céramiques plastiques de haute résistance à la chaleur. Les couches non métalliques jouent le rôle de pièges à chaleur ou de réflecteurs, réduisant la température du jet de gaz beaucoup plus vite que le métal. Cela veut surtout dire que le jet pénètre moins profondément.

Habituellement, le blindage composite a une surface extérieure d'acier durci, comme les blindages normaux. Mais en dessous, on trouve des couches successives de métaux et de céramiques. En outre, des polymères conducteurs à différentes charges peuvent également être incorporés, apportant une conductivité supplémentaire et améliorant ainsi les propriétés de blindage.



**Figure I.4 :** Composites polymères conducteurs avec interface multiple pour le blindage [3]

### I.4.4 Blindage parfait

Théoriquement un blindage parfait est possible en choisissant un matériau de conductivité infinie et ne présentant aucun moyen d'échange avec le milieu extérieur. Le milieu blindé serait donc complètement dépourvue de champ comme le montre bien la figure ci-dessous ;

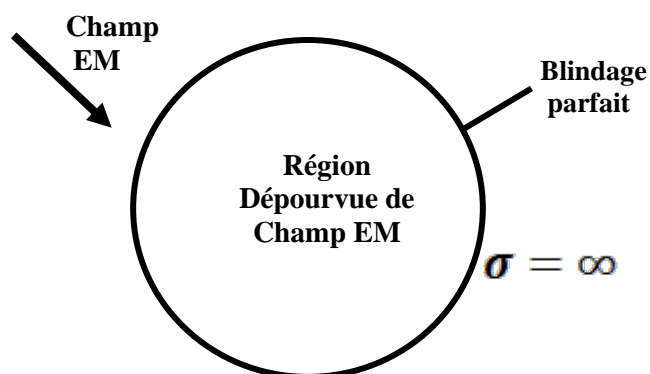


Figure I. 5 : Blindage parfait

Cependant il n'existe pas de matériaux à conductivité infinie qui permettent de créer un blindage parfait. Il y aura toujours une pénétration de champ électromagnétique à travers les parois par diffusion limitée par l'épaisseur de peau. De toute manière, aucun blindage ne peut être une enceinte complètement fermée, car il serait absurde d'imaginer l'existence d'un équipement complètement isolé, sans communication avec l'extérieur. Cette communication est nécessaire pour :

- L'alimentation
- Le transfert des informations entre cet équipement et d'autres systèmes ;
- La ventilation [4]

Le blindage réel est illustré par la figure ci-dessous ;

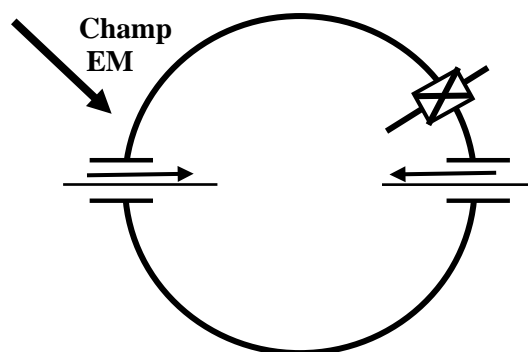
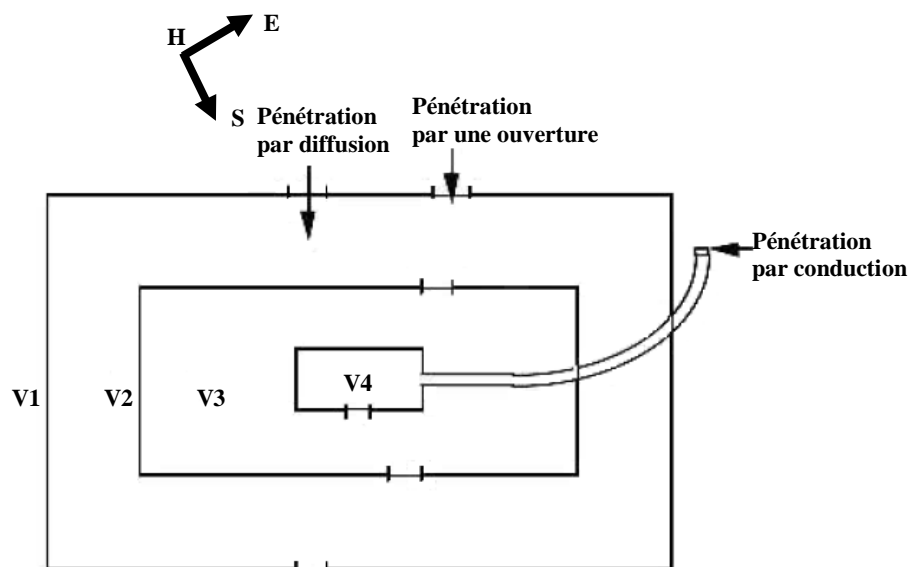


Figure I.6 : Blindage réel

### I.4.4.1 Pénétration d'un champ électromagnétique

Un champ électromagnétique peut pénétrer à l'intérieur d'un blindage de trois manières :

- Par diffusion,
- Par des ouvertures,
- Par conduction.



**Figure I. 7 :** Pénétration d'un champ électromagnétique

La Figure I.7 permet d'illustrer les mécanismes de couplage du champ électromagnétique à travers un blindage. Trois structures blindées ont été emboîtées les unes dans les autres. Ainsi l'espace noté V1 représente l'espace externe non blindé et étant siège d'un champ électromagnétique perturbateur. Les espaces V2, V3 et V4 représentent des espaces blindés à des degrés différents. La pénétration du champ électromagnétique externe peut se faire par diffusion à travers les parois, ou à travers les ouvertures, ou bien par le biais d'un conducteur tel qu'un câble de connexion. [5]

### I.4.5 Câbles blindés

#### I.4.5.1 Blindages sans mise à la terre

- Si les circuits à protéger n'ont aucune liaison électrique avec l'extérieur, le blindage n'a pas besoin d'être mis à terre pour être efficace ;
- Mais un blindage « flottant » induirait des perturbations dans le circuit à potentiel fixe ;
- Les courants perturbateurs intérieurs ne peuvent pas sortir à l'extérieur ;
- Les courants perturbateurs provenant de l'extérieur doivent être « forcés » de passer par la face externe du blindage pour aller à la terre ;
- Cette mise à terre assure également une protection en cas de défaut d'isolation.

#### I.4.5.2 Mise à terre des blindages (mise à la masse du blindage d'un câble coaxial)

- Un blindage relié à une seule extrémité présente un danger mortel ;
- Une forte tension peut apparaître à l'extrémité non reliée à la masse ;

- Le blindage doit donc être protégé contre les contacts directs ;
- Le blindage peut faire antenne et entrer en résonance perturbation supplémentaire nécessaire.

### I.4.6 Autres forme du blindage

#### I.4.6.1 Fenêtres blindée transparentes

- les affichages ou verres (écrans de PC, portière micro-onde,...) exigent de grandes ouvertures transparentes ;
- Réseau de fils très fins (4 à 60 conducteurs par cm) disposés en 2 couches croisées ;
- Réseau de couches de carbone ;
- Couche fine d'or.

#### I.4.6.2 Boitiers plastic

- Recouvrir la face interne d'une couche conductrice (très mince) ;
- Mouler le plastic autour d'une feuille ou d'une structure conductrice ;
- Utiliser un adjuvant rendant la masse du plastic conducteur.

Ces protections suffisent contre les décharges électrostatiques, mais pas assez ne contre les rayonnements électromagnétiques.

### I.5 La conception CEM

La compatibilité électromagnétique (CEM) est définie par : « Capacité d'un dispositif, équipement ou système à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans introduire de perturbations électromagnétiques intolérables pour quoi que ce soit dans cet environnement. » [6]

La compatibilité électromagnétique (CEM) d'un équipement n'est atteinte de manière économique, que par le respect d'un certain nombre de règles de base lors de la conception de l'appareil. Les équipements électriques et électroniques doivent être construits de telle sorte que :

- Les perturbations électromagnétiques générées soient limitées à un niveau permettant aux appareils de radio et de télécommunication et aux autres appareils de fonctionner conformément à leur utilisation.

#### I.5. 1 Les perturbations électromagnétiques

Les systèmes électriques et/ou électromagnétiques ne sont pas isolés de leur environnement. De l'énergie électromagnétique peut donc franchir non

intentionnellement leurs frontières soit pour y pénétrer, soit pour s'en échapper. Cette énergie parasite est appelée perturbation électromagnétique.

Les perturbations électromagnétiques sont donc la raison d'être de la CEM. Elles sont considérées comme étant des ondes électromagnétiques parasites générées de manières très diverses. Leurs sources se classent en deux grandes catégories, elles peuvent être d'origine transitoire (phénomène temporel) ou harmonique (phénomène fréquentiel). Ces deux types de parasites se distinguent par la spécificité de leurs effets sur les équipements agressés. [7]

### I.5. 2 Modèle d'analyse de la CEM

Qu'il s'agisse d'émission ou de susceptibilité (ce n'est qu'une question de direction), le phénomène ne se produit (ou n'est gênant) que s'il y a, simultanément :

- une « source » (d'un signal parasite) ;
- une « victime » (vulnérable au signal parasite),
- et un couplage entre les deux

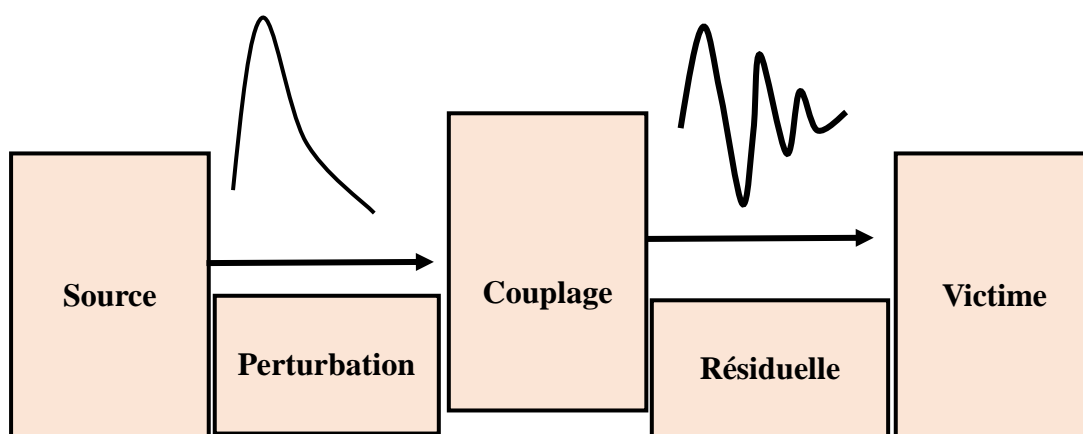
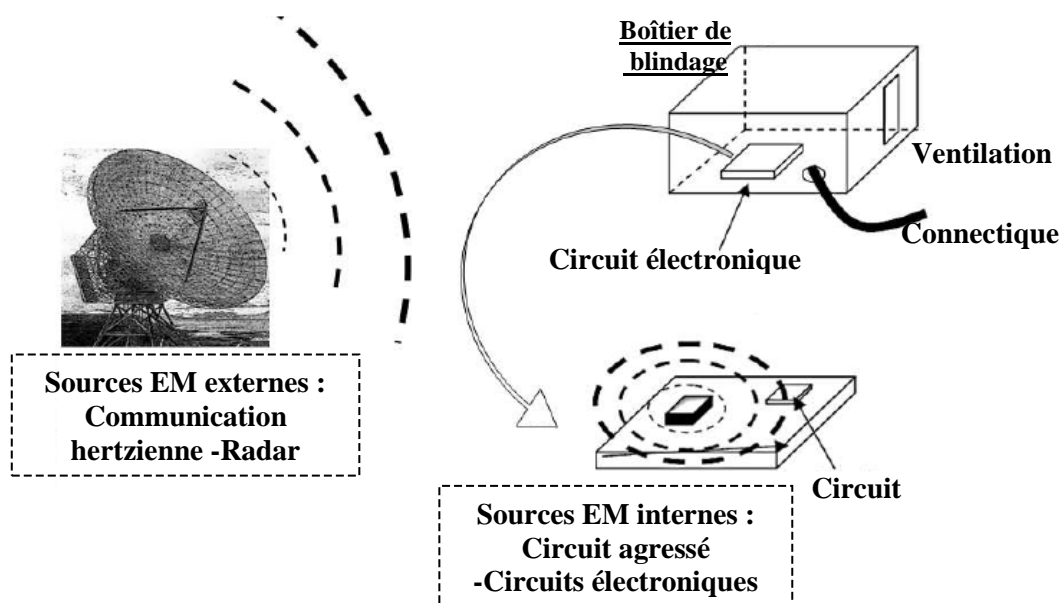


Figure I.8 : Méthode générale d'analyse de la CEM. [8]

### I.5. 3 Sources de perturbations

Si nous nous intéressons à l'environnement électromagnétique d'un équipement, nous pouvons distinguer deux grandes classes de sources de perturbations.

- Les sources de perturbations naturelles : foudre, décharges électrostatiques, bruit atmosphérique.



**Figure I.9 :** Sources de perturbations électromagnétiques.

- Les sources de perturbations humaines, illustrées par la figure I.9, sont nombreuses et peuvent être divisées en deux types :
- Sources externes de rayonnement : les radars, les émetteurs pour communications sans fils, les armes électromagnétiques de forte puissances (tel que les bombes électromagnétiques, et les impulsions électromagnétique), les lignes de puissances électriques, les écrans des appareils hautes tensions industriels, médicaux, scientifiques etc....
- Sources internes de rayonnement : les circuits électroniques, en fonctionnement normale ces circuits émettent des rayonnements électromagnétiques par la piste de circuit imprimés ou circuit intégré [9].

### I.5. 4 Niveaux de compatibilité

Pour assurer la CEM, différentes marges ont été définies (Figure I-10)

- **Niveau d'immunité:** C'est le seuil à partir duquel un équipement ou un système commence à présenter des dysfonctionnements.
- **Niveau de compatibilité:** c'est le niveau maximal de perturbation auquel on eut s'attendre dans un environnement donné.
- **Niveau d'émission:** c'est la marge qui existe entre le niveau de compatibilité et le niveau de limite d'immunité. C'est la marge qui existe entre le niveau de compatibilité et le niveau d'émission



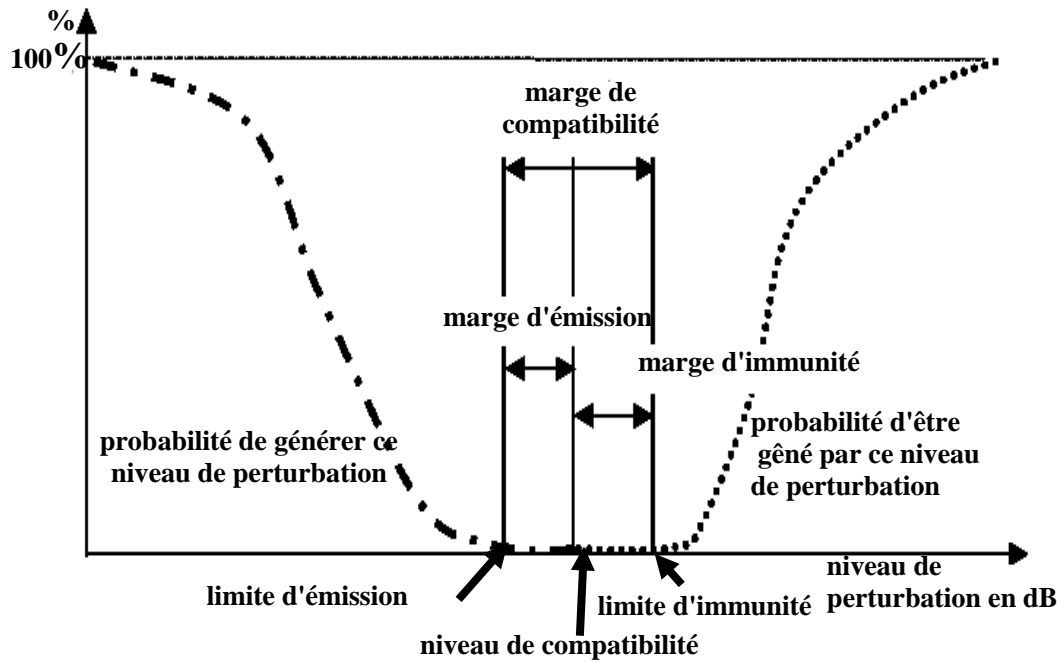


Figure I.10 : Niveaux de perturbation en CEM [10]

### I.5. 5 Mécanismes d'action des perturbations électromagnétiques

Le principe d'action des perturbations électromagnétique est schématisé par le diagramme de la figure I.11. Pour que se produise un phénomène de perturbation électromagnétique, trois éléments doivent être présents : une source de perturbations, un milieu de couplage et une victime des perturbations

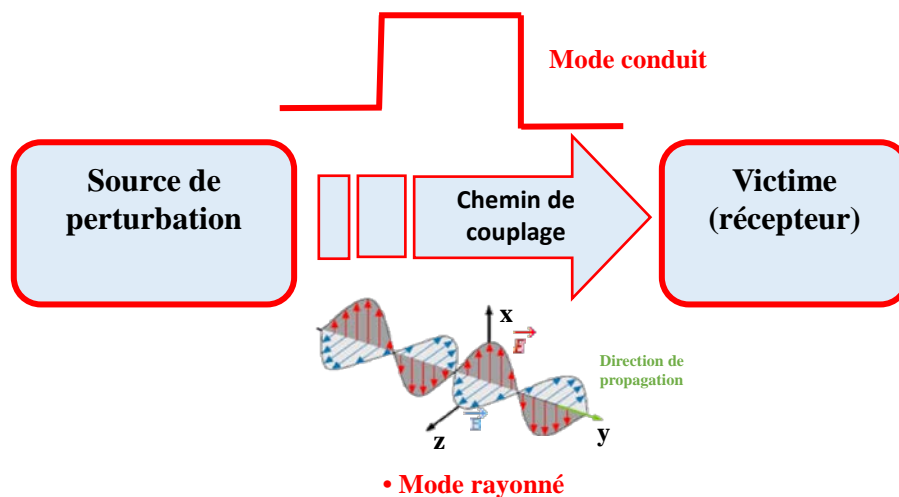


Figure I.11 : Mécanismes du couplage

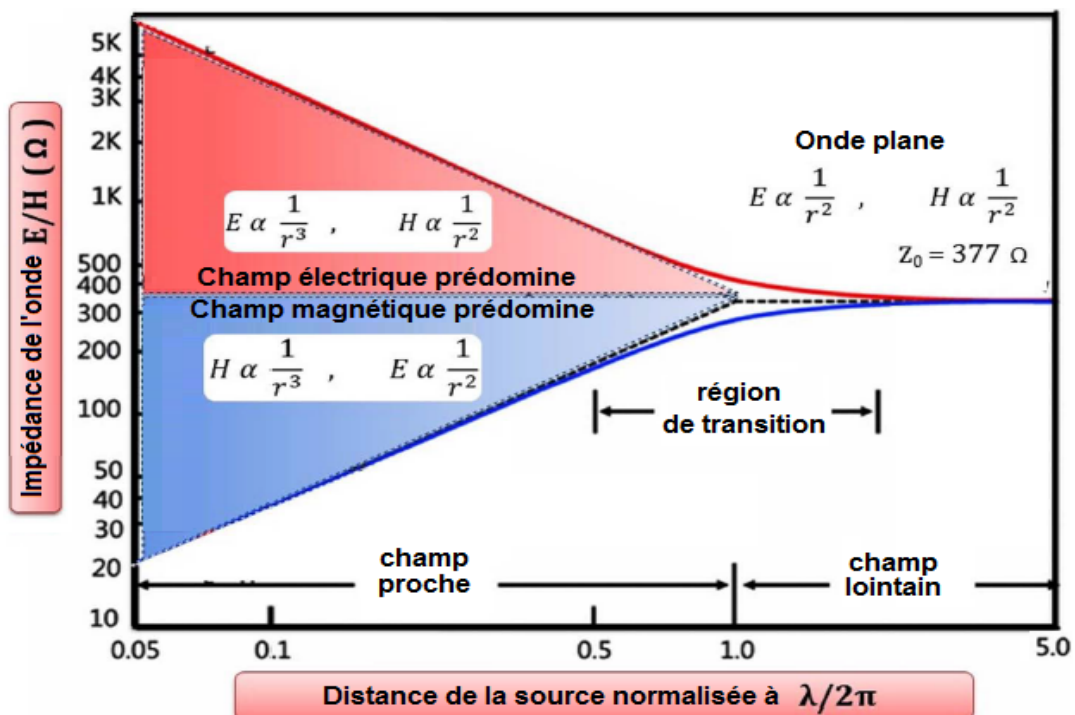
### I.6 Champ proche et champ lointain

Le rapport entre le champ électrique et le champ magnétique est appelé impédance d'onde ( $Z = \frac{E}{H}$ ). En se référant à l'évolution de ce rapport, illustré sur la

figure I.12 en fonction de la distance séparant la source de rayonnement et le point d'observation, on peut définir les limites physiques des zones CP et CL [11].

Nous distinguons trois zones : **une zone de champ proche** ; lorsque la distance source-matériau est inférieure à la longueur d'onde dans l'air  $r < \frac{\lambda}{2\pi}$ , le rayonnement est dominé par les composantes multipolaires des champs de la source.

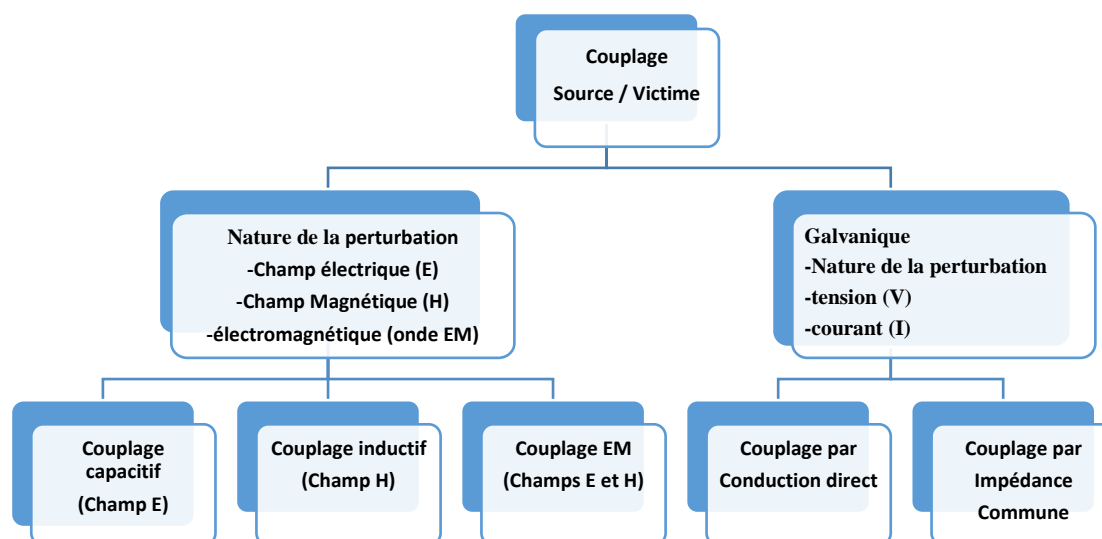
**Une zone de champ lointain** ; quand la distance source-matériau est plus grande que la longueur d'onde dans l'air  $r > \frac{\lambda}{2\pi}$ , dans cette zone le rayonnement est considéré comme une onde plane ou sphérique et l'impédance est donnée par impédance de l'air. Autour de  $r = \frac{\lambda}{2\pi}$  on se trouve **dans une zone transitoire**. Si l'impédance de l'onde est supérieure à l'impédance du vide  $Z_0$ , le champ est à dominance électrique et si l'impédance de l'onde est inférieure à l'impédance du vide  $Z_0$ , le champ est à dominance magnétique [9].



**Figure I.12** : Évolution de l'impédance d'onde en fonction de la distance [12]

### I.7 Modes de couplage

Les couplages sont les modes d'action des perturbations (CEM) sur les victimes. A partir de la représentation de la figure I.13, nous observons clairement pour qu'il y ait couplage, il faut au moins deux équipements en présence : un qui va générer des signaux parasites (le coupable, l'agresseur), et un autre qui va subir la perturbation (la victime). [13]



**Figure. I.13 :** Modes de couplages électromagnétiques

En effet, nous distinguons les cinq modes de couplage suivants :

- couplage par impédance commune,
- couplage par diaphonie inductive,
- couplage par diaphonie capacitive,
- couplage de champ à fil,
- couplage de champ à boucle.

Le premier est un couplage par conduction (à travers une résistance, une inductance), et les quatre derniers, des couplages par rayonnement de champs électromagnétique.

#### **A. Le mode de couplage galvanique (ou par conduction) :**

Ce mode de couplage se caractérise par le fait, que le signal perturbateur se propage de la source vers la victime par une liaison physique. Dans cette catégorie on distingue encore les perturbations conduites induites par couplage par impédance commune. Le signal est soit une tension soit un courant. Ce mode de couplage se fait soit par liaison direct soit impédance commun

### A.1. Les couplages par liaison directe :

Les couplages par liaison directe permettent la propagation de la source à la victime par l'intermédiaire d'un canal de transmission d'information ou d'énergie.

Ces perturbations passent de la source à la victime en mode commun et en mode différentiel.

- **Mode différentiel** : La propagation s'effectue en mode différentiel lorsque la perturbation est transmise à un seul des conducteurs actifs [14]

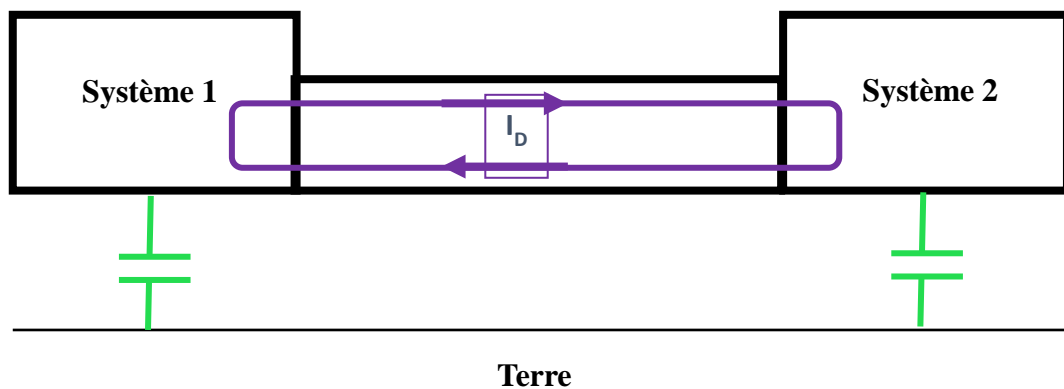


Figure.I.14.a : Mode différentiel [15]

- **Mode commun** : Le courant se propage sur les deux conducteurs dans le même sens et revient par la liaison équipotentielle.

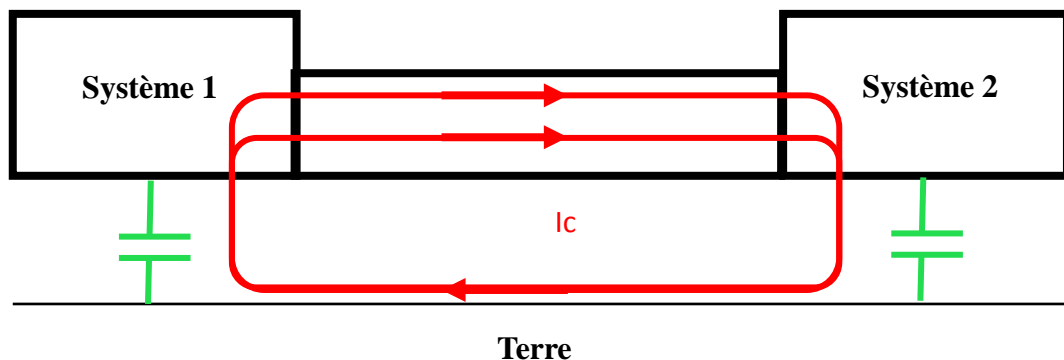


Figure.I.14.b : Mode commun

### A.2 Les couplage par impédance commune :

Le couplage par impédance commune survient lorsqu'un circuit comporte une partie commune avec la source de perturbations, l'impédance commune peut être n'importe quel élément du circuit, résistance, capacité, inductance, retour des masses....

### B. Le mode de couplage rayonné

Dans ce cas il n'existe aucune liaison physique entre la source et la victime. Le transfert d'énergie s'effectue par couplage capacitif, inductif ou par rayonnement. Selon la nature du couplage le signal perturbateur peut être un champ électrique, un champ magnétique ou une onde électromagnétique. On peut distinguer deux types de couplage dans ce mode le couplage en champ lointain et le couplage en champ proche.

#### B.1 Le couplage en champ lointain

Un champ électromagnétique peut se coupler sur toute structure filaire, donc tout câble, et générer sur ces structures des tensions soit en mode commun (par rapport à la masse), soit en mode différentiel (entre fils) (figure. I.15, 16,17) soit et d'ailleurs plus généralement les deux couplages sont appelés champ à câble, c'est l'effet d'antenne, des pistes de circuits imprimés...etc.

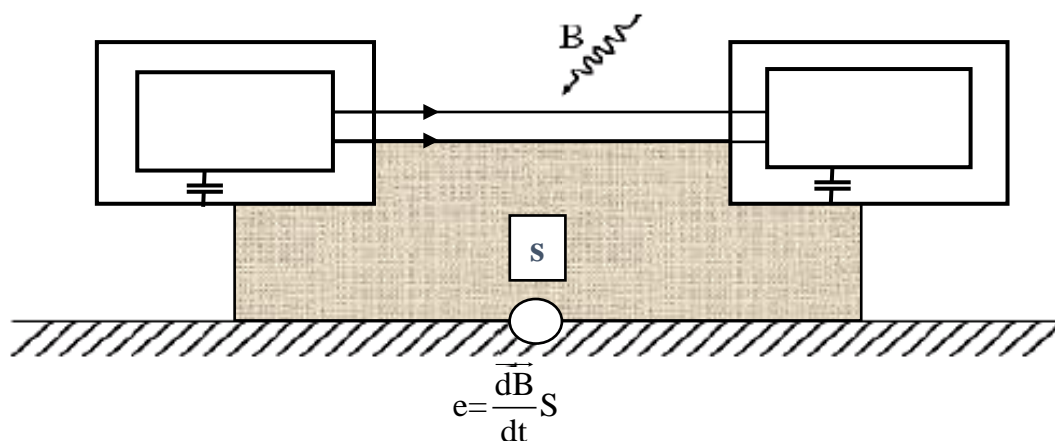


Figure.I.15 : Couplage champ magnétique à câble en mode commun [2]

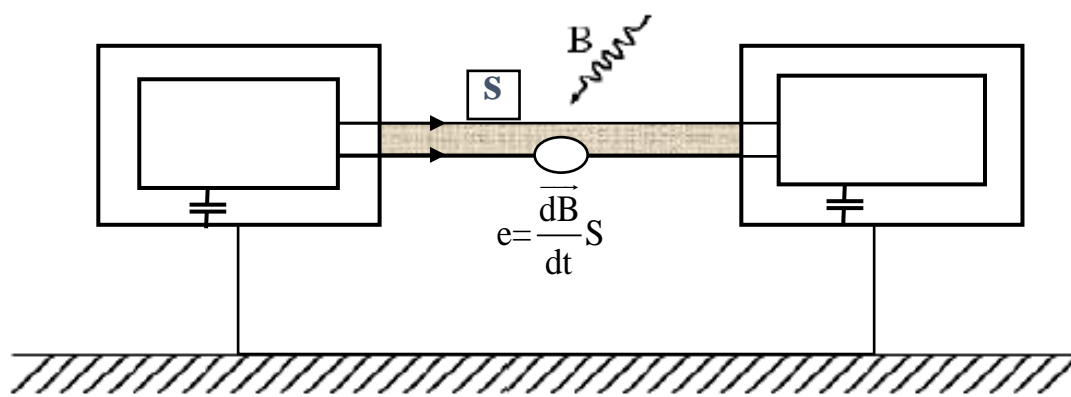


Figure. I.16 : Couplage champ magnétique à câble en mode différentiel

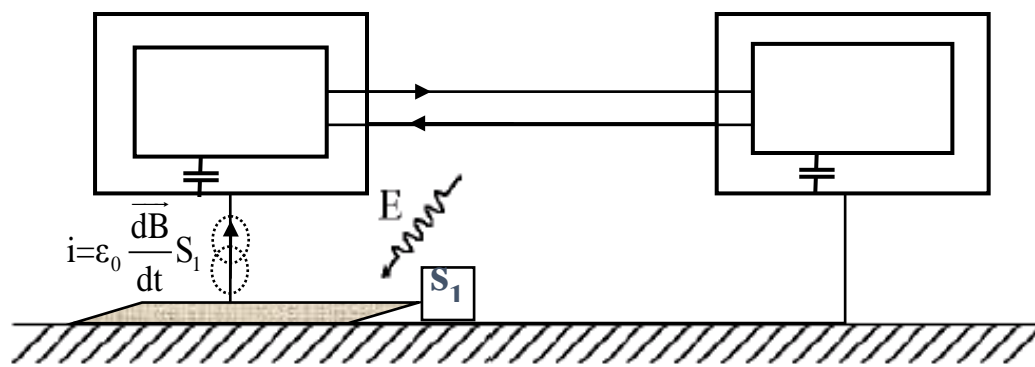


Figure. I.17 : Couplage champ électrique à câble en mode commun

### B.2 Le couplage en champ proche :

Ces couplages en champ électrique ou magnétique peuvent être représentés respectivement par des liaisons capacitives ou des mutuelles inductances. Quand ces couplages interviennent sur des connexions électriques, on parle alors de couplage câble à câble ou de phénomènes de diaphonie capacitive ou inductive (figure. I.18).

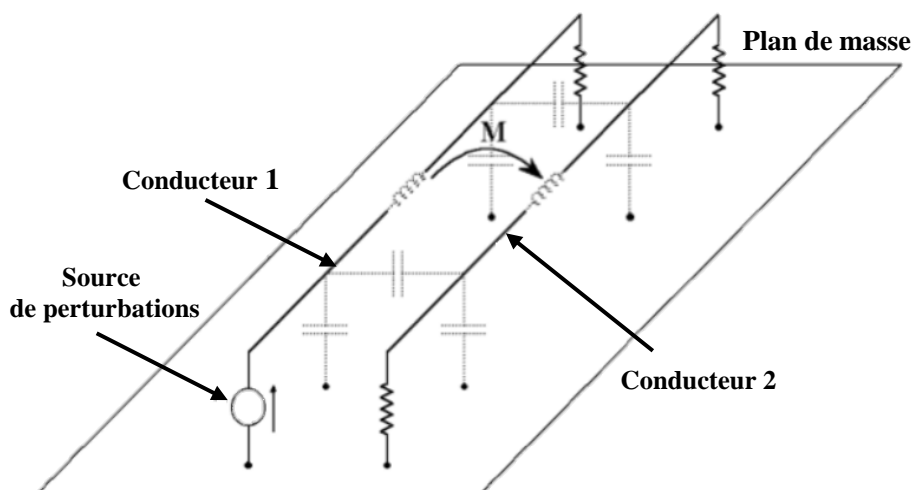


Figure. I.18 : Couplage en champ proche [16]

### I.8 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté un aperçu détaillé du blindage électromagnétique, en abordant son rôle, son fonctionnement ainsi que les différents types existants. Cette analyse nous a permis de constater la complexité de ces phénomènes, leur importance et les défis qu'ils posent en termes de traitement.

Dans la seconde partie, nous avons concentré sur la définition des notions fondamentales de la compatibilité électromagnétique, en mettant en lumière les sources de perturbations ainsi que les modes de couplage.

### Bibliographies

[1] **A.BOUTAR**, *Contribution Au Développement De Modèles Circuits Pour L'étude De Couplages Electromagnétiques A L'intérieur D'enceintes Métalliques*, Thèse de doctorat en électronique des Hautes Fréquences, Photoniques et Systèmes, Université de limoges, Octobre 2014

[2] **H.AG TAWWAD, A.OUIFI**, *Effet Des Ecrans Passifs Et Actifs Sur La Réduction Du Champ Electromagnétique Rayonné Par Une Ligne THT 500 kV*, Mémoire de master en électrotechnique, Université badji mokhtar Annaba, 2018

[3] **M. Wangn, X. Tang , J. Cai , et al** « Construction, Mechanism And Prospective Of Conductive Polymer Composites With Multiple Interfaces For Electromagnetic Interference Shielding». *Carbon*. 2021, 1 Volume 177, P 377-402,( doi.org/10.1016/j.carbon.2021.02.047)

[4] **A. Lallam**, *Conception Simulation Et Réalisation De Coupleurs Pour Des Applications RF Et Micro-Ondes*, Thèse de doctorat en électronique, Université de Tlemcen. 2019

[5] **K. Elfellous**, *Contribution A L'élaboration D'une Méthode D'analyse Reposant Sur Une Approche « Equivalent Circuit » Pour L'étude De La Pénétration D'ondes Electromagnétiques Dans Une Cavité*. Thèse de doctorat en électronique des Hautes fréquences, Université de Limoges, 2010

[6] **P, Poulichet. O, Picon**. *Aide-mémoire d'électromagnétisme*. Dunod. 2010. 408 pages. Aide-mémoire

[7] **A, IDER**. *Etude Des Couplages En Compatibilité Electromagnétique Des Systèmes Electroniques*. Thèse de master d'ingénieur d'état en électronique. Option communication. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 2010

[9] **R, Oussaid**. *Les Aspects De La Compatibilité Electromagnétique*. Office des publications universitaires. 2009.page117

## Chapitre I : Généralités sur le blindage en CEM

---

[9] **S, Ammour.** *Mesure Et Analyse De L'efficacité Du Blindage Electromagnétique A Base De Polystyrène Conducteur A Impact Elevé Associé A Des Charges De Noir De Carbone.* Thèse de master en physique. Université Abou-Bekr Belkaid - Tlemcen .2017

[10] **Jean Louis, Boizard.** *Notions De Compatibilité Electro Magnétique (CEM).* Maître de conférences, IUFM Midi Pyrénées- Toulouse II .Cours, 45p. Disponible sur : <[http://acversailles.free.fr/documentation/08~Documentation\\_Generale\\_M\\_Suire/Avionique/Anti-Parasites/Theorie-antiparasites/Notions\\_de\\_compatibilite\\_electromagnetique\(CEM\)~JM.Boizard.pdf](http://acversailles.free.fr/documentation/08~Documentation_Generale_M_Suire/Avionique/Anti-Parasites/Theorie-antiparasites/Notions_de_compatibilite_electromagnetique(CEM)~JM.Boizard.pdf)> (Consulté le 03/05/2024).

[11] **M, Benchana.** *Etude Et Modélisation Des Emissions Rayonnées En Champ Proche Et Champ Lointain Des Dispositifs Electroniques.* Thèse de doctorat en télécommunications. Université 8 Mai 1945 Guelma. 2023

[12] **S. Dhawan ,A Pratap Singh,A Ohlan. et al.** *Smart Materials Design For Electromagnetic Interference Shielding Applications.* Sundeep K. Dhawan, Avanish Pratap Singh, Anil Ohlan, Kuldeep Singh Kakran, Pradeep Sambyal. 2022. page 574

[13] **Hameurlaine.A.** Chapitre 2 : Sources des Perturbations et Techniques de Couplages en CEM. Université Djelfa [en ligne]. Cours, 14p. Disponible sur : <<http://elearning.univ-djelfa.dz/course/view.php?id=4999>> (Consulté le 11/05/2024).

[14] **Abdallah, Darkawi.** Compatibilité Electromagnétique. Polytech Nantes École d'ingénieurs de l'université de Nantes[en ligne]. Disponible sur : <[https://hal.science/cel-01358003/file/cours\\_initiation\\_CEM\\_DARKAWI.pdf](https://hal.science/cel-01358003/file/cours_initiation_CEM_DARKAWI.pdf)> (Consulté le 17/05/2024).

[15] **Michael,Margot.** La Compatibilité Electromagnétique (CEM). Disponible sur : <<http://www.electromagazine.ch/fr/compatibilite-electromagnetique-dans-les-installations-electriques/>> (Consulté le 18/05/2024).

[16] **Dorothee,Ménard.** Compatibilité Electromagnétique. Université Poitiers iut-Angoulême[en ligne]. France. Cours, 39p. Disponible sur : <<https://slideplayer.fr/slide/14744168/>> (Consulté le 22/05/2024).



## **Chapitre II**

# **Etat De L'art Sur Les Méthodes D'évaluation L'efficacité De Blindage**

### II.1 Introduction

Face aux phénomènes de perturbations électromagnétiques, le blindage réagit comme une frontière physique, isolant les composants sensibles aux perturbations ou confinant les sources rayonnantes dans un volume restreint. Le blindage aura pour mission d'atténuer fortement l'intensité des agressions électromagnétiques. Dans ce chapitre on parlera de l'efficacité de blindage et des méthodes d'évaluation.

### II.2 L'efficacité d'un blindage

L'efficacité d'un blindage est habituellement exprimée en décibels, on la calcule sous la forme d'un rapport entre la puissance du champ électrique, la puissance du champ magnétique ou la puissance des ondes transmises et incidentes, sous l'effet des expressions suivantes [1] :

$$\text{Pour le champ électrique : } SE_E \text{ (dB)} = 20 \log \left| \frac{E_i}{E_t} \right| \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Pour le champ magnétique : } SE_H \text{ (dB)} = 20 \log \left| \frac{H_i}{H_t} \right| \quad (\text{II.2})$$

Pour des champs proches et/ou lorsque les deux milieux sont différents, les équations (I.1) et (I.2) ne sont pas équivalentes. Le champ transmis étant au plus égal au champ incident,  $SE_E$  et  $SE_H$  sont nécessairement supérieures à 0 dB.

Comme l'expression de l'efficacité de blindage est différente pour le champ électrique et le champ magnétique, on doit s'efforcer de déterminer si la source émet davantage de champ électrique ou davantage de champ magnétique. Une forte tension est à l'origine d'un fort champ électrique, et un fort courant à l'origine d'un champ magnétique élevé, ceci étant valable lorsque l'on se trouve proche de la source. Considérons un écran de blindage d'épaisseur  $t$ , de conductivité  $\sigma$ , de permittivité relative  $\epsilon_r$  et de perméabilité relative  $\mu_r$

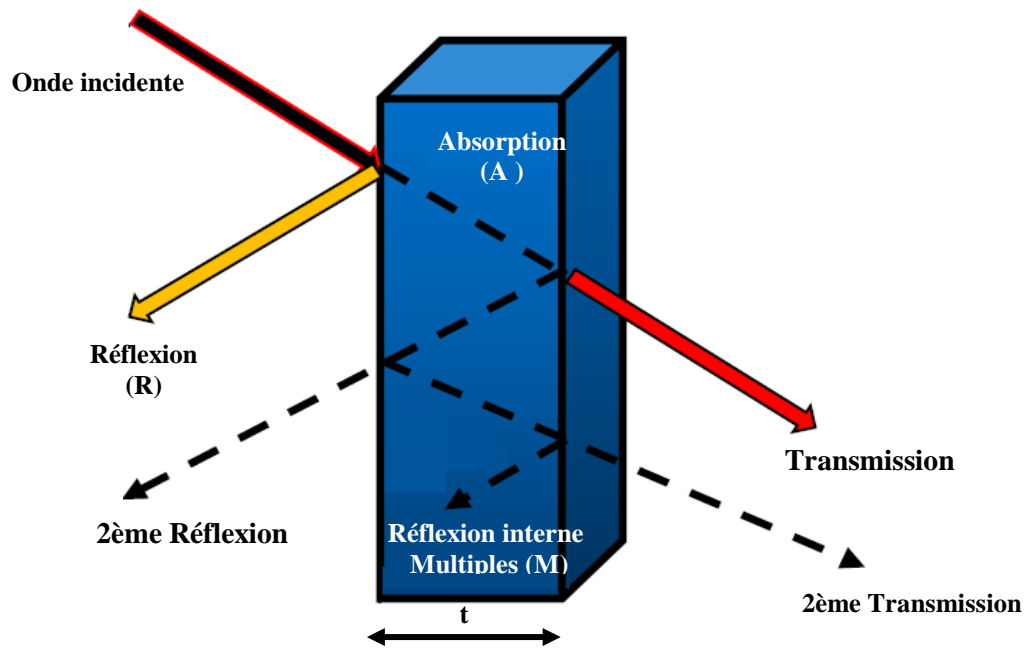


Figure II.1 : Atténuation d'une onde électromagnétique.

L'atténuation d'une onde électromagnétique, à l'aide d'un écran, peut se produire sous l'effet de trois mécanismes différents :

- ✓ Absorption A (dB),
- ✓ Réflexion R (dB)
- ✓ Réflexion interne multiple M (dB).

Dans le matériau, l'onde s'atténue par dissipation si bien qu'elle ne parvient à l'autre face qu'atténuée. Ce facteur est désigné par A (dB).

### II.3 Théorie du blindage :

#### II.3.1 Réflexion et absorption

Un champ électrique alternatif qui frappa une paroi conductrice de longueur infinie induira un flux de courant dans cette surface de la paroi qui à son tour produira une onde réfléchie de sens opposé.

L'amplitude de l'onde réfléchie détermine les pertes par réflexion de la paroi. Comme les parois de blindage ont une conductivité finie, une partie de ce flux pénètre dans la paroi et une fraction de celle-ci apparaîtra de l'autre côté de la paroi ou elle produira son propre champ (figure II.2). Plus la paroi est épaisse, plus l'atténuation du courant à travers elle est grande. Les pertes par absorption dépendent de « l'épaisseur de peau » dans la paroi. Les champs sont atténués de 8,6 dB ( $1/e$ ) à chaque pénétration de l'épaisseur de peau [2].

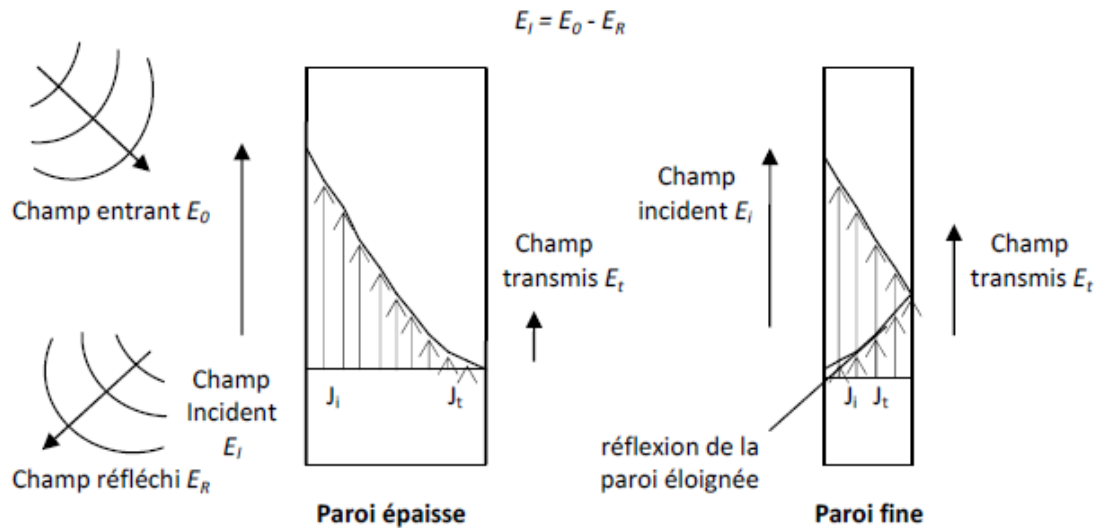


Figure. II.2 : Réflexion et absorption dans une barrière infinie

### II.3.1.1 Effet de peau

Les courants circulent préférentiellement en surface des conducteurs : c'est l'effet de peau

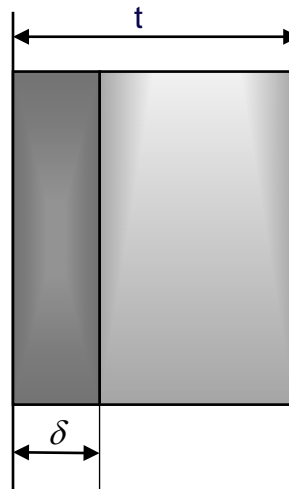


Figure II.3 : l'effet de peau dans un conducteur [3].

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}} = \frac{66}{\sqrt{\mu_r\sigma_r f (hz)}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.3})$$

$\delta$  est la profondeur de pénétration, soit la distance à laquelle l'onde a été atténuée d'un facteur  $t$ . Elle dépend de la fréquence  $f$ , de la perméabilité  $\mu$  et de la conductivité  $\sigma$ .

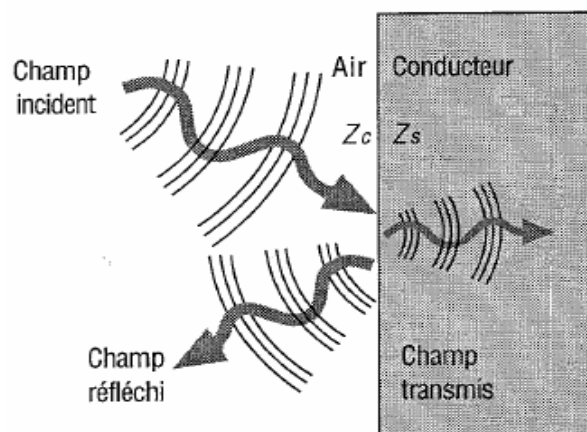
**Tableau II. 1 :** Épaisseur de peau (en mm) pour quelques matériaux courants [4]

fréquence (Hz)	Cuivre	Aluminium	Acier
50	50	14.7	0.932
100	6.60	10.4	0.66
1 k	2.08	3.30	0.208
10 k	0.660	1.04	0.0660
100 k	0.208	0.330	0.0208
1 m	0.0660	0.104	0.00660
100 m	0.00660	0.0104	0.000660

### A. Perte par réflexion R

Les pertes par réflexion R est un phénomène dû à la désadaptation d'impédance entre le milieu de propagation de l'onde et la barrière de blindage qui est généralement constitué d'un matériau bon conducteur. La haute conductivité électrique n'est pas généralement une exigence pour le blindage électromagnétique, cependant, elle contribue à son amélioration. Pour cette raison, une grande partie de l'onde électromagnétique incidente est réfléchi [5].

Les matériaux très conducteurs comme le cuivre et l'aluminium ont des pertes par réflexion du champ électrique E supérieures à celles de matériaux moins conducteurs comme l'acier.



**Figure. II. 4 :** Pertes par réflexion

Lorsque la fréquence augmente, les pertes par réflexion diminuent pour le champ E et augmente pour le champ H. [2]

$$\text{Onde plane} \quad R = 168 - 10 \cdot \log_{10}((\mu_r / \sigma_r) \cdot f) \quad [\text{dB}] \quad (\text{II.4})$$

$$\text{Champ électrique} \quad R_E = 322 - 10 \cdot \log_{10}((\mu_r / \sigma_r) \cdot f^3 \cdot r^2) \quad [\text{dB}] \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Champ magnétique} \quad R_H = 14.6 - 10 \cdot \log_{10}((\mu_r / \sigma_r) \cdot f \cdot r^2) \quad [\text{dB}] \quad (\text{II.6})$$

### B. Perte par absorption A

Les pertes par absorption dépendent de l'épaisseur de la barrière et de son épaisseur de peau ; elles sont les mêmes pour le champ électrique, magnétique ou l'onde plane. L'épaisseur de peau à son tour dépend des propriétés de la barrière ; par contraste avec les pertes par réflexion, l'acier offre une absorption supérieure à celle du cuivre pour une même épaisseur.

Pour un blindage d'épaisseur  $t$ , on peut alors calculer le facteur d'absorption :

$$A = 8.69 \cdot \frac{t}{\delta} \sqrt{\mu_r \sigma_r f} \quad [\text{dB}] \quad (\text{II.7})$$

### C. Réflexions Multiples

Si un matériau mince est utilisé comme blindage, l'onde réfléchiée par la deuxième frontière est renvoyée vers la première frontière, puis elle retourne à la deuxième frontière pour être à nouveau réfléchiée, comme illustré à la Figure II.1 , Cela peut être négligé dans le cas d'un blindage épais car la perte d'absorption est élevée. Lorsque l'onde atteint la deuxième frontière pour la deuxième fois, son amplitude est négligeable car, à ce moment-là, elle a traversé l'épaisseur du blindage trois fois. Le facteur SE (M) peut être exprimé comme suit :

$$M = 20 \cdot \log_{10}((1 - e^{-2t/\delta})) \quad [\text{dB}] \quad (\text{II.8})$$

Les pertes réflexions multiples M sont insignifiantes dans la plupart des cas où les pertes A sont supérieures à 10 dB, mais elles deviennent importantes pour les barrières fines aux basses fréquences

$t$  : l'épaisseur du blindage et  $\delta$  : la profondeur de pénétration en mètres.

#### ➤ L'atténuation du champ par le blindage dépend de [6] :

- ❖ de la perméabilité du matériau,
- ❖ de sa conductivité,
- ❖ de son épaisseur,

- ❖ de la fréquence  $F$  de l'onde transmise,
  - ❖ de la distance entre la source EMI et le blindage
- L'efficacité du blindage donnée par l'équation (II-1) et (II-2) peut être divisée en trois termes chacun représentant un phénomène [7] :

$$\boxed{SE \text{ (dB)} = R \text{ (dB)} + A \text{ (dB)} + M \text{ (dB)}} \quad [\text{dB}] \quad (\text{II.9})$$

- ✓  $R_{dB}$  : représente les pertes par réflexions sur la face gauche du conducteur ( $R > 0$ ).
- ✓  $A_{dB}$  : représente les pertes par absorption dans le conducteur ( $A > 0$ ).
- ✓  $M_{dB}$  : représente les réflexions et transmissions multiples additionnels ( $M < 0$ ). La valeur négative de ce dernier facteur diminue l'efficacité de blindage.

### II.4 Les paramètres influence sur l'efficacité de blindage

En fonction du type de source, en fonction de la distance à laquelle on se trouve de la source, on sait si on est à prédominance de champ électrique ou de champ magnétique. L'efficacité de blindage dépend du type de matériau, de la fréquence des champs, de l'épaisseur du blindage, de la présence d'ouvertures et de la forme du blindage [8]

#### II.4.1 Matériaux de blindage

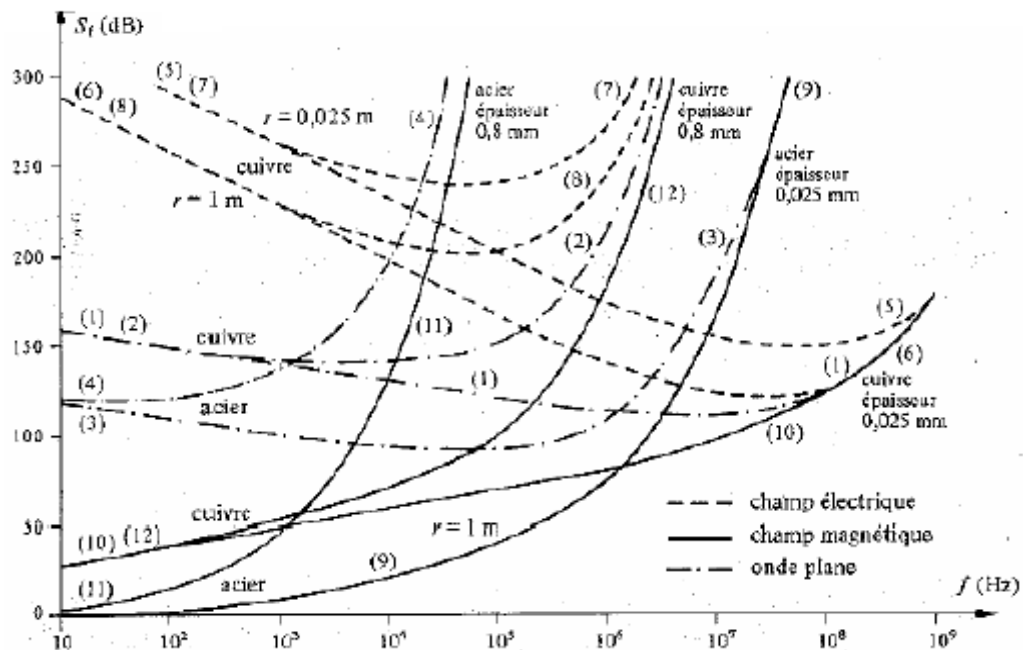
##### II.4.1.1 Critères du choix de la matière

Lors du choix de la matière pour un blindage électromagnétique, plusieurs critères doivent être pris en compte pour assurer que le matériau choisi répond aux exigences spécifiques de l'application. Voici une explication détaillée de chacun des critères mentionnés :

- Caractéristiques mécaniques
- Poids
- Résistance à la corrosion
- Coût
- Efficacité de blindage
- Facilité d'assemblage

Les matériaux typiques utilisés pour le blindage sont le cuivre, l'aluminium et l'acier. Chaque matériau a une courbe d'efficacité spécifique en fonction de la fréquence et de

l'épaisseur de la tôle, en champ électrique, magnétique ou électromagnétique, voir la figure II. 5. [9]



**Figure II. 5 :** Dispersion de l'épaisseur de peau pour différents matériaux [10]

On préfère les matériaux à perméabilité magnétique élevée pour blinder les champs magnétiques.

Les matériaux à  $\mu$  élevé sont à utiliser pour se protéger des champs magnétiques.

Et les tableaux suivants représentent quelques valeurs courantes.

**Tableau II.2 :** Valeurs de perméabilité et de conductivité pour des matériaux [11].

Matériau	Conductivité	Perméabilité
	relative $\sigma_r$	relative $\mu_r$
Argent	1,05	1
Cuivre – recuit	1	1
Or	0,7	1
Chrome	0,664	1
Aluminium (mou)	0,61	1
Aluminium (trempé)	0,4	1
Zinc	0,32	1
Laiton	0,26	1



### II.4. 1.2 Matériaux ferromagnétiques

Les matériaux ferromagnétiques représentent une classe des matériaux en céramique qui sont employés couramment dans des applications à haute fréquence. Ils sont divisés en grenats et ferrites, ces derniers étant beaucoup plus importants en blindage en raison de leurs plus grandes valeurs de la perméabilité magnétique relative et de leurs grandes pertes. [12]

**Tableau II. 3 :** Conductivité et intervalle de la perméabilité magnétique relative des trois matériaux ferromagnétiques les plus courants [13]

Matériau Ferromagnétique	Conductivité [S/m]	Intervalle de la Perméabilité Magnétique Relative
Cobalt	$1.6 \cdot 10^7$	70–250
Nickel	$\sim 1.2 \cdot 10^7$	110–600
Fer	$\sim 1 \cdot 10^7$	150–200000

Dans les applications de blindage, les ferrites trouvent leur principale utilisation pour l'absorption d'un champ électromagnétique incident en raison de leurs grandes valeurs de pertes : cela est très utile pour réduire le champ réfléchi à l'intérieur des structures en forme de cavité une fois que le champ les a pénétrées.

### II.4. 1.3 Matériaux ferroélectriques

Des propriétés des matériaux ferroélectriques ont été connues depuis le dix-septième siècle (sous la forme appelée le sel de Rochelle), bien qu'elles aient été appelées de cette façon seulement environ 1940.

Le développement industriel et l'utilisation des matériaux ferroélectriques est bien plus récent et souvent limité aux appareils électroniques. Ces matériaux présentent trois caractéristiques principales :

- Anisotropie.
- Pertes de puissance.
- Sensibilité aux variations de la température des paramètres principaux.

D'un point de vue chimique, les matériaux ferroélectriques peuvent être des céramiques, des métallophthalocyanines monomères ou polymères. En fonction de leur structure, composition et du procédé utilisé pour leur synthèse

#### II.4.1.4 Matériaux composites et structures hybrides pour le blindage EMI

En général, les matériaux métalliques sont largement utilisés comme matériaux de blindage EMI (interférences électromagnétiques) en raison de leur haute conductivité

## Chapitre II : Efficacité de blindage et méthodes d'évaluation

électrique ; l'un des principaux inconvénients des métaux est leur poids lourd, ce qui rend le processus de fabrication et d'assemblage très difficile. Les dommages dus à la corrosion représentent un autre problème pratique pour les métaux, la haute densité et la faible flexibilité des métaux les rendent inadaptés aux dispositifs électroniques modernes légers et haut de gamme [14], des matériaux composites multifonctionnels conducteurs d'électricité, ainsi que des structures hybrides, sont développés pour répondre à la demande croissante de solutions de blindage contre les interférences électromagnétiques (EMI) dans l'électronique de haute puissance. Ces matériaux, intégrés dans des configurations hybrides complexes.

### II.4.1.4.1 blindages composés ou multiples:

On a vu qu'il était difficile de trouver un matériau capable d'avoir une efficacité de blindage en réflexion et absorption simultanément. L'idée est alors d'associer en plusieurs couches, des matériaux aux propriétés complémentaires de manière à augmenter l'efficacité de blindage dans tout le domaine de fréquence. Bien entendu on le paye en coûts et poids supplémentaires [6].

Les tableaux suivants donnent quelques exemples qui utilisent cette technique

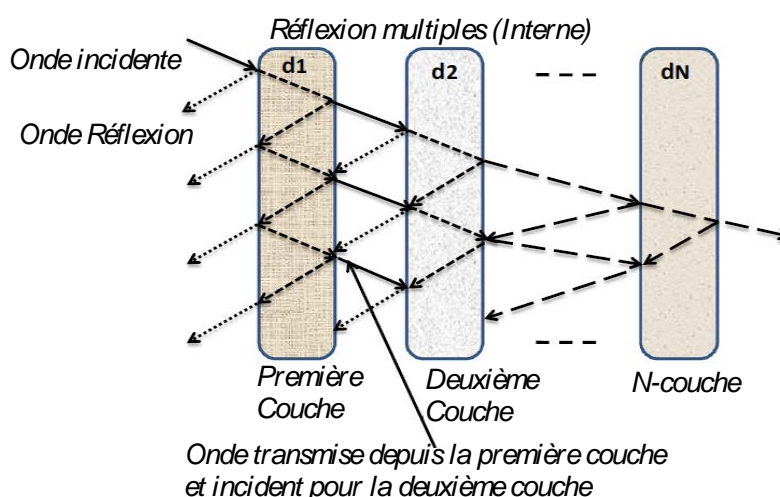
**Tableau II. 4 :** Atténuation d'un blindage à double isolation électrique (en dB)

Matériaux	Champ magnétique		Champ électrique et onde plane		
	60Hz	15kHz	15kHz	1GHz	10GHz
2 couches de cuivre (915g/m <sup>2</sup> )	2-2	64	120	120	120
2 couches d'acier 24 galvanisé	15	80	120	120	90à 106
Combinaison cuivre et acier	18-25	90	120	120	120
4 couches 2 d'acier 24 galvanisé 2 de cuivre (915g/m <sup>2</sup> )	30-36	120	120	120	120

**Tableau II. 5 :** Comparaison entre les simples écrans, les doubles isolés et les doubles non isolés

Type de blindage	Type de paroi	Matériau	Champ magnétique		Champ électrique et ondes planes		
			60 Hz	15 kHz	15 kHz	1 GHz	10 GHz
Double isolation électrique	Ecran solide	Cuivre Acier	2-3 15	64	120	120	98 à
		24 galvanisé		80	120	120	106
Double non isolé électrique	Ecran solide	Cuivre Acier		52	90	90	
		24 galvanisé		68	90	90	
Simple		Cuivre Acier		42	60	60	
		24 galvanisé		48	80	80	

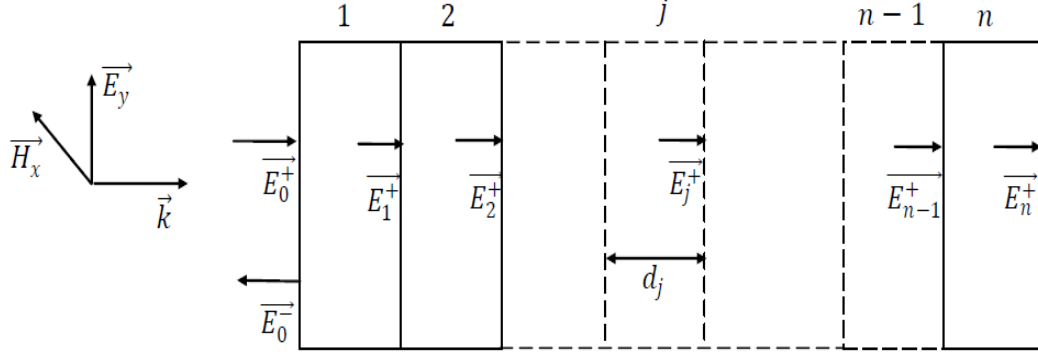
On peut remarquer le meilleur comportement de ce type de technique même en basse fréquence.



**Figure II. 6 :** Principe de réflexions multiples dans une structure multicouche [15]

#### II.4.1.4.2 L'efficacité d'un blindage multicouche en champ lointain

Un blindage multicouche est obtenu à partir d'assemblage de deux ou plusieurs couches de matière différentes. Ce type de blindage consiste à développer une structure multicouche en utilisant les performances de chaque constituant. Pour calculer l'efficacité du blindage d'une structure multicouche, le raisonnement utilisé dans le cas d'un blindage monocouche peut être étendu. Pour ce faire, nous considérons une onde électromagnétique plane incidente sur une structure à  $j$  couches ( $j = 1.. .. n$ ). Chaque couche est supposée homogène et isotrope avec une permittivité  $\epsilon_j$ , une perméabilité  $\mu_j$ , une conductivité électrique  $\sigma_j$  et une épaisseur  $d_j$  (Figure II.7).



**Figure II.7 :** Représentation schématique d'onde électromagnétique pénétrant une structure multicouche.

Le coefficient de transmission de la couche 1 est  $T_1 = \frac{E_1^+}{E_0^+}$  la couche 2 est  $T_1 = \frac{E_2^+}{E_1^+}$  de la couche 3 est  $T_1 = \frac{E_3^+}{E_2^+}$  ..... de la couche j est  $T_1 = \frac{E_j^+}{E_{j-1}^+}$  .... et de la couche n est  $T_1 = \frac{E_n^+}{E_{n-1}^+}$ . En substituant  $T_n$  dans  $T_{n-1}$ , en suite  $T_{n-1}$  dans  $T_{n-2}$  ..... jusqu'à  $T_1$ , nous pouvons écrire le coefficient de transmission total de la structure multicouche comme un produit de l'ensemble des coefficients de transmission de chaque couche, donné par :

$$T = \prod_{j=1}^n T_j \quad (\text{II.10})$$

Finalement, en considérant que la structure multicouche est en contact avec de l'air ( $Z_0 = Z_{n+1} = 377 \text{ Ohms}$ ), l'efficacité du blindage multicouche, donnée par [5] :

$$SE (dB) = -20 \log_{10} \left| \prod_{j=1}^n p_j \left[ 1 - q_j e^{-i2k_j d_j} \right]^{-1} e^{-ik_j d_j} \right|$$

$$SE (dB) = -20 \log_{10} \left| \prod_{j=1}^n p_j \right| + 20 \log_{10} \left| \prod_{j=1}^n e^{ik_j d_j} \right| + 20 \log_{10} \left| \prod_{j=1}^n \left[ 1 - q_j e^{-i2k_j d_j} \right] \right| \quad (\text{II.11})$$

Où

$$R (dB) = -20 \log_{10} \left| \prod_{j=1}^n p_j \right| \quad (\text{II.12})$$

$$A (dB) = 20 \log_{10} \left| \prod_{j=1}^n e^{ik_j d_j} \right| \quad (\text{II.13})$$

$$M (dB) = 20 \log_{10} \left| \prod_{j=1}^n \left[ 1 - q_j e^{-i2k_j d_j} \right] \right| \quad (\text{II.14})$$

$$p_j = \frac{4Z_j Z_{j+1}}{(Z_j + Z_{j-1})(Z_j + Z_{j+1})}$$

$$q_j = \frac{(Z_{j+1} - Z_j)(Z_{j-1} - Z_j)}{(Z_j + Z_{j-1})(Z_j + Z_{j+1})}$$

### II.4.1.5 Blindage des coffrets plastiques par métallisation :

Les matières plastiques allégées ou compactes sont fréquemment utilisées à la place des métaux, dans la réalisation d'habillage ou de boîtiers d'appareils électroniques. Elles présentent un sérieux désavantage comparé aux métaux car elles ne peuvent pas assurer un blindage aux ondes EM internes ou externes. Elles ne permettent pas non plus d'évacuer les charges électriques à la terre correctement.

Pour éviter ces problèmes il est possible de rendre ces matières plastiques conductrices en utilisant divers procédés :

- Par shooPAGE (projection de zinc ou de cuivre fondu).
- Par métallisation sous vide (en général de l'aluminium).

Par peinture conductrice (un pigment conducteur est en dispersion dans un liant). Ces peintures qui sont appliquées à froid, sont soit à base de nickel, de cuivre, d'argent ou de graphite

Pour obtenir une atténuation élevée (60 à 70dB), il est nécessaire de métalliser les deux faces interne et externe des coffrets

**Tableau II.6 :** Efficacité de blindage de quelques revêtements conducteurs

Matériau	Epaisseur	Atténuation dB*
Plastique	3,2mm	0
Aluminium (plaque)	1,6mm	65-100
Peinture argent	25µm	65-70
Argent graphite (2couches)	5µm - 25µm	54-74
Cuivre	50µm	20-65
Cuivre graphite 2 couches	50µm - 50µm	27-62
Graphite	50µm	30-60
Nickel	50µm	65

\* Pratiquement indépendante de la fréquence de 0,1MHz à 1GHz pour des épaisseurs inférieures à 0,1mm. Varie en fonction inverse de la résistivité du revêtement [6]

### II.4.1.6 Polymères Thermoplastiques et Thermodurcissants

Les matériaux conducteurs, notamment les métaux, sont utilisés pour le blindage contre les interférences électromagnétiques (EMI) en raison de leur haute conductivité électrique. Cependant, les métaux présentent des inconvénients tels que la difficulté de traitement, le poids élevé, la corrosion et une faible élasticité.

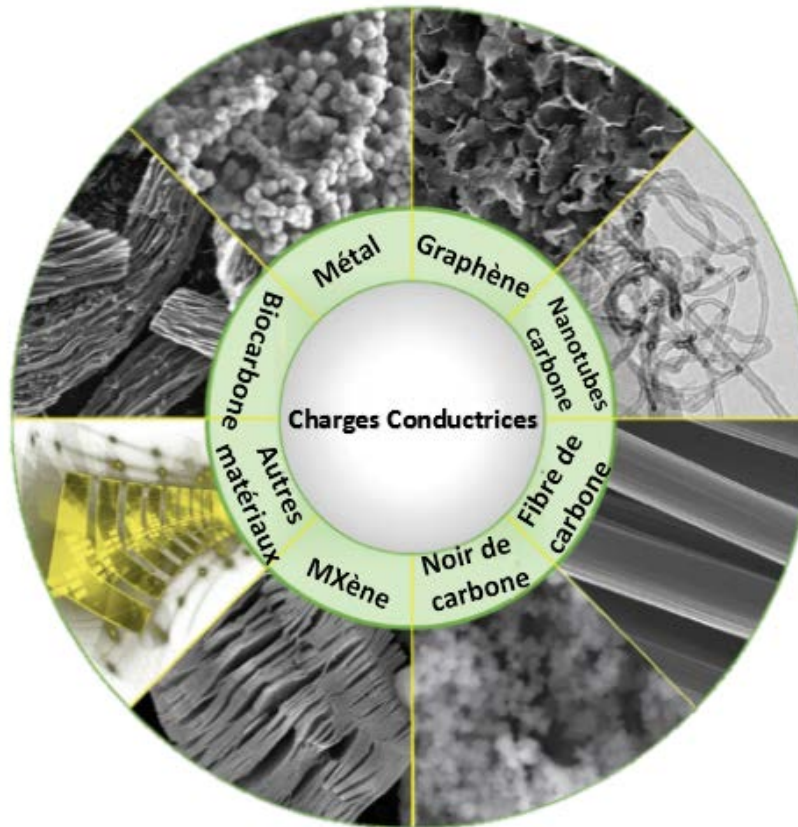
Les chercheurs développent des matériaux intelligents avec une haute conductivité électrique et une forte magnétisation saturée pour des performances élevées d'absorption des ondes électromagnétiques. Les composites polymères conducteurs (PNCs) sont une alternative prometteuse, offrant légèreté, faible coût, facilité de traitement, résistance à la corrosion et compatibilité environnementale.

Les polymères thermoplastiques sont fiables pour le blindage EMI et offrent des avantages significatifs, notamment la flexibilité et la possibilité de créer des produits de formes et tailles variées. Plusieurs polymères thermoplastiques, tels que le polyuréthane thermoplastique (TPU), le styrène-acrylonitrile-butadiène (ABS), le polycarbonate (PC), le polystyrène (PS) et le polypropylène (PP), renforcés avec des nano composites conducteurs, sont étudiés pour les applications de blindage EMI [16]

#### II.4.1.6.1 Charges Conductrices

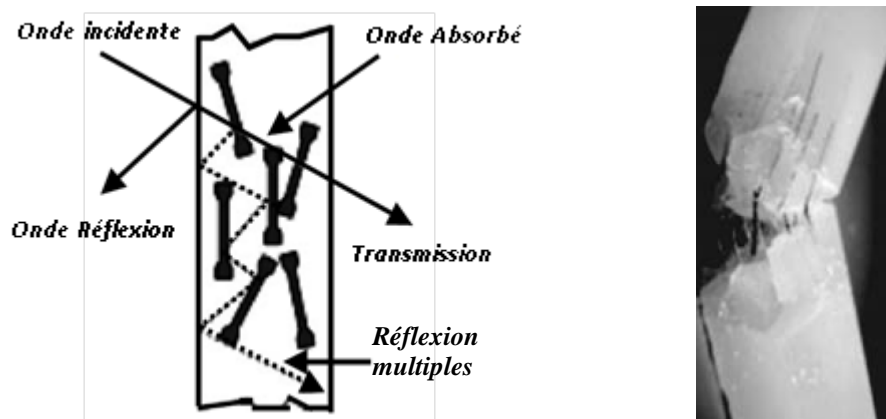
Les polymères utilisés pour le blindage électromagnétique, comme le polystyrène (PS) et le polypropylène (PP), sont des isolants nécessitant des charges conductrices pour obtenir la conductivité et l'efficacité de blindage EMI requises. Les matériaux carbonés tels que le graphène et les nanotubes de carbone (CNTs) sont prometteurs en raison de leurs excellentes performances de blindage EMI et de leurs applications variées [14].

Un matériau de blindage efficace doit être hautement conducteur et économique à produire. Les composites polymères doivent donc former un réseau interconnecté conducteur avec une faible teneur en charge. Pour les dispositifs modernes, la réduction de l'épaisseur du matériau est essentielle pour obtenir des produits légers et flexibles sans compromettre les performances de blindage



**Figure II.8 :** Charges conductrices utilisées pour le blindage électromagnétique ces dernières années [14]

La mise en forme des fibres métalliques permet également de favoriser des réflexions multiples à travers l'épaisseur du composite ; voir la Figure II.9



**Figure II.9 :** Composites polymères renforcés de fibres métalliques. (Modifié de Wetherhold et Patra, 2004.)[17]

**Tableau II.7 :** Efficacité de blindage des polymères dans la bande X à 8,2 GHz [18]

Polymère	Charge	Contenu de Charge	Conductivité électrique ( $\sigma$ ) (S/m)	Épaisseur (mm)	SE (dB)
PP (Polypropylène)	Particules d'étain	15 vol%	2600	2	67
PP (Polypropylène)	Fibres de verre enrobées d'Ag	10 vol%	1200	2	61
PP (Polypropylène)	CNT (Nanotubes de carbone)	10 vol%	380	1	38
PU (Polyuréthane)	Graphène	20 wt%	830	1.5	51
PP (Polypropylène)	Fibres d'acier inoxydable	15 vol%	0.1	3.1	40
Époxy	Mxènes	15 wt%	1000	2	41
PLA (Acide Polylactique)	Fibres PLA enrobées d'Ag avec de l'acide stéarique	8.3 vol%	254	1.5	49
UHMWPE (Polyéthylène à ultra-haut poids moléculaire)	Particules de Ni (Nickel)	2.58 vol%	2650	2	52

\*vol% :volume %;Wt% :poids%

### II.4.1.7 Couches minces

La technologie actuelle a rendu disponible pour les matériaux de blindage qui peuvent être formés en tant que couches minces. Les épaisseurs de ces matériaux s'étendent d'environ 1 millimètre aux dizaines de millimètre et offrent ainsi de grands avantages en termes de poids et souvent du coût, en comparaison des barrières épaisses. Parfois ce type de blindage est choisi parce qu'elle facilite la mise à la terre ou offre les chemins aux décharges électrostatiques.

L'efficacité de blindage des couches conductrices minces est généralement acceptable seulement aux fréquences plus hautes que des dizaines de mégahertz.

### II.4.2 Prise en compte des ouvertures et des discontinuités d'un blindage

Les calculs précédents de l'efficacité du blindage supposaient un blindage solide sans ouvertures. Il a été démontré que, sauf pour les champs magnétiques à basse fréquence,



il est relativement facile d'obtenir plus de 90 dB d'efficacité de blindage. En pratique, cependant, la plupart des blindages ne sont pas solides. Il doit y avoir des couvercles d'accès, des portes, des trous pour les conducteurs, des ventilations, des interrupteurs, des compteurs, ainsi que des joints et des coutures mécaniques. Tous ces éléments peuvent réduire considérablement l'efficacité du blindage. En pratique, l'efficacité intrinsèque du matériau de blindage est moins préoccupante que les fuites à travers les coutures, les joints et les trous.

Les discontinuités du blindage ont généralement plus d'effet sur les fuites de champ magnétique que sur les fuites de champ électrique. Par conséquent, on accorde une plus grande attention aux méthodes de minimisation des fuites de champ magnétique. Dans presque tous les cas, ces mêmes méthodes sont plus que suffisantes pour minimiser les fuites de champ électrique.

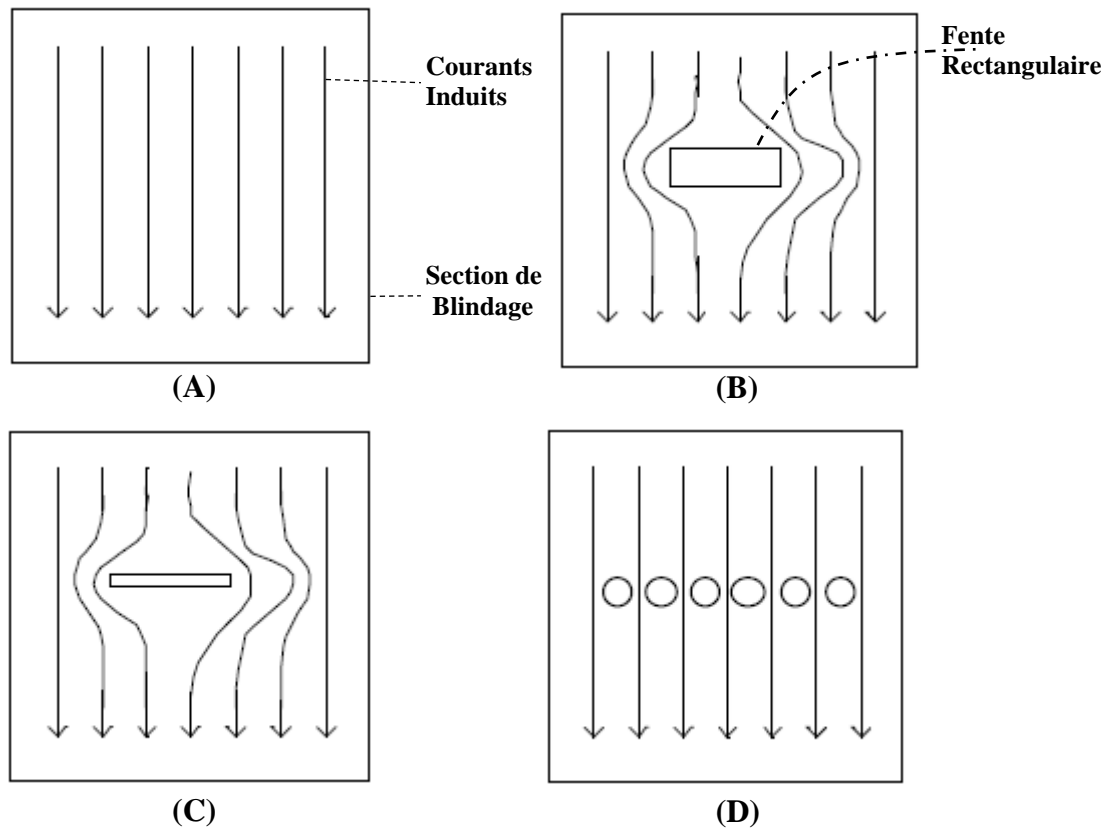
La quantité de fuite provenant d'une discontinuité de blindage dépend principalement de trois éléments:

1. La dimension linéaire maximale (et non la surface) de l'ouverture.
2. L'impédance d'onde.
3. La fréquence de la source.

Le fait que la dimension maximale, et non la surface, détermine la quantité de fuite peut être mieux visualisé en considérant l'approche par la théorie des circuits appliquée au blindage. Dans cette approche, les champs de bruit induisent des courants dans le blindage, et ces courants génèrent ensuite des champs supplémentaires. Les nouveaux champs annulent le champ initial dans certaines régions de l'espace. Pour que cette annulation se produise, ces courants de blindage doivent pouvoir circuler sans perturbation de la manière dont ils ont été induits par le champ incident. Si une discontinuité du blindage oblige les courants induits à suivre un chemin différent, l'efficacité du blindage est réduite. Plus le courant est contraint de faire un détour, plus la diminution de l'efficacité du blindage sera importante.

La Figure II.10 illustre comment les discontinuités affectent les courants induits dans le blindage. La Figure II.10 A montré une section de blindage sans discontinuité, ainsi que les courants induits dans le blindage. La Figure II.10 B montre comment une fente rectangulaire détourne les courants induits dans le blindage et produit ainsi des fuites.

La Figure II.10 C montre une fente beaucoup plus étroite mais de la même longueur. Cette fente plus étroite a presque le même effet sur le courant que la fente plus large de la Figure II.10 B et produit donc la même quantité de fuite. La Figure II.10 D montre qu'un groupe de petits trous a beaucoup moins d'effet de détournement sur le courant.



**Figure II.10 :** Modification des courants induits dans le blindage par la présence des ouvertures [19]

#### II.4.2.1 Ouvertures rectangulaires dans le blindage

Pour les ouvertures rectangulaires dont la longueur est égale ou inférieure à la demi-longueur d'onde, l'efficacité de blindage en décibel est donnée par l'expression suivante

$$SE = 20 \log \left( \frac{\lambda}{2L} \right) \quad (II.15)$$

$\lambda$  est la longueur d'onde et  $L$  la dimension maximale de l'ouverture.

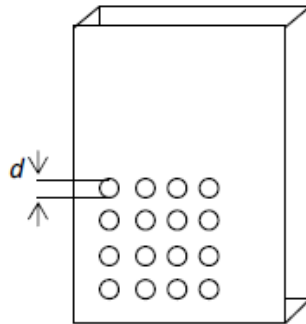
Pour la dimension la plus large de l'ouverture égale à une demi-longueur d'onde, l'atténuation de l'ouverture est de 0 dB et l'atténuation augmente de 20 dB quand la fréquence diminue d'un facteur 10

Il faut garder à l'esprit que le guide d'onde est un passe haut dont la fréquence de coupure est définie par les dimensions de l'ouverture [20]

### II.4.2.2 Fenêtres et fentes d'aération

#### ❖ Réseau d'ouvertures

Réseau d'ouverture de mêmes dimensions sont réparties à des distances inférieures à la longueur d'onde (par exemple un réseau de fentes de ventilation).



**Figure II.11 :** Réseau d'ouverture sur un boîtier

La réduction d'efficacité du blindage est approximativement proportionnelle à la racine carrée du nombre  $N$  d'ouverture :

$$SE = 20 \log\left(\frac{\lambda}{2d\sqrt{N}}\right) = 20 \log\left(\frac{\lambda}{2d}\right) - 10 \log(N) \quad (\text{II.17})$$

Par contre si les ouvertures sont des faces différentes du blindage, le rayonnement se fait dans des directions différentes et il n'y a pas cumulation. Il est donc avantageux de chercher à répartir les ouvertures sur les faces du blindage.

### II.5 Méthodes d'évaluation du blindage électromagnétique

L'évaluation de l'efficacité d'un blindage électromagnétique est cruciale pour garantir qu'il remplit sa fonction de protection. Plusieurs méthodes, combinant des approches théoriques, numériques et expérimentales, sont utilisées pour quantifier l'atténuation des champs électromagnétiques.

#### II.5.1 Méthodes théoriques

Dans la pratique, les boîtiers des systèmes embarqués ont des dimensions finies, l'efficacité de blindage électromagnétique  $SE$  peut être calculée par des méthodes numériques ou par des formulations analytiques. Le choix d'une méthode dépend de la complexité de la structure étudiée et des phénomènes physiques mis en jeu.

##### II.5.1.1 Méthodes numériques :

Les méthodes de modélisation peuvent être classées en fonction du domaine temporel (TD) ou fréquentiel (FD). La formulation TD est adaptée aux phénomènes

transitoires et aux médias non linéaires, tandis que la formulation FD est idéale pour les réponses en régime permanent et les structures à haute résonance. Le choix de la méthode dépend de la nature du problème, de la géométrie, des médias impliqués, et des besoins en sortie. Chaque méthode présente des avantages et des compromis [13], dans le domaine temporel telles que la modélisation de ligne de transmission (TLM), la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) et la méthode des moments (MoM) sont des choix évidents [21]. Les formulations analytiques fournissent un moyen beaucoup plus rapide de calculer l'efficacité du blindage, permettant d'étudier l'effet des paramètres de conception

### **.II.5.1.2 Calculs analytiques :**

Lors de calcul de l'efficacité du blindage, les méthodes analytiques présentent une rapidité de calcul. Elles sont aussi faciles à implémenter et précises par rapport aux méthodes numériques. La plupart de ces méthodes sont basées sur la théorie de diffraction de Bethe [12].

Le problème de la pénétration des champs électromagnétiques à travers une ouverture a fait l'objet de plusieurs travaux depuis de nombreuses années parmi ces modèles, on peut citer :

- Modèle de M. P. Robinson : le principe consiste à transformer l'enceinte métallique avec ouverture en un circuit électrique équivalent. L'enceinte est modélisée comme un guide d'onde court-circuité en l'une de ces extrémités. Alors que l'ouverture est modélisée par une ligne de transmission court-circuitée en ses deux extrémités [7]
- Le modèle de R. Azaro est basé sur l'interaction entre des ondes électromagnétiques et une enceinte métallique à ouverture rectangulaire en mode quasi-TEM [22].
- Les méthodes basées sur l'impédance de surface et l'impédance de la fente : en exploitant l'impédance de surface du blindage, les champs électromagnétiques à l'intérieur et à l'extérieur du blindage peuvent être calculés de façon indépendante. Le calcul est réalisé sans introduire les dérivées spatiales des champs à l'interface.

### **II.5.2 Méthodes expérimentales**

Les quatre méthodes de test couramment utilisées pour mesurer l'efficacité de protection contre les interférences électromagnétiques (EMI SE) d'un matériau de blindage donné sont les suivantes :

- ✓ Méthode en champ libre ou espace libre (Open Field or Free Space Method)
- ✓ Méthode de la boîte blindée (Shielded Box Method)
- ✓ Méthode de la salle blindée (Shielded Room Method)
- ✓ Méthode de la ligne de transmission coaxiale (Coaxial Transmission Line Method)

### II.5.2.1 Champ ouvert ou d'espace libre

La méthode en champ libre ou espace libre permet d'évaluer l'efficacité de protection pratique d'un assemblage électronique complet. Ainsi, ce test mesure les émissions rayonnées qui s'échappent d'un produit fini. Le test ne mesure pas la performance d'un matériau spécifique et est soumis à de larges variations en raison des différences d'assemblage des produits finis individuels. Il s'agit d'un véritable test de la performance en service du blindage conçu du produit fini [23], Dans cette technique, le dispositif est placé à une distance de 30 m de l'antenne de réception et l'émission rayonnée est enregistrée (Figure II.12). Dans un test similaire, l'émission conduite transmise par la ligne d'alimentation est également enregistrée. Le résultat final est exprimé à l'aide d'un niveau mètre de bruit, qui indique la quantité d'IEM [24].

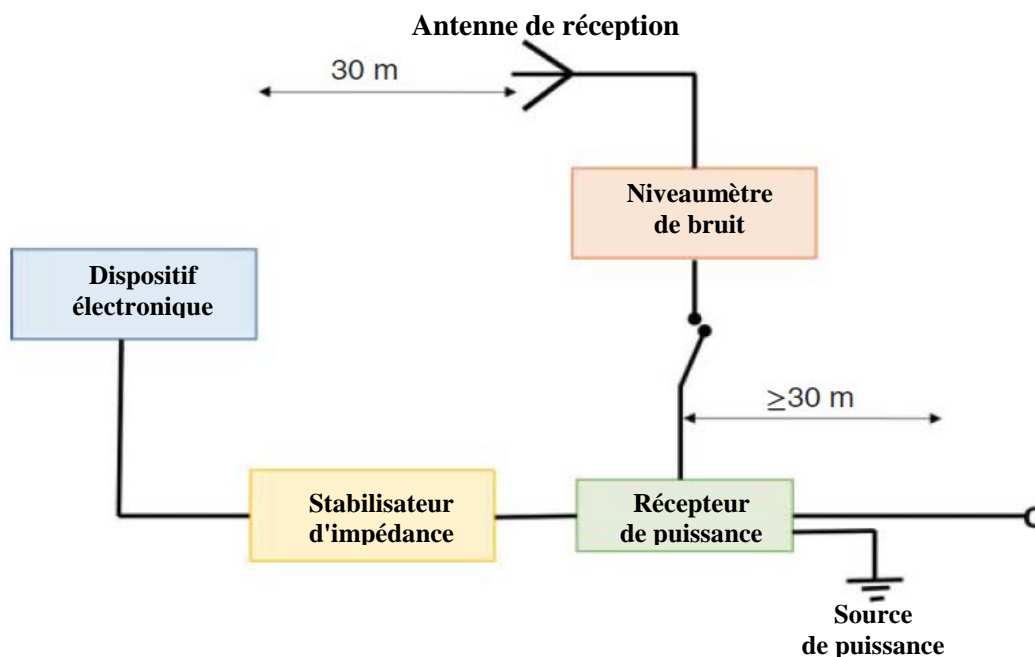
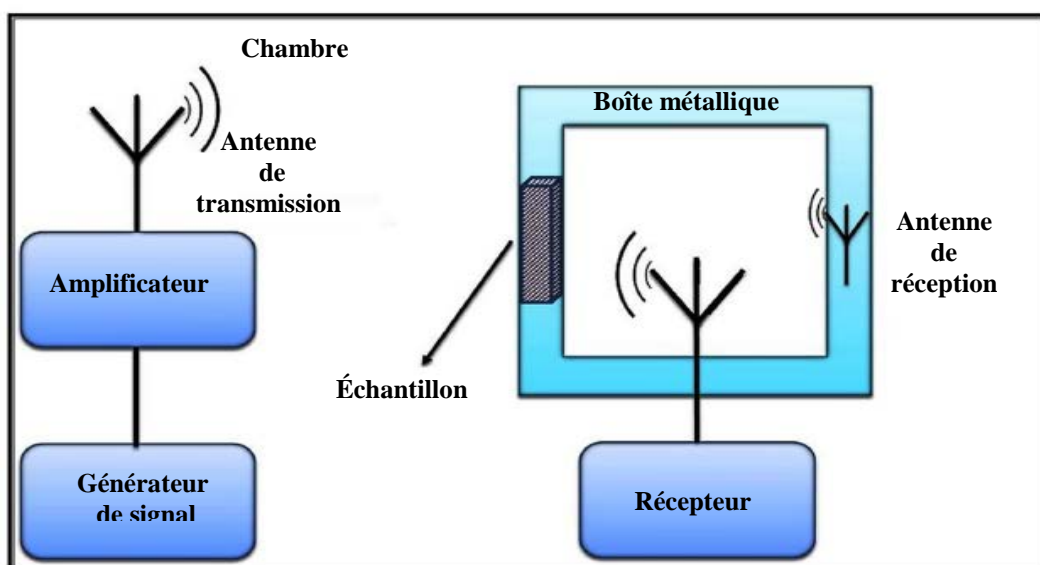


Figure II.12 : Test de l'efficacité du blindage avec un champ ouvert.

### II.5.2.2 Boîte blindée

La figure II.13 présente un schéma de base de la méthode de la boîte blindée, couramment utilisée pour les mesures relatives d'échantillons de test de différents matériaux de blindage. Le dispositif de mesure comprend une boîte métallique à joint

électrique étanche intégrant un port d'échantillon dans un mur et une antenne de réception. Une antenne émettrice située à l'extérieur de la boîte enregistre l'intensité du signal à travers le port, avec et sans échantillon placé dessus. Les signaux électromagnétiques à l'extérieur et à l'intérieur de la boîte sont enregistrés, et le rapport entre ces signaux fournit la SE de l'échantillon. Il est très difficile d'obtenir un contact électrique adéquat entre l'échantillon de test et la boîte de blindage, ce qui constitue un inconvénient majeur de cette méthode. De plus, cette méthode ne fonctionne bien que dans une plage de fréquences limitée à 500 MHz. En outre, les résultats obtenus pour le même échantillon dans différents laboratoires ou instruments présentent une très faible corrélation. [24].

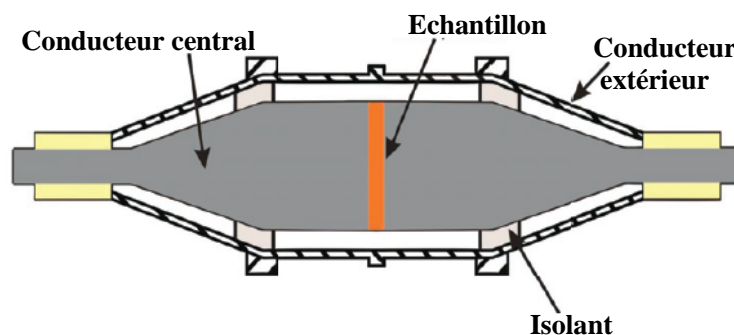


**Figure II.13 :** Mesure de l'efficacité du blindage par boîtier blindé [16].

### II.5.2.3 Méthode de la ligne de transmission coaxiale

La méthode de la ligne de transmission coaxiale est désormais la méthode privilégiée pour la mesure de l'efficacité du blindage (SE), car elle surmonte les inconvénients de la méthode de la boîte blindée. Son principal avantage réside dans l'obtention de résultats comparables entre différents laboratoires pour un même échantillon. De plus, les données recueillies lors de la mesure de la SE peuvent être décomposées en composantes réfléchie, absorbée et transmise (Figure II.14). Des échantillons de petite taille en forme de tore conviennent à ce test. Les mesures à des fréquences spécifiques peuvent être enregistrées à l'aide d'un générateur de signal modulé, d'un détecteur à cristal et d'un amplificateur accordé, ou bien, en mode balayage, un générateur de suivi piloté par un analyseur de spectre peut remplacer le

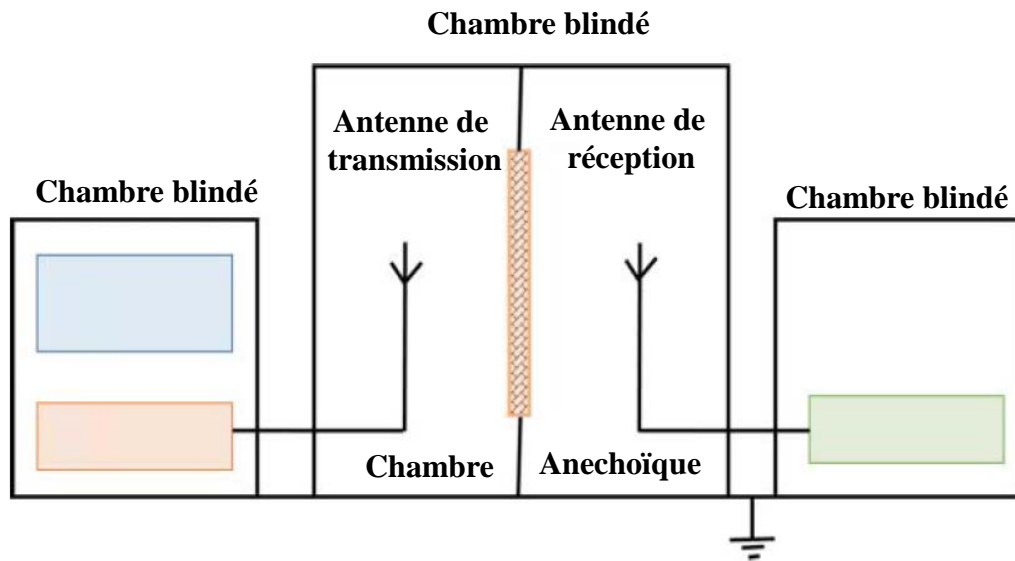
générateur. En mode point par point, le système est d'abord configuré sans le porte-échantillon dans la ligne à une fréquence donnée. L'atténuateur variable est réglé au maximum et le niveau du signal est noté. Ensuite, le porte-échantillon est inséré dans la ligne et l'atténuateur est réduit jusqu'à atteindre la même lecture. L'atténuation du signal obtenu correspond directement à la SE de l'échantillon. Ce processus est répété à différentes fréquences pour obtenir le spectre des réponses. En mode point par point, l'acquisition du spectre est plus longue, tandis qu'en mode balayage, l'analyseur de spectre affiche la réponse du système sous forme d'une courbe unique sur l'écran en quelques minutes. Les câbles coaxiaux standards peuvent offrir une plage dynamique d'environ 80 dB [25].



**Figure II.14 :** Spectre de ligne de transmission coaxiale.

### II.5.2.4 Chambre blindé

La méthode de la salle blindée est la méthode la plus complexe développée pour surmonter les limitations de la méthode de la boîte blindée. Son principe est le même que celui de la méthode de la boîte blindée. Le système de mesure, le générateur de signal, l'antenne de réception, l'antenne émettrice et les composants enregistreurs sont isolés individuellement dans des salles blindées pour éliminer toute possibilité d'interférence. De plus, les antennes sont placées dans des chambres anéchoïques de la taille d'une pièce. La taille de l'échantillon peut atteindre 2,5 mètres carrés, comme le montre la figure II.15. De cette manière, les résultats sont plus fiables et reproductibles dans le même domaine de fréquences que ceux de la méthode de la boîte blindée étendue et la reproductibilité des données sont considérablement améliorées [16].



**Figure II.15 :** Test de l'efficacité de blindage avec une chambre blindée.

### I.6 Conclusion

Ce chapitre explore la notion d'efficacité de blindage et examine les méthodes d'évaluation utilisées. Il aborde la théorie du blindage, les paramètres influençant son efficacité, et les matériaux utilisés, notamment les matériaux ferromagnétiques, ferroélectriques, composites, et les polymères. Les techniques pour évaluer le blindage, qu'elles soient théoriques, numériques, ou expérimentales, sont également présentées, offrant un aperçu des approches courantes pour optimiser les performances des blindages électromagnétiques.



### Bibliographies

[1] **N, Midoud.** *Contribution A L'étude Théorique De L'efficacité Du Blindage Electromagnétique En Champ Proche Cas Des Polymères Conducteurs Composites.* Magister En Physique. Université de Tlemcen. 2011

[2] **M, Ammour.M,Ait Ihaddadene.** *Etude De La Compatibilité Electromagnétique Des Cartes De Circuit Imprimé.* Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electronique. Université Tizi-Ouzou. 2009

[3] **THALES LAND & JOINT SYSTEMS** "Protection Des Equipements Par Blindage Électromagnétique", 2007

[4] **Rachid, Oussaid.** *Les Aspects De La Compatibilité Electromagnétique.* Office des publications universitaires. 2009.page117

[5] **Sidi Mohamed, Benhamou.** *Contribution A L'étude Théorique De L'efficacité Du Blindage Electromagnétique Multicouche A Base De Polymères Conducteurs : Cas d'une incidence oblique.* Thèse de doctorat en sciences. Spécialité physique des polymères. Université Tlemcen.2016

[6] **Yvon,Mori.** *Electronique Pour Le Traitement Du Signal.* Electromagnétisme. Volume VII. Hermès - Lavoisier.2006. pages384

[7] **Amin,Frikha.** *Contribution A L'étude Du Blindage Magnétique Basse Fréquence De Boîtiers Dédiés Aux Véhicules Electriques Et Hybrides.* Thèse de doctorat en physique .Université PARIS-SUD. 2014

[8] **Patrick, Poulichet .** Chapitre 2 : Efficacité de blindage des feuilles métalliques. [En ligne]. Paris : ESIEE, Cours, 2004 ,26p, Disponible sur : < [https://perso.esiee.fr/~poulichp/CEM/Blindage\\_électromagnétique/chapitre2.PDF](https://perso.esiee.fr/~poulichp/CEM/Blindage_électromagnétique/chapitre2.PDF) > (Consulté le 19/05/2024)

[9] **Y, Fegas.N, Faour.** *Etude De L'efficacité De Blindage D'une Enceinte Métallique Munie D'ouverture Centrée.* Thèse de master en Electrotechnique Industrielle.2019

[10] **A, Michel., I, Michel.** *Haute Tension.* 2ieme édition. PPUR presses polytechniques, 2001. Volume XXII. 425 pages. Traité d'électricité.

[11] **Henry W. Ott .***Electromagnetic Compatibility Engineering.* A JOHN WILEY & SONS, INC.2009. 871 pages

[12] **H, SLIMANI.** *Estimation Des Perturbations Conduites Et Rayonnées Dans Les Câbles De Puissance.* Thèse de doctorat en Électrotechnique. Option : Compatibilité Électromagnétique. Université Sidi Bel Abbés.2016

[13] **Celozzi, S. R. Araneo, G. Lovat.** *Electromagnetic Shielding.* A John Wiley & Sons, Inc.,Hoboken, New Jersey, Canada, 2008. 358 pages

[14] **Songtao Li.Zhengwang Zhu.Dongyan Liu;et al.** *Hierarchically Porous Bio-Carbon Based Composites For High Electromagnetic Shielding Performance.* 1er édition. Springer Nature.2021. 141 pages. Engineering Materials

[15] **B, Gaoui. A, Hadjadj. M, Kiou.** *Enhancement Of The Shielding Effectiveness Of Multilayer Materials By Gradient Thickness In The Stacked Layers.* Springer Science Business Media New York. 2017

[16] **Sundeep K, Dhawan. Avanish Pratap Singh. Anil,Ohlan. et al .**Smart Materials Design for Electromagnetic Interference Shielding Applications. Bentham books. 2022. 574page

[17] **Robert C. Wetherhold, Renee M. Bagwell, Joseph M. McManaman.** *Short Shaped Copper Fibers In An Epoxy Matrix: Their Multifunctional Use – Fracture & Impact Toughening And EMI Shielding.* Département de génie mécanique et aérospatial, Université de Buffalo SUNY, NY États-Unis. 2004

[18] **H, Lecocq. G, Sudre. P, Alcouffe. et al.** Enhanced electromagnetic interference shielding effectiveness of polypropylene/hybrid metallic fillers composite materials

coalescence-driven guided electrical percolation. University Claude Bernard Lyon. Polymer, 2022, 246, pp.124740. 10.1016/j.polymer.2022

[19] **Henry W. Ott.** *Noise reduction techniques in electronic systems.* 2<sup>ème</sup> édition. A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION, 1989. 426 pages. Electronic circuits-Noise.

[20] **P, Poulichet. O, Picon.** *Aide-mémoire d'électromagnétisme.* Dunod. 2010. 408 pages. Aide-mémoire

[21] **F. T. Belkhacem, A. Boutar, M. Bensetti, et al.** « The analytical and numerical evaluation versus experimented of electromagnetic shielding effectiveness of a rectangular enclosure with aperture » .In 19th soft magnetic materials conference, Torino, Italy, 6-9 September 2009

[22] **R, Azaro, S, Caorsi. M, Donelli. et al.** « Evaluation of the effects of an external incident electromagnetic wave on metallic enclosures with rectangular apertures ». Microwave and Optical Technology Letters [en ligne]. 2001. Volume28, Pages 289-293. Disponible sur : <<https://onlinelibrary.wiley.com/>>. (25/05/2024).

[23] **S. Geetha, K. K. Satheesh Kumar, Chepuri R. et al** , «EMI Shielding: Methods and Materials—A Review». Journal of Applied Polymer Science [en ligne]. 2009. Volume 112, Issue 4. Pages : 1863-2587. Disponible sur : <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/app.29812>>. (26/05/2024).

[24] **Chong Min Koo, Pradeep Sambyal, Aamir Iqbal, et al.** *Two-Dimensional Materials for Electromagnetic Shielding.* Editors: Sundeep K. Dhawan, Bentham Science Publishers. Singapore. 2022.

[25] **Maciej Jaroszewski, Sabu Thomas, Ajay V. Rane.** *Advanced Materials for Electromagnetic Shielding Fundamentals, Properties, and Applications.* John Wiley & Sons, Inc. 2019

**Chapitre III : Méthodes Numériques Pour  
L'évaluation De L'efficacité De Blindage Dans  
Le Domaine Temporel**

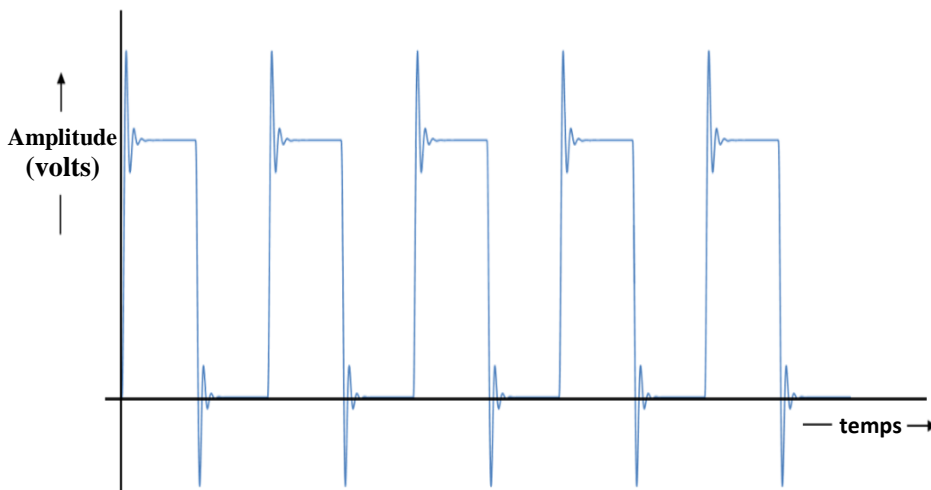
### **III.1 Introduction**

La résolution dans le domaine temporel signifie une représentation des signaux ou des phénomènes en fonction du temps. Dans ce domaine, les variations des grandeurs électromagnétiques (telles que le champ électrique et le champ magnétique) sont observées et analysées directement au cours du temps.

Dans ce chapitre on va présenter les méthodes communément utilisées, on mettant accent sur la méthode matrice des lignes de transmission (TLM).

### **III.2 Représentation des Signaux dans le Domaine Temporel**

Les signaux électriques ont des représentations à la fois dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel. Dans le domaine temporel, la tension ou le courant est exprimé en fonction du temps comme illustré dans la Figure III.1. La plupart des gens sont relativement à l'aise avec les représentations temporelles des signaux. Les signaux mesurés sur un oscilloscope sont affichés dans le domaine temporel et les informations numériques sont souvent transmises par une tension en fonction du temps. [1]



**Figure III.1 :** Représentation dans le domaine temporel d'un signal électrique.

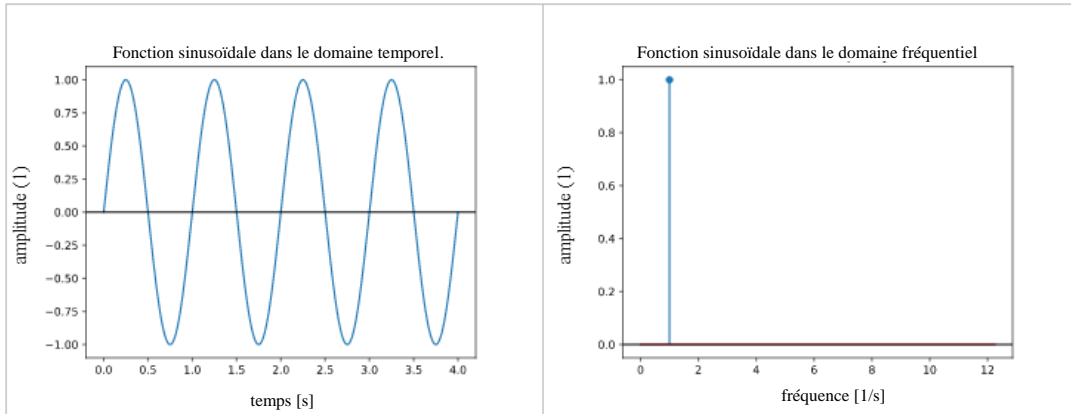
### **III.3 Différence entre le domaine temporel et le domaine fréquentiel**

Dans le domaine temporel, les signaux sont représentés en fonction du temps, montrant comment la tension ou le courant varie à chaque instant. Cette représentation est intuitive pour de nombreuses personnes et est couramment utilisée, par exemple, avec les oscilloscopes.

Dans le domaine fréquentiel, les signaux sont représentés en fonction de la fréquence. Cette représentation montre les différentes composantes de fréquence présentes dans le

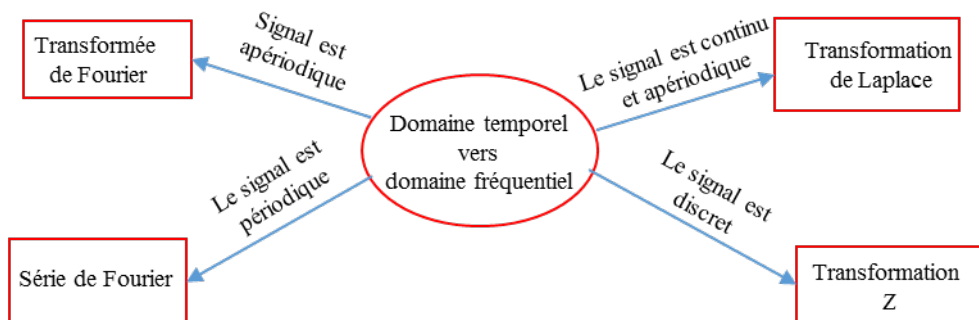
## Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel

signal, chacune avec une certaine amplitude et phase. Les signaux périodiques sont représentés par un spectre de raies, avec des composantes fondamentales et des harmoniques.



**Figure III.2 :** Onde sinusoïdale d'une amplitude de 1 et d'une fréquence de 1 Hz [2]

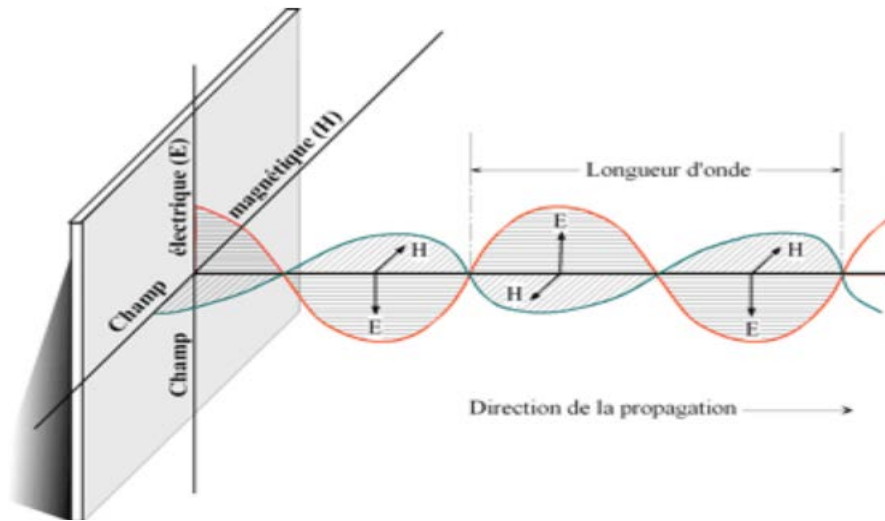
Par conséquent, chaque domaine de représentation du signal nous fournit différents types d'informations sur le même signal. Sur la base de l'objectif, l'analyse dans un domaine est avantageuse par rapport à l'autre. Les méthodes suivantes sont utilisées pour passer du domaine temporel au domaine fréquentiel.



**Figure III.3 :** Méthodes pour passer du domaine temporel au domaine fréquentiel [3]

### III.4 Bases de l'électromagnétisme : équations de Maxwell

Les équations de Maxwell, du nom du physicien écossais James Clerk Maxwell, constituent le socle théorique de l'électromagnétisme. Elles décrivent de manière unifiée les phénomènes électriques et magnétiques, reliant entre eux les champs électriques et magnétiques, les charges électriques et les courants électriques



**Figure III.4 :** Propagation de l'onde EM dans un milieu.[4]

La loi de Faraday, le théorème d'ampère et le théorème de Gauss ont été réunis par James Clerk Maxwell (1831-1879). Ce savant a été capable de donner les découvertes une formulation la plus complète de l'électromagnétisme liant les grandeurs électriques et magnétiques dans les quatre équations aux dérivées partielles suivantes :

$$1. \text{ Equation de Maxwell-Ampère : } \overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = \mu \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \mu \cdot \vec{J} \quad (\text{III.1})$$

$$2. \text{ Equation de Maxwell-Faraday : } \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.2})$$

$$3. \text{ Equation de Maxwell-Gauss : } \overrightarrow{\text{div}} \vec{D} = \rho \quad (\text{III.3})$$

$$4. \text{ Equation de Maxwell-flux : } \overrightarrow{\text{div}} \vec{B} = 0 \quad (\text{III.4})$$

où:

$\vec{E}$  est l'intensité du champ électrique [V/m],

$\vec{B}$  est l'induction magnétique ou la densité du flux magnétique [T],

$\vec{D}$  est l'induction électrique ou la densité du flux électrique [C/m<sup>2</sup>],

$\vec{J}$  est la densité de courant électrique [A/m<sup>2</sup>], [5]

### **III.4.1 Différentes méthodes numériques pour résoudre les équations de Maxwell dans le domaine temporel**

Pour résoudre les équations de Maxwell dans le domaine temporel, plusieurs méthodes numériques ont été développées. Ces méthodes permettent de simuler les phénomènes électromagnétiques avec une grande précision. Voici quelques-unes des principales méthodes utilisées :

## Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel

- Méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD)
- Méthode des Éléments Finis dans le Domaine Temporel (FETD)
- Méthode des Intégrales Finies dans le Domaine Temporel (FITD)
- Méthode des Volumes Finis dans le Domaine Temporel (FVTD)
- Méthode des Éléments Spectraux dans le Domaine Temporel (SETD)
- Méthode des Éléments Discontinus de Galerkin dans le Domaine Temporel (DGTD)
- Méthode des Lignes de Transmission (TLM)

### III.4.1.1 Méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD)

La méthode des différences finies dans le domaine temporel (Finite Difference Time Domain, FDTD) est l'une des techniques couramment utilisées pour la résolution des problèmes électromagnétiques. Tant conceptuellement qu'en termes de mise en œuvre, elle peut aborder avec précision une large gamme de problèmes, y compris la programmation de systèmes tridimensionnels. La méthode FDTD utilise des différences finies comme approximations pour les dérivées spatiales et temporelles apparaissant dans les équations de Maxwell (en particulier les lois d'Ampère et de Faraday). [6]

La théorie à la base de la méthode FDTD est simple. Pour résoudre un problème électromagnétique, l'idée est de discrétiser, à la fois dans le temps et dans l'espace, les équations de Maxwell avec des approximations de différences centrées. L'originalité de l'idée de Yee réside dans l'allocation spatiale des composants du champ électrique et du champ magnétique, ainsi que dans l'avancement temporel de l'évolution de la procédure.[7]

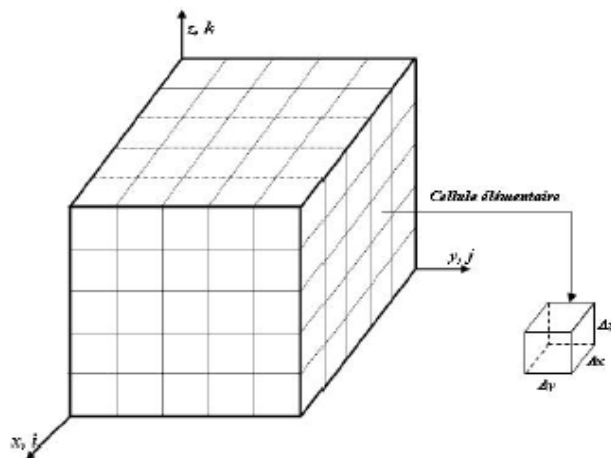


Figure III.5 : Exemple d'un volume de calcul FDTD. [8]



#### **III.4.1.2 Méthode des Intégrales Finies dans le Domaine Temporel (FITD)**

Tous les phénomènes électromagnétiques macroscopiques se produisant en pratique peuvent être décrits mathématiquement avec l'ensemble complet des équations de Maxwell. La technique d'intégration finie (Finite Integration Technique, FIT) développée par Weiland en 1977 fournit une reformulation discrète des équations de Maxwell sous leur forme intégrale, adaptée aux ordinateurs, et permet de simuler des problèmes de champs électromagnétiques du monde réel avec des géométries complexes. Ce schéma de discrétisation de type volume fini pour les équations de Maxwell repose sur l'utilisation de bilans intégrales et permet ainsi de prouver la stabilité et les propriétés de conservation des champs discrets même avant de commencer les calculs numériques.

En particulier, ces propriétés algébriques de la formulation discrète permettent le développement de schémas d'intégration temporelle numérique stables à long terme ou de solveurs de valeurs propres précis évitant les modes parasites. [9]

#### **III.4.1.3 Méthode des Volumes Finis dans le Domaine Temporel (FVTD)**

La méthode des volumes finis dans le domaine temporel (Finite Volume Time Domain, FVTD) est une méthode numérique utilisée pour simuler les ondes électromagnétiques dans un espace-temps plat. L'avantage de la méthode FVTD réside dans sa flexibilité lors du choix d'un maillage. Bien que seule un maillage hexaédrique régulier puisse être utilisé pour la FDTD, de nombreux types de maillages (par exemple, le maillage tétraédrique) peuvent être utilisés pour la FVTD. Cela est bénéfique lors de la simulation de structures fines. [10]

#### **III.4.1.4 Méthode des Éléments Discontinus de Galerkin dans le Domaine Temporel (DGTD)**

Les méthodes de Galerkin discontinues sont une classe de méthodes des éléments finis qui utilisent des fonctions de base et de test par morceaux continus. Ces méthodes se caractérisent par une grande précision, une capacité à modéliser des géométries complexes, une efficacité, une stabilité et un haut degré de parallélisations. La Méthode des Éléments Discontinus de Galerkin dans le Domaine Temporel (DGTD) ont été utilisées plus récemment pour la résolution des équations de Maxwell. [11]

#### **III.4.1.5 Méthode des Lignes de Transmission (TLM)**

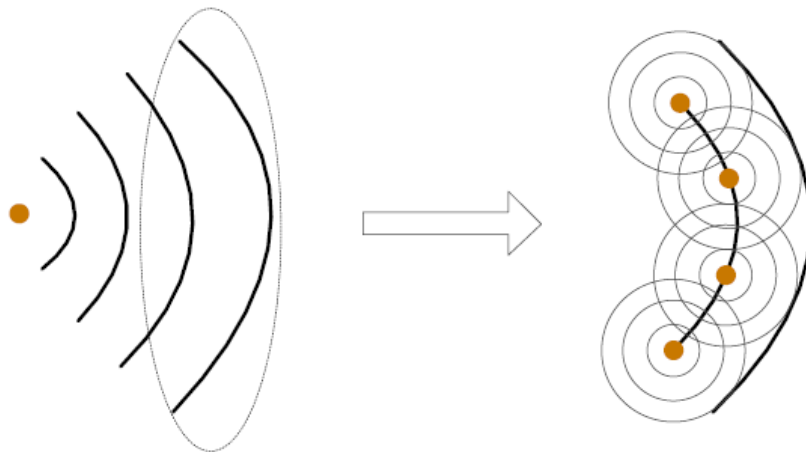
La méthode TLM est une méthode de modélisation numérique qui permet la simulation de la propagation du champ EM dans le domaine temporel. Elle a été

### Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel

---

introduite par P.B. Johns et R.L. Beurle, en 1971. L'espace de propagation est représenté par un réseau de lignes de transmission interconnectées. Les connexions de ces lignes de transmission définissent les nœuds du réseau. [5]

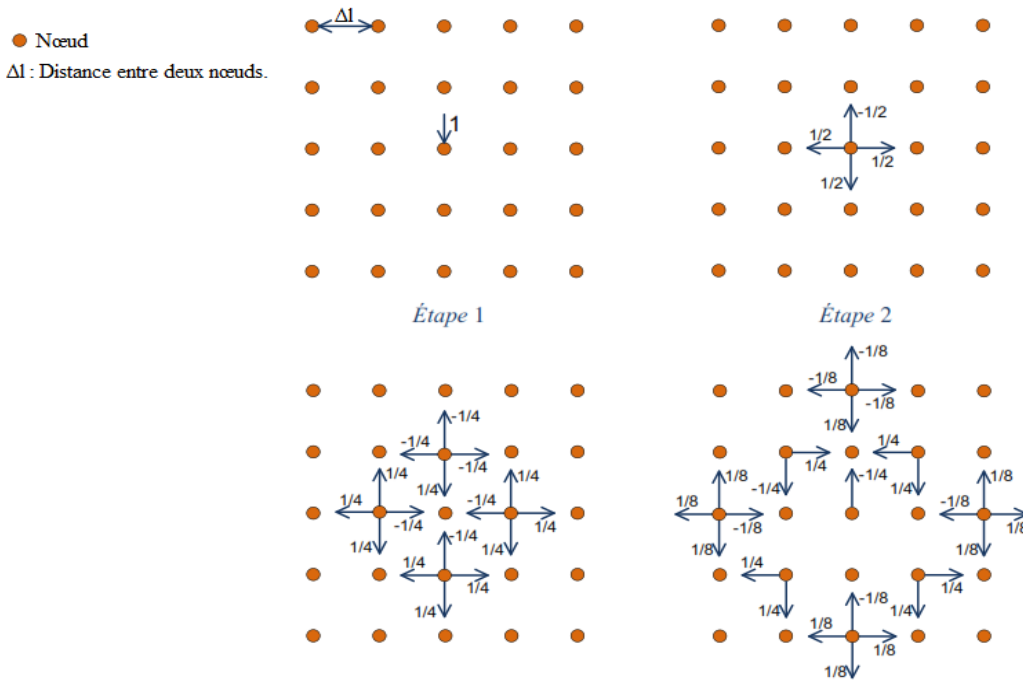
Dans un tel milieu décrit par le réseau TLM, la propagation d'une onde électromagnétique s'effectue selon le principe de Huygens : «Chacun des points d'un front d'onde agit comme une source de petites ondes secondaires. À un instant ultérieur, l'enveloppe des bords avant des petites ondes forme le nouveau front d'onde. [12]



**Figure.III.6** : Principe de Huygens [13]

Pour modéliser la propagation dans le réseau TLM, Johns avait appliqué le principe de Huygens décrit en 2D dans la Figure III. 7 Lorsqu'une impulsion arrive à un noeud, elle rencontre une discontinuité et elle sera partiellement réfléchiée et transmise selon la théorie des lignes de transmission vers les quatre noeuds voisins. À l'itération suivante, chacun de ces noeuds se comporte comme une source donnant naissance à de nouvelles impulsions qui vont à leur tour se propager vers les noeuds voisins. Contrairement aux autres méthodes telles que la FDTD et la FEM qui ont des approches de discrétisation mathématique, la TLM est basée sur une approche de discrétisation physique.

## Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel



**Figure III. 7 :** Principe de Huygens dans réseau TLM 2D [14].

Ce processus itératif peut s'écrire sous une forme matricielle comme suit :

$$\begin{cases} V_r^{n+\frac{1}{2}} = [S] \cdot V_i^{n-\frac{1}{2}} \\ V_i^{n+\frac{1}{2}} = [C] \cdot V_r^{n-\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

$V_i^{n-\frac{1}{2}}$  et  $V_r^{n+\frac{1}{2}}$  représentent respectivement les impulsions incidentes définies à l'instant  $\left(n-\frac{1}{2}\right)\Delta t$  et réfléchies définies à l'instant  $\left(n+\frac{1}{2}\right)\Delta t$

- [S] est la matrice de répartition qui permet d'écrire les impulsions réfléchies en fonction des incidentes
- [C] est la matrice de connexion du nœud, elle permet de calculer les impulsions incidentes à l'instant  $\left(n+\frac{1}{2}\right)\Delta t$  en fonction des impulsions réfléchies déterminées à l'étape de répartition.

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{2c_0}$$

### III.4.1.5.1 Maillage TLM

Le maillage TLM est constitué de nœuds formés par interconnexion d'un certain nombre de lignes de transmission. La distance entre deux nœuds est appelée «pas spatial

### Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel

du réseau» :  $\Delta l$ . La discrétisation spatiale entraîne une discrétisation temporelle  $\Delta t$ . Donc, si  $\Delta l$  est la dimension d'une cellule élémentaire, alors  $\Delta t$  est le « pas temporel du réseau », c'est à dire le temps nécessaire pour qu'une impulsion de tension se déplace d'un nœud à l'autre du réseau. Le pas temporel dépend du pas du maillage suivant la relation :  $\Delta t = \Delta l / v$ ,  $v$  étant la vitesse de propagation des ondes dans le réseau TLM. On note que lorsque le pas spatial  $\Delta l$  diminue, le pas temporel  $\Delta t$  diminue. Cela signifie que pour réaliser un maillage fin, le temps de calcul deviendra très long et le stockage en mémoire augmentera, ce qui est un inconvénient des méthodes numériques temporelles. La Figure III.8 présente les trois nœuds TLM 3D qu'on vient de présenter, avec :

- a) Nœud asymétrique distribué,
- b) Nœud asymétrique condensé,
- c) Nœud symétrique condensé (SCN).

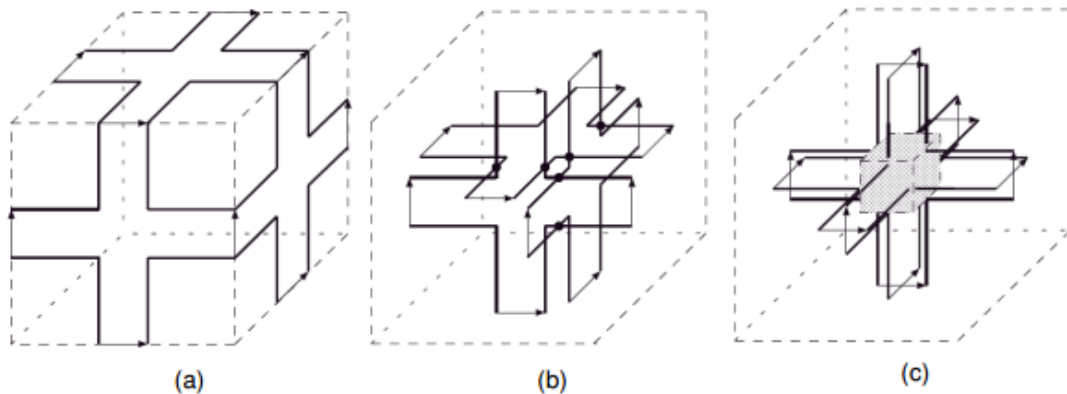


Figure III.8 : Les nœuds TLM 3D. [14]

#### III.4.1.5.2 Organigramme de la méthode TLM

L'algorithme fondamental de la méthode TLM qui est représenté sur la Figure III.9 peut être décrit comme suit :

- ✓ **Fichiers d'entrée** : Description des dimensions du domaine de calcul, la géométrie de la structure (dimensions de la structure, plans métalliques, caractéristiques des matériaux, caractéristiques des fils, composants,...), les conditions aux limites, le maillage de la structure, la position et l'amplitude de l'excitation, la durée de la simulation, les points d'observation
- ✓ **Excitation** : A l'instant  $\left(n - \frac{1}{2}\right)\Delta t$ , la structure est excitée via les impulsions incidentes. Il suffit de superposer l'excitation désirée aux impulsions incidentes (calculées par la TLM).

### Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel

- ✓ **Calcul des champs** : Ensuite, à l'instant  $n\Delta t$ , les six composantes de champ électromagnétique sont calculées au centre de chaque cellule à partir des impulsions incidentes.
- ✓ **Répartition** : Puis, à l'instant  $\left(n + \frac{1}{2}\right)\Delta t$ , des impulsions réfléchies sont obtenues à partir des champs électromagnétiques et des impulsions incidentes.
- ✓ **Connexion** : Enfin, les impulsions réfléchies deviennent à leur tour impulsions incidentes sur les nœuds voisins pour l'itération suivante.
- ✓ **Fichier de sortie** : Une fois le nombre d'itérations atteint, les champs électromagnétiques temporels sont sauvegardés dans un fichier de sortie.

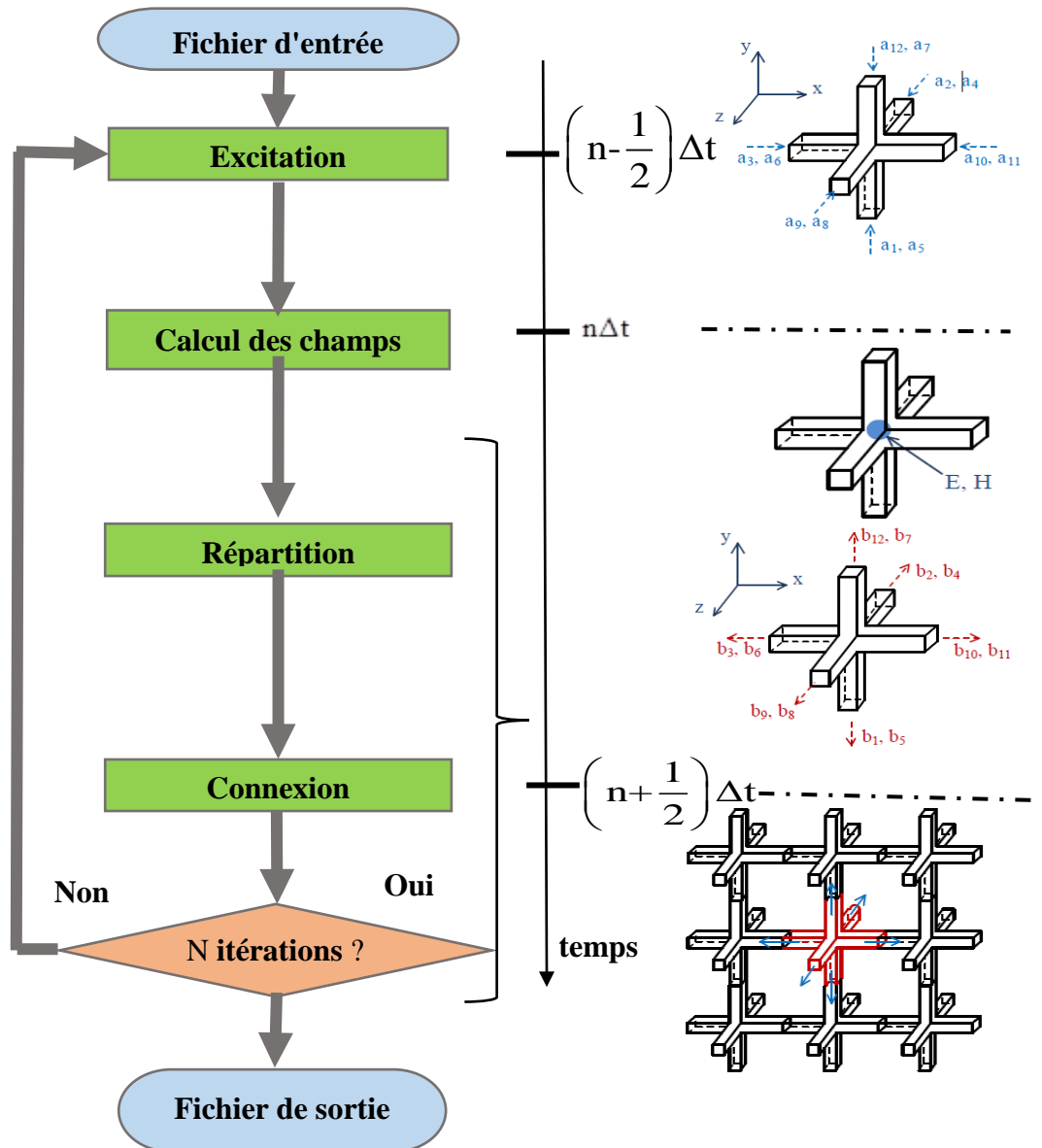
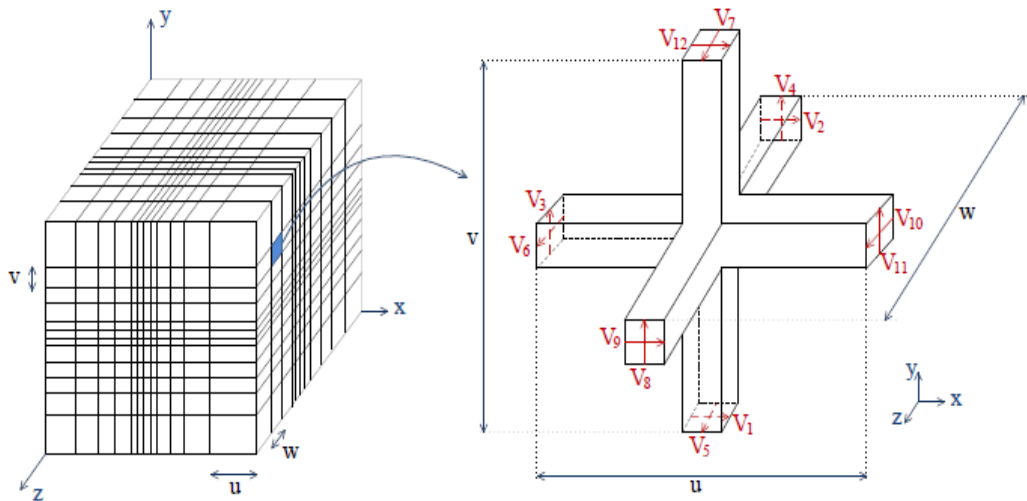


Figure III. 9 : L'organigramme de la méthode TLM [13].

### III.4.1.5.3 Les nœuds 3D-TLM

A l'origine, la méthode a été développée en deux dimensions avec un nœud composé de deux lignes de transmission connectées soit en parallèle soit en série [Johns71]. Ces deux types de connexions possèdent chacun un circuit équivalent qui permet d'aboutir à l'analogie entre les champs électromagnétiques et les impulsions de tension et de courant comme cela a été évoqué ci-dessus. La combinaison de ces nœuds 2D en une structure 3D permet la création du nœud << expanded >>, puis du nœud distribué asymétrique [Akhtarzad75] [Saguet82]. Ceux-ci ne permettent cependant pas de calculer les composantes du champ électromagnétique au même point. Cela rend difficile la modélisation des interfaces entre les différents milieux, ainsi que la programmation du maillage variable.

Une structure visant à combiner les avantages et minimiser les inconvénients du nœud <<< expanded >>> et du nœud asymétrique a été présentée la première fois par P.B. Johns en 1987 [Johns87] et est représentée à la Figure III. 10. Il se compose de douze accès pour représenter deux polarisations dans chaque direction. Ce nœud, qui est appelé Nœud Symétrique Condensé (SCN), est devenu le nœud TLM le plus largement utilisé.



**Figure III. 10 :** (a) Maillage spatial 3D ; (b) Nœud TLM 3D symétrique condensé (SCN).

#### III.4.1.5.4 Discrétisation des équations de Maxwell

En coordonnées cartésiennes, pour un milieu hétérogène et anisotrope, les équations de Maxwell-Faraday (III.2) et Maxwell-Ampère (III.1), dans leur forme discrète, s'écrivent de la manière suivante [15]

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_0 \varepsilon_{rx} \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma_{ex} E_x \end{array} \right. \quad \text{(III. 6)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_0 \varepsilon_{ry} \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma_{ey} E_y \end{array} \right. \quad \text{(III. 7)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_0 \varepsilon_{rz} \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma_{ez} E_z \end{array} \right. \quad \text{(III. 8)}$$

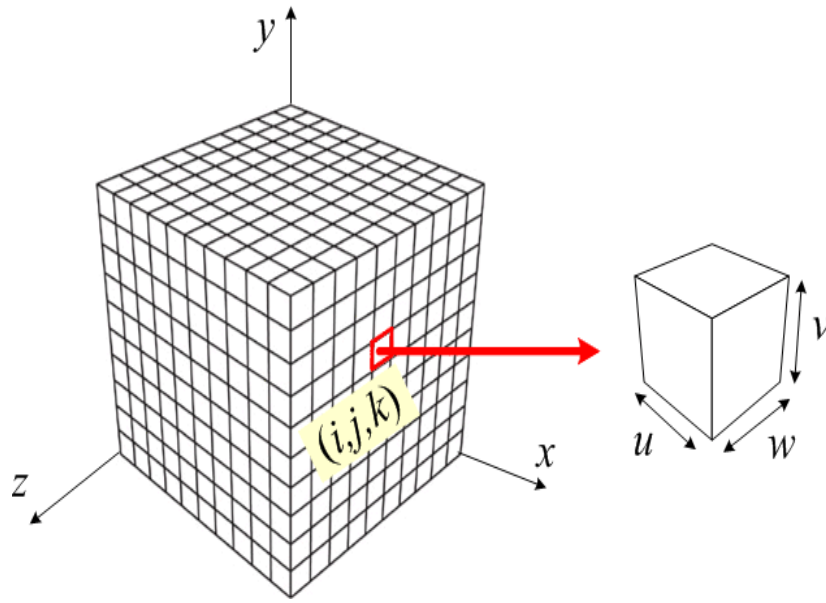
$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_0 \mu_{rx} \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial z} - \frac{\partial E_y}{\partial y} - \sigma_{mx} H_x \end{array} \right. \quad \text{(III. 9)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_0 \mu_{ry} \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \sigma_{my} H_y \end{array} \right. \quad \text{(III. 10)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_0 \mu_{rz} \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \sigma_{mz} H_z \end{array} \right. \quad \text{(III. 11)}$$

Nous souhaitons réaliser la liaison entre ces équations et les paramètres du réseau TLM. Par la suite, nous allons présenter la démarche, proposée par H. Jin en 1994, qui est suffisamment explicite. Alors, l'espace et le temps sont discrétisés (Figure III. 11). Notons-le nombre de nœuds du maillage selon les trois directions :  $N_x$  ,  $N_y$  ,  $N_z$  et les dimensions d'une cellule élémentaire du maillage, par  $u$ ,  $v$ ,  $w$  (suivant les axes  $x$ ,  $y$  et  $z$  respectivement).

Notons par  $\Delta l$  la plus petite dimension de cellule du maillage (c'est à dire  $\Delta l$  est le minimum de  $(u_i, v_j, w_k)$  , quel que soit  $(i = \overline{1, N_x}, j = \overline{1, N_y}, k = \overline{1, N_z})$ . Le temps nécessaire pour qu'une onde se propage d'un nœud à l'autre est égal à :  $\Delta t = \Delta l / 2c$ ,  $c$  étant la vitesse de la lumière  $(c = 1 / \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0})$



**Figure III. 11 :** Maillage cartésien 3D.

Les six composantes du champ sont donc normalisées (indice «N») par rapport aux trois dimensions de la cellule (u, v et w):

$$\begin{aligned}
 (E_x)_N^{TLM} &= E_x \cdot u & (E_y)_N^{TLM} &= E_y \cdot v & (E_z)_N^{TLM} &= E_z \cdot w \\
 (H_x)_N^{TLM} &= H_x \cdot u \cdot z_0 & (H_y)_N^{TLM} &= H_y \cdot v \cdot z_0 & (H_z)_N^{TLM} &= H_z \cdot w \cdot z_0
 \end{aligned}
 \tag{III. 12}$$

Où  $Z_0$  est l'impédance caractéristique de l'espace libre et :

$$u = \frac{x}{N_x} \quad v = \frac{y}{N_y} \quad w = \frac{z}{N_z} \quad ; \quad t = \Delta t \cdot I = \frac{\Delta l}{2c} \cdot I
 \tag{III. 13}$$

Où  $I$  représente le nombre d'itérations.

En remplaçant les paramètres liés au réseau TLM dans l'équation (III.6), Il résulte :

$$\frac{Y_x + 4}{2} \cdot \frac{\partial (E_x)_N^{TLM}}{\partial N_y} - g_{ex} \cdot (E_x)_N^{TLM}
 \tag{III. 14}$$



### Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel

$$\text{Avec : } \begin{cases} Y_x = 4(\varepsilon_{rx} \frac{v.W}{u.\Delta l} - 1) \\ g_{ex} = \sigma_{ex} \frac{v.W}{u} z_0 \end{cases}$$

De la même manière, on obtient les cinq autres équations :

On passe alors à un système de coordonnées dans lequel l'espace et le temps sont mélangés (cette opération peut être réalisée puisque l'espace et le temps caractérisant le réseau TLM sont normalisés et ils sont donc sans dimension). On fait les notations :

$$\begin{cases} \xi_x = N_x + 1 & \xi_y = N_y + 1 & \xi_z = N_z + 1 \\ \eta_x = N_x + 1 & \eta_y = N_y + 1 & \eta_z = N_z + 1 \end{cases} \quad (\text{III. 15})$$

Si on fait respectivement la somme et la différence des relations ci-dessus, on obtient :

$$\begin{cases} N_x = (\xi_x + \eta_x) / 2 & N_y = (\xi_y + \eta_y) / 2 & N_z = (\xi_z + \eta_z) / 2 \\ I = (\xi_x - \eta_x) / 2 & N_y = (\xi_y - \eta_y) / 2 & N_z = (\xi_z - \eta_z) / 2 \end{cases} \quad (\text{III. 16})$$

Alors, les équations (III.8) et (III.13) deviennent :

$$\begin{aligned} & \frac{Y_x}{2} \frac{\partial (E_x)_{N_x}^{TLM}}{\partial I} + \frac{1}{2} \frac{\partial [(E_x)_{N_x}^{TLM} - (H_z)_{N_x}^{TLM}]}{\partial \xi_y} - \frac{\partial [(E_x)_{N_x}^{TLM} + (H_z)_{N_x}^{TLM}]}{\partial \eta_y} + \frac{\partial [(E_x)_{N_x}^{TLM} + (H_y)_{N_x}^{TLM}]}{\partial \xi_z} - \\ & \frac{\partial [(E_x)_{N_x}^{TLM} - (H_y)_{N_x}^{TLM}]}{\partial \eta_z} + g_{ex} \cdot (E_x)_{N_x}^{TLM} = 0 \end{aligned} \quad (\text{III. 17})$$

A partir de l'équation (III.16), une série d'équations aux différences finies a été développée.

Les dérivées partielles sont discrétisées pour chaque point du maillage caractérisé par les indices  $(i, j, k)$  ( $i = \overline{1, N_x}, j = \overline{1, N_y}, k = \overline{1, N_z}$ ), et à chaque instant  $n$  ( $n = \overline{1, I}$ ).

Comme une impulsion a besoin d'un temps égale à  $\Delta t/2$  pour se propager du bout d'un de ses bras, jusqu'au centre du nœud, l'équation (III.17) s'écrit :

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} \left( n + \frac{1}{2} \right) \left( E_x \right)_N^{TLM} \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) - \frac{1}{2} \left( n - \frac{1}{2} \right) \left( E_x \right)_N^{TLM} \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) - \\
 & \frac{1}{2} \left( n + \frac{1}{2} \right) \left( H_z \right)_N^{TLM} \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) - \frac{1}{2} \left( n - \frac{1}{2} \right) \left( H_z \right)_N^{TLM} \left( i, j - \frac{1}{2}, k \right) - \\
 & \frac{1}{2} \left( n - \frac{1}{2} \right) \left( E_x \right)_N^{TLM} \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) - \frac{1}{2} \left( n + \frac{1}{2} \right) \left( E_x \right)_N^{TLM} \left( i, j - \frac{1}{2}, k \right) - \\
 & \frac{1}{2} \left( n - \frac{1}{2} \right) \left( H_z \right)_N^{TLM} \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) - \frac{1}{2} \left( n + \frac{1}{2} \right) \left( H_z \right)_N^{TLM} \left( i, j - \frac{1}{2}, k \right) + \\
 & \frac{1}{2} \left( n + \frac{1}{2} \right) \left( E_x \right)_N^{TLM} \left( i, j, k, + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2} \left( n - \frac{1}{2} \right) \left( E_x \right)_N^{TLM} \left( i, j, k - \frac{1}{2} \right) + \\
 & \frac{1}{2} \left( n + \frac{1}{2} \right) \left( H_y \right)_N^{TLM} \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2} \left( n - \frac{1}{2} \right) \left( H_y \right)_N^{TLM} \left( i, j, k - \frac{1}{2} \right) - \\
 & \frac{1}{2} \left( n - \frac{1}{2} \right) \left( E_x \right)_N^{TLM} \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2} \left( n + \frac{1}{2} \right) \left( E_x \right)_N^{TLM} \left( i, j, k - \frac{1}{2} \right) - \\
 & \frac{1}{2} \left( n - \frac{1}{2} \right) \left( H_y \right)_N^{TLM} \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2} \left( n + \frac{1}{2} \right) \left( H_y \right)_N^{TLM} \left( i, j, k - \frac{1}{2} \right) + \\
 & \frac{Y_x}{2} \left( n + \frac{1}{2} \right) \left( E_x \right)_N^{TLM} \left( i, j, k \right) - \frac{1}{2} \left( n - \frac{1}{2} \right) \left( E_x \right)_N^{TLM} \left( i, j, k \right) + g_{ex} \cdot n \left( E_x \right)_N^{TLM} \left( i, j, k \right) = 0
 \end{aligned} \tag{III. 18}$$

Les autres équations se déduisent de la même manière.

#### III.4.1.5.5 Analogie champ EM discret – paramètres du réseau TLM

Chaque onde plane qui entre dans une cellule du milieu à simuler, le long de l'une des directions  $x$ ,  $y$  et  $z$ , est associée, dans le réseau TLM, à une impulsion de tension. Cette impulsion se propage vers le centre de la cellule, à travers l'une des douze lignes de transmission reliant le nœud à ses six voisins

Par exemple, une onde plane polarisée suivant l'axe  $x$ , entre dans la cellule  $(i, j, k)$ , à l'instant  $(n - 1/2)\Delta t$  et à la position  $(i, j - 1/2, k)$ , et se propage dans les directions des  $y$  positifs. Elle est associée à l'impulsion de tension incidente sur le port 1 du nœud (Figure.III.10.b) [5] :

### Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel

$$nV_1^i = \frac{1}{2} \left[ n^{-1/2} {}^{(E_x)}TLM_N(i, j-\frac{1}{2}, k) \quad -n^{-1/2} {}^{(H_z)}TLM_N(i, j-\frac{1}{2}, k) \right] \quad (\text{III. 19})$$

Cette impulsion incidente subit ensuite une répartition au centre du nœud, au moment  $n\Delta t$  et elle devient une impulsion réfléchie, associée à une onde sortante. L'onde plane polarisée suivant l'axe  $x$  sort donc de la cellule  $(i, j, k)$ , à l'instant  $(n + 1/2)\Delta t$  et à la position  $(i, j + 1/2, k)$ , et se propage dans la direction des  $y$  positifs. Elle est associée à l'impulsion de tension  $nV_{12}^r$  réfléchie sur le port 12 du nœud (Figure. III.10.b) :

$$nV_{12}^i = \frac{1}{2} \left[ n^{+1/2} {}^{(E_x)}TLM_N(i, j+\frac{1}{2}, k) \quad n^{+1/2} {}^{(H_z)}TLM_N(i, j+\frac{1}{2}, k) \right] \quad (\text{III. 20})$$

En considérant la propagation des ondes dans les trois directions, avec les deux sens possibles et les deux polarisations possibles, on peut déterminer toutes les correspondances entre les composantes du champ EM et les impulsions de tension au niveau du nœud TLM :

$$nV_1^{i,r} = \frac{1}{2} \left[ n^{\mp 1/2} {}^{(E_x)}TLM_N(i, j-\frac{1}{2}, k) \quad \mp n^{\mp 1/2} {}^{(H_z)}TLM_N(i, j-\frac{1}{2}, k) \right] \quad (\text{III. 21})$$

$$nV_2^{i,r} = \frac{1}{2} \left[ n^{\mp 1/2} {}^{(E_x)}TLM_N(i, j, k-\frac{1}{2}) \quad \pm n^{\mp 1/2} {}^{(H_y)}TLM_N(i, j, k-\frac{1}{2}) \right] \quad (\text{III. 22})$$

$$nV_3^{i,r} = \frac{1}{2} \left[ n^{\mp 1/2} {}^{(E_y)}TLM_N(i-\frac{1}{2}, j, k) \quad \pm n^{\mp 1/2} {}^{(H_z)}TLM_N(i-\frac{1}{2}, j, k) \right] \quad (\text{III. 23})$$

$$nV_4^{i,r} = \frac{1}{2} \left[ n^{\mp 1/2} {}^{(E_y)}TLM_N(i, j, k-\frac{1}{2}) \quad \mp n^{\mp 1/2} {}^{(H_x)}TLM_N(i, j, k-\frac{1}{2}) \right] \quad (\text{III. 24})$$

### Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel

---

$$n^{V_5^{i,r}} = \frac{1}{2} \left[ n^{\mp 1/2} (E_z)^{TLM} \left( i, j - \frac{1}{2}, k \right) \pm n^{\mp 1/2} (H_x)^{TLM} \left( i, j - \frac{1}{2}, k \right) \right] \quad \text{(III. 25)}$$

$$n^{V_6^{i,r}} = \frac{1}{2} \left[ n^{\mp 1/2} (E_z)^{TLM} \left( i - \frac{1}{2}, j, k \right) \mp n^{\mp 1/2} (H_y)^{TLM} \left( i - \frac{1}{2}, j, k \right) \right] \quad \text{(III. 26)}$$

$$n^{V_7^{i,r}} = \frac{1}{2} \left[ n^{\mp 1/2} (E_z)^{TLM} \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) \mp n^{\mp 1/2} (H_x)^{TLM} \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) \right] \quad \text{(III. 27)}$$

$$n^{V_8^{i,r}} = \frac{1}{2} \left[ n^{\mp 1/2} (E_y)^{TLM} \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \pm n^{\mp 1/2} (H_x)^{TLM} \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \right] \quad \text{(III. 28)}$$

$$n^{V_9^{i,r}} = \frac{1}{2} \left[ n^{\mp 1/2} (E_x)^{TLM} \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \mp n^{\mp 1/2} (H_y)^{TLM} \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \right] \quad \text{(III. 29)}$$

$$n^{V_{10}^{i,r}} = \frac{1}{2} \left[ n^{\mp 1/2} (E_x)^{TLM} \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) \mp n^{\mp 1/2} (H_y)^{TLM} \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) \right] \quad \text{(III. 30)}$$

$$n^{V_{11}^{i,r}} = \frac{1}{2} \left[ n^{\mp 1/2} (E_y)^{TLM} \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) \mp n^{\mp 1/2} (H_z)^{TLM} \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) \right] \quad \text{(III. 31)}$$

$$n^{V_{12}^{i,r}} = \frac{1}{2} \left[ n^{\mp 1/2} (E_x)^{TLM} \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) \pm n^{\mp 1/2} (H_z)^{TLM} \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) \right] \quad \text{(III. 32)}$$

Pour modéliser des milieux inhomogènes, on ajoute au niveau du nœud des stubs d'impédances caractéristiques différentes :

- Les stubs en circuit ouvert décrivent les effets capacitifs et permettent de modifier la permittivité du milieu ;
- Les stubs en court-circuit décrivent les effets inductifs et permettent de modifier la perméabilité du milieu.

### Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel

---

Au niveau du nœud TLM avec 6 stubs, on rajoute donc 6 impulsions de tension qui se propagent sur ces bras :

$$n^{V_{13}^{i,r}} = \frac{1}{2} n^{\mp 1/2 (E_x)_N^{TLM}(i,j,k)} \quad (\text{III. 33})$$

$$n^{V_{14}^{i,r}} = \frac{1}{2} n^{\mp 1/2 (E_y)_N^{TLM}(i,j,k)} \quad (\text{III. 34})$$

$$n^{V_{15}^{i,r}} = \frac{1}{2} n^{\mp 1/2 (E_z)_N^{TLM}(i,j,k)} \quad (\text{III. 35})$$

$$n^{V_{16}^{i,r}} = \pm \frac{Z_x}{2} n^{\mp 1/2 (H_x)_N^{TLM}(i,j,k)} \quad (\text{III. 36})$$

$$n^{V_{17}^{i,r}} = \pm \frac{Z_y}{2} n^{\mp 1/2 (H_y)_N^{TLM}(i,j,k)} \quad (\text{III. 37})$$

$$n^{V_{18}^{i,r}} = \pm \frac{Z_z}{2} n^{\mp 1/2 (H_z)_N^{TLM}(i,j,k)} \quad (\text{III. 38})$$

Les relations (III. 20)-(III. 37) établissent une correspondance entre le modèle mathématique décrivant le champ EM d'une manière discrète par des différences finies, et le modèle physique de la méthode TLM.

En remplaçant (III. 21)-(III. 38) dans (III. 18), on obtient :

$$\begin{aligned} n^{V_1^r} + n^{V_{12}^r} + n^{V_2^r} + n^{V_9^r} + Y_x n^{V_{13}^r} - n^{V_1^i} - n^{V_{12}^i} - n^{V_2^i} \\ - n^{V_9^i} - Y_x n^{V_{13}^i} + g_{ex} n (E_x)_N^{TLM}(i,j,k) = 0 \end{aligned} \quad (\text{III. 39})$$

D'autre part, d'après l'équation (III. 8) :

$$\begin{aligned} \frac{Y_x + 4}{2} \cdot \frac{\partial (E_x)_N^{TLM}}{\partial I} - \frac{\partial (H_z)_N^{TLM}}{\partial N_y} + \frac{\partial (H_y)_N^{TLM}}{\partial N_z} \\ + g_{ex} \cdot (E_x)_N^{TLM} = 0 \end{aligned} \quad (\text{III. 40})$$

### Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel

Exprimons cette équation sous forme de différences fines, centrées au point  $(i, j, k)$ , à l'instant  $n + 1/2$  :

$$\begin{aligned} \frac{Y_x + 4}{2} = & \left[ n + 1 \begin{matrix} (E_x)^{TLM}(i,j,k) \\ -n \end{matrix} \right] - \\ & \left[ n + 1/2 \begin{matrix} (H_z)^{TLM}(i,j+\frac{1}{2},k) \\ -n - 1/2 \end{matrix} \right] + \\ & \left[ n + 1/2 \begin{matrix} (H_y)^{TLM}(i,j,k+\frac{1}{2}) \\ -n + 1/2 \end{matrix} \right] \\ & + g_{ex} n + 1/2 (E_x)_N^{TLM}(i, j, k) = 0 \end{aligned} \quad (\text{III. 41})$$

L'équation (III. 39) peut être simplifiée, en utilisant (III. 21)-(III. 38) et (III. 39) :

$$\begin{aligned} \frac{Y_x + 4 + g_{ex}}{2} \cdot \left[ n + 1 \begin{matrix} (E_x)^{TLM}(i,j,k) \\ -n \end{matrix} \right] = \\ n + 1^{V_1^i} + n + 1^{V_{12}^i} + n + 1^{V_2^i} + n + 1^{V_9^i} + Y_x n + 1^{V_{13}^i} - \\ (n^{V_1^i} - n^{V_{12}^i} - n^{V_2^i} + n^{V_9^i} + Y_x n^{V_{13}^i}) \end{aligned} \quad (\text{III. 42})$$

On peut donc déduire l'expression du champ électrique suivant l'axe  $Ox$ :

$$\boxed{n \begin{matrix} (E_x)^{TLM}(i,j,k) \\ -n \end{matrix} = \frac{2}{Y_x + 4 + g_{ex}} (n^{V_1^i} - n^{V_{12}^i} - n^{V_2^i} + n^{V_9^i} + Y_x n^{V_{13}^i})} \quad (\text{III. 43})$$

Similairement, on déduit les 5 autres composantes du champ EM :

$$\boxed{n \begin{matrix} (E_y)^{TLM}(i,j,k) \\ -n \end{matrix} = \frac{2}{Y_y + 4 + g_{ey}} (n^{V_3^i} - n^{V_{11}^i} - n^{V_4^i} + n^{V_8^i} + Y_y n^{V_{14}^i})} \quad (\text{III. 44})$$

### Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel

$$n^{(E_z)_{N}^{TLM}(i,j,k)} = \frac{2}{Y_z + 4 + g_{ez}} (n^{V_6^i} - n^{V_{10}^i} - n^{V_5^i} + n^{V_7^i} + Y_z n^{V_{15}^i}) \quad (\text{III. 45})$$

$$n^{(H_x)_{N}^{TLM}(i,j,k)} = \frac{2}{Z_x + 4 + g_{mx}} (n^{V_5^i} - n^{V_7^i} + n^{V_8^i} - n^{V_4^i} + n^{V_{16}^i}) \quad (\text{III. 46})$$

$$n^{(H_y)_{N}^{TLM}(i,j,k)} = \frac{2}{Z_y + 4 + g_{my}} (n^{V_{10}^i} - n^{V_6^i} + n^{V_2^i} - n^{V_9^i} + n^{V_{17}^i}) \quad (\text{III. 47})$$

$$n^{(H_z)_{N}^{TLM}(i,j,k)} = \frac{2}{Z_z + 4 + g_{mz}} (n^{V_3^i} - n^{V_{11}^i} + n^{V_{14}^i} - n^{V_1^i} + n^{V_{18}^i}) \quad (\text{III. 48})$$

On a donc obtenu les expressions liant les 6 composantes du champ EM, (discretisées dans l'espace et dans le temps) avec les 18 impulsions de tensions incidentes sur les bras du nœud TLM.

On peut exprimer les impulsions de tension réfléchies comme il suit :

$$n^{V_1^i} = \left[ n^{(E_x)_{N}^{TLM}(i,j,k)} + n^{(H_z)_{N}^{TLM}(i,j,k)} \right] - n^{V_{12}^i} \quad (\text{III. 49})$$

$$n^{V_2^i} = \left[ n^{(E_x)_{N}^{TLM}(i,j,k)} - n^{(H_y)_{N}^{TLM}(i,j,k)} \right] - n^{V_9^i} \quad (\text{III. 50})$$

$$n^{V_3^i} = \left[ n^{(E_y)_{N}^{TLM}(i,j,k)} - n^{(H_z)_{N}^{TLM}(i,j,k)} \right] - n^{V_{11}^i} \quad (\text{III. 51})$$

$$n^{V_4^i} = \left[ n^{(E_y)_{N}^{TLM}(i,j,k)} + n^{(H_x)_{N}^{TLM}(i,j,k)} \right] - n^{V_8^i} \quad (\text{III. 52})$$

### Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel

---

$$n^{V_3^r} = \begin{bmatrix} (E_z)_N^{TLM}(i,j,k) & (H_x)_N^{TLM}(i,j,k) \\ n & -n \end{bmatrix} - n^{V_7^i} \quad (\text{III. 53})$$

$$n^{V_6^r} = \begin{bmatrix} (E_z)_N^{TLM}(i,j,k) & (H_y)_N^{TLM}(i,j,k) \\ n & -n \end{bmatrix} - n^{V_{10}^i} \quad (\text{III. 54})$$

$$n^{V_7^r} = \begin{bmatrix} (E_z)_N^{TLM}(i,j,k) & (H_x)_N^{TLM}(i,j,k) \\ n & +n \end{bmatrix} - n^{V_5^i} \quad (\text{III. 55})$$

$$n^{V_8^r} = \begin{bmatrix} (E_y)_N^{TLM}(i,j,k) & (H_x)_N^{TLM}(i,j,k) \\ n & -n \end{bmatrix} - n^{V_4^i} \quad (\text{III. 56})$$

$$n^{V_9^r} = \begin{bmatrix} (E_x)_N^{TLM}(i,j,k) & (H_y)_N^{TLM}(i,j,k) \\ n & +n \end{bmatrix} - n^{V_2^i} \quad (\text{III. 57})$$

$$n^{V_{10}^r} = \begin{bmatrix} (E_z)_N^{TLM}(i,j,k) & (H_y)_N^{TLM}(i,j,k) \\ n & -n \end{bmatrix} - n^{V_6^i} \quad (\text{III. 58})$$

$$n^{V_{11}^r} = \begin{bmatrix} (E_y)_N^{TLM}(i,j,k) & (H_z)_N^{TLM}(i,j,k) \\ n & +n \end{bmatrix} - n^{V_3^i} \quad (\text{III. 59})$$

$$n^{V_{12}^r} = \begin{bmatrix} (E_x)_N^{TLM}(i,j,k) & (H_z)_N^{TLM}(i,j,k) \\ n & -n \end{bmatrix} - n^{V_1^i} \quad (\text{III. 60})$$

$$n^{V_{13}^r} = n^{(E_x)_N^{TLM}(i,j,k)} - n^{V_{13}^i} \quad (\text{III. 61})$$

$$n^{V_{14}^r} = n^{(E_y)_N^{TLM}(i,j,k)} - n^{V_{14}^i} \quad (\text{III. 62})$$

$$n^{V_{15}^r} = n^{(E_z)_N^{TLM}(i,j,k)} - n^{V_{15}^i} \quad (\text{III. 63})$$

$$n^{V_{16}^r} = n^{V_{16}^i} - Z_x n^{(H_x)_N^{TLM}(i,j,k)} \quad (\text{III. 64})$$

$$n^{V_{17}^r} = n^{V_{17}^i} - Z_y n^{(H_y)_N^{TLM}(i,j,k)} \quad (\text{III. 65})$$



### Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel

---

$$n^{V_{18}^r} = n^{V_{18}^i} - Z_z n^{(H_z)_{N}^{TLM}(i,j,k)} \quad (\text{III. 66})$$

Les coefficients de la matrice de répartition  $[S]$  (de dimensions  $(18 \times 18)$ ) sont obtenus en moyennant les expressions  $E_i \pm H_j$  ( $i, j = x, y, z$ ).

#### III.5 Conclusion

Ce chapitre couvre les méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité du blindage dans le domaine temporel. Il commence par expliquer la différence entre les domaines temporel et fréquentiel, puis explore les bases de l'électromagnétisme à travers les équations de Maxwell. Ensuite pour résoudre ces équations plusieurs méthodes numériques sont présentées, notamment les méthodes FDTD, FITD, FVTD, DGTD, et TLM. La méthode TLM est particulièrement détaillée avec des concepts comme le maillage, les nœuds 3D-TLM, et la discrétisation des équations de Maxwell. Ce chapitre établit ainsi les fondations pour une évaluation efficace du blindage dans le domaine temporel.

### Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel

---

#### Bibliographies

[1] **Todd Hubing.** *LearnEMC.* [En ligne]. (2011) Disponible sur : <<https://learnemc.com/time-frequency-domain> > (Consulté le 05/04/2024).

[2] **Association Scenari.** *Les Modulations Numériques.* [En ligne]. Disponible sur : <[https://cabanisbrive.scenari-community.org/Spe\\_SI/Terminale/Sequence\\_11\\_IO\\_Modulation/2\\_Modulation\\_Numerique/1\\_Cours/2\\_Cours\\_Modulation\\_Numerique\\_web/co/0\\_Cours\\_LesModulationsNumeriques\\_1.html](https://cabanisbrive.scenari-community.org/Spe_SI/Terminale/Sequence_11_IO_Modulation/2_Modulation_Numerique/1_Cours/2_Cours_Modulation_Numerique_web/co/0_Cours_LesModulationsNumeriques_1.html)> (Consulté le 20/05/2024).

[3] **Surya Paneerselvam.** *skill-lync.* [en ligne]. (2018) Disponible sur : <<https://skill-lync.com/blogs/technical-blogs/electrical-an-overview-of-the-differences-between-time-domain-and-frequency-domain> > (Consulté le 07/05/2024).

[4] **Nadia, BELARBI.** *Contribution A L'étude De La Réflexion D'un Blindage Electromagnétique A Base De Polymères Conducteurs.* Mémoire de Master en systèmes macromoléculaires et leurs applications. Université Abou Bekr Belkaïd De Tlemcen. 2014

[5] **Alina, Ungureanu.** *Synthèse De Sources Rayonnantes Large Bande, Par La Méthode TLM Inverse.* Thèse de doctorat en optique et radiofréquence. Université de Grenoble. 2011,

[6] **A, HENDI. F, ALKALLAS. H, ALMOUSSA. et al.** « *Finite Difference Time-Domain Method For Simulating Dielectric Materials And Metamaterials* ». Journal of Nanomaterials and Biostructures. , juillet - septembre 2020, vol.15, p. 707 - 719

[7] **Dr Gandhi.** Numerical Methods for Electromagnetics: The Finite-Difference TimeDomain Method (FDTD). Université de l'Utah. [En ligne]. États-Unis. Cours, 2012, 12p. Disponible sur : <<https://my.ece.utah.edu/~ece6340/LECTURES/lecture%2014/FDTD.pdf> > (Consulté le 20/05/2024).

### Chapitre III : Méthodes numériques pour l'évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel

---

[8] **Mahdi, HAMIDI.** *Modélisation Par La Méthode FDTD Des Plasmons De Surface Localisés.* Thèse de doctorat en physique matériaux. Université mouloud Mammeri Tizi-ouzou.2012

[9] **M, Clemens. T, Weiland.** « *Modélisation Par La Méthode FDTD Des Plasmons De Surface Localisés* ». Progress In Electromagnetics Research. , 2001, vol.32, p. 65–87

[10] **Shou-Qing Jia .** « *Finite Volume Time Domain with the Green Function Method for Electromagnetic Scattering in Schwarzschild Spacetime* ». Chinese Physics Letters, 2019, vol.36, No1

[11] **Stephen D, Gedney. T,Kramer. C, Luo . et al.** « *The Discontinuous Galerkin Finite Element Time Domain Method (DGFETD)* » . In *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Honolulu, HI, USA, 09-13 juillet 2007

[12] **Karim, Belkacemi.** *Modélisation et Management Thermique des modules de puissance RF et fiabilité des circuits électroniques par la méthode TLM.* Thèse de doctorat en Electronique. Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem. 2019

[13] **Thi Quynh Van Hoang.** *Maillage Cartesien Non-Conforme Pour La Methode TLM Application A La Conception De Rectennas Compactes.* Thèse de doctorat en Electronique. Université Nice Sophia Antipolis. 2012

[14] **Oualid, Makhlof.** *Nouveau Modèle TLM Thermique Pour La Dosimétrie Numérique De Structures Fortement Hétérogènes.* Thèse de doctorat en Electronique. Université Côte d'Azur, 2016.

[15] **Yahia, Fegas.Nabil, Faour.** *Etude De L'efficacité De Blindage D'une Enceinte Métallique Munie D'ouverture Centrée.* Mémoire de Master en Electrotechnique Industrielle. Université Mohammed Seddik Benyahia .2019

## **Chapitre VI**

### **Applications Et Résultats Numériques**

### IV.1 Introduction

Les avancées technologiques et l'amélioration des logiciels de simulation ont multiplié les options disponibles, chacun offrant une variété de méthodes numériques. Pour évaluer les problèmes potentiels de compatibilité électromagnétique (EMC), le développement d'outils de prédiction est essentiel [1]. Le choix du logiciel de simulation est donc déterminé par la nature spécifique du problème à résoudre.

Dans ce dernier chapitre, nous proposons d'utiliser le logiciel de simulation électromagnétique en 3D CST Microwave Studio pour quantifier l'efficacité de blindages face à des agressions en formes d'ondes planes.

#### IV.1.1 Description du logiciel de simulation CST Studio Suite

Fondé en 1992, le logiciel de simulation électromagnétique CST STUDIO SUITE est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et de développement dans les solutions les plus efficaces et précises de calcul pour la conception électromagnétique [2].

CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structures passives en 3 Dimensions basée sur la résolution des équations de Maxwell. CST Microwave Studio fait partie de la CST DESIGN STUDIO suite, offre un certain nombre de solveurs différents pour différents types d'applications. Étant donné aucune méthode ne fonctionne aussi bien dans tous les domaines d'application [3].

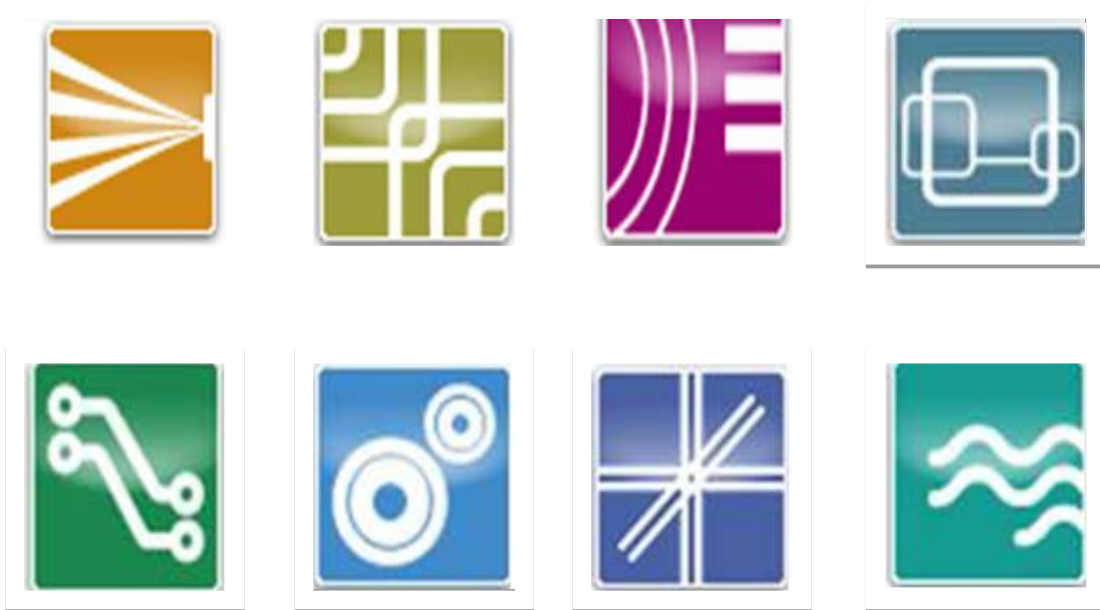
#### IV.2 Caractéristiques du logiciel CST Microwave Studio

Les principales caractéristiques de logiciel CST Microwave Studio sont [4] :

- Une mémoire technique efficace d'intégration finie.
- La structure peut être vue soit comme un modèle 3D ou un schéma.
- Très bonne performance en raison de rapprochement frontière Perfect (PBA).
- Caractéristique hybride à base de modélisation permet rapide changements structurels.
- Importation d'un ensemble de données modèle humain visible ou d'autres ensembles de données.
- L'importation de modèles 2D et 3D.
- Paramétrages des fichiers de CAO importés.
- Base de données des matériaux.
- Modèles de structure pour la description du problème simplifié.

#### IV.3. Les module d'exécution

Ils existent plusieurs modules d'exécution sous le logiciel CST, on va les sites comme suit :



**Figure IV.1** : Les modules d'exécution du logiciel CST

### IV. 4 Modules de solveur CST

#### IV. 4.1 Un solveur transitoire

Il contient deux solveurs basés sur les mailles hexaèdres. Ces solveur est remarquablement efficace pour les applications de hautes fréquence comme les connecteurs, filtres, antennes...Etc.

- **Transient solver** : est basé sur la méthode (FIT). Avec la combinaison entre la technique PBA (the Perfect Boundary Approximation) et TST (feature and the Thin Sheet Technique) extension de solveur est capable d'augmenter la précision de simulation.
- **TLM solver** : le solveur de TLM utilisée la méthode TLM (Transmission Line Matrix)
- pour vous fournir des résultats à haute disponibilité, ce solveur est particulièrement
- bien adapté pour les applications d'EMC/EMI/E3.

#### IV. 4.2 Un solveur fréquentiel

Comme le solveur transitoire, il est constitué d'un solveur général basé sur une méthode fréquentielle. Le type de maillage change selon la structure étudiée.

### **IV. 4.3 Un solveur intégral**

Ce solveur est dédié aux plus grandes structures électriques. Il se fonde sur la méthode des moments avec une formulation intégrale des champs électriques et magnétiques. Afin de réduire la complexité numérique l'approche MLFMM (Multi Level Fast Multipole Method) est utilisée.

### **IV. 4.4 Un solveur modal**

Ce solveur est dédié à la simulation des structures fermées résonantes. Les résultats qui peuvent être obtenus sont par exemple la distribution des modes ainsi que les fréquences de résonance de la structure.

### **IV. 4.5 Un solveur multicouche**

Ce solveur est basé sur la Méthode des Moments (MoM) et permette les utilisateurs de simuler les géométries multicouches précisément et efficacement.

### **IV. 4.6 Un solveur Asymptotique**

Ce solveur intégral pour les très hautes fréquences. Le solveur est basé sur la méthode LR (méthode de lancer de rayons) qui devient très efficace pour la diffusion mono-statique et bi-statique et d'imagine les calculs.

### **IV. 5 Choix du logiciel et du solveur**

On va utiliser le logiciel CST il est très avantageux en termes de temps de calcul et de précision.

Le solveur le plus flexible pour traiter notre problématique, est le solveur transitoire. Il est efficace pour la plupart des types d'applications à haute fréquence tels que les connecteurs, les lignes de transmission, les filtres, les antennes, les blindages ...etc.

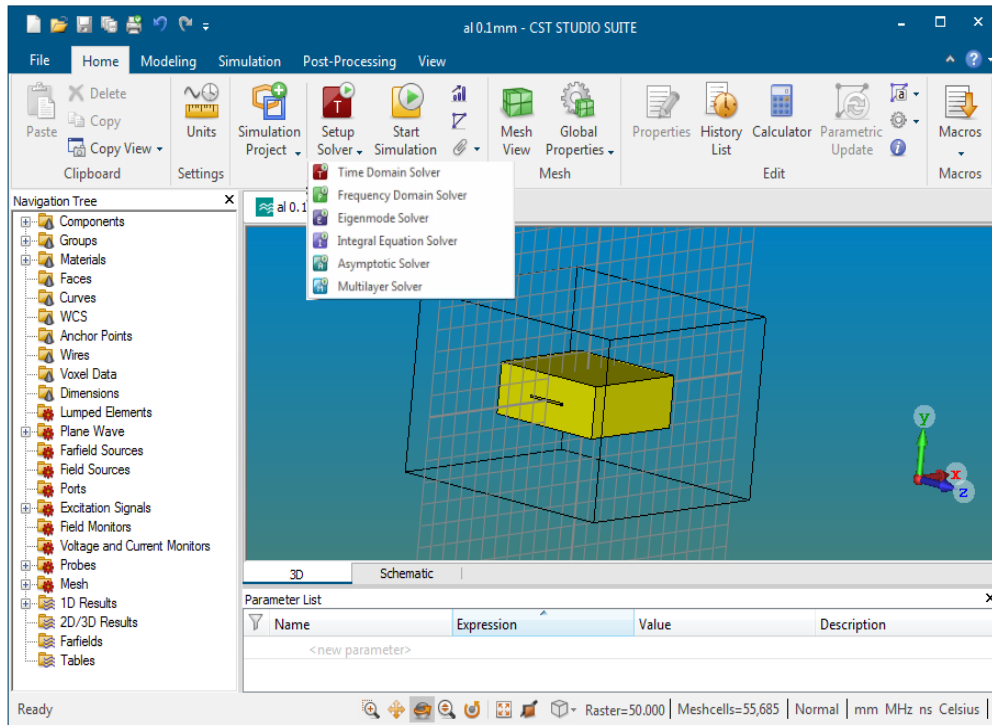


Figure IV.2 : Illustration de l'outil CST.

### IV.6 Outils de simulation

#### IV. 6.1 le choix de méthodes de résolution

Les équations de Maxwell sont résolues à l'aide de diverses méthodes numériques dans le cadre des études de dosimétrie numérique. Notre travail se focalise sur la méthode numérique TLM, qui offre un moyen rapide et efficace pour analyser l'impact des paramètres de conception, de la fréquence et des ondes incidentes sur l'efficacité du blindage des boîtiers de protection utilisant des matériaux composites .

#### IV.7 Géométrie de la structure étudiée

Le choix de la géométrie d'une enceinte de blindage est réalisé en s'appuyant sur des approches concrètes et adaptées aux exigences industrielles actuelles. Exemple dans le contexte des véhicules électriques (VE), enceinte de protection peut avoir différentes dimensions en fonction de la complexité des circuits internes de la disposition du système de refroidissement et du montage. Tableau IV.1 illustre une étude de référence spécifique aux onduleurs pour différentes marques et modèles de véhicules afin d'indiquer les dimensions courantes pour les onduleurs.

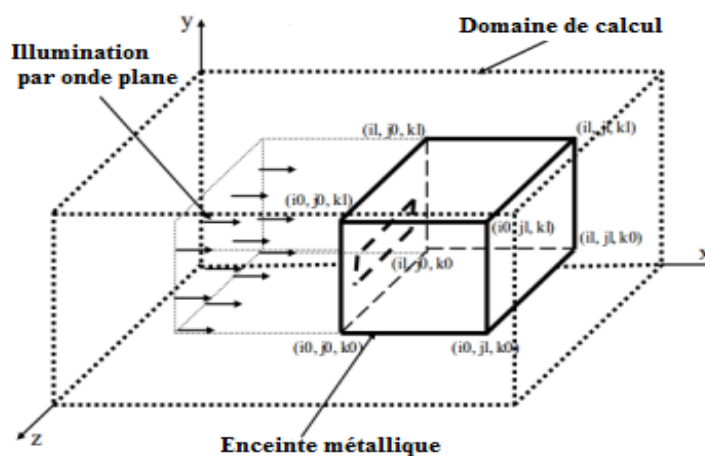


**Tableau IV.1 : Étude comparative spécifique aux onduleurs.[5]**

Type	Modèle de véhicule	Dimensions de l'onduleur (mm)	Poids (kg)	Tension (V)	Matériau du boîtier
BEV	Audi e-Tron	300 × 160 × 310	7,986	150-460	Aluminium
PHEV	BMW i3 R.E	202 × 367 × 128	5,081	120-400	Composite
BEV	Jaguar I-Pace	275 × 90 × 435	8,134	290-450	Aluminium
BEV	Renault Zoe	450 × 200 × 260	10,108	240-420	Aluminium
BEV	Hyundai Kona	370 × 120 × 400	9,193	200-400	Aluminium
BEV	Opel Ampera	247 × 147 × 405	9,373	250-400	Aluminium

Dans notre étude, la géométrie du problème est illustrée dans la figure, une enceinte rectangulaire vide, de dimensions (a x d x b) mm, équipée d'une ouverture rectangulaire centrée de dimensions (w x l) mm, exposée à une onde plane d'incidence normale avec une amplitude normalisée de  $E_y = 1$  V/m. Les parois de l'enceinte ont une épaisseur de  $e = 1$  mm. Le choix du matériau de la boîte dépend de la nature du problème étudié.

L'efficacité du blindage est définie comme le rapport des composants  $E_y$  ou  $H_z$  au point d'observation  $P_0$  (illustré sur la figure IV.5) [6], situé au centre de la boîte, en présence et en absence du boîtier. La bande fréquentielle étudiée se situe dans la gamme monomodale de la cavité, allant de 0 à 1 GHz.



**Figure IV.3 : Boîtier de blindage.**

Pour le champ électrique :

$$SE_E \text{ (dB)} = 20 \log \left| \frac{E_{y_0}}{E_{y_1}} \right| \dots\dots\dots (IV.1)$$

Pour le champ magnétique :

$$SE_H \text{ (dB)} = 20 \log \left| \frac{H_{z_0}}{H_{z_1}} \right| \dots\dots\dots (IV.2)$$

$E_{y_1}$  et  $H_{z_1}$  : les composantes des champs électrique et magnétique en présence de l'enceinte.

$E_{y_0}$  et  $H_{z_0}$  : les composantes des champs électrique et magnétique en absence de l'enceinte.

### IV.8 Détermination de l'efficacité de blindage d'une enceinte

La détermination du SE est basée sur les étapes suivantes :

- 1- Excitation de l'enceinte avec une onde plane d'impulsion gaussienne d'incidence et enregistrement du champ électrique et magnétique à le point d'observation  $p_0$  ;
- 2- Excitation du domaine de calcul de l'espace libre avec la même onde plane d'incident normale et enregistrement du champ électrique et magnétique à le point d'observation ;
- 3- Calcul de l'efficacité de blindage SE et SH par les expressions (IV.1) et (IV.2)
- 4- Utilisation d'outillage MATLAB pour Amélioration des résultats par filtrages

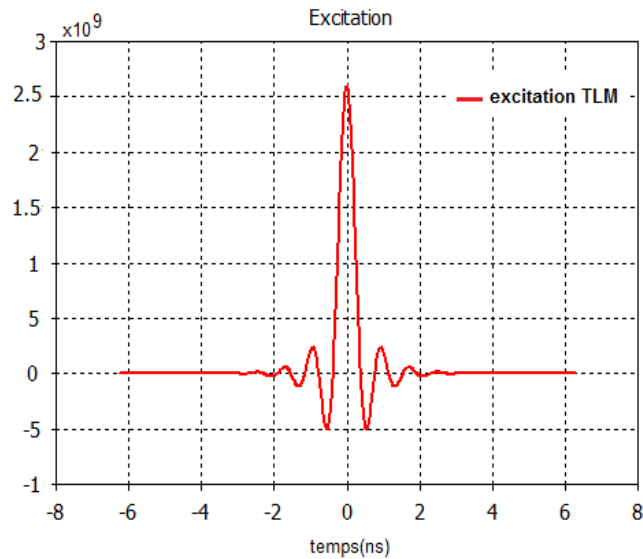
#### IV.8.1 L'excitation

Tout système électromagnétique nécessite une excitation pour générer une réponse. Cette réponse dépend autant de la nature du système que de la manière dont il est excité. Le choix de l'excitation est influencé par plusieurs facteurs, tels que le type de structure à utiliser et la bande de fréquence visée.

L'excitation se traduit par un signal numérique qui se propage à travers la structure. Cette variation, appliquée à un point précis du maillage, possède une forme, une durée, et une position particulières. Numériquement, il est possible de choisir une forme arbitraire pour l'excitation. Cependant, pour garantir la convergence des résultats, il est préférable de sélectionner une excitation qui se rapproche de la forme réelle du champ dans la structure.

Il est idéal d'utiliser une excitation qui répond à certaines exigences, telles qu'une étude couvrant une large bande spectrale, allant de zéro jusqu'à une fréquence supérieure de travail, avec une durée temporelle raisonnable, continue, et facilement interprétable.

Dans CST, les excitations sont automatiquement sélectionnées par le logiciel.



**Figure IV.4 :** Excitation impulsionnelle pour TLM.

### IV.9 Étude de l'efficacité de blindage en fonction du matériau

Cette étude s'intéresse à l'influence du matériau sur l'efficacité de blindage d'une enceinte métallique en électronique de puissance. L'objectif est de comprendre comment le choix du matériau affecte la capacité de l'enceinte à atténuer les champs électromagnétiques (CEM).

#### IV.9.1 Modélisation d'une enceinte

La modélisation d'une enceinte métallique en électronique de puissance dans CST Studio Suite implique les étapes suivantes :

1. **Géométrie :** Définir la géométrie 3D de l'enceinte métallique, en spécifiant ses dimensions, sa forme et les matériaux utilisés.
2. **Matériaux :** Attribuer les propriétés de chaque matériau utilisé aux différentes parties de l'enceinte, en particulier la conductivité électrique et la perméabilité magnétique.
3. **Sources CEM :** Définir les sources CEM incidentes sur l'enceinte, telles que des champs électriques ou magnétiques à des fréquences spécifiques.

❖ Une cage (enceinte) de taille :

$$\text{Enceinte} \begin{cases} a = 300\text{mm} \\ b = 120\text{mm} \\ c = 300\text{mm} \end{cases} ; \text{ouverture} \begin{cases} L = 100\text{mm} \\ W = 5\text{mm} \end{cases}$$

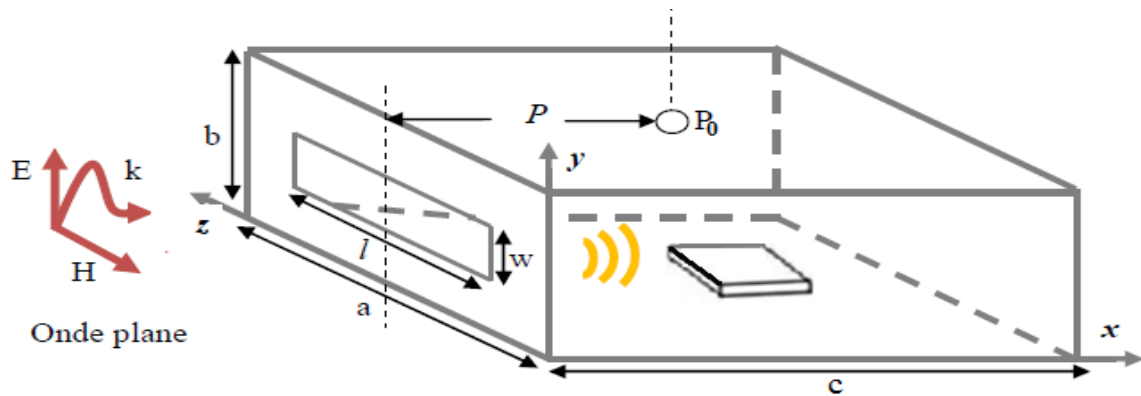


Figure IV.5 : Géométrie de l'enceinte illuminée par une onde plane.

#### IV.10 Evaluation temporelle l'efficacité du blindage

Évaluer l'efficacité du blindage dans le domaine temporel, en étudiant la propagation des ondes à travers cette structure d'une enceinte métallique avec deux matériaux le nickel et aluminium

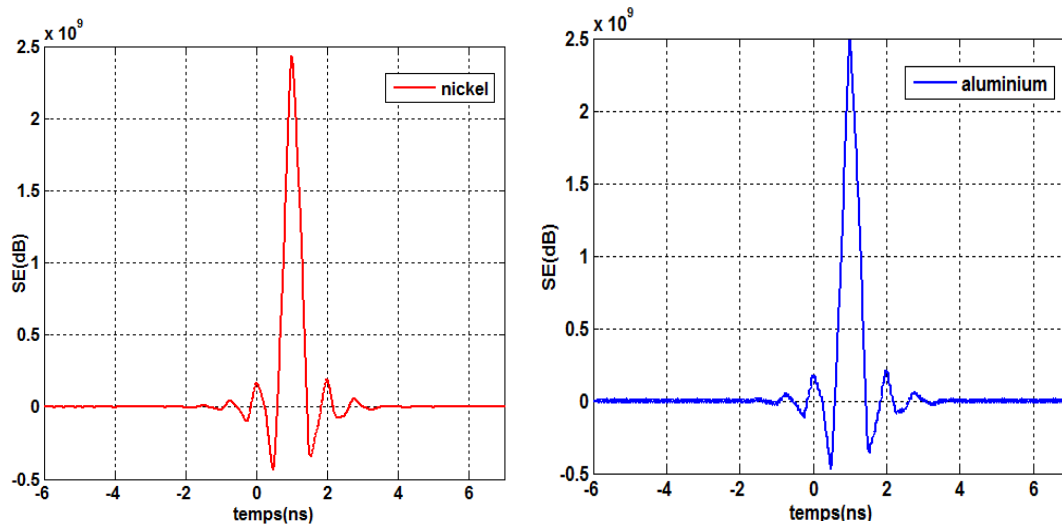


Figure IV.6 : Evaluation temporelle l'efficacité du blindage de nickel et aluminium

- La simulation dans le domaine temporel nous a permis d'observer la signature du signal, d'analyser les modifications de forme et de détecter les décalages ou retards de propagation. Ce type de modélisation, appliqué à une enceinte métallique, est particulièrement utile pour prendre en compte les non-linéarités des matériaux, telles que la saturation, ou celles des composants (ex : diode).
- Dans notre cas, nous avons bénéficié de la rapidité de la méthode TLM (Transmission Line Matrix) par rapport aux méthodes de résolution dans le domaine fréquentiel.

Nous avons opté pour un affichage des résultats dans le domaine fréquentiel, ce qui nous permet de mieux analyser et discuter l'efficacité des différentes techniques employées.

### IV.11 Étude de l'efficacité du blindage avec une paroi monocouche

Cette étude s'intéresse à l'influence de type de matériau sur l'efficacité de blindage d'une enceinte avec une seule couche. Nous cherchons à comprendre comment le matériau choisi influence la capacité de l'enceinte à atténuer les champs électromagnétiques

#### IV.11.1 L'effet du changement de type de matériau conducteur

Pour apprécier l'effet du changement de matériau de l'enceinte sur SE, nous conservons la même géométrie de l'enceinte (300\*300\*120\*) mm avec une épaisseur d'1 mm.

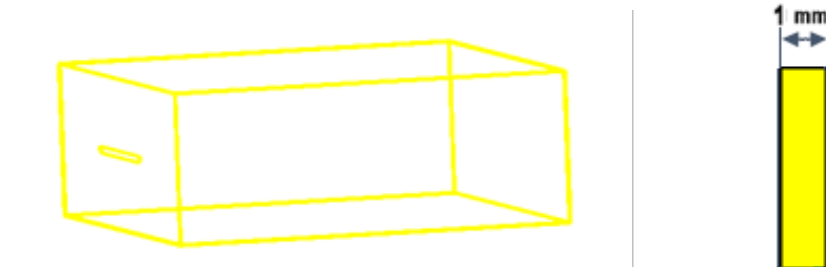


Figure IV.7 : Boîtier de blindage avec une paroi monocouche d'un 1mm.

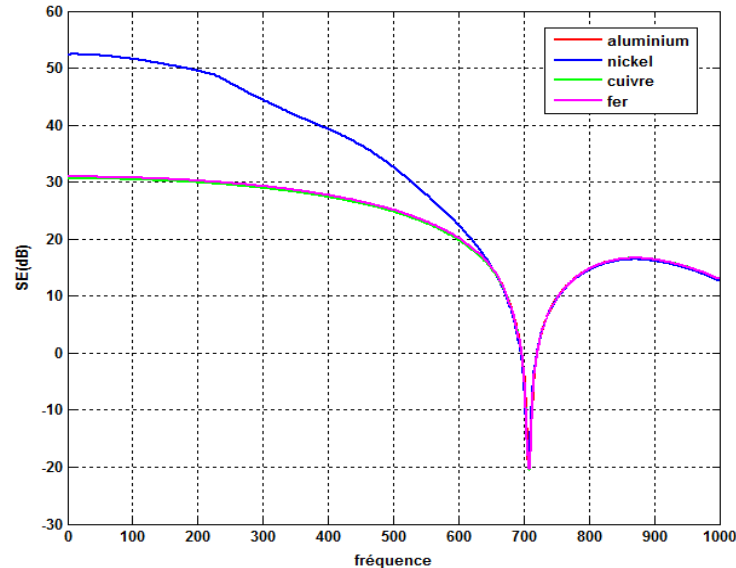


Figure IV.8 : Résultat obtenu le champ électrique pour des matériaux conducteurs.

#### Remarque :

- Tous les matériaux de blindage montrent des fluctuations de l'efficacité électromagnétique (SE) en fonction de la fréquence, particulièrement marquées autour des fréquences de résonance, près de 700 MHz.

- Le classement des matériaux en termes d'efficacité de blindage varie en fonction de la fréquence. Aux basses fréquences, le nickel offre l'efficacité de blindage la plus élevée, suivi de près par l'aluminium et le cuivre. À des fréquences plus élevées.

### ➤ Effet de résonance

Comme une cavité ayant la forme d'un parallélépipède de dimensions  $l$ ,  $L$  et  $h$ , une boîte de dimensions  $l$ ,  $L$  et  $h$  présente une fréquence de résonance fixée par la relation [7]:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{k}{l}\right)^2 + \left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{h}\right)^2} \text{ pour laquelle } k, m \text{ et } n \text{ fixe le mode de résonance.}$$

#### IV.11.2 L'effet du changement de type de matériau isolant

L'effet du changement de type de matériau isolant sur l'efficacité du blindage Pour apprécier l'effet de changement de matériaux de l'enceinte 04 matériaux choisie (porcelain, polycarbonate, polyimide, epoxy resin ), nous conservons la même géométrie de l'enceinte (300\*300\*120\*)mm avec épaisseur d'un 1mm

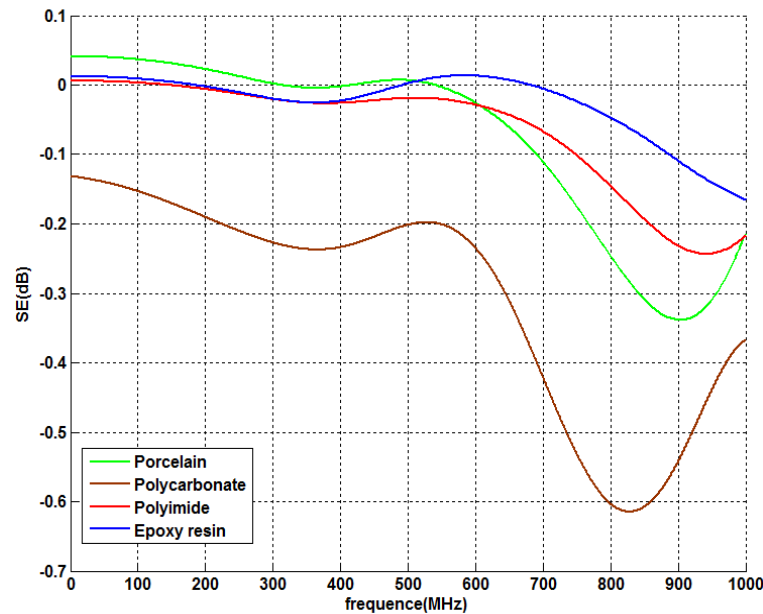


Figure IV.9: Résultat obtenu le champ électrique pour des matériaux isolants

#### Remarque :

- Toutes les courbes tendent vers zéro, ce qui indique que l'efficacité du blindage de ces matériaux est négligeable. Ceci est cohérent avec l'idée générale selon laquelle les matériaux non conducteurs, tels que les quatre matériaux utilisés dans cette analyse, ont une capacité minimale, voire nulle, à atténuer les champs EM.

### ❖ Raisons de l'efficacité négligeable du blindage :

- **Manque de conductivité électrique :** les matériaux non conducteurs ont une très faible conductivité électrique, ce qui signifie qu'ils ne peuvent pas transporter efficacement les charges électriques, qui sont les principaux porteurs des ondes EM.
- **Absence de formation de courants de Foucault :** les courants de Foucault, induits par les champs magnétiques changeants des ondes EM, sont responsables de la dissipation de l'énergie EM dans les matériaux conducteurs. Les matériaux non conducteurs ne génèrent pas de courants de Foucault importants, ce qui limite leur capacité de blindage.
- **Réflexion ou absorption minimale :** les matériaux non conducteurs ont une capacité limitée à réfléchir ou à absorber les ondes électromagnétiques incidentes. Au lieu de cela, les ondes ont tendance à traverser le matériau avec une interaction minimale.

### IV.11.3 L'effet du changement et augmenter la conductivité électrique de matériau isolant

L'effet du changement et augmenter conductivité électrique de matériau isolant sur l'efficacité du blindage Pour apprécier l'effet de changement SE sur l'enceinte ,on utiliser 02 matériaux (polyimide, Polythiophène) SE, et on fait augmenter conductivité électrique de 100 Jusqun 1000 s/m.

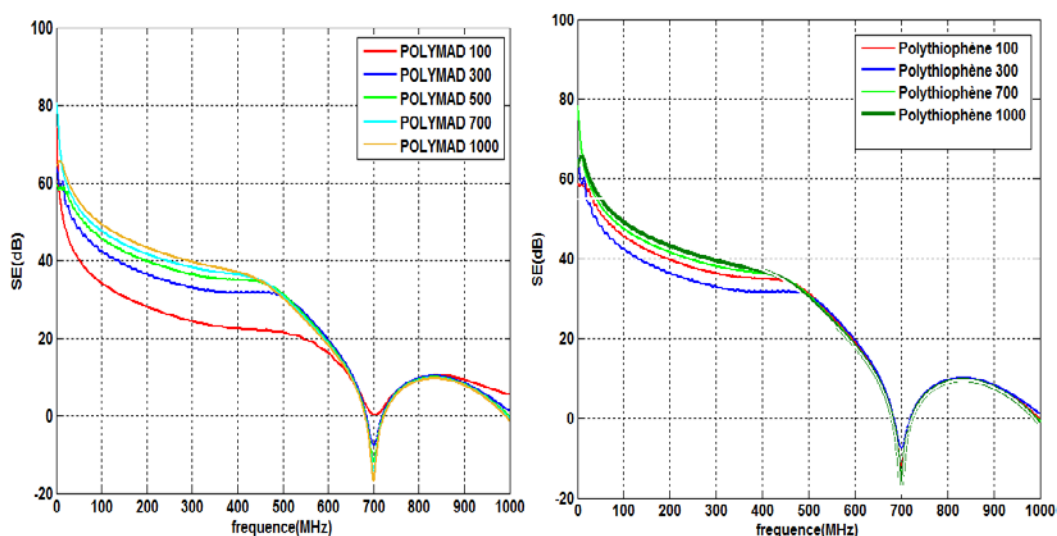


Figure IV.10 :Résultat obtenu le champ électrique changement la conductivité électrique

### Remarque :

- On remarque bien que l'augmentation de la conductivité du Polythiophène et polymade conduit à une amélioration significative de l'efficacité de blindage, en particulier aux basses et moyennes fréquences.

#### IV.11.3.1 Interprétation de la variation de l'efficacité du blindage avec d'augmenter la conductivité électrique de matériau

L'efficacité de blindage (SE) est déterminée par trois contributions principales :

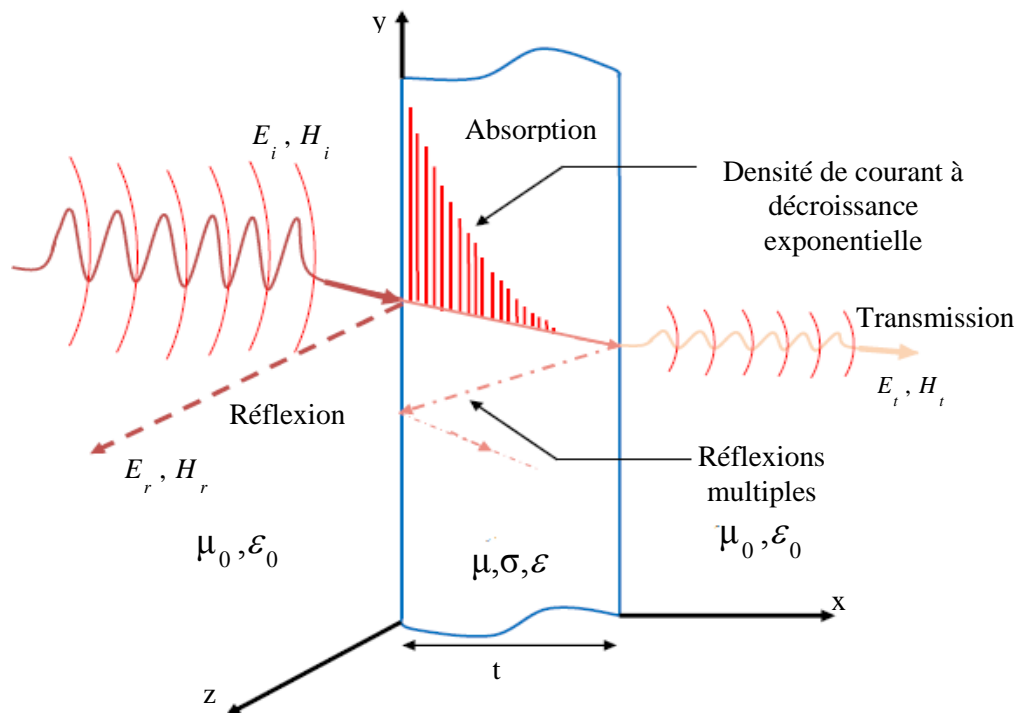


Figure IV.11 : Atténuation d'une onde électromagnétique[8].

- Perte par réflexion (R) :** Cette perte est liée à la capacité du matériau à réfléchir les ondes électromagnétiques. Elle dépend de la conductivité électrique ( $\sigma$ ) et de la perméabilité ( $\mu$ ) du matériau ainsi que de la fréquence ( $f$ ) de l'onde incidente. Lorsque la fréquence augmente, les pertes par réflexion diminuent en raison de l'effet de peau, qui réduit la profondeur de pénétration des ondes dans le matériau conducteur.
- Perte par absorption (A) :** Elle dépend de l'épaisseur ( $t$ ) du matériau, de la conductivité ( $\sigma$ ), de la perméabilité ( $\mu$ ), et de la fréquence de l'onde. Plus la conductivité et la perméabilité sont élevées, plus le matériau absorbe efficacement les ondes électromagnétiques.



- **Réflexions multiples (M) :** Ce facteur prend en compte les ondes réfléchies à l'intérieur du matériau. Plus la conductivité est élevée, plus les réflexions multiples peuvent influencer l'efficacité de blindage, car les ondes peuvent être réfléchies plusieurs fois avant d'être complètement absorbées

### IV.12 Étude de l'efficacité du blindage multicouches

Cette étude s'intéresse à l'influence de combine plusieurs matériaux sur l'efficacité de blindage d'une enceinte métallique. L'objectif est de comprendre comment le choix du matériau et leur disposition affectent la capacité de l'enceinte à atténuer les champs électromagnétiques (CEM).

#### **Théorie des Structures Multicouches**

##### ➤ **Concept de Multicouche:**

Une structure multicouche est constituée de plusieurs matériaux empilés les uns sur les autres, chacun ayant des propriétés spécifiques de conductivité ( $\sigma$ ), de perméabilité magnétique ( $\mu$ ) et de permittivité électrique ( $\epsilon$ ). Ces propriétés déterminent comment chaque couche interagit avec les ondes électromagnétiques.

##### ➤ **Interaction des Ondes avec les Couches:**

Lorsqu'une onde électromagnétique atteint une structure multicouche, elle subit plusieurs processus clés :

- **Réflexion aux Interfaces**

Une partie de l'onde est réfléchiée chaque fois qu'elle rencontre une interface entre deux couches de matériaux différents. Cela dépend des différences d'impédance entre les matériaux.

- **Absorption dans les Couches**

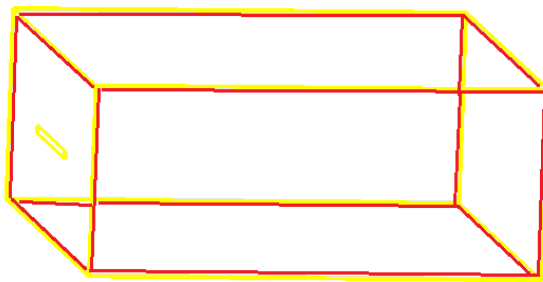
Une partie de l'onde est absorbée dans le matériau, ce qui dissipe l'énergie de l'onde sous forme de chaleur.

- **Transmission à Travers les Couches**

La partie non réfléchiée de l'onde continue à travers la couche suivante.

#### IV.12.1 Modélisation EMI d'une enceinte bicouches

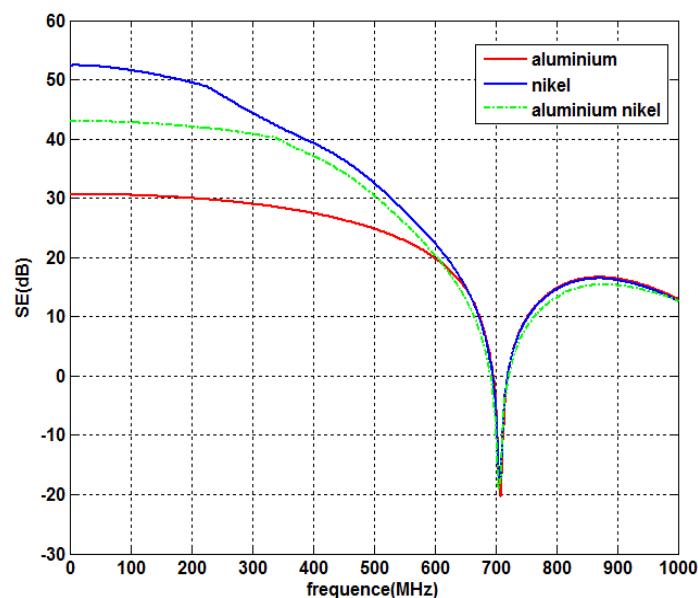
Dans cette étude, nous examinons un boîtier avec une paroi composée de deux couches : en aluminium et nickel



**Figure IV.12.a** Boîtier de blindage avec une paroi bicouches



**Figure IV.12.b** La disposition des matériaux



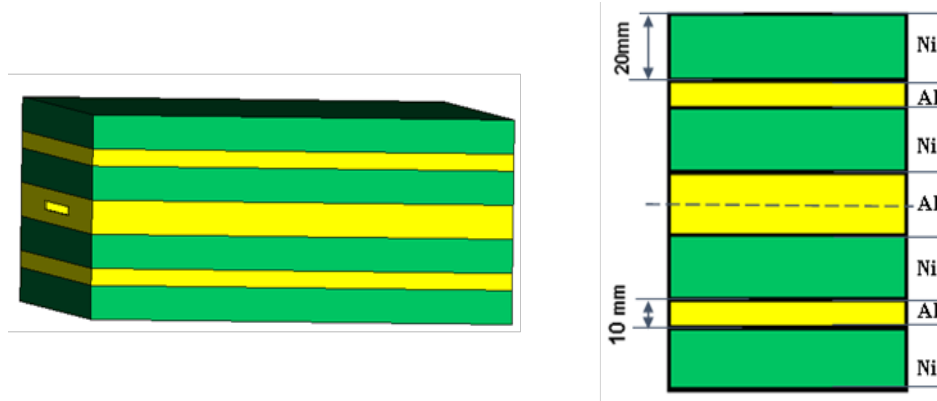
**Figure IV.13** : Résultat obtenu le champ électrique composé de deux couches :  
aluminium et nickel

**Remarque :**

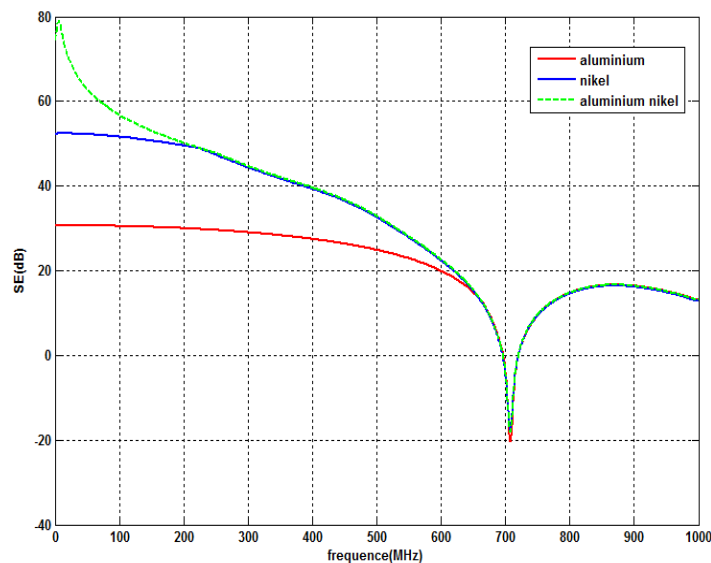
- La courbe de de deux couches se situe généralement entre les courbes rouge (aluminium) et bleue (nickel), montrant une SE meilleure que celle de l'aluminium seul mais inférieure à celle du nickel seul.
- Cette combinaison offre une solution de compromis en termes d'efficacité de blindage sur toute la plage de fréquences étudiée.

### IV.12.2 Modélisation EMI d'une enceinte deux couches stratifiée

Dans cette étude, nous examinons un boîtier avec une paroi composée de deux couches stratifiée : en aluminium(couche de 10mm) et nickel(couche de 20mm) et une paroi de 1mm



**Figure IV.14 :** La disposition de deux couches stratifiée aluminium et nickel.



**Figure IV.15:** Résultat obtenu le champ électrique deux matériaux en bicouches stratifiées : aluminium et nickel

#### Remarque :

- L'utilisation des deux matériaux en couches stratifiées montre une performance de blindage électromagnétique supérieure, particulièrement aux basses et moyennes fréquences. Cette combinaison permet d'obtenir une SE plus élevée grâce à l'effet synergique des deux matériaux.

### IV.12.3 Interprétation de la variation de l'efficacité du blindage avec l'utilisation de deux matériaux de différentes propriétés

- **Aluminium (Al) :**

Matériau hautement conducteur, mais avec une perméabilité magnétique faible (proche de celle de l'air). il est efficace pour réfléchir les ondes électromagnétiques mais n'absorbe pas significativement les champs magnétiques.

- **Nickel (Ni) :**

Matériau ayant une conductivité inférieure à celle de l'aluminium mais avec une perméabilité magnétique beaucoup plus élevée. Il est capable d'absorber les champs magnétiques et de fournir un blindage efficace contre les fréquences basses à moyennes[9].

- **Combinaison Al-Ni :**

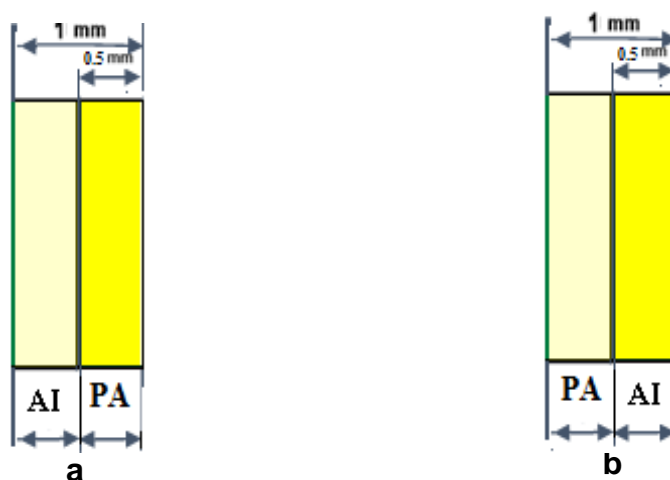
Utilisation des propriétés complémentaires de ces deux matériaux pour obtenir un blindage optimisé sur une large bande de fréquences.

- **Réflexion et absorption :**

La combinaison des deux matériaux permet d'obtenir un blindage qui non seulement réfléchit efficacement les ondes électromagnétiques mais qui les absorbe également. Cela conduit à une réduction des interférences électromagnétiques sur une large gamme de fréquences, ce qui est essentiel pour des applications où une large bande de protection est nécessaire.

### IV.12.4 Modélisation EMI d'une enceinte bicouche hybride

dans cette étude, nous examinons un boîtier avec une paroi composée de deux couches hybride: un matériau conducteur et l'autre isolant



**Figure IV.16 :** La disposition des matériaux : aluminium et polyamide

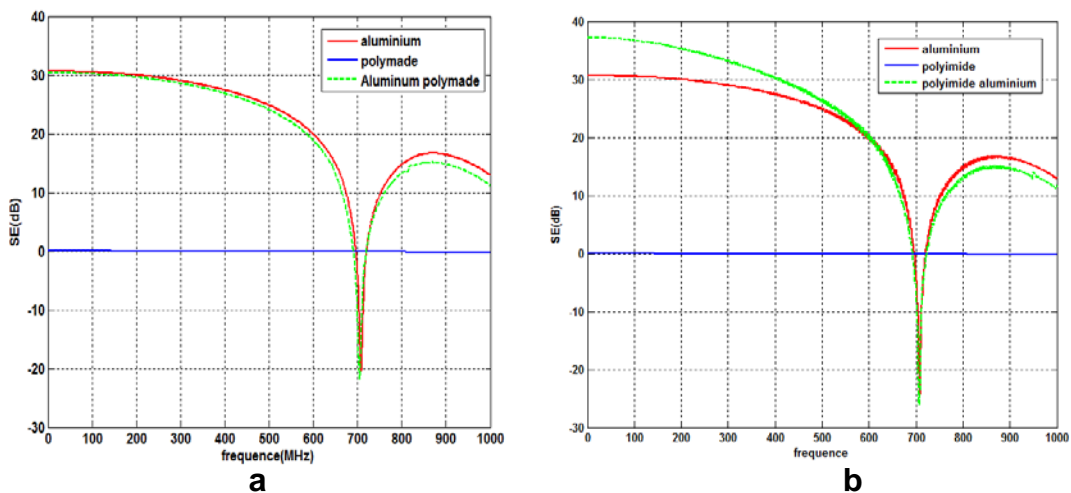


Figure IV.17 : Résultat obtenu le champ électrique deux matériaux en bicouches : aluminium et polyamide

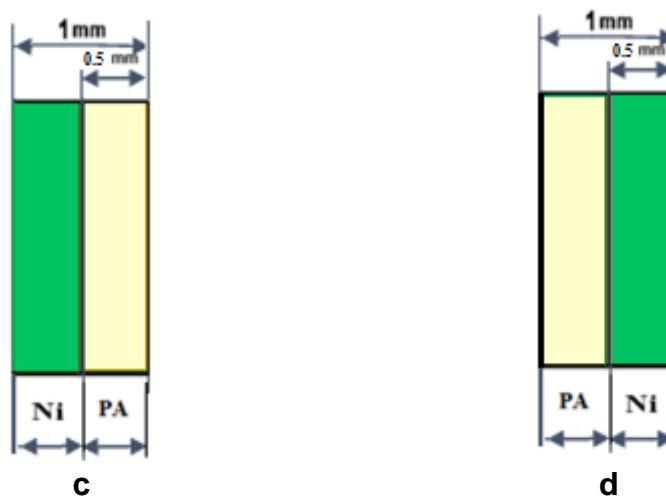


Figure IV.18 : La disposition des matériaux : nickel et polyamide

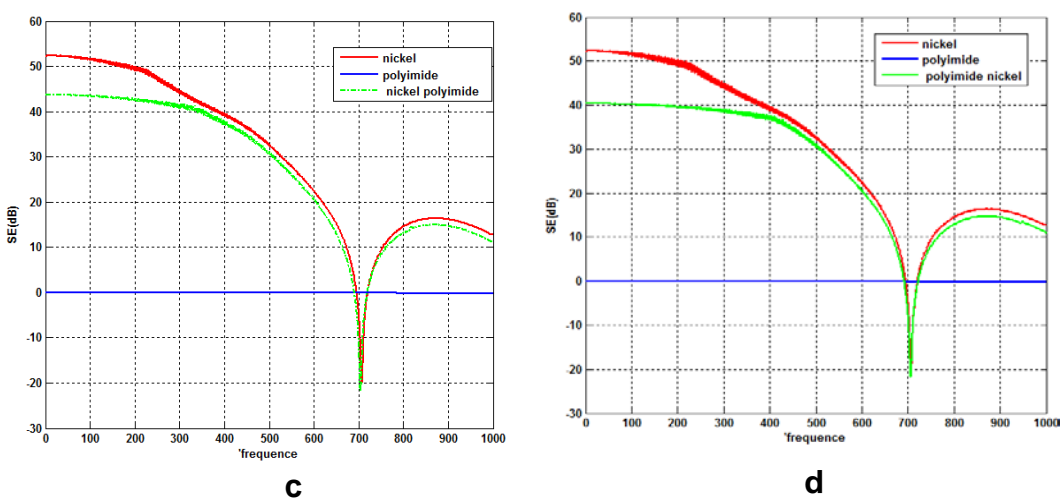


Figure IV.19 : Résultat obtenu le champ électrique deux matériaux en bicouches : nickel et polyamide

### Remarque :

- La combinaison d'un matériau conducteur (comme l'aluminium ou le nickel) avec un matériau isolant (comme le polyamide) améliorer l'efficacité du blindage électromagnétique (SE) de manière intermédiaire pour plusieurs raisons :

#### 1. Propriétés de conduction des matériaux

Les matériaux conducteurs, tels que l'aluminium et le nickel, sont largement utilisés pour le blindage électromagnétique (EMI) grâce à leurs excellentes propriétés de conduction électrique. Ils peuvent réfléchir et absorber une grande partie des ondes électromagnétiques, en particulier à basse et moyenne fréquence

#### 2. Effet de la conductivité et de la perméabilité sur le blindage

Le polyamide, isolant avec faible perméabilité magnétique et conductivité négligeable, absorbe certaines fréquences électromagnétiques via des pertes diélectriques. Ces pertes résultent de la polarisation dipolaire et de la conduction ionique, dissipant l'énergie en chaleur. Son facteur de perte diélectrique, entre 0,02 et 0,04 à 1 MHz, indique une absorption modérée d'énergie électromagnétique[10]. Lorsqu'il est combiné avec un matériau conducteur comme l'aluminium, l'onde électromagnétique est d'abord partiellement absorbée par le polyamide, puis fortement réfléchi par l'aluminium, optimisant ainsi le blindage électromagnétique à certaines fréquences.

#### IV.12.5 Modélisation EMI d'une enceinte trois couches

Dans cette étude, nous examinons un boîtier avec une paroi composée de trois couches avec deux matériaux conducteur déferant.

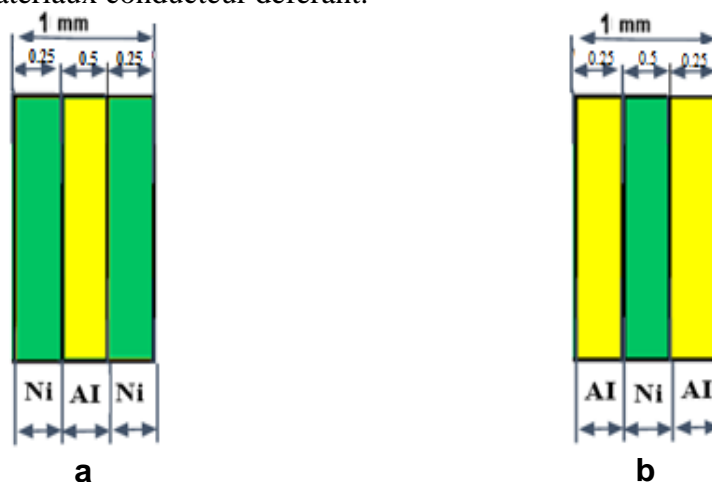


Figure IV.20 : La disposition des matériaux : aluminium et nickel

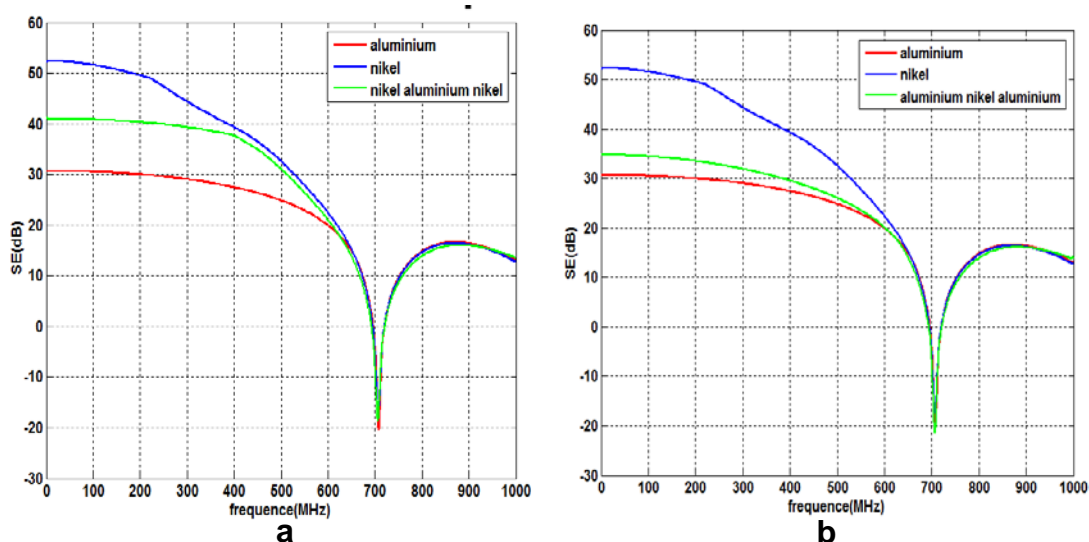


Figure IV.21 : Résultat obtenu le champ électrique avec une paroi multicouches : aluminium et nickel

**Remarque :**

- La combinaison de matériaux montre une performance intermédiaire entre les capacités de blindage du nickel et celles de l'aluminium, offrant ainsi une protection efficace contre les interférences électromagnétiques tout en optimisant les propriétés des deux matériaux.
- L'efficacité du blindage varie en fonction de l'ordre dans lequel les matériaux sont disposés

**IV.12.6 Modélisation EMI d'une enceinte trois couches hybride**

Dans cette étude, nous examinons un boîtier avec une paroi composée de trois couches hybride : un matériau conducteur et l'autre isolant avec un changement de disposition

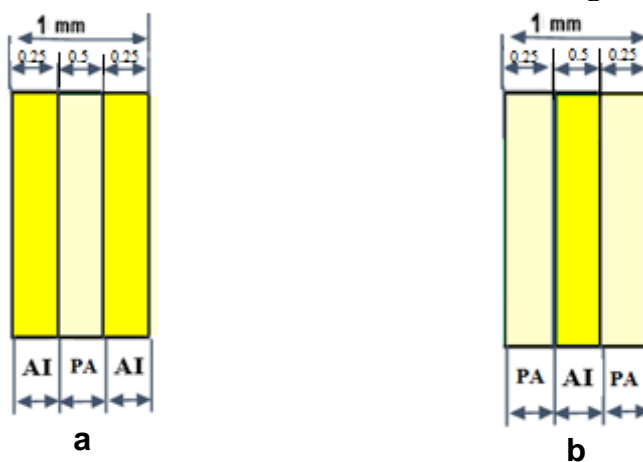


Figure IV.22: La disposition des matériaux avec trois couches : polymade et alumnuime

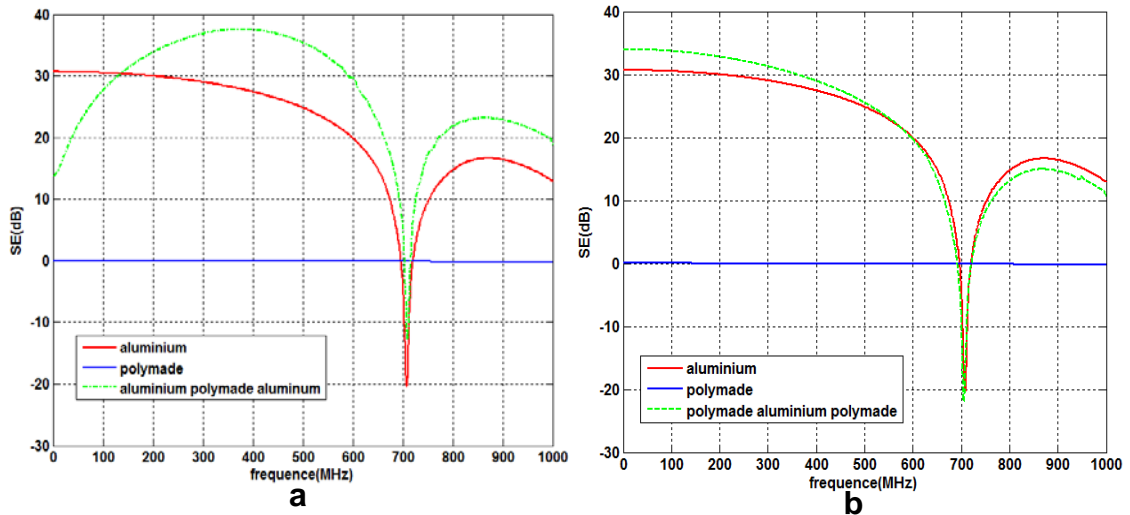


Figure IV.23: Résultat obtenu le champ électrique avec une paroi multicouches:  
polymade et alumnuime

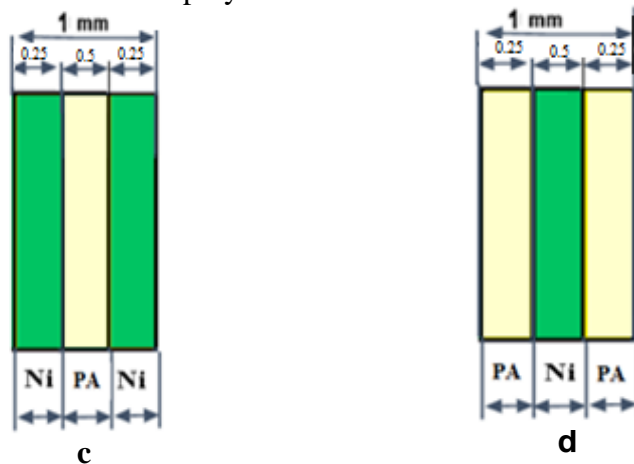


Figure IV.24: La disposition des matériaux avec trois couches :  
polymade et nickel

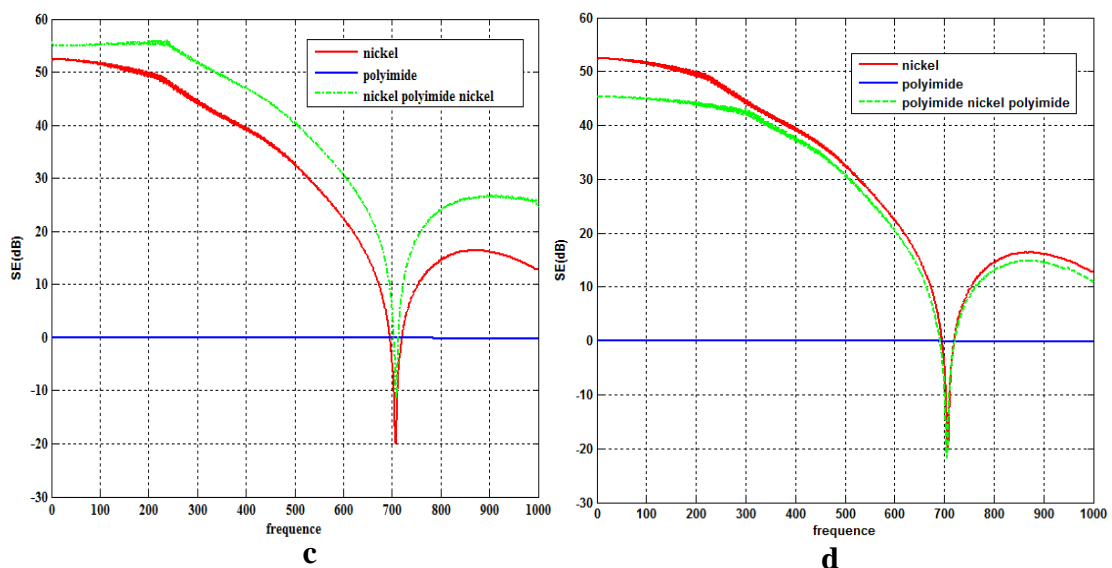


Figure IV.25: Résultat obtenu le champ électrique avec une paroi multicouches:  
polymade et nickel



### Remarque :

- La combinaison des couches de matériaux conducteur et isolant permet d'améliorer légèrement la SE par rapport à l'aluminium seul. Bien que le polymade n'offre pas de protection directe, son inclusion dans la structure multicouche semble stabiliser et légèrement améliorer la performance de l'aluminium, surtout aux basses et moyennes fréquences.

### IV.13 Amélioration de l'efficacité du blindage

D'après les résultats obtenus, plusieurs stratégies peuvent être mises en œuvre pour améliorer l'efficacité du blindage (SE), impliquant des matériaux comme l'aluminium, le nickel, et le polythiophène. Les solutions proposées prennent en compte :

#### ➤ Utilisation de Structures Multicouches Alternées :

En alternant des couches de matériaux ayant des propriétés différentes, comme l'aluminium, le nickel, et des polymères conducteurs comme le polythiophène, on peut maximiser les avantages de chaque matériau. Par exemple, une couche de nickel peut absorber les champs magnétiques tandis qu'une couche d'aluminium peut réfléchir les ondes électromagnétiques.

La courbe intitulée "aluminium nickel stratifiée" montre une performance supérieure à une fréquence plus large par rapport aux couches simples d'aluminium ou de nickel.

#### ➤ Optimisation des Épaisseurs des Couches :

L'ajustement de l'épaisseur de chaque couche peut améliorer l'efficacité du blindage à différentes fréquences. Des couches plus épaisses peuvent absorber plus d'énergie, mais au détriment de la réduction de la profondeur de pénétration des ondes. Trouver un équilibre entre ces facteurs est crucial.

#### ➤ Intégration de Matériaux Avancés :

L'intégration de polymères conducteurs, comme le polythiophène, peut offrir une alternative légère et flexible aux métaux traditionnels, tout en maintenant une bonne efficacité de blindage. Ces matériaux peuvent être exceptionnellement performants lorsqu'ils possèdent une conductivité élevée ou qu'ils sont associés à des métaux dans une structure à plusieurs couches.

#### ➤ Optimisation de la Séquence des Couches :

L'ordre dans lequel les matériaux sont disposés peut grandement affecter l'efficacité du blindage. Par exemple, en plaçant un matériau hautement réfléchissant en première

couche, suivi de matériaux absorbants, on peut créer une barrière plus efficace contre les ondes électromagnétiques

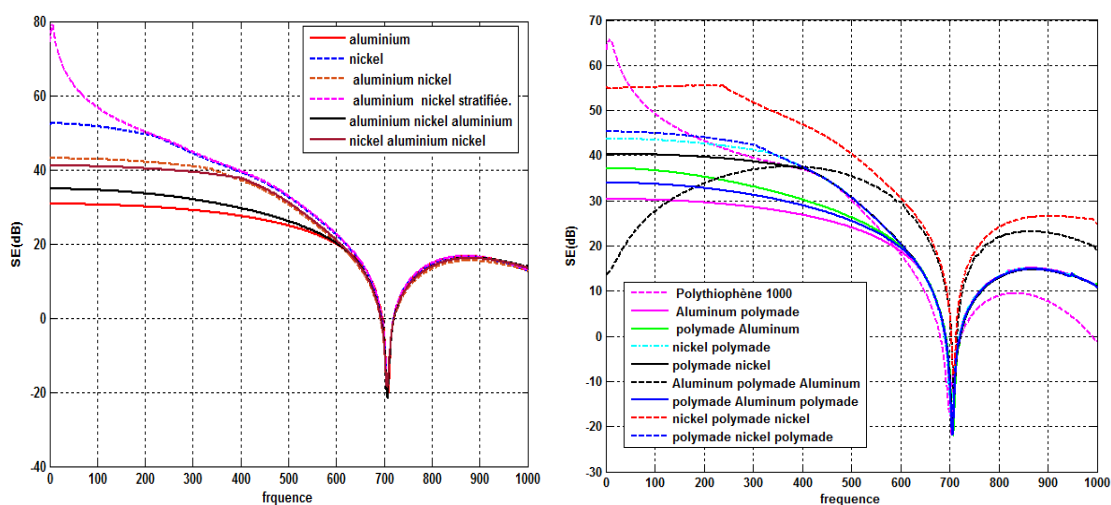


Figure IV.26 : Comparaison les résultats obtenus

### IV.14 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre d'application, nous avons introduit le logiciel CST Microwave Studio, utilisé pour simuler des phénomènes électromagnétiques complexes. Ensuite, nous avons présenté plusieurs applications permettant d'évaluer l'efficacité de blindage des boîtiers métalliques contre les interférences électromagnétiques (EMC).

Efin on a consacré la dernière partie à des études paramétriques approfondies, examinant l'influence des caractéristiques des matériaux, qu'ils soient ordinaires ou composites, et leur agencement en couches. L'accent a été mis sur différents matériaux et dispositions de couches pour la paroi d'enceinte de protection contre les EMC, afin de déterminer la configuration optimale pour un blindage efficace.

### Bibliographie

- [1] Kihal, M. C., Azizi, H., Rezzak, D., Chebout, M., & Moulai, H. Electromagnetic fields using equivalent. In Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications–Volume 2: ICEECA 2022, 15–17 November, Khenchela, Algeria (p. 163). Springer Nature.7
- [2] Nassima, Belgacem. *Conception Des Antennes Pifa Mono-Bande Et Multi-Bandes GSM, DCS, PCS, UMTS Et WIFI*. Thèse de master en réseaux mobile et service. Université de Tlemcen.2013
- [3] Y, Fegas. N, Faour. *Etude De L'efficacité De Blindage D'une Enceinte Métallique Munie D'ouverture Centrée*. Thèse de master en Electrotechnique Industrielle.2019
- [4] Amira, Belkadi. Nihed, Chabane. *Etude et conception des réseaux d'antennes planaires pour les communications mobiles de la cinquième génération*. Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen.2022
- [5] Sunay,Güler.Sibel,Yenikaya. « Analysis of shielding effectiveness by optimizing aperture dimensions ». *Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences [en ligne]*. 2021, vol.29, n°2, Article 34. Disponible sur : < <https://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/vol29/iss2/34/>>. (Consulté le 13/05/2024.)
- [6] Azizi, H., Kihal, M. C., Moulai, H., & Moussaoui, D. *Etude De L'interaction Entre Une Onde Electromagnétique Externe Et Les Ouvertures D'une Enceinte Métallique*
- [7] P, Poulichet. Chapitre 2 : Efficacité De Blindage Des Feuilles Métalliques. [En ligne]. Paris : ESIEE, Cours, 2004 ,26p, Disponible sur : < [https://perso.esiee.fr/~poulichp/CEM/Blindage électromagnétique/chapitre2.PDF](https://perso.esiee.fr/~poulichp/CEM/Blindage%20électromagnétique/chapitre2.PDF) > (Consulté le 19/05/2024)

[8] **Abdelghafour, Boutar** . *Contribution Au Développement De Modèles Circuits Pour L'étude De Couplages Electromagnétiques A L'intérieur D'enceintes Métalliques*. Thèse de master en Électronique des Hautes Fréquences, Photoniques et Systèmes. Université De Limoges. 2014.

[9] **S. Celozzi, R. Araneo, G. Lovat**, "Electromagnetic Shielding", A John Wiley & Sons, Inc Hoboken, New Jersey, Canada, 2008

[10] **Blythe, A. R., Bloor, D.** Electrical Properties Of Polymers. Cambridge University Press. 2005

## **Conclusion générale**

## Conclusion Générale

---

### Conclusion Générale

Dans cette mémoire, nous avons exploré en profondeur l'efficacité de blindage des matériaux composites utilisés en électronique de puissance, élargissant les travaux de recherche en blindage électromagnétique (CEM) menés au sein du département d'électrotechnique spécialisé en électrotechnique industrielle. Le travail s'articule autour de quatre chapitres principaux, chacun abordant une facette essentielle du CEM, de l'analyse des matériaux composites à l'application de stratégies de blindage efficaces.

Pour étudier et analyser les phénomènes électromagnétiques, l'utilisation d'outils de simulation s'est avérée essentielle dans toutes les procédures de conception. Ces outils permettent de traiter l'ensemble des problématiques de compatibilité électromagnétique, du niveau des composants à celui des systèmes. En effet, les industriels ont besoin de simuler le comportement électromagnétique des dispositifs afin d'étudier les couplages électromagnétiques et la susceptibilité des systèmes. Ce projet de recherche représente une contribution importante à ce domaine au sein de notre université, renforçant ainsi notre expertise en CEM

Ce travail de mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude du blindage des matériaux composites utilisés en électronique de puissance. Il a permis de surmonter plusieurs défis liés à la modélisation de l'interaction entre une onde électromagnétique et ces matériaux composites.

Dans le premier chapitre de cette mémoire, nous avons introduit les concepts fondamentaux du blindage en compatibilité électromagnétique (CEM), abordant diverses méthodes et stratégies de blindage. Nous avons commencé par situer le blindage électromagnétique comme la solution la plus couramment utilisée pour atténuer et exclure les émissions rayonnées. Ce chapitre a exploré divers types de blindage, tels que le blindage magnétique, électrostatique, composite et parfait, en détaillant leurs applications spécifiques ainsi que les principes sous-jacent

Le Chapitre II : État de l'art sur les méthodes d'évaluation de l'efficacité de blindage est consacré à l'étude des méthodes théoriques et expérimentales permettant d'évaluer l'efficacité des blindages. Nous y avons présenté les paramètres influençant cette

## Conclusion Générale

---

efficacité, notamment les matériaux de blindage, les critères de choix, ainsi que l'impact des ouvertures et des discontinuités. Ce chapitre explore également les différentes méthodes de simulation, comme les méthodes numériques (FIT, TLM) et analytiques, ainsi que les méthodes expérimentales en champ ouvert, boîtes blindées, et chambres anéchoïques.

Dans le Chapitre III : Évaluation de l'efficacité de blindage dans le domaine temporel, nous avons étudié les représentations des signaux dans le domaine temporel, en comparant avec le domaine fréquentiel. Nous avons également abordé les bases de l'électromagnétisme à travers les équations de Maxwell, et décrit diverses méthodes numériques pour les résoudre dans le domaine temporel, telles que la méthode des différences finies (FDTD), la méthode des intégrales finies (FITD), et la méthode des lignes de transmission (TLM).

Alors que le quatrième chapitre s'intéresse à l'utilisation du logiciel de simulation CST Microwave Studio pour valider les résultats d'efficacité de blindage. Ce chapitre présente une étude paramétrique pour analyser l'effet de plusieurs facteurs sur l'efficacité de blindage. Nous y abordons les différentes configurations de blindage, telles que les enceintes monocouche et multicouche, en étudiant l'impact des matériaux conducteurs et isolants sur l'efficacité du blindage. Ce chapitre se conclut par la modélisation EMI d'enceintes à une paroi bicouches et multicouches, avec des recommandations pour améliorer l'efficacité du blindage.

Les perspectives de ce travail incluent :

- Conduire des tests avec des composites polymères conducteurs, en mettant l'accent sur des configurations avec des interfaces multiples, afin d'analyser l'efficacité de blindage dans des conditions variées.
- Effectuer des mesures dans une chambre blindée pour valider expérimentalement les modèles théoriques et numériques développés, garantissant ainsi la précision et la fiabilité des résultats.
- Aborder la résolution d'un problème de compatibilité électromagnétique (CEM) réciproque, où un dispositif d'électronique de puissance, placé à l'intérieur d'un boîtier, génère un champ électromagnétique qui se propage vers l'extérieur à

## Conclusion Générale

---

travers une ouverture. Ce scénario, fréquemment rencontré en pratique, permettra d'évaluer l'impact électromagnétique d'un système sur son environnement immédiat, offrant ainsi des perspectives d'amélioration pour le blindage CEM.

Cette structure en points permet de mieux mettre en valeur les différents aspects de la recherche future et les objectifs à atteindre.



## **Annexes**

# Annexes

## Annexe A

### A. les étapes de concevoir Evaluation de l'efficacité de blindage

#### A.1 Création d'un nouveau projet

- ❖ D'abord on va cliquer sur l'icône du logiciel CST sur le bureau, on obtient la fenêtre représentée dans (la figure A.1) et on clique sur la cellule New and Recent et une autre clique sur New Template

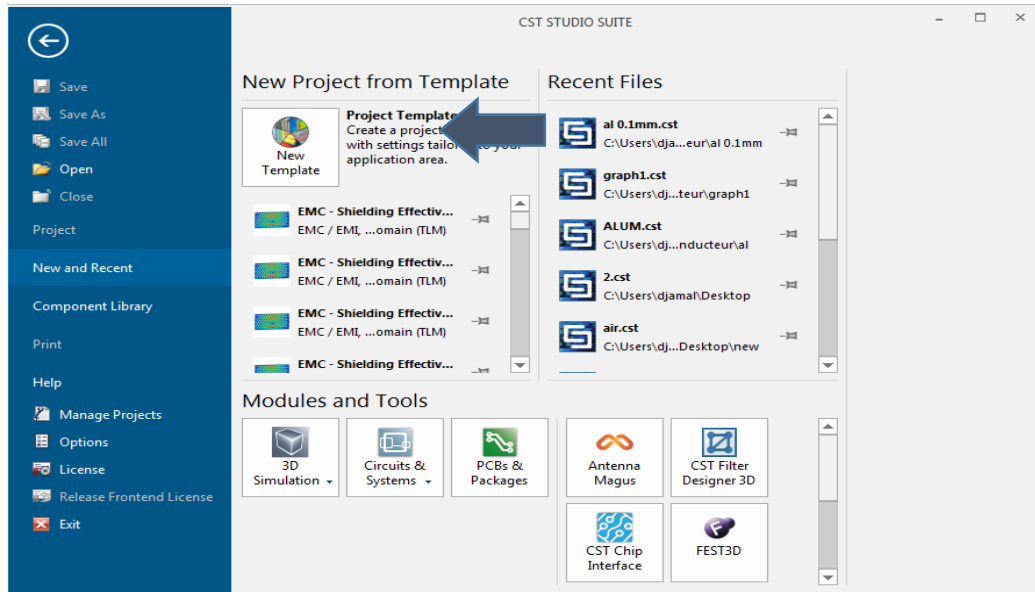


Figure A.1 : ouverture du nouveau projet.

- ❖ On obtient la fenêtre suivante qui affiche des choix multiples pour la simulation (la figure A.2) et on choisit EMC/EMI & Optical ensuite Antennes et on clique sur Next :

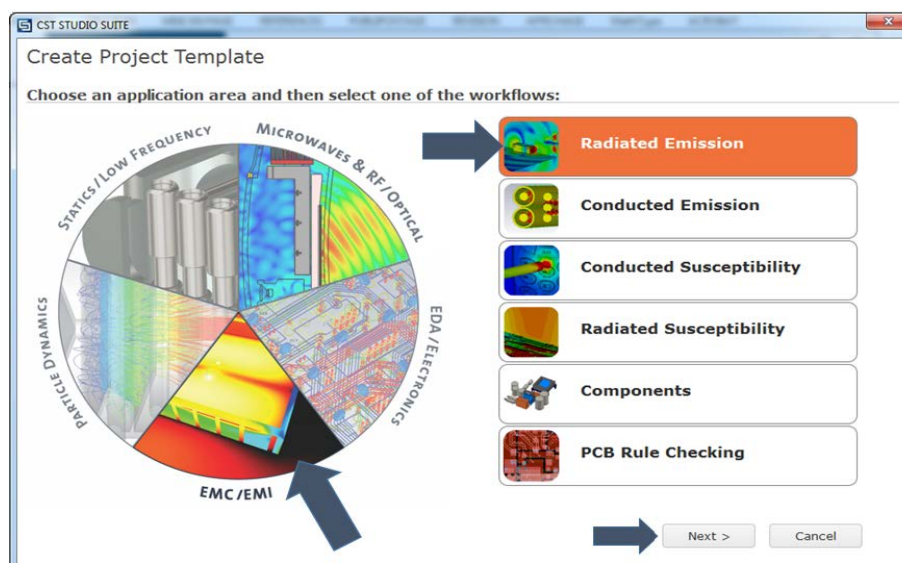
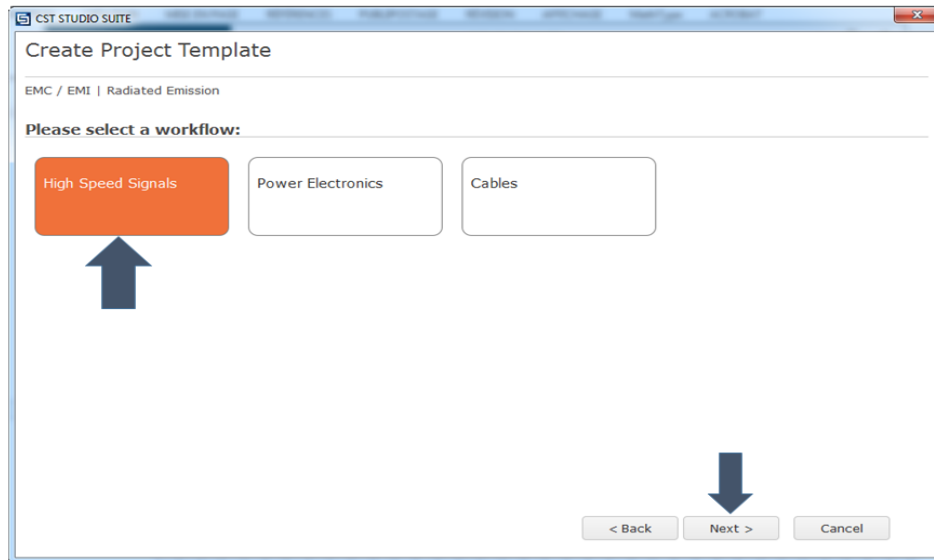


Figure A.2 : ouverture du nouveau projet suite.

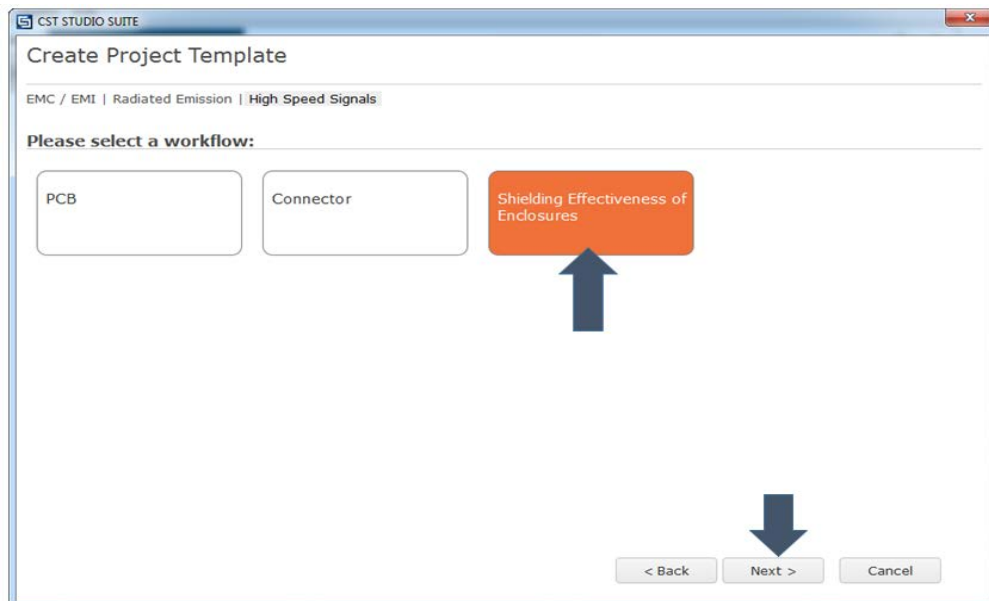
## Annexes

Ensuite on clique sur High Speed Signals dans la fenêtre suivante (la figure A.3).



**Figure A.3** : ouverture du nouveau projet suite (High Speed Signals).

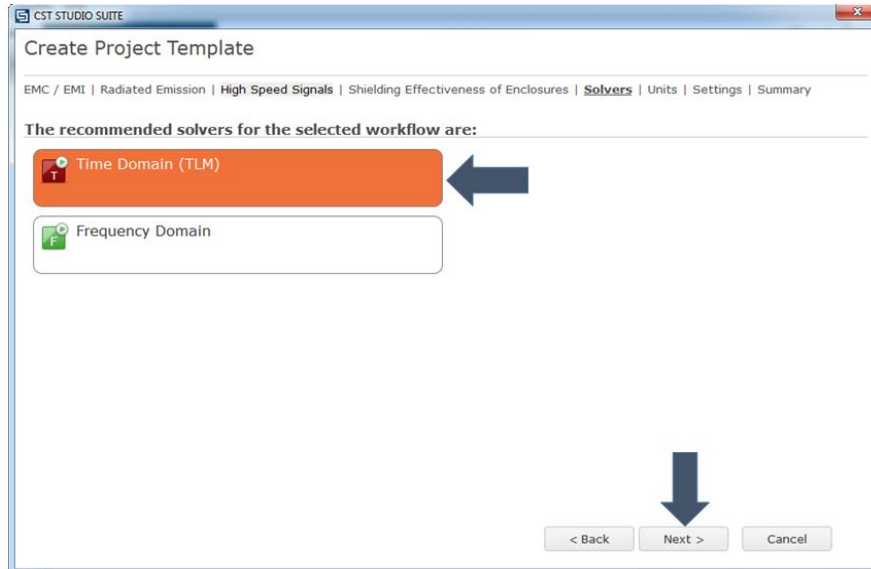
- ❖ Ensuite on clique sur Shielding Effectiveness of Enclosures dans la fenêtre suivante (la figure A.4).



**Figure A.4** : ouverture du nouveau projet suite (Shielding Effectiveness of Enclosures)

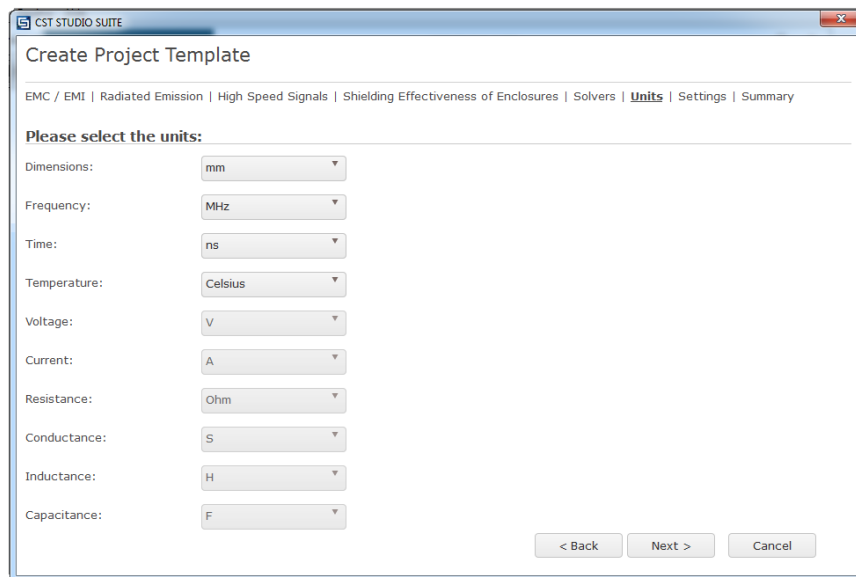
- ❖ On choisit ensuite Time domain comme suivant (la figure A.5) :

## Annexes



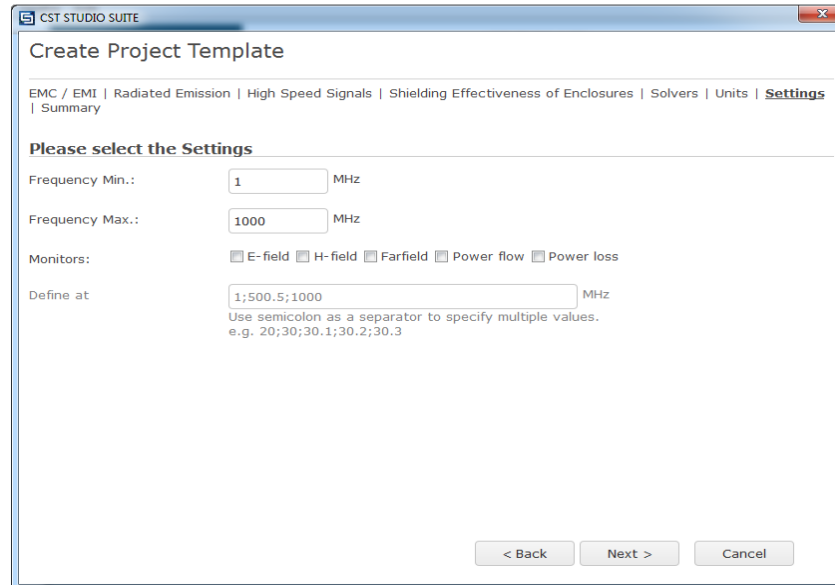
**Figure A.5** : ouverture du nouveau projet suite (domaine d'étude).

Maintenant on peut choisir les unités dans la fenêtre Units (la figure A.6) comme suivant :

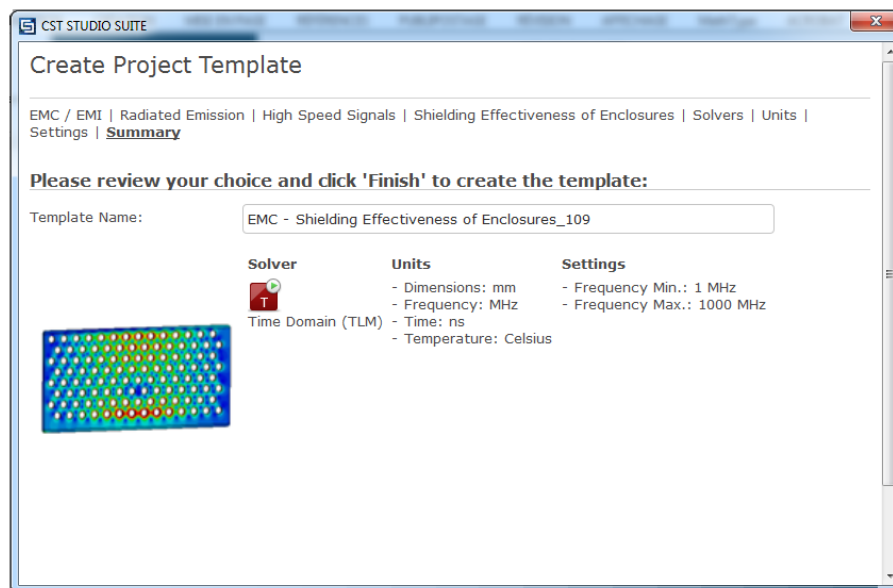


**Figure A.6** : ouverture du nouveau projet suite (choix des unités).

On va aussi limiter la bande de fréquence qu'on doit étudier les performances de notre blindage (la figure A.7) :



**Figure A.7 :** ouverture du nouveau projet suite (bande de fréquence d'étude).  
Maintenant tous les paramètres sont bien réglés (la figure A.8), et on est prêt pour commencer la conception :



**Figure A.8 :** ouverture du nouveau projet suite.

## A.2 Conception de blindage d'une enceinte

Après qu'on termine le réglage des paramètres, on aura la fenêtre de travail suivante (la figure A.9) sur laquelle on va faire conception et simulation.

# Annexes

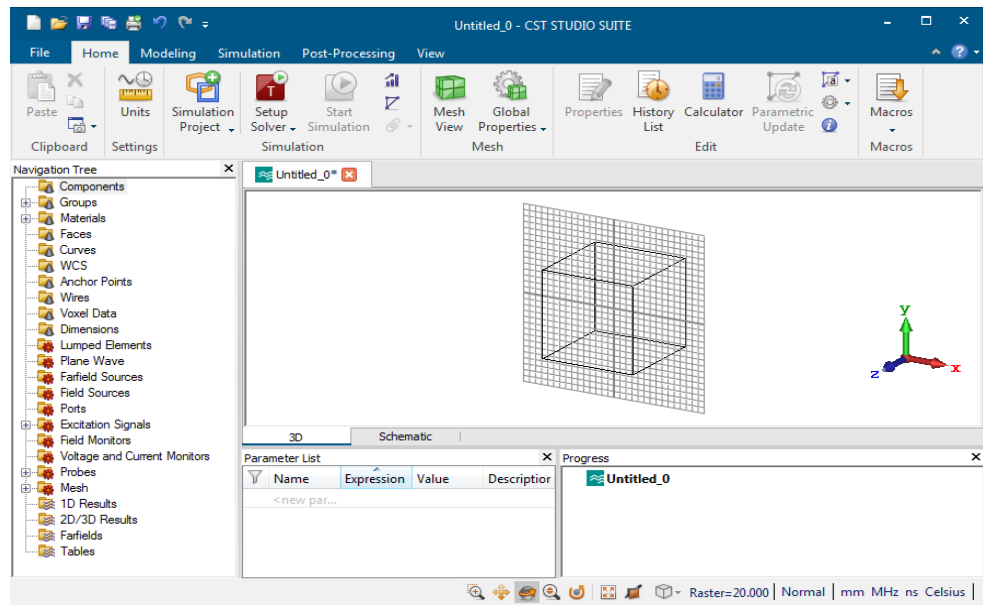


Figure A.9 : fenêtre de travail du logiciel CST

## ❖ Dimensionnement du plan de masse

On utilise le cube pour tracer les dimensions des composants de notre blindage d'une enceinte en suite on fait entré les longueurs nécessaires pour les dimensionner et les positionner. Dans la petite fenêtre nous pouvons choisir le type de matériel utilisé dans la bibliothèque du logiciel,

Après qu'on remplit tous les longueurs et type de matériaux on clique sur ok figure A.10).

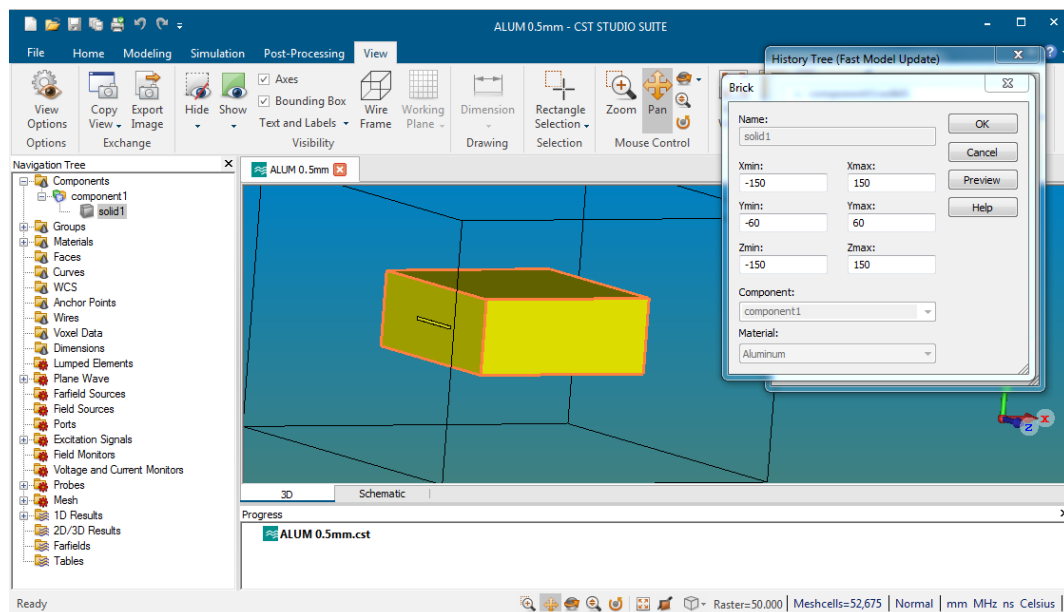


Figure A.10 : fenêtre des Commandes pour dessiner la géométrie

## ❖ Commandes pour mettre le probe (point d'observation) :

## Annexes

Nous plaçons le point d'observation des champs électriques et magnétiques au centre de l'enceinte.

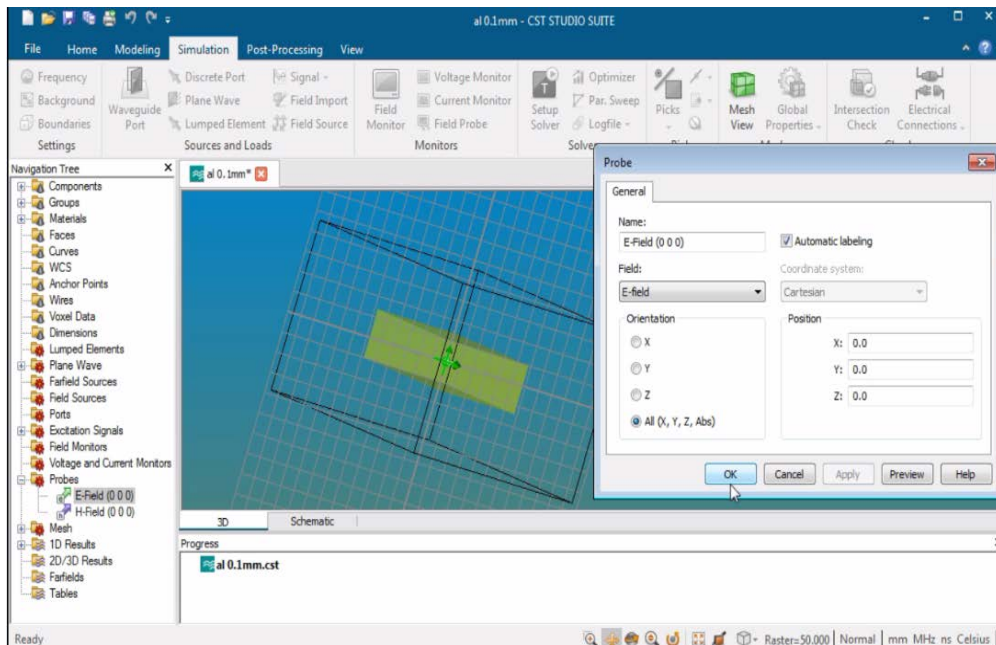


Figure A.11.a : Probe (point d'observation) pour le champ électrique

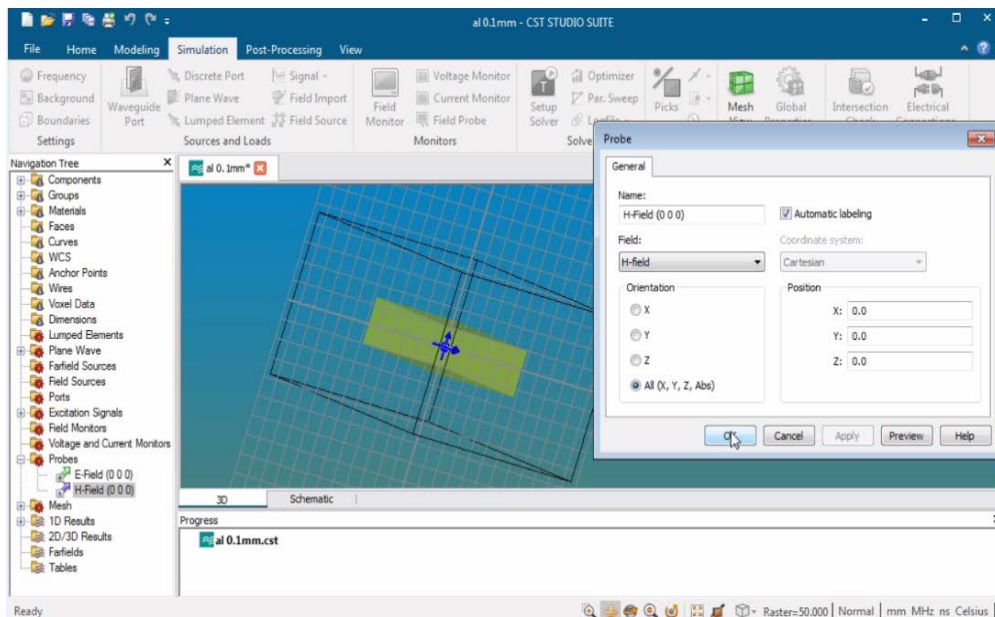


Figure A.11.b : Probe (point d'observation) pour le champ magnétique

### ❖ Les conditions aux limites

À partir du menu «SOLVE» ; on configure les conditions aux bornes ( la Figure A. 12 ), ces derniers permettent de spécifier si le modèle est soumis à un champ électrique ou magnétique

# Annexes

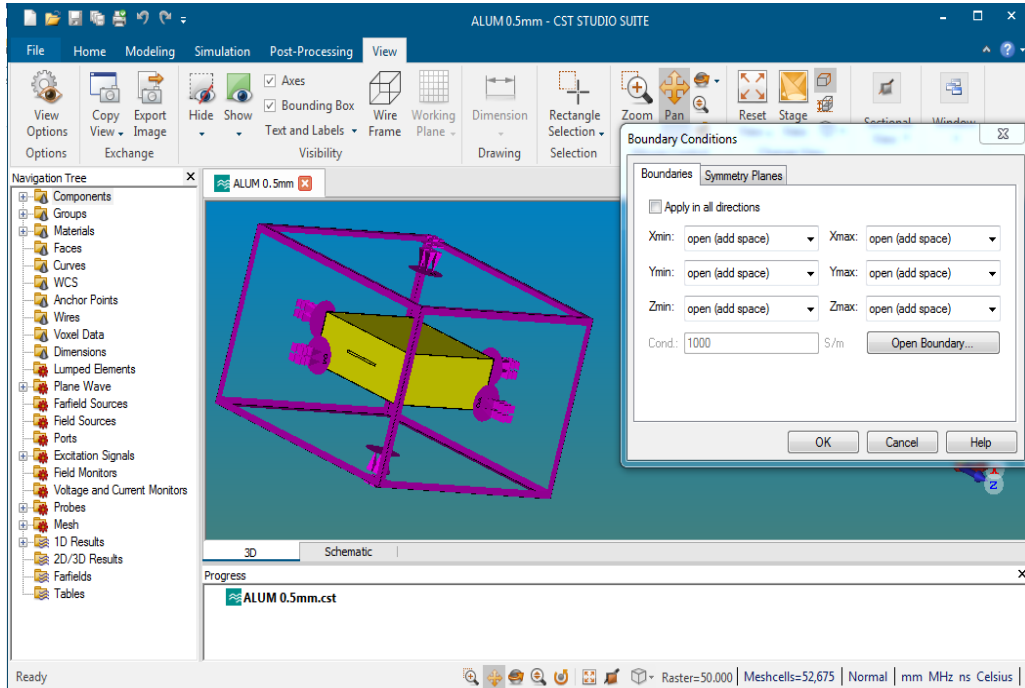


Figure A. 12 : Dialogue de configuration des conditions aux bornes

## ❖ Commandes pour les caractéristiques d'onde plane :

Définir l'onde plane (la figure A. 13), spécifier la direction de propagation, la polarisation, et la phase de l'onde.

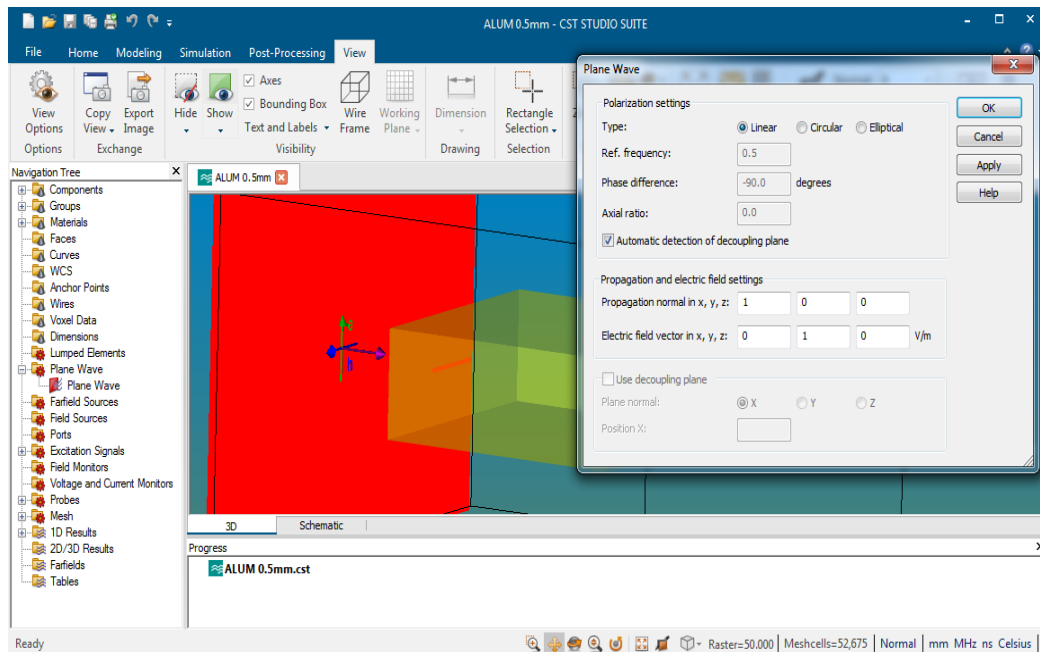


Figure A. 13 : Commandes pour les caractéristiques d'onde plane

## ❖ Choix de Domaine d'étude

On a choisir le solver **Time domain solver**



# Annexes

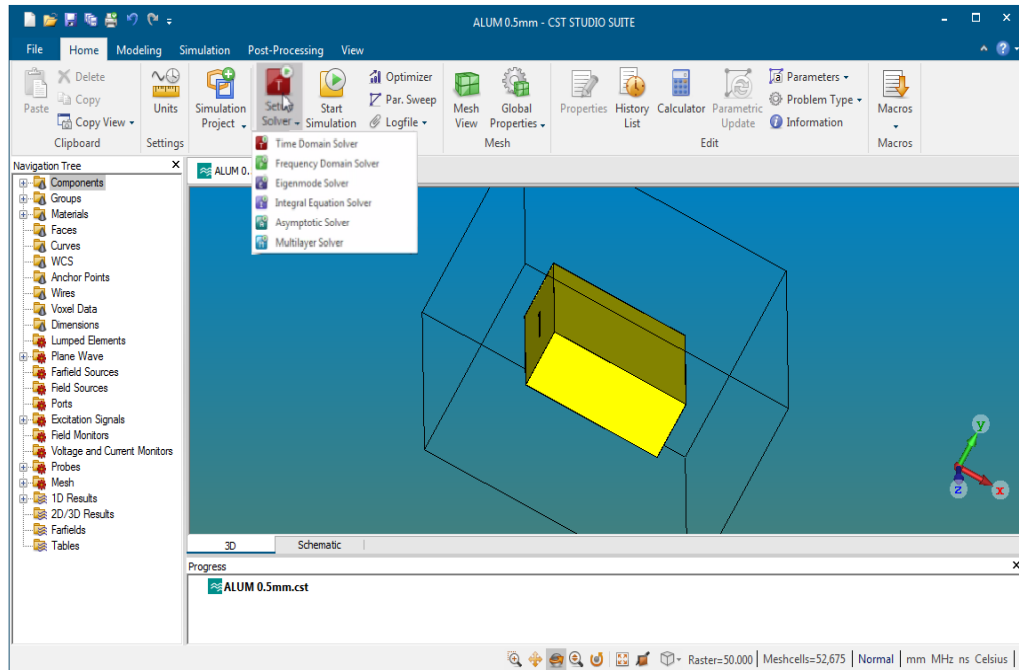


Figure A. 14 : Choix De Domaine D'étude

## ❖ Configuration du Maillage

Vérification la qualité du maillage

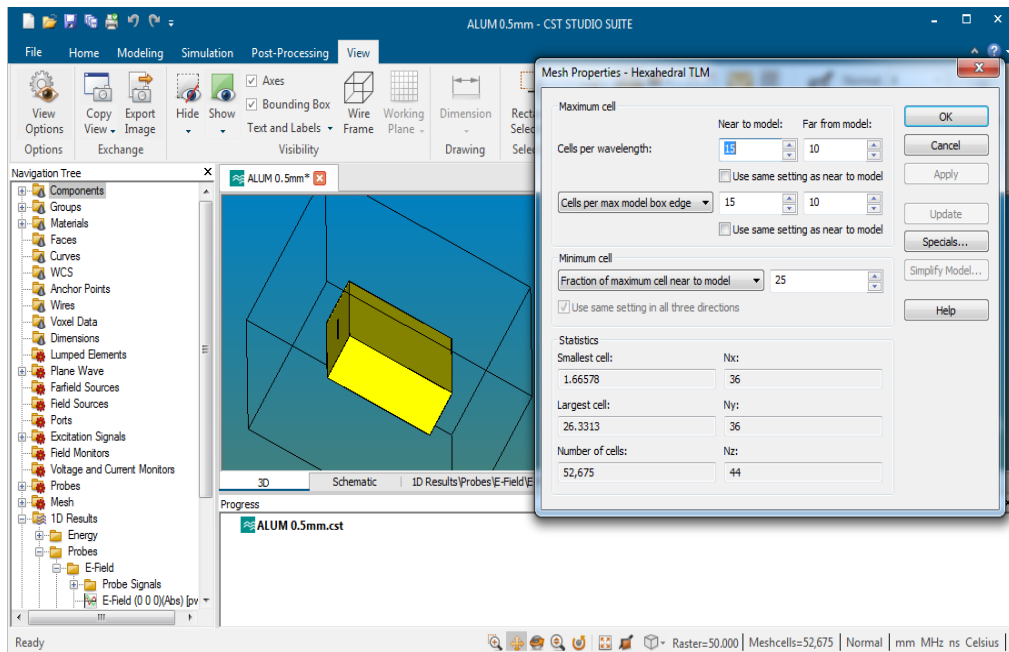


Figure A. 15 : Propriétés du maillage - TLM hexaédrique

## ❖ Paramètres du solveur de domaine temporel

Démarrer Une Simulation Dans CST Studio Suite

# Annexes

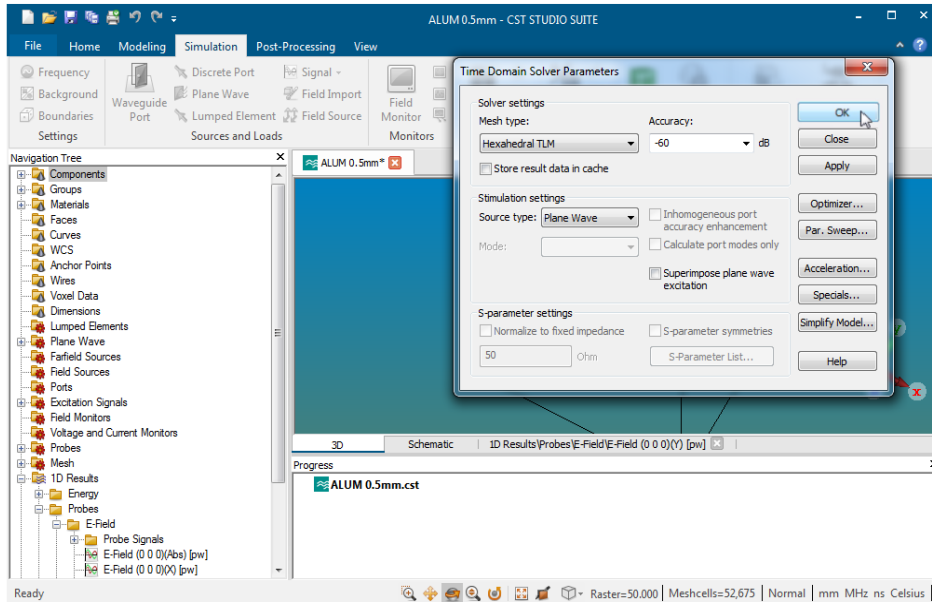


Figure A. 16 : Paramètres du solveur de domaine temporel

## A.3 Les résultats numériques

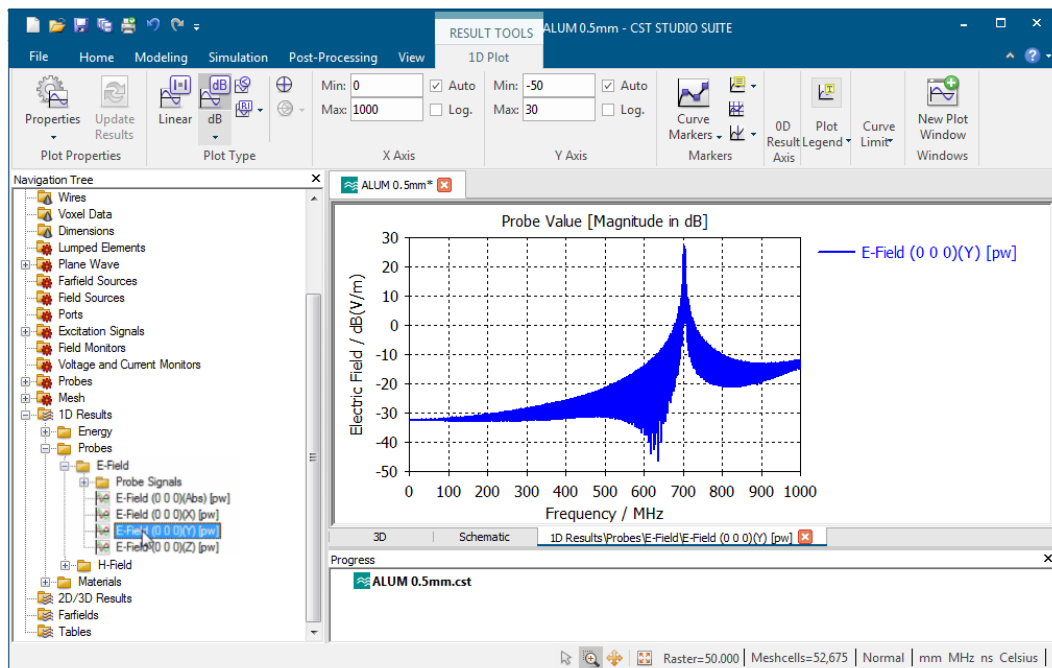


Figure A. 17 : Les Valeurs de la sonde Champ électrique/dB (V/m)

### ❖ Exporter les données de simulation

Exporter les résultats, sauvegarde et le choisissez le format **.txt**

## Annexes

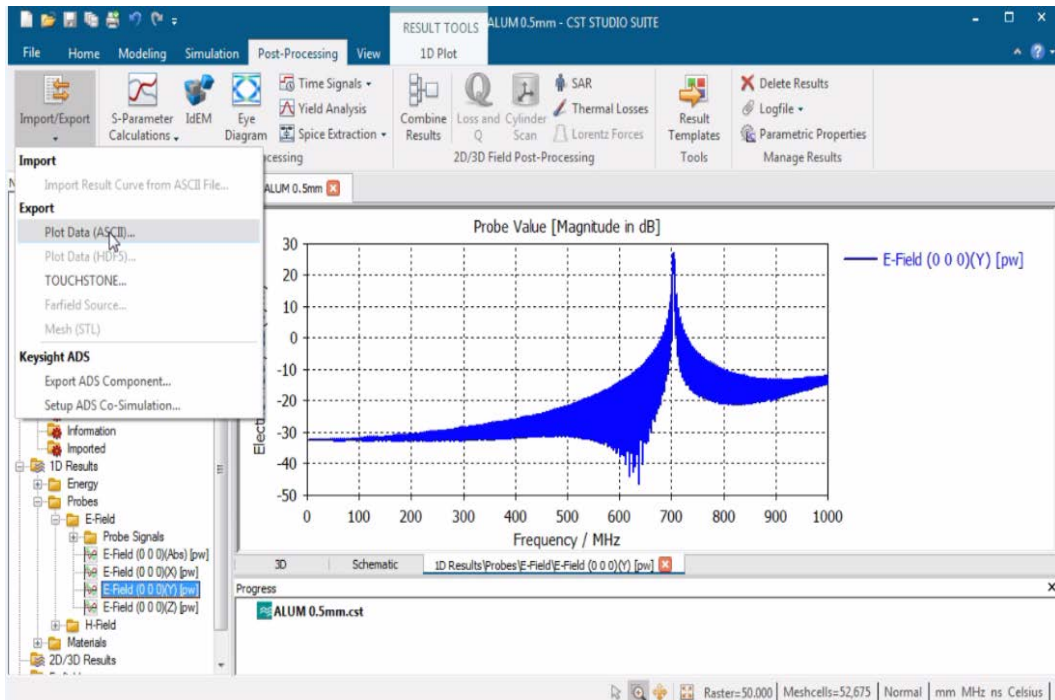


Figure A. 18 : Exporter les données de simulation

### ❖ Calcul de l'efficacité de blindage SE

Calcul de l'efficacité de blindage SE à l'aide de logiciel MATLAB

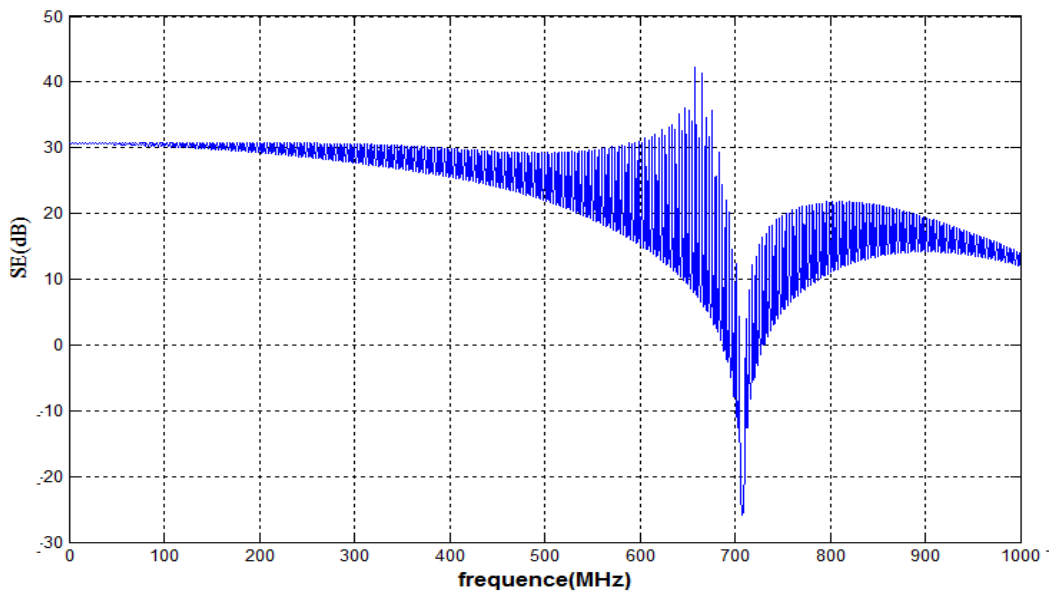


Figure A. 19 : Efficacité De Blindage SE

❖ à l'aide de filtre du Toolbox MATLAB « CFTOOL » pour d'obtenir des résultats de bonnes qualités.

# Annexes

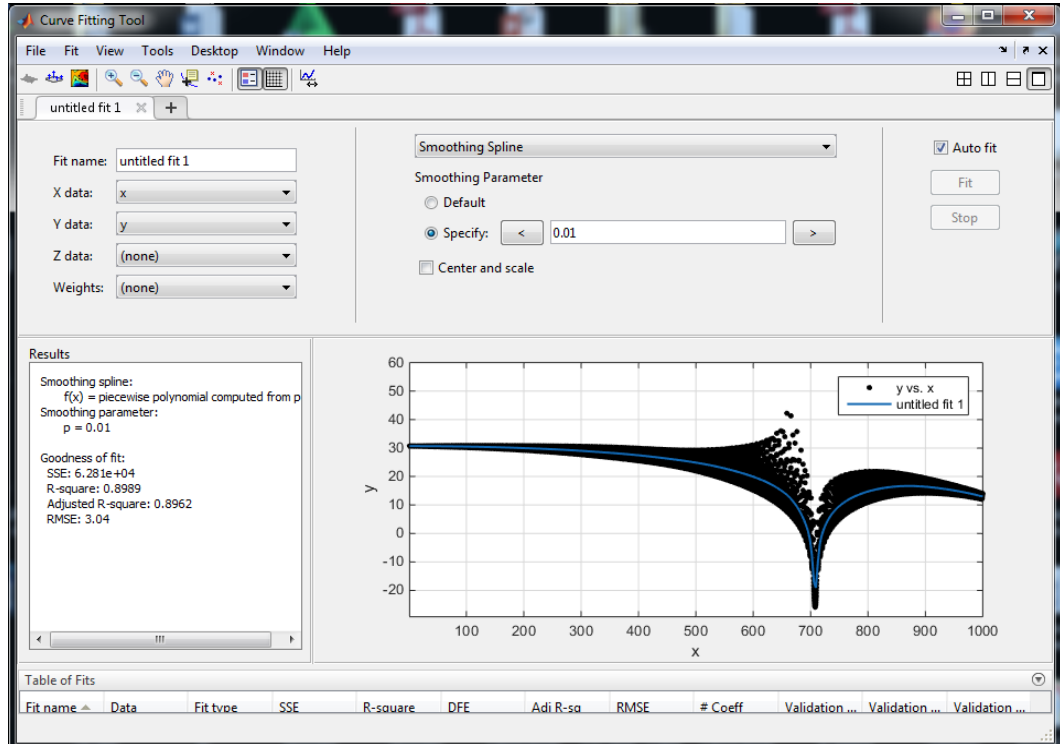


Figure A. 20: Filtre du Toolbox MATLAB

## ❖ Résultat après la filtration

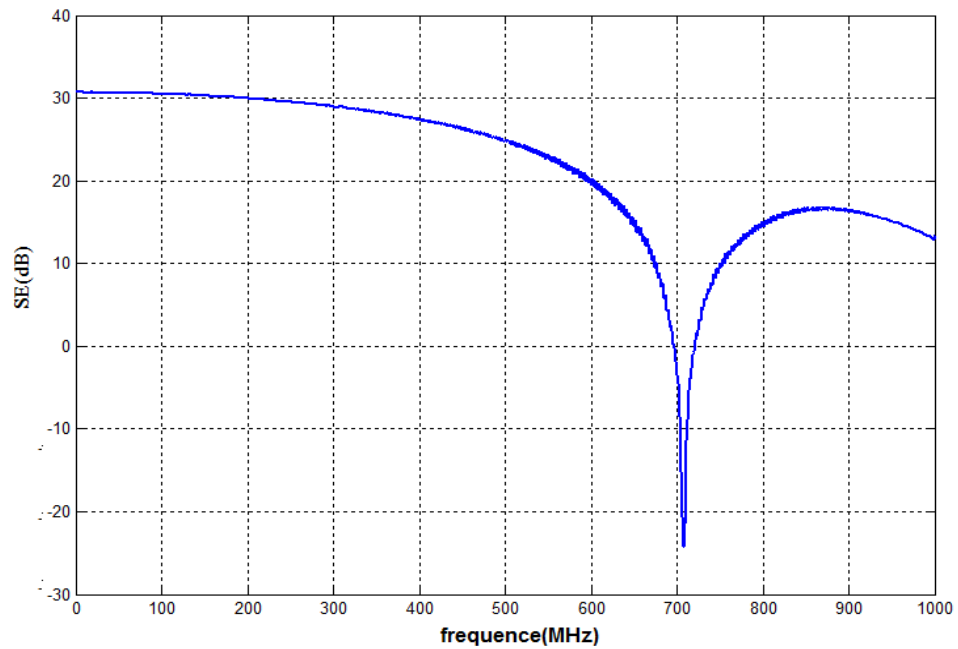


Figure A. 21 : Efficacité De Blindage SE (après le filtrage)