



HAL
open science

Technique de caractérisation de textiles nouvelle génération pour le blindage électromagnétique

Jalal Alaa Eddine

► **To cite this version:**

Jalal Alaa Eddine. Technique de caractérisation de textiles nouvelle génération pour le blindage électromagnétique. Optique / photonique. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2020. Français. NNT : 2020GRALT064 . tel-03185139

HAL Id: tel-03185139

<https://theses.hal.science/tel-03185139>

Submitted on 30 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Optique et Radiofréquences**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Jalal ALAA EDDINE

Thèse dirigée par **Fabien NDAGIJIMANA**, Professeur, G2ELab – Université Grenoble Alpes, et codirigée par **Emmanuel PISTONO**, Maître de conférences, RFIC-Lab – Université Grenoble Alpes

Préparée au sein du **Laboratoire G2ELab**

Dans l'École Doctorale **EEATS**

Techniques de caractérisation de textiles nouvelle génération pour le blindage électromagnétique

Thèse soutenue publiquement le **03 Décembre 2020**,

Devant le jury composé de :

M. Jean-Luc SCHANEN

Professeur, G2ELab – Université Grenoble Alpes, Président

M. Moncef KADI

Enseignant Chercheur HDR, IRSEEM – Esigélec Rouen, Rapporteur

Mme. Valérie MADGRANGEAS

Professeur, Xlim – Université de Limoges, Rapporteuse

M. Christian VOLLAIRE

Professeur, Ampère – Ecole centrale de Lyon, Examineur

M. Charles Jullien

Docteur, Ingénieur CEM, Safran Electrical & Power – Toulouse, Examineur

M. Fabien NDAGIJIMANA

Professeur, G2ELab – Université Grenoble Alpes, Directeur de thèse

M. Emmanuel PISTONO

Maître de conférences, RFIC-Lab – Université Grenoble Alpes, co-directeur de thèse



Remerciements

Cette thèse est effectuée au sein du laboratoire G2ELab – université Grenoble Alpes et dans la plateforme Phéline-CSTB Grenoble, un laboratoire de test spécialisé dans l'étude des champs électromagnétiques et leurs interactions avec l'environnement.

La rédaction de cette thèse a été possible grâce aux plusieurs personnes à qui je voudrais adresser mes sincères remerciements.

Tout d'abord, je tiens à remercier M. Fabien NDAGIJIMANA directeur thèse et M. Emmanuel PISTONO, co-directeur de thèse, de m'avoir encadré, orientés, aidés et conseillés.

Je remercie également, le président et les membres du Jury, d'avoir accepté de juger ma thèse et de l'intérêt qui ont donné à mon travail.

Aussi je voudrais remercier l'équipe du G2ELab, et l'équipe du CSTB et l'équipe de Nexio - Grenoble pour leurs forts soutiens et encouragements durant mes trois années de travail.

Également, je remercie tous mes enseignants et professeurs pendant toutes les phases de ma vie académique et aussi tous mes collègues au Liban et à Grenoble et les membres de ma famille pour leurs soutiens

Enfin, je ne sais pas si un mot suffit pour dire merci à mes parents, ma mère, mon père, ils sont mes premiers enseignants et le modèle de rôle pour moi dans ma vie, et aussi pour mes sœurs et mon frère pour leurs conseils, soutiens, supports et toutes les belles choses que nous avons passé et que nous passerons ensemble.

Grenoble, Décembre 2020

Jalal ALAA EDDINE

Résumé

Le blindage électromagnétique consiste à réduire le champ électromagnétique au voisinage d'un objet en interposant une barrière entre la source du champ et l'objet à protéger. L'objectif de la thèse est le développement de techniques de caractérisation et prédiction de performances de blindage nouvelle génération à base de textiles et polymères pour des applications avioniques entre le DC et 1 GHz. Elle se déroule dans le cadre du projet FUI NextGen qui s'inscrit dans le domaine de la protection de câblage aéronautique.

La thèse est composée de deux grandes parties : 1) la caractérisation de l'efficacité de blindage à partir des tests sur des échantillons plans (matériau plein ou tresse métallique), 2) la mesure d'impédance de transfert pour des gaines.

Dans la littérature, la mesure de l'efficacité de blindage (SE en anglais pour shielding efficiency) est généralement obtenue soit en espace libre soit dans une chambre réverbérante ou anéchoïque. Dans ces méthodes, le matériau sous test est placé entre deux antennes, la valeur de l'efficacité de blindage mesurée dépend alors de la bande d'opération des antennes (> à quelques MHz) ne permettant pas d'atteindre des fréquences basses de quelques kHz. L'efficacité de blindage est obtenue en mesurant l'atténuation du champ électromagnétique à travers un matériau par rapport à la transmission du champ sans matériau. Dans notre cas, la mesure d'efficacité de blindage est réalisée à l'aide d'une cellule coaxiale en prenant en compte les paramètres affectant la mesure comme le contact électrique, la dynamique de mesure... Dans cette cellule, l'efficacité de blindage peut être mesurée à partir du DC, ce qui est en accord avec la demande du domaine aéronautique. Ces mesures sont vérifiées à l'aide de modélisations théoriques et de simulations électromagnétiques

Concernant la mesure d'impédance de transfert Z_t des gaines, elle est réalisée avec une cellule triaxiale. L'impédance de transfert est alors définie comme le quotient de la tension V_1 induite

au circuit intérieur par le courant I_2 introduit dans le circuit externe sur une longueur de couplage donnée. La norme actuelle de la mesure de l'impédance de transfert est définie jusqu'au 100 MHz. Dans la cellule développée dans le cadre de cette thèse, la mesure atteint la fréquence de 500 MHz avec adaptation.

Enfin pour faire le lien entre l'efficacité de blindage et l'impédance de transfert, un modèle de prédiction de l'impédance de transfert à partir de la mesure de l'efficacité de blindage est proposé.

Abstract

Electromagnetic shielding consists in reducing the electromagnetic field in the vicinity of an object by interposing a barrier between the source of the EM field and the object to be protected. The objective of the thesis is the development of techniques for characterizing and predicting new generation shielding performance based on metallic textiles and polymers for avionics applications between DC and 1 GHz. It takes place within the framework of the FUI NextGen project which is part of the field of aeronautical wiring protection. The thesis is composed of two main parts: 1) the characterization of the shielding efficiency from tests on plane samples (solid material or metal braid), 2) the transfer impedance measurement for sheaths.

In the literature, the measurement of shielding efficiency (SE) is generally obtained either in free space or in a reverberating or anechoic chamber. In these methods, the material under test is placed between two antennas. The value of the measured shielding efficiency depends on the operating band of the antennas which starts at a few MHz and cannot reach low frequencies in the band of a few kHz. Shielding efficiency is obtained by measuring the attenuation of the electromagnetic field through a material relative to the transmission of the field without material. Herein, the shielding efficiency measurement is made by a coaxial cell, considering all the parameters that affect the measurement such as electrical contact, measurement dynamics, etc., allowing measuring the effectiveness of shielding from DC to 1 GHz and this suits the requirements of the aeronautical field. These measurements are validated with theoretical modeling and electromagnetic simulations.

Concerning the sheath transfer impedance, its measurement is carried out with a triaxial cell. The transfer impedance (Z_t) is defined as the quotient of the voltage (V_1) induced in the internal circuit by the current (I_2) introduced into the external circuit over a given coupling length. The

current standard of transfer impedance measurement is defined up to 100 MHz while in our developed cell the measurement reaches the frequency of 300 MHz without adaptation.

Finally, to make the link between shielding efficiency and transfer impedance, a model for predicting the transfer impedance from the measurement of the shielding efficiency is proposed.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iv
Chapitre 1 Introduction et état de l'art	1
1.1 Introduction	1
1.1.1 Champs électromagnétiques.....	1
1.1.2 Blindage électromagnétique	2
1.1.3 Projet NextGen.....	4
1.1.4 Description du travail de la thèse.....	6
1.2 Efficacité de blindage	6
1.2.1 IEEE_STD-299	7
1.2.2 MIL-STD-285 vs MIL-STD-1377	8
1.2.3 Mesure dans l'espace libre.....	11
1.2.4 Mesure en chambre anéchoïque	12
1.2.5 Mesure avec guide d'onde	15
1.2.6 Mesure en cellule TEM.....	16
1.2.7 Norme ASTM 4935	19
1.2.8 Conclusion sur les méthodes d'efficacité de blindage	21
1.3 Impédance de transfert	21
1.3.1 Méthode triaxiale	22
1.3.2 Méthode BCI.....	23
1.4 Conclusion	24
Chapitre 1 : Bibliographie	25
Chapitre 2 Efficacité de blindage	27
2.1 Introduction	27
2.2 Exigence du projet NextGen	28
2.3 Cellule coaxiale	32
2.3.1 Choix de la cellule coaxiale.....	32
2.3.2 Design de la cellule coaxiale.....	32
2.3.3 Validation de la cellule coaxiale	36
2.3.4 Modélisation électrique de la cellule coaxiale	40
2.4 Mesure de l'efficacité de blindage des tresses métalliques	42
2.4.1 Mesure de l'efficacité de blindage pour la tresse de référence.....	44
2.4.2 Application : mesure de l'efficacité de blindage avec un taux de remplissage de la tresse dans la cellule coaxiale	45
2.4.3 Effet des ouvertures sur l'efficacité de blindage.....	46
2.4.4 Effet du nombre de fils sur la valeur de l'efficacité de blindage	47
2.4.5 Effet de raboutage sur la valeur de l'efficacité de blindage des tresses.	49
2.5 Mesure de l'efficacité de blindage des tricots	51
2.6 Amélioration de la dynamique de l'appareil de mesure	52
2.6.1 Application sur la tresse de référence.....	54

2.6.2	Validation de mesure sur autre tresse métallique	55
2.6.3	Exemple d'amélioration dans la fabrication d'une tresse à partir de nos mesures	56
2.7	Problème de continuité électrique	57
2.8	Modélisation de l'efficacité de blindage	59
2.8.1	Modèles existants	59
2.8.2	Modèle de réflexions multiples proposé.....	62
2.8.3	Application à une plaque en Aluminium d'épaisseur 1 mm.....	64
2.8.4	Effet de la résistance de contact	66
2.8.5	Incertitude et reproductibilité de mesure.....	71
2.8.6	Simulation électromagnétique de la cellule coaxiale avec matériau	72
2.8.7	Effet de l'épaisseur sur l'efficacité de blindage.....	74
2.9	Modèle comportemental de l'efficacité de blindage des tresses	75
2.9.1	Présentation du modèle.....	75
2.9.2	Application à la tresse de référence.....	76
2.9.3	Validation du modèle sur d'autres tresses métalliques	77
2.9.4	Application : effet de trous sur l'efficacité de blindage	79
2.10	Dynamique globale de mesure.....	80
2.11	Conclusion	81
Chapitre 2 : Bibliographie.....		83
Chapitre 3 Impédance de transfert.....		84
3.1	Introduction.....	84
3.2	Modélisation de l'impédance de transfert.....	85
3.2.1	Modèle électrique de l'impédance de transfert des gaines en forme de tresse métallique	85
3.2.2	Modèle Physique de l'impédance de transfert pour les gaines homogènes	90
3.2.3	Modèle géométrique de l'impédance de transfert pour les gaines métalliques en forme de tresses	93
3.3	Cellule Triaxiale pour la mesure de l'impédance de transfert	94
3.3.1	Cellule triaxiale selon la norme IEC 62153-4-3.....	94
3.3.2	Modèle électrique proposé.....	96
3.3.3	Design et fabrication	98
3.3.4	Validation	101
3.3.5	Effet de résistance de contact sur la mesure de l'impédance de transfert.....	102
3.4	Application : Influence de chevauchement de la gaine sur la mesure de l'impédance de transfert.....	104
3.5	Modèle de l'impédance de transfert des tresses à partir du modèle de l'efficacité de blindage.....	108
3.6	Exemple de mesure de validation de modèle de l'impédance de transfert	110
3.7	Adaptation de la cellule triaxiale jusqu'à 1 GHz	112
3.7.1	Simulation du système intérieur	113
3.7.2	Simulation du système extérieur	116
3.7.3	Cellule triaxiale complète.....	117
3.7.4	Simulation électromagnétique de la cellule triaxiale complète.....	120
3.8	Conclusion	122

Chapitre 3 : Bibliographie.....	123
Conclusion générale et Perspectives	124
Annexes.....	127
A. Modèle numérique de l'efficacité de blindage.....	127
B. Modèle de l'efficacité de blindage des échantillons plans à partir des réflexions multiples.	129
C. Mesure de l'efficacité de blindage pour les tissus métalliques en guide d'onde.....	132
D. Mesure de l'efficacité de blindage des gaines en cellule TEM	135
D.1. Introduction à la cellule TEM.....	135
D.2. Méthode de test.....	135
D.3. Choix de l'orientation de l'échantillon.....	136
D.4. Application de mesure sur la gaine	137
Publications	139

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

Chapitre 1 Introduction et état de l'art

1.1 Introduction

De nos jours, avec la croissance rapide des technologies de communication, les champs électromagnétiques sont présents dans beaucoup d'applications comme les réseaux de télécommunication, les voitures, les avions et beaucoup d'autres applications.

Pour cela, la compatibilité électromagnétique (CEM) a pour objectif de faire en sorte que chaque dispositif fonctionne normalement dans son environnement, c'est-à-dire qu'il ne perturbe pas son environnement et qu'il ne soit pas perturbé par les champs électromagnétiques d'autres sources.

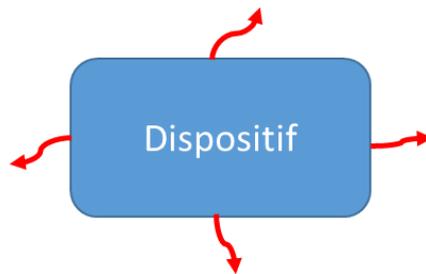


Figure 1.1 : Rayonnement d'un équipement à l'extérieur

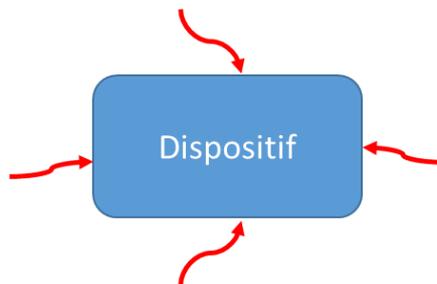


Figure 1.2: Perturbation extérieure

1.1.1 Champs électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques sont constituées d'un champ électrique E et d'un champ magnétique H, et se propagent dans l'espace libre à la vitesse de lumière (c). La fréquence (F), la période (T) et la longueur d'onde (λ) sont des termes qui caractérisent l'onde électromagnétique.

$$c = 3 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (1.1)$$

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

$$T = \frac{1}{F} [s] \quad (1.2)$$

$$\lambda = \frac{c}{F} [m] \quad (1.3)$$

Rappelons que le champ électromagnétique s'étend sur l'ensemble du spectre fréquentiel qui s'appelle le 'Spectre Electromagnétique', ('Electromagnetic Spectrum' en anglais) avec un vaste domaine d'applications.

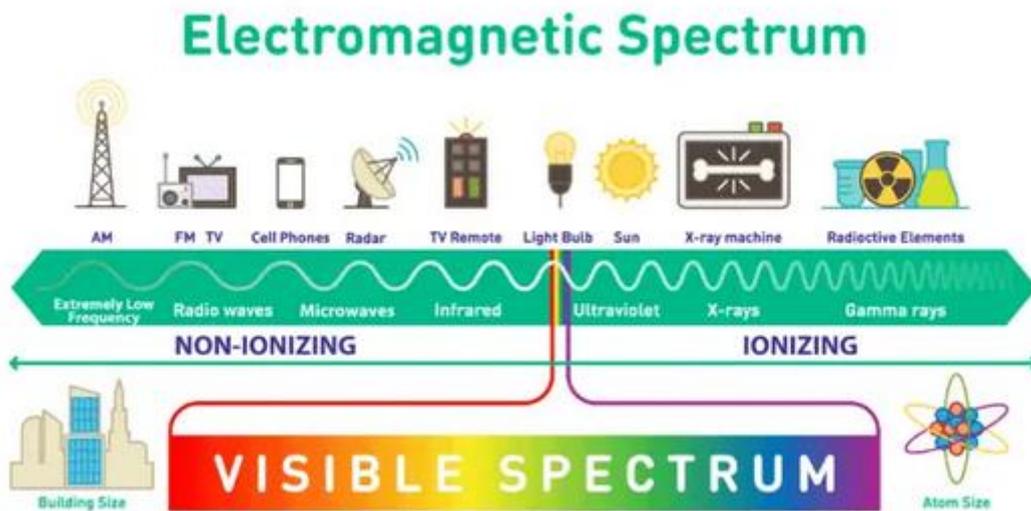


Figure 1.3 : Spectre Electromagnétique [1]

1.1.2 Blindage électromagnétique

Le blindage électromagnétique est nécessaire pour la protection des câbles, des équipements et même encore des bâtiments et des personnes contre les rayonnements électromagnétiques. Il consiste à réduire le champ électromagnétique au voisinage d'un objet en interposant une barrière entre la source du champ et l'objet à protéger.

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

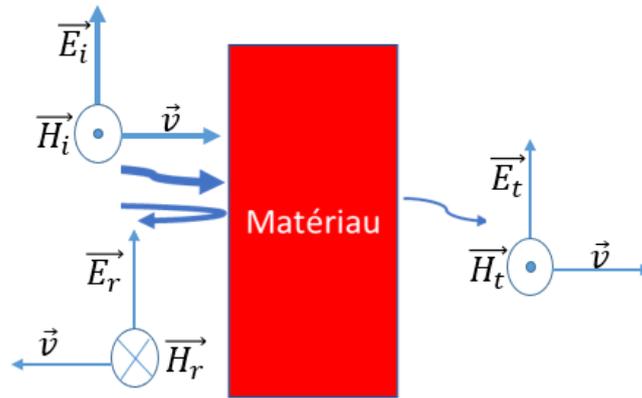


Figure 1.4 : Propagation du champ électromagnétique à travers un matériau

Pour caractériser ce blindage électromagnétique, il y a deux grandes catégories de grandeurs :

- L'efficacité de blindage pour les matériaux pleins.
- L'impédance de transfert pour les gaines.

Le problème de blindage des câbles dans les applications aéronautiques est crucial pour la protection des équipements et des câbles contre la foudre et les émissions d'autres équipements.

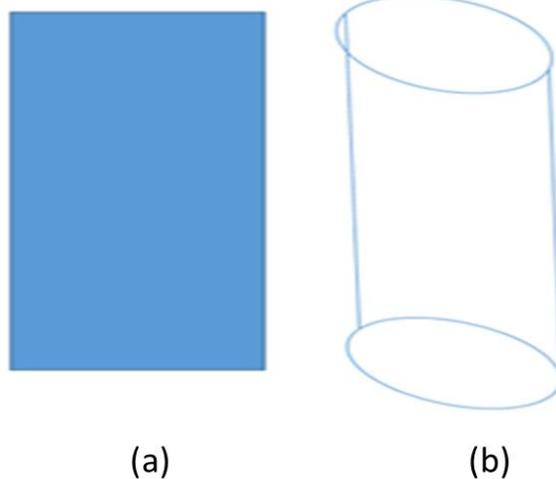


Figure 1.5 : Schéma de grandeurs du blindage (a) matériau plein, (b) gaine métallique

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

Pour les câbles électriques, trois types de blindage sont généralement proposés [2].

- a. Blindage constitué d'un matériau homogène

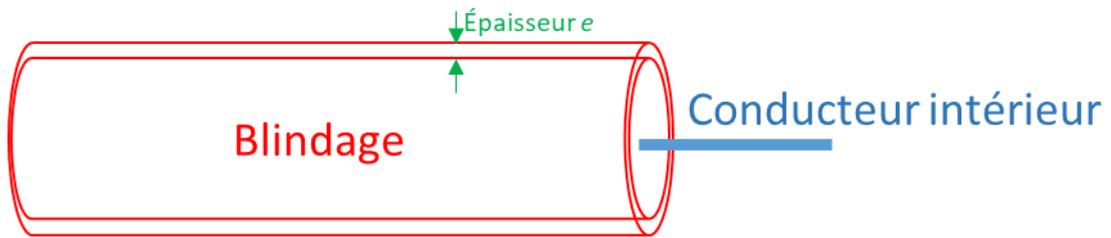


Figure 1.6 : Blindage en forme homogène

- b. Blindage constitué par une tresse métallique

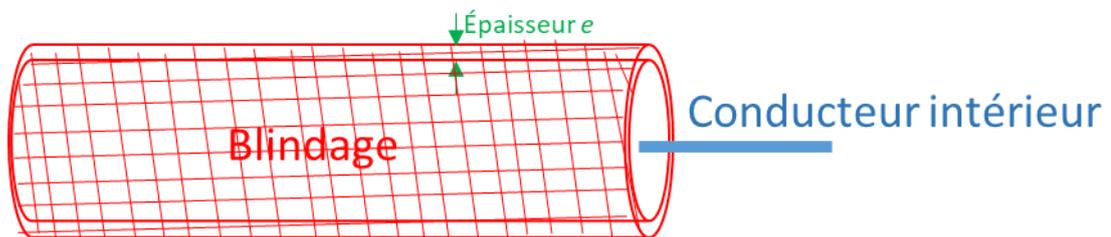


Figure 1.7 : Blindage en forme de tresse métallique

- c. Blindage à base de rubans hélicoïdaux

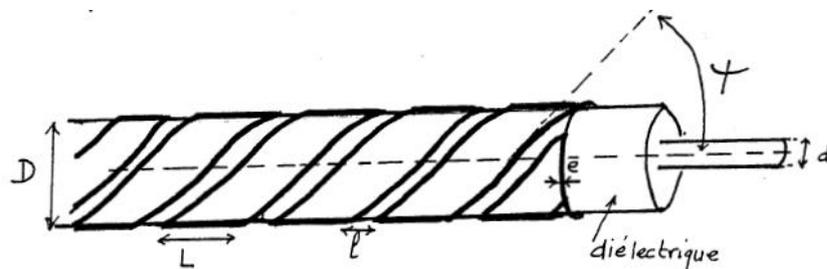


Figure 1.8 : Blindage en forme hélicoïde [2]

Dans nos travaux, seuls les blindages constitués d'un matériau homogène ou d'une tresse métallique seront considérés.

La thèse se déroule dans le cadre du projet NextGen (FUI AAP 22).

1.1.3 Projet NextGen

Le projet NextGen s'inscrit dans le domaine de la protection de câblage aéronautique : d'une part une protection mécanique pour les câbles (contre l'abrasion) et d'autre part une protection électrique contre les ondes électromagnétiques de foudre.

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

L'objectif général du projet est le développement d'une nouvelle génération de gaines de protection pour les câbles électriques plus légères que l'existant tout en augmentant les performances électriques sur la continuité électrique, le blindage électromagnétique et la résistance aux agressions externes.

1.1.3.1 Consortium du projet NextGen et rôle de l'UGA

Le consortium du projet NextGen est porté par SAFRAN le fabricant des équipements aéronautiques et contient plusieurs partenaires industrielles dont leur travail consiste à fabriquer et développer de nouvelles gaines de blindage avec différents types de tricot et tissage et ainsi fournir la protection mécanique pour l'assemblage finale de la gaine. De plus dans le consortium il y a 3 partenaires universitaires pour développer des matériaux polymères chargés et caractériser les propriétés physiques (laboratoire IMP, Lyon), modélisation physique des comportements électromagnétiques (laboratoire Hubert-Curien, Saint Etienne) et enfin notre rôle (laboratoire G2ELab – UGA) dans le projet est d'étudier et caractériser l'efficacité de blindage, prédire et mesurer l'impédance de transfert.

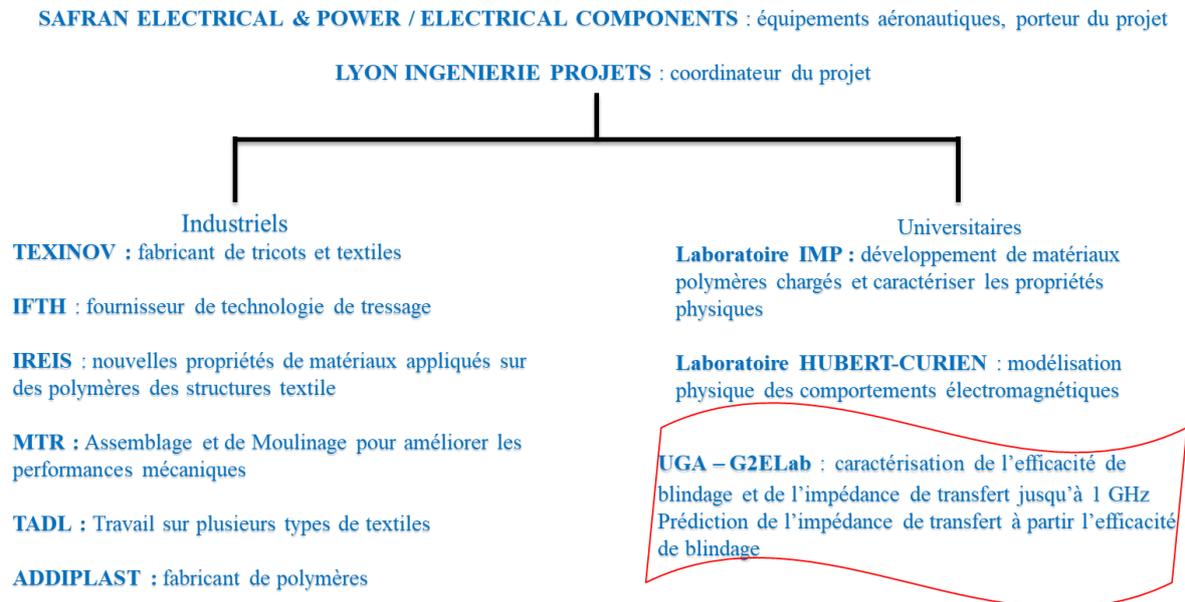


Figure 1.9 : Consortium du projet NextGen

1.1.3.2 Cahier des charges du projet

Les travaux du projet NextGen visent à développer une nouvelle gaine de blindage avec les exigences suivantes :

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

- Améliorer la continuité électrique,
- Améliorer la résistance à l'abrasion,
- Obtenir une meilleure optimisation du blindage EM
- Proposer une vision prédictive des performances de blindage des structures.

Pour des raisons de confidentialité du projet les valeurs actuelles et exigées des résistances électriques et mécaniques ne seront pas communiquées.

1.1.4 Description du travail de la thèse

Dans le cadre de ces travaux de thèse et du projet NextGen (FUI AAP 22), le développement des techniques de caractérisation et de prédiction des performances de blindage des textiles de nouvelle génération pour les applications avioniques entre DC et 1 GHz est visé. Les points suivants sont abordés :

- Test d'efficacité de blindage des échantillons plans entre DC et 1 GHz avec une dynamique de mesure de 100 dB.
- Développement de modèles d'efficacité de blindage et prédiction des performances de nouveaux textiles à partir d'échantillons plans.
- Conception des cellules de mesure d'impédance de transfert pour répondre aux exigences normatives imposées par le projet
- Développement d'un modèle comportemental de prédiction de l'impédance de transfert des gaines

Dans ce chapitre nous présentons les différentes méthodes de caractérisation de l'efficacité de blindage et dans la deuxième partie les techniques de mesure de l'impédance de transfert.

1.2 Efficacité de blindage

L'efficacité de blindage (SE pour « Shielding Efficiency » en anglais) est un des termes qui caractérisent le blindage électromagnétique. L'efficacité de blindage sert à mesurer l'atténuation du champ électromagnétique à travers un matériau.

A partir de la Figure 1.4 l'efficacité de blindage est calculée selon l'équation suivante

$$SE = -20 \cdot \log\left(\frac{E_t}{E_i}\right) = -20 \cdot \log\left(\frac{H_t}{H_i}\right) [dB] \quad (1.4)$$

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

Où E_t correspond au champ électrique transmis, E_i le champ électrique émis, H_t le champ magnétique transmis et H_i le champ magnétique émis.

Les mesures d'efficacité de blindage sont basées sur plusieurs configurations de mesure :

- Mesure de transmission (S_{21} en utilisant un VNA) en espace libre : transmission entre 2 antennes.
- Mesure de transmission au sein de lignes de transmission : insertion de l'échantillon entre deux parties d'une ligne de transmission (guide d'onde, cellule coaxiale).
- Mesure de couplage en champs proches (dipôles magnétiques ou électriques).
- Immersion en champs TEM (Cellule TEM) ou diffus, Chambre reverbérante).

Certaines de ces méthodes ont été traduites en standards utilisés par les laboratoires d'essais au niveau international. Dans cette partie, nous présentons ces différentes techniques, leurs domaines d'application, les principaux résultats, ainsi que les limitations éventuelles.

Pour toutes ces méthodes, l'efficacité de blindage est déduite en mesurant la transmission du champ électromagnétique à vide puis la transmission à travers un matériau selon l'équation suivante

$$SE = \text{transmission à vide} - \text{transmission à travers un matériau [dB]} \quad (1.5)$$

1.2.1 IEEE STD-299

Premièrement le standard IEEE-STD-299 [3] propose une méthode de mesure de l'efficacité de blindage des matériaux, cette méthode consiste à mesurer la transmission entre 2 antennes. L'antenne réceptrice est placée à l'intérieur d'une enceinte fabriquée à base du matériau sous test, tandis que l'émetteur est placé à l'extérieur (Figure 1.10). Le type d'antenne est choisi selon la bande de fréquence souhaitée ; par exemple une petite boucle pour la bande de 9kHz → 20 MHz, un dipôle entre 300 MHz et 1GHz...

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

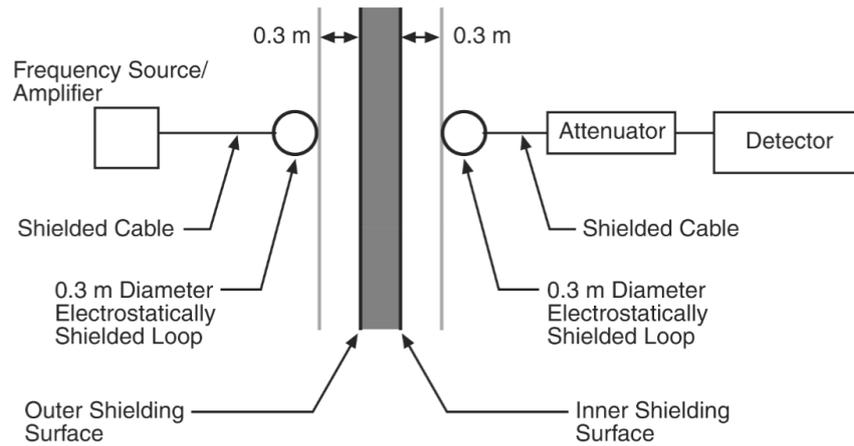


Figure 1.10 : Méthode IEEE STD-299 [3]

1.2.2 MIL-STD-285 vs MIL-STD-1377

En 1975, une comparaison entre les méthodes MIL-STD 1377 et la méthode MIL-STD-285 fut présentée [4]. La méthode MIL-STD 285 consiste à mesurer la transmission entre deux antennes sans et à travers un matériau (Figure 1.11), l'émetteur (transmitting antenna) est placé dans une chambre blindée. L'antenne réceptrice (receiving antenna) peut être orientée physiquement pour atteindre une indication maximale. Dans cette méthode, la bande de fréquence est également déterminée par le type d'antenne utilisée, les dimensions du matériau par rapport aux dimensions de l'ouverture dans la chambre et il faut assurer la connexion électrique entre le matériau sous test et la chambre blindée.

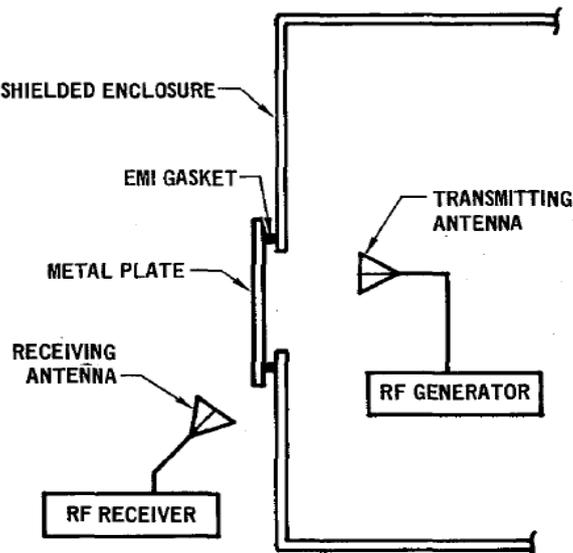


Figure 1.11: MIL STD-285 configuration[4]

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

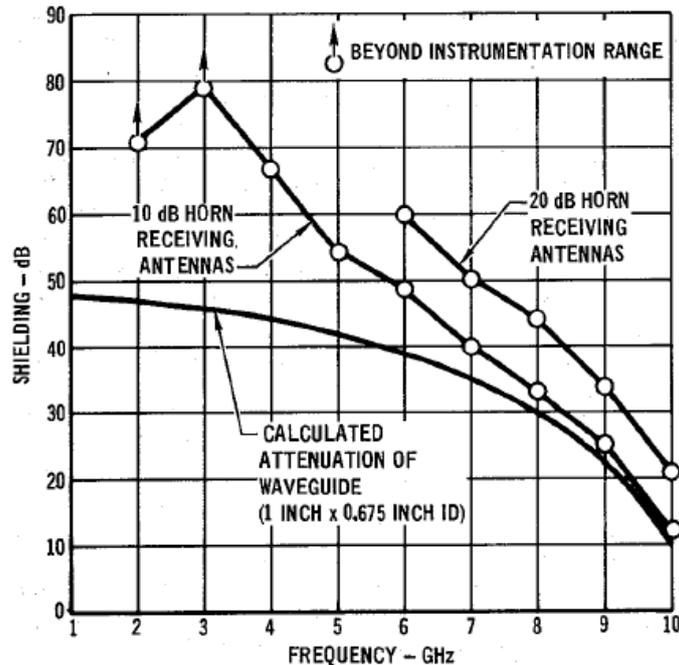


Figure 1.12: : Impact du Type d'antenne réceptrice sur la valeur de l'efficacité de blindage pour MIL-STD-285 [4]

La Figure 1.12 donne l'efficacité de blindage d'un tube en aluminium de diamètre intérieur de 17.145 mm. La courbe supérieure correspond aux résultats obtenus en utilisant un cornet à gain standard de 20 dB comme antenne de réception. La courbe inférieure montre la diminution de l'efficacité de blindage lorsque le même tube en aluminium est mesuré en utilisant un cornet à gain standard de 10 dB comme antenne de réception. Cette figure montre également l'atténuation calculée du tube lorsqu'il est traité comme un guide d'ondes fonctionnant en dessous de la coupure. En conséquence, pour minimiser cet effet de l'antenne de réception, les antennes avec les plus petites ouvertures disponibles doivent être utilisées comme antennes de réception pour les mesures de type MIL-STD-285.

De l'autre côté, la méthode MIL STD-1377 (Figure 1.13) est utilisée pour calculer l'efficacité de blindage des câbles, connecteurs et filtres, le matériau sous test est placé dans une enceinte blindée ; l'émetteur et le récepteur sont tout simplement des brins filaires. Pour arriver à un maximum d'indication des 'PADDLE WHEEL', qui peuvent être tournées et déplacées longitudinalement, sont utilisés pour orienter le champ électromagnétique.

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

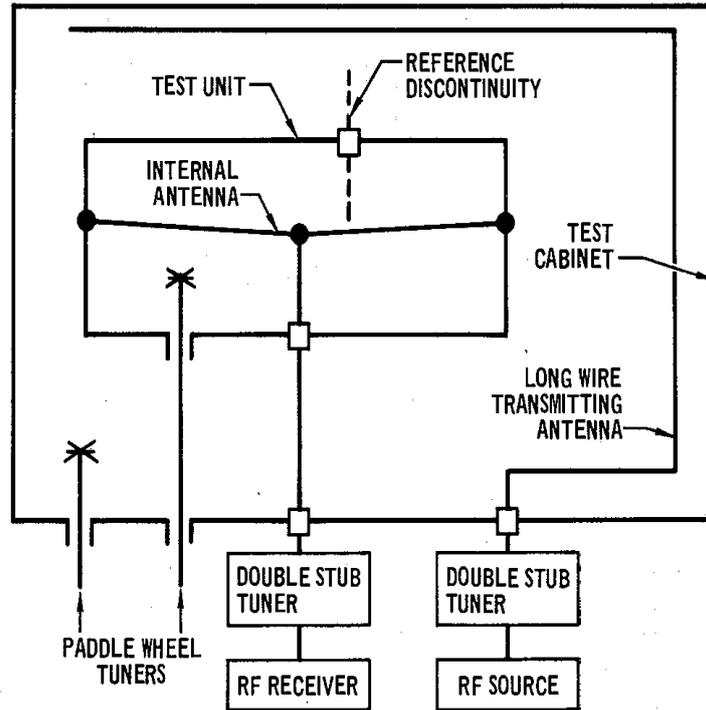


Figure 1.13 : configuration du MIL-STD-1377 [4]

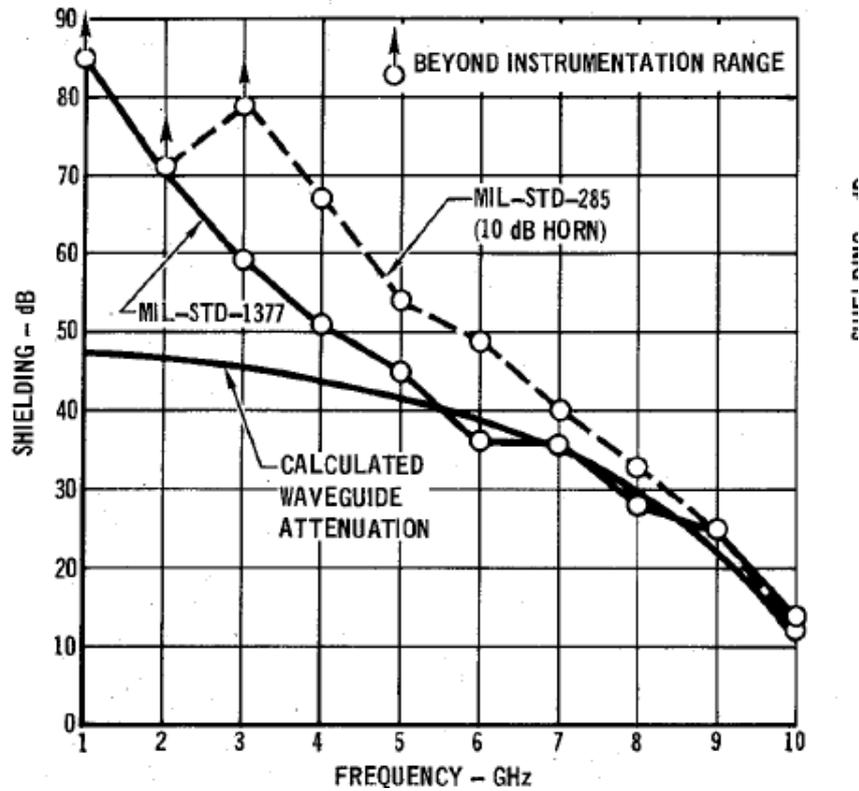


Figure 1.14 : Comparaison entre MIL STD1377 et MIL STD 285[4]

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

La Figure 1.14 présente la comparaison entre les méthodes MIL-STD-1377 et MIL-STD-285, le blindage indiqué aux fréquences plus basses est supérieur à l'atténuation du guide d'ondes car l'efficacité mesurée est en fait due au blindage correspondant à la somme du blindage de l'ouverture de 17.145 mm et l'atténuation du guide [4]. Aux fréquences plus élevées, le blindage de l'ouverture devient négligeable et le blindage indiqué est approximativement égal à l'atténuation du guide d'ondes. La plus grande efficacité de blindage indiquée par MIL-STD-285 aux fréquences inférieures est due au fait que la taille physique des antennes de réception cornet 10 dBi en réception est plus grande que la taille de l'ouverture de fuite. Aux fréquences plus élevées, la taille de l'antenne est approximativement la même que l'ouverture du guide d'ondes, et l'erreur « grande antenne de réception » n'est pas significative.

1.2.3 Mesure dans l'espace libre

Cette méthode consiste à mesurer l'atténuation du champ à travers un matériau placé entre deux antennes en espace libre (Figure 1.15) [5]. Cette méthode dépend des antennes utilisées. Et les résultats de mesure sont affectés par les réflexions des ondes électromagnétiques présentes dans l'endroit de test qui modifient l'onde transmise par l'antenne d'émission.



Figure 1.15: Méthode espace libre [5]

Les mesures dans cette méthode dépendent beaucoup des antennes utilisées, de la distance entre antennes et échantillons et de la dynamique de mesure et du bruit et de la stabilité électromagnétique dans l'espace de mesure.

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

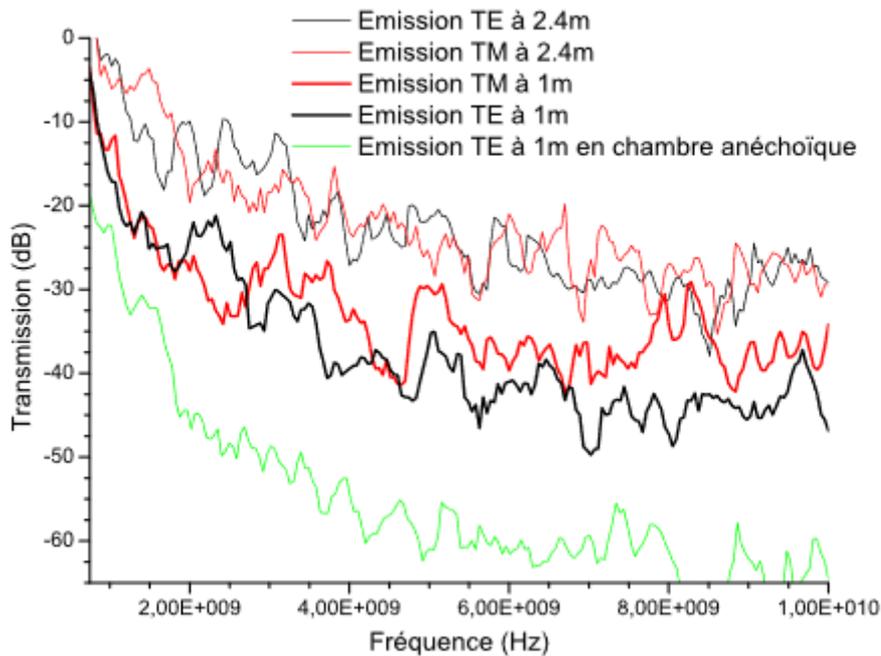


Figure 1.16: Mesure de la transmission à travers une tôle d'aluminium de 1.5 mm d'épaisseur [5]

La Figure 1.16 présente la transmission à travers une tôle en aluminium d'épaisseur 1.5 mm avec différents types d'émissions et différentes distances entre les antennes et l'échantillon et en les comparant à une mesure faite en chambre anéchoïque. Les graphes montrent que la mesure dépend beaucoup de la distance et du bruit électromagnétique présent dans l'espace de travail. De plus la bande de fréquence dans cette méthode commence à quelques centaines de MHz jusqu'à 10 GHz selon les antennes utilisées.

1.2.4 Mesure en chambre anéchoïque

Une première méthode classique consiste à placer l'émetteur, le récepteur et le matériau sous test dans une chambre anéchoïque (Figure 1.17 et Figure 1.18) [5], [6]. Cette solution permet de limiter les réflexions dans l'enceinte mais ne permet pas de les supprimer complètement.

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

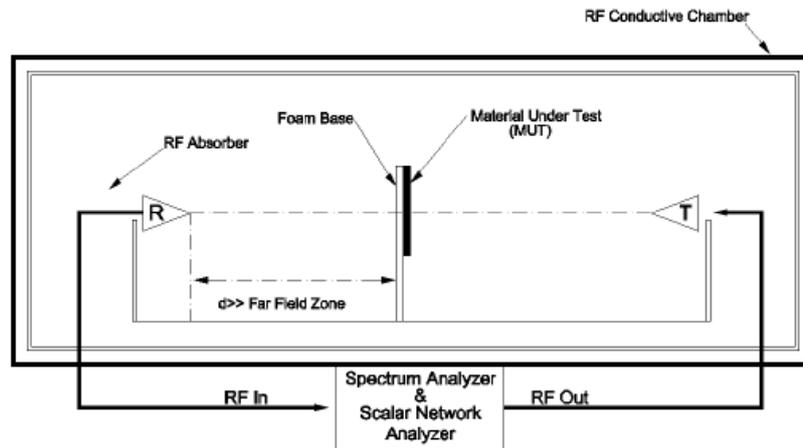


Figure 1.17 : Mesure dans une chambre anéchoïque [6].



Figure 1.18: Intérieur d'une boîte anéchoïque [6]

Une autre solution hybride consiste à mettre seulement le récepteur à l'intérieur de la chambre, l'émetteur étant à l'extérieur et le matériau est placé entre les deux antennes sur une ouverture dans la paroi de la chambre [7]. Dans la référence [7], l'ouverture est créée dans une porte de la chambre anéchoïde (Figure 1.19).

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

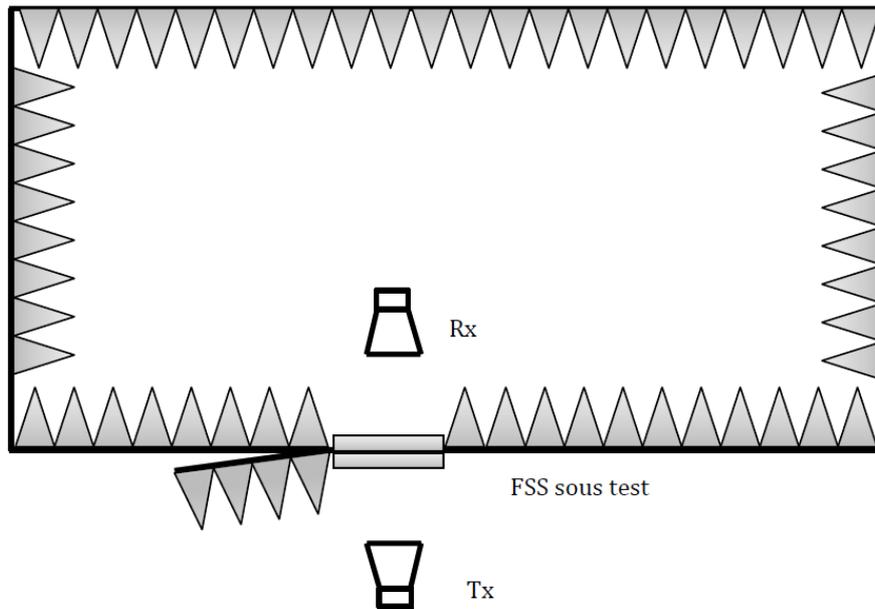


Figure 1.19: Mesure dans une chambre anéchoïque (deuxième méthode) [7].

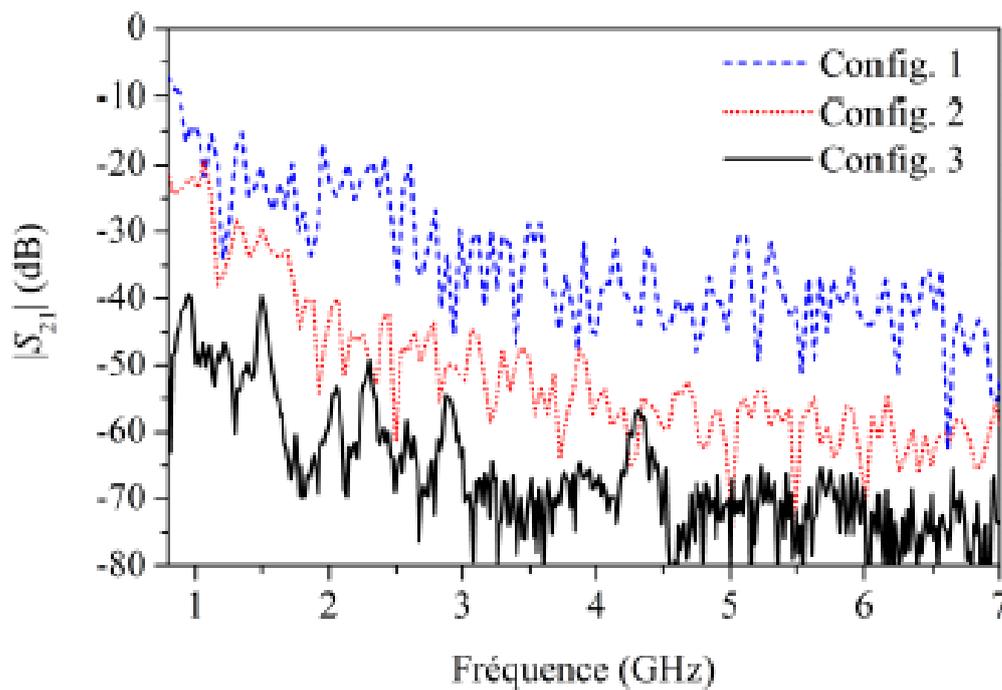


Figure 1.20 : Comparaison de mesure d'atténuation pour une tôle en aluminium d'épaisseur 2 mm [7]

La Figure 1.20 présente la comparaison de mesure de l'atténuation à travers une tôle en aluminium d'épaisseur de 2 mm. La comparaison est faite entre la méthode en espace libre (config 1), la méthode en chambre anéchoïque (2 antennes à l'intérieur – config 2) et la méthode hybride (antenne émettrice à l'extérieur – config 3). Les graphes montrent une différence de 10 à 20 dB entre les mesures. Il faut noter que ces différences dépendent également du

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

dimensionnement des antennes, des perturbations électromagnétiques extérieures et du placement des antennes par rapport à l'échantillon. On peut noter qu'une dynamique de 40 dB est atteinte sur toute la bande de fréquence présentée en utilisant la deuxième configuration de mesure en chambre anéchoïque (configuration hybride).

1.2.5 Mesure avec guide d'onde

Cette méthode consiste à mesurer la transmission à travers un matériau plan entre deux guides d'ondes identiques [8], [9]. La bande de fréquence dépend des dimensions transversales du guide.

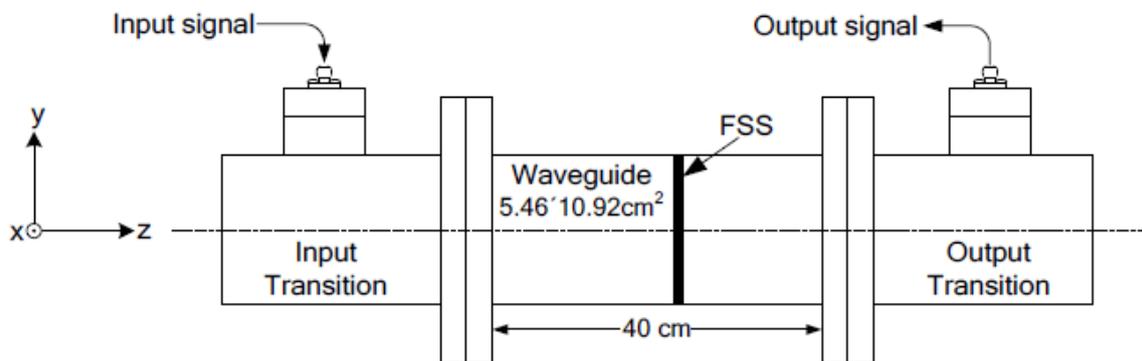


Figure 1.21 : Méthode de guide d'onde [9]

Par exemple avec des guides WR340(R26) nous avons une transmission à vide proche de 0 dB dans la bande de 1.8 GHz à 3.8 GHz. Dans cette bande nous avons mesuré une plaque en cuivre de 1 mm d'épaisseur montre qu'on peut avoir une dynamique de mesure de 100 dB sur toute la bande entre 1.8 et 2 (voir Figure 1.22).

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

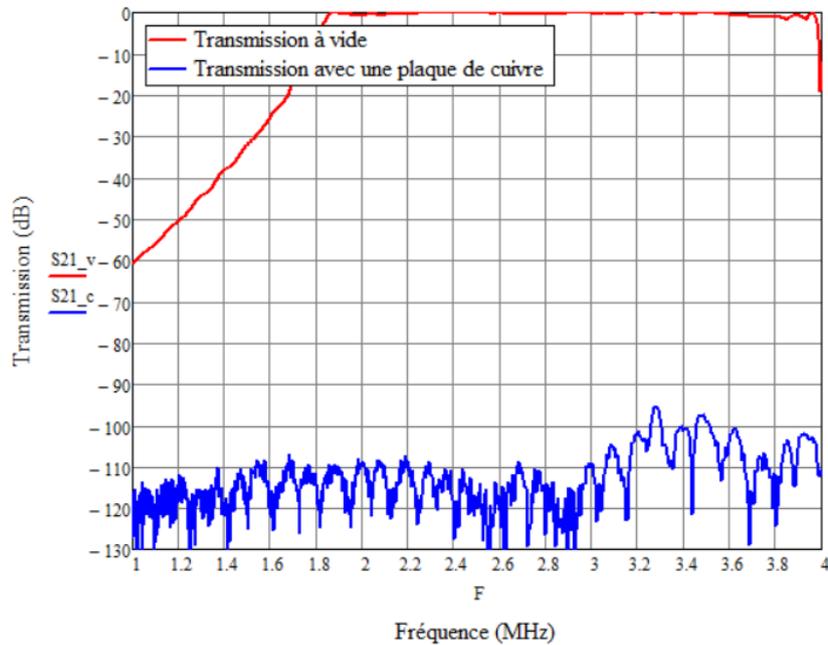


Figure 1.22 : Dynamique de mesure de guide d'onde WR340 avec une plaque en cuivre de 1mm.

Des mesures par le guide d'onde sur les tissus métalliques sont présentés dans l'annexe C.

1.2.6 Mesure en cellule TEM

Une cellule TEM (Transverse Electro-Magnétique) est une ligne coaxiale agrandie progressivement, de façon à disposer d'un espace pour pouvoir placer des dispositifs à tester à l'intérieur. Pour des raisons pratiques, le conducteur central initialement cylindrique est agrandi uniquement dans une direction pour devenir plat, et il est placé de façon dissymétrique (plus proche du conducteur du haut) de façon à disposer d'un volume de test plus élevé.

La cellule TEM est utilisée pour les essais d'émissions et d'immunité rayonnée dans les normes suivantes (liste non exhaustive) :

- NF EN 61000-4-20 Février 2011 : compatibilité électromagnétique (CEM) - partie 4-20 : techniques d'essai et de mesure – essais d'émission et d'immunité dans les guides d'onde TEM [10]
- NF EN 61967-8 mars 2012 : circuits intégrés – mesure des émissions électromagnétiques – partie 8 : mesure des émissions rayonnées - méthode de la ligne TEM à plaques (stripline) pour CI [11].

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

- NF EN 62132-8 février 2013 : circuits intégrés – mesure de l'immunité électromagnétique – partie 8 : mesure de l'immunité rayonnée - méthode de la ligne TEM à plaques pour circuit intégré [12].

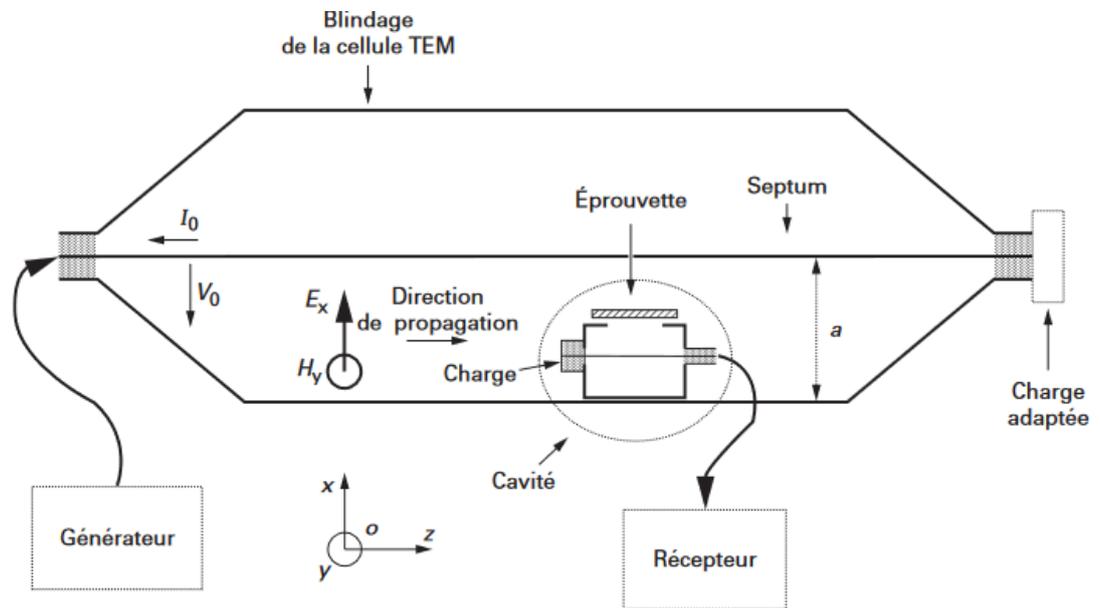


Figure 1.23 : Mesure dans une cellule TEM [13]

La Figure 1.23 présente la méthode de mesure en cellule TEM pour une éprouvette [13], cette méthode dépend du niveau de champ émis et du type de récepteur pour assurer un niveau de dynamique élevé.

Un type de fonctionnement est d'utiliser une double cellule TEM [14] en plaçant le matériau sur une ouverture faite dans le Septum (le conducteur central de la cellule TEM).

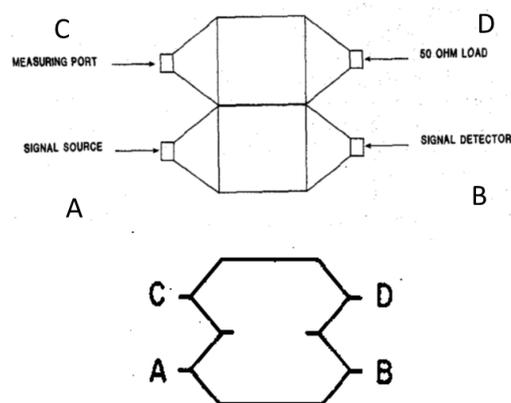


Figure 1.24: Double cellule TEM [14]

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

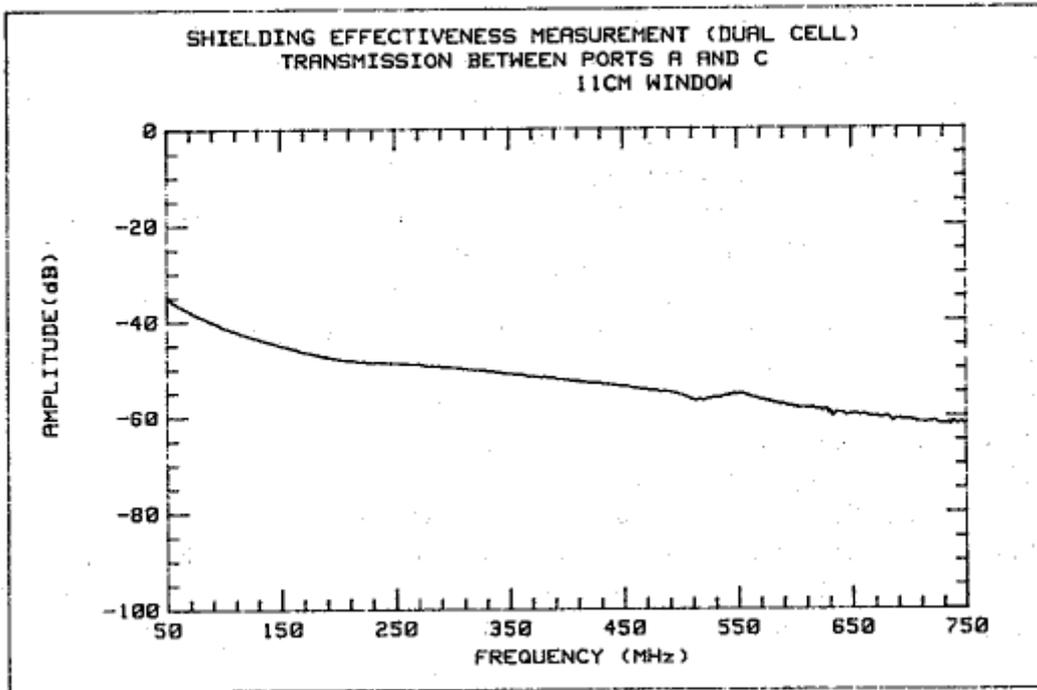


Figure 1.25: : Efficacité de blindage, double cellule TEM pour un matériau textile flexible [14]

La Figure 1.25 présente le coefficient de transmission à travers un matériau textile flexible avec un revêtement conducteur. La mesure est faite entre 50 – 750 MHz en plaçant le matériau sur une ouverture, de 11 cm x 11 cm, entre les deux cellules. Une bonne connexion est obligatoire entre la cellule et l'échantillon sous test pour éviter les fuites dans la mesure.

L'autre principe est d'utiliser une cellule TEM en 'split' et qui correspond à une forme coaxiale.

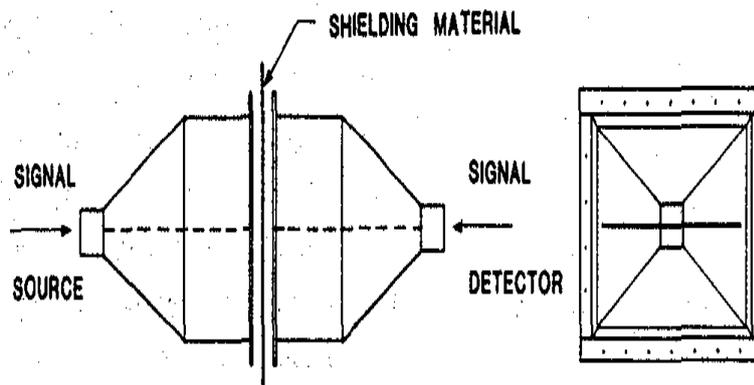


Figure 1.26 : Cellule TEM en split.[14]

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

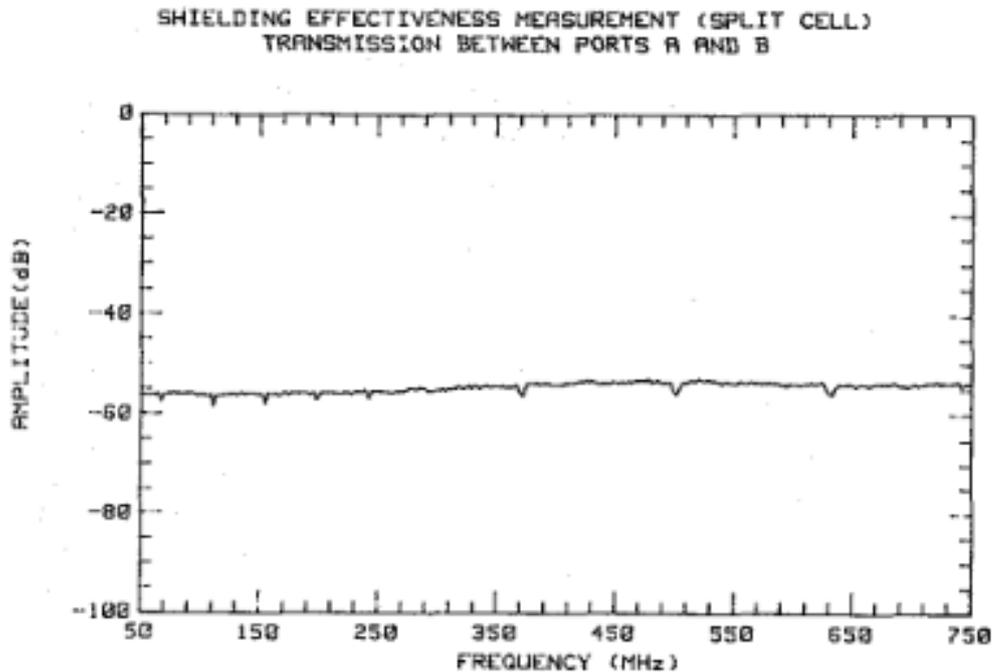


Figure 1.27 : Efficacité de blindage en utilisant 'Split' TEM cell pour un matériau textile flexible [14]

La Figure 1.27 présente l'efficacité de blindage en utilisant un 'split' TEM, la mesure est faite avec le même matériau utilisé dans la mesure avec double cellule TEM.

En comparant les deux mesures (Figure 1.25 et Figure 1.27) des différences sont obtenues sur les résultats, premièrement en basse fréquence, la valeur de l'efficacité de blindage est inférieure à 20 dB en utilisant la double cellule TEM. De plus la mesure avec la cellule TEM divisée semble constant sur toute la bande de fréquence tandis que le niveau mesuré avec la double cellule augmente avec la fréquence.

Ces différences sont possiblement liées à la différence d'orientation du champ dans les deux méthodes.

1.2.7 Norme ASTM 4935

Cette norme décrit la méthode coaxiale pour mesurer l'efficacité de blindage à travers des matériaux plans [15]. Cette méthode mesure l'efficacité de blindage entre 30 MHz et 1.5 GHz en plaçant le matériau sous test entre 2 parties identiques d'une ligne coaxiale d'impédance caractéristique de 50Ω.

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

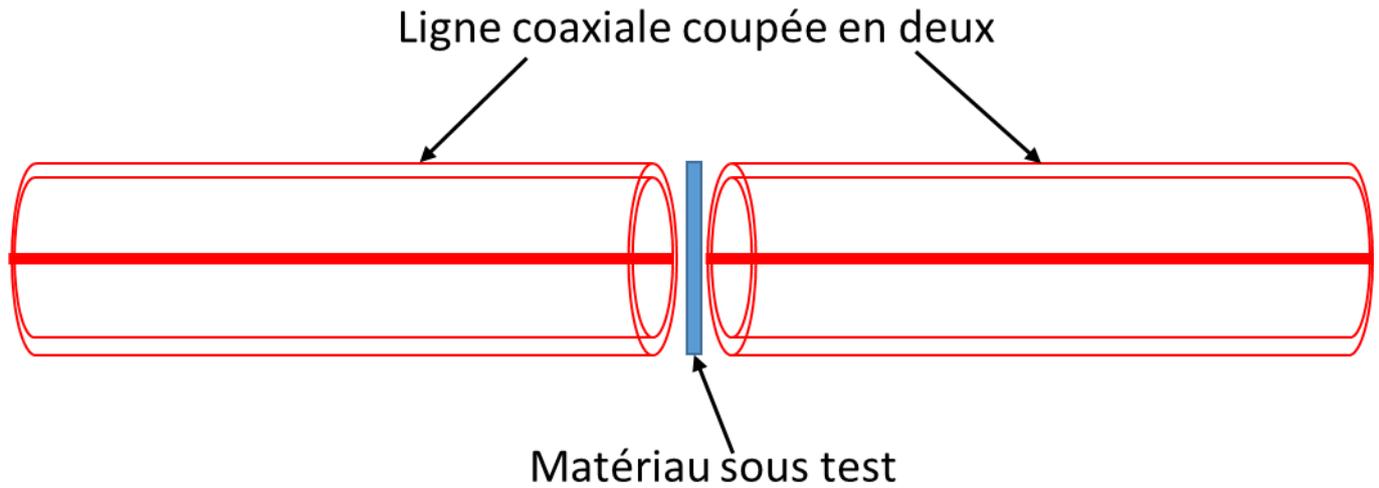


Figure 1.28 : Schéma de test ASTM-4935

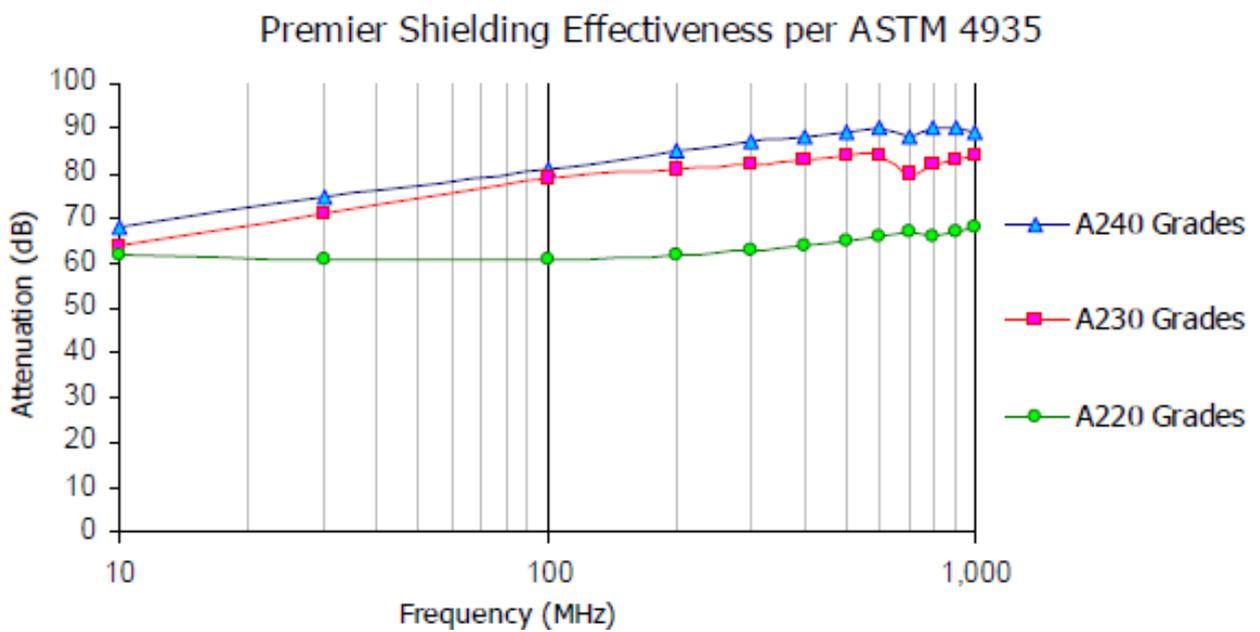


Figure 1.29 : Résultats de mesure de l'efficacité de blindage selon ASTM 4935 pour des échantillons de résine [16]

La Figure 1.29 présente les résultats de mesure de l'efficacité de blindage pour différents échantillons de résine, la mesure est faite entre 10 MHz et 1GHz selon ASTM4935. Les graphes montrent que l'efficacité de blindage augmente en augmentant la fréquence.

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

1.2.8 Conclusion sur les méthodes d'efficacité de blindage

Dans les parties précédentes nous avons présenté différentes méthodes de mesure de l'efficacité de blindage pour des matériaux plats. En revanche ces méthodes sont différentes par la source du champ électromagnétique (antenne, guide ...), la bande de fréquence et la taille du matériau sous test.

Dans le projet NextGen l'exigence est de mesurer l'efficacité de blindage entre 10 kHz et 1 GHz. Pour cela nous présentons dans le tableau suivant la différence de la bande de fréquence pour pouvoir choisir la méthode la plus proche pour nos travaux. Également nous présentons la comparaison de la dynamique de mesure de chaque méthode car l'objectif attendu est une dynamique de 100 dB permettant les essais sur une grande gamme d'échantillons.

Méthode de mesure	Champ Proche	Espace libre	Chambre anéchoïque	Cellule TEM	Guide d'onde	Ligne coaxiale
Fréquence minimale	Quelques <i>kHz</i>	Quelques centaines de <i>MHz</i>	Quelques centaines de <i>MHz</i>	Quelques <i>kHz</i>	Quelques centaines de <i>MHz</i>	DC

Tableau 1.1 : Comparaison entre les méthodes de mesure de l'efficacité de blindage selon la bande de fréquence et le dynamique de la mesure

Dans le Tableau 1.1 nous trouvons deux méthodes (cellule TEM et ASTM4935) qui sont proches à la bande de fréquence exigée. Le projet NextGen oblige l'utilisation d'une méthode normative et pour cela nous avons choisi de travailler avec la méthode ASTM 4935.

Durant la thèse, des travaux portant sur l'amélioration du niveau de dynamique sur une large bande de fréquence ont été réalisés sur la cellule coaxiale, l'objectif visé étant d'assurer une dynamique de 100 dB sur la bande de fréquence de 10 kHz → 1 GHz, et la possibilité de tester différents types de matériaux, cela fait l'objet du Chapitre 2

1.3 Impédance de transfert

Nous avons traité ci-dessus les problématiques de mesure de l'efficacité de blindage électromagnétique pour les échantillons plans. Mais pour les applications pratiques des protections des câbles, la notion de gaine doit être introduite. La gaine correspond à un

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

échantillon plan enroulé pour avoir une forme cylindrique. En effet, par exemple, dans les applications aéronautiques, le blindage doit protéger les câbles contre la foudre où l'impulsion créée peut atteindre une dizaine de kV/m. Le blindage doit servir également pour la protection contre les émissions des autres équipements tels que les radars.

L'exigence de performance des gaines utilisées en aéronautique est spécifiée en terme d'impédance de transfert. Cette impédance de transfert Z_t est définie sur une longueur de couplage (L_c) donnée comme le quotient de la tension (V_1) induite au circuit intérieur (conducteur central + gaine) par le courant (I_2) introduit dans le circuit externe (gaine + tube de fermeture) (Figure 1.30).

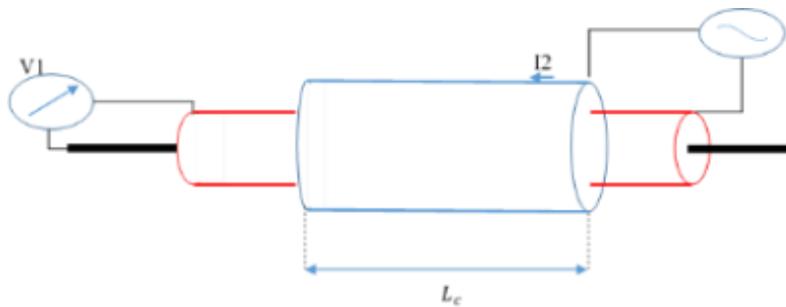


Figure 1.30 : Structure de définition de l'impédance de transfert

$$Z_t = \frac{V_1}{I_2 \cdot L_c} \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (1.6)$$

Dans la littérature l'impédance de transfert est mesurée par deux méthodes, la méthode triaxiale et la méthode BCI, méthodes décrites ci-dessous.

1.3.1 Méthode triaxiale

La méthode triaxiale est une méthode décrite dans la norme IEC 62153-4-3 [17] pour la mesure de l'impédance de transfert. La mesure de l'impédance de transfert s'étend du de DC jusqu'à 100 MHz. Plusieurs publications utilisent la méthode triaxiale pour la mesure de l'impédance de transfert [13], [18],[19], [20], [21],[22], [23].

La cellule triaxiale est composée du conducteur central, la gaine de blindage sous test et un tube conducteur pour la fermeture extérieure avec la reprise de la gaine.

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

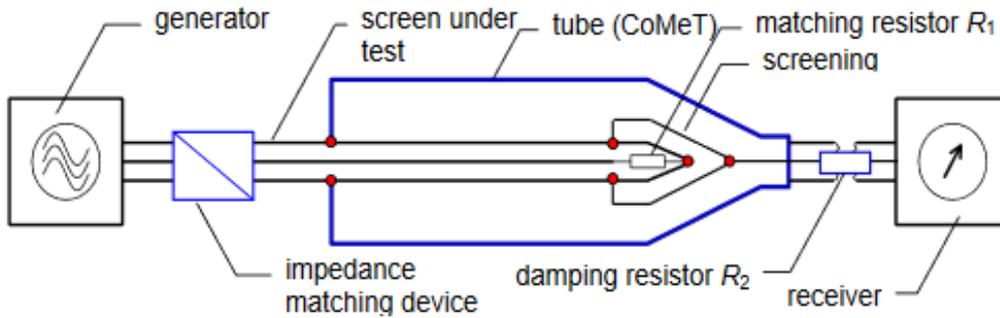


Figure 1.31 : Schéma de la cellule triaxiale [19]

Cette structure ainsi que les équations de l'extraction de l'impédance de transfert sont présentées dans le chapitre 3.

1.3.2 Méthode BCI

Cette méthode présentée dans [24] est utilisée pour mesurer l'impédance de transfert pour des câbles blindés jusqu'à 100 MHz également. Le principe de la mesure de l'impédance de transfert est de créer un courant sur le blindage (de longueur L) puis de mesurer la tension interne V_{int} entre le conducteur interne et le blindage à une extrémité du DUT. Le courant est injecté et mesuré respectivement avec une pince d'injection et une pince de mesure. La tension est mesurée. Deux types de mesures sont possibles : la mesure scalaire en utilisant un générateur et un analyseur de spectre et la mesure vectorielle à l'aide d'un analyseur vectoriel de réseaux.

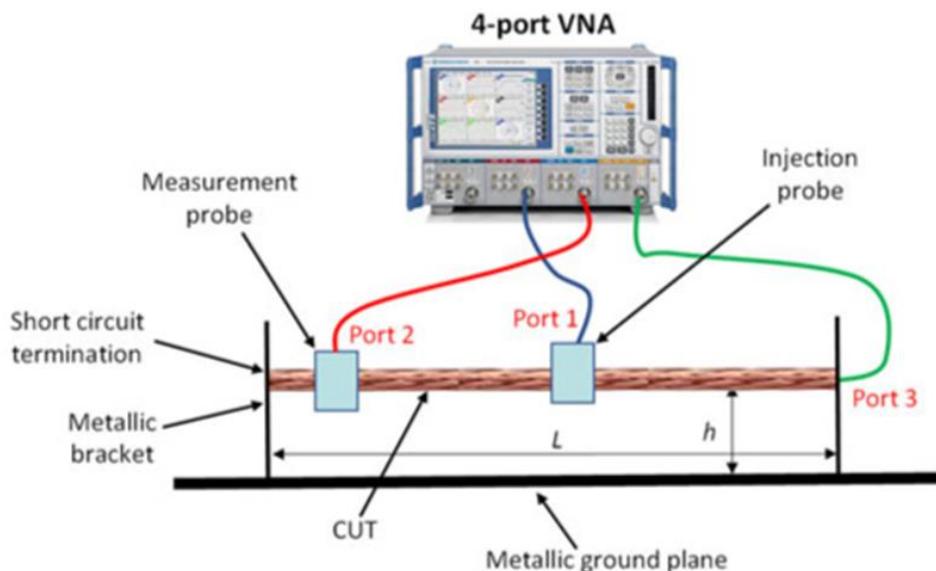


Figure 1.32 : Schéma de test vectoriel [24]

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

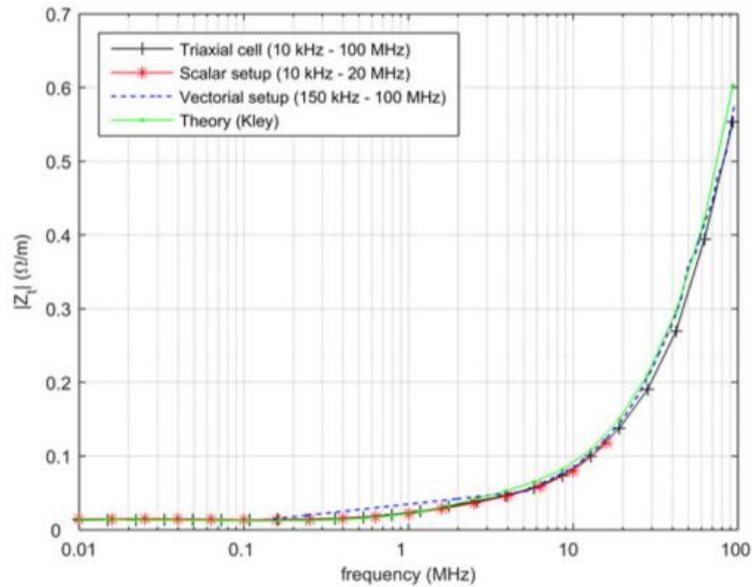


Figure 1.33 : Impédance de transfert pour RG-58 câble [24]

La Figure 1.33 présente les résultats de mesure de l'impédance de transfert avec la méthode BCI en comparaison avec la méthode triaxiale. La mesure est présentée jusqu'à 20 MHz pour le test scalaire et jusqu'à 100 MHz pour le test vectoriel et la mesure triaxiale.

Pour répondre aux exigences normatives posées par le projet nous avons choisi de travailler avec la méthode triaxiale pour la mesure de l'impédance de transfert, des travaux portant sur l'adaptation de la cellule ayant été proposés pour aller jusqu'à 1 GHz.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'objectif général de la thèse. Les notions du blindage électromagnétique des câbles et les termes qui caractérisent ce blindage (efficacité de blindage et impédance de transfert) ont été définis. Nous avons également présenté différentes méthodes de mesure de l'efficacité de blindage et l'impédance de transfert.

Compte tenu des exigences du projet NextGen nous avons choisi de travailler sur la cellule coaxiale pour caractériser l'efficacité de blindage des matériaux et sur la cellule triaxiale pour la mesure de l'impédance de transfert des gaines, ce qui est les objets d'études qui seront présentées dans les chapitres 2 et 3, respectivement. Enfin un modèle comportemental de prédiction de l'impédance de transfert à partir de la mesure de l'efficacité de blindage sera également présenté dans le chapitre 3.

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

Chapitre 1 : Bibliographie

- [1] 'Safe levels of Electromagnetic Radiation', [en ligne]
<https://www.dfendershield.com/safe-levels-electromagnetic-radiation/>
- [2] L. Koné, "Conception d'outils numériques et de bancs de mesures permettant d'évaluer l'efficacité de blindage des cables et des connecteurs", *Thèse*, Université Lille1 - sciences et technologies , 1989.
- [3] "IEEE Standard Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having all Dimensions between 0.1 m and 2 m", *IEEE Std 299.1-2013*, p. 1-96, janv. 2014.
- [4] J. D. Lee, "MIL-STD-1377 VS. MIL-STD-285 Microwave Shielding Effectiveness Measurements", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1-4 San Antonio, TX, 1975.
- [5] F. De Barros, "Conception, réalisation et caractérisation de papiers fonctionnels pour des applications de filtrage électromagnétique", *Thèse*, Université Grenoble Alpes, 2011
- [6] Ş. S. Ugurlu, M. C. Özgönül, A. Özkurt and M. Seçmen, "An RF anechoic box system development for shielding effectiveness measurements," *9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)* pp. 332-336 , Bursa, 2015,
- [7] A. NIEMBRO MARTIN, "Conception et développement de supports imprimables souples pour filtrage et adaptation des ondes électromagnétiques radiofréquences", *Thèse*, Université Grenoble Alpes , 2015.
- [8] F. Bayatpur and K. Sarabandi, "Tuning Performance of Metamaterial-Based Frequency Selective Surfaces," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 2, pp. 590-592, Feb. 2009
- [9] F. Debarros, et al, "Characterization of frequency-selective surface spatial filters in a rectangular waveguide", *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 4, no Special Issue 01, p. 59–69, févr. 2012
- [10] 'NF EN 61000-4-20' Février 2011
- [11] 'NF EN 61967-8' mars 2012

Chapitre 1 : Introduction et état de l'art

- [12] 'NF EN 62132-8' février 2013
- [13] L. Koné . B. Démoulin, "Mesure de l'atténuation procurée par des blindages", *Techniques de l'ingénieur*, vol. Réf D1325 V1, 10 Mai 2012.
- [14] S. Kashyap, "Shielding Effectiveness Measurements with a Dual Tem Cell and a Split TEM Cell" , *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1-3 SAN DIEGO, CA, 1986
- [15] Norme ASTM 4935
- [16] CHMERICS PREMIER, "Test report Shielding Effectivness per ASTM 4935", Document #TR 1006 EN 0206, February3, 2006
- [17] "IEC 62153-4-3" Novembre 2013.
- [18] B. Démoulin. et L. Koné, "Shielded cables transfer impedance measurement", *IEEE EMC news letter*, pp. 30-37, 2010
- [19] L.Halme et B. Mund "EMC of Cables, Connectors, and Components with Triaxial set-up', *Proceedings of the 62nd IWCS conference*
- [20] B. Vanlandschot et al, "An improved Triaxial Cell for transfer impedance Meaurements on miltipins backpane connectors", *IEEE International symposium on electromagnetic compatibility*, pp. 141-144, Austin, TX, USA, 18-22 Aug. 1997
- [21] B. Vanlandschot et al, "New method for measuring transfer impedance and transfer and admittance of shileds using a triaxial cell", in *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, vol. 39, issue 2, pp. 180-185, May 1997
- [22] H. Kim et T. Jang., "Comparison of measurement results on the transfer impedance of a coaxial cable", *Asia Pacific international symposium on electromagnetic compatibility*, pp. 134-136,, Seoul, South Korea, 20-23 June 2017.
- [23] P. De Langhe et al, "Transfer Impedance measurements on the shielding of a multi-pins board-to-board connectors', *IEEE symposium in Electromagnetic compatibility*, pp. 453-455, 22-26 Aug.1994, Chicago, USA.
- [24] Z. Chérif. et al, "Ttransfer impedance measurement of shielded cables through localized injection", *IEEE transaction on electromagnetic compatibility*, vol. 60, n° 14, August 2018.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

Chapitre 2 Efficacité de blindage

2.1 Introduction

Ce chapitre présente l'étude et la mesure de l'efficacité de blindage pour différents types d'échantillons plans sur la gamme de fréquence allant du DC à 1 GHz. Les échantillons mesurés sont soit des échantillons pleins soit des tresses métalliques.

Rappelons tout d'abord comment est déterminée l'efficacité de blindage (SE) d'un matériau : L'efficacité de blindage est obtenue en mesurant l'atténuation du champ électromagnétique à travers un matériau par rapport à la transmission du champ sans matériau.

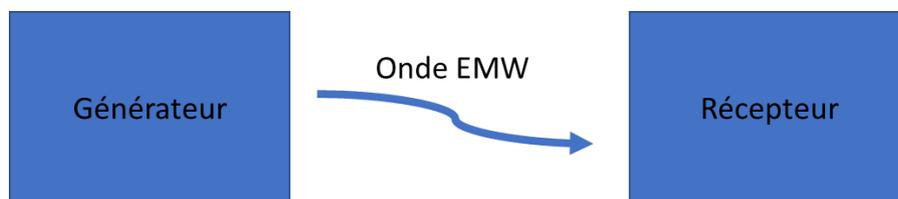


Figure 2.1:

Figure 2.1 : Transmission à vide

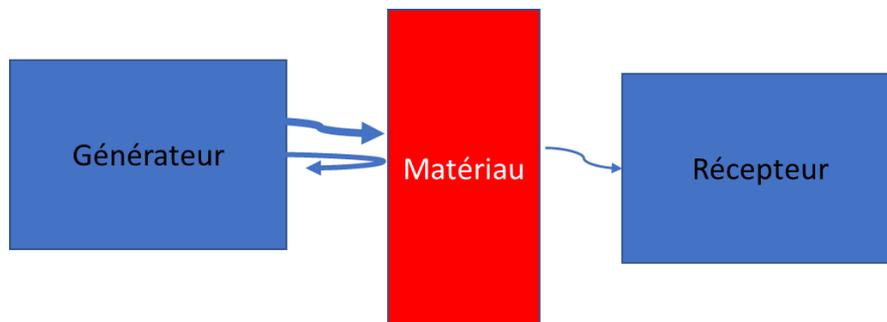


Figure 2.2 : Transmission à travers un matériau

L'efficacité de blindage est calculée à partir de l'équation suivante :

$$SE \text{ (dB)} = \text{transmission à vide (dB)} - \text{transmission avec matériau(dB)} \quad (2.1)$$

La première partie dans ce chapitre porte sur l'exigence imposée par le projet NextGen en terme d'impédance de transfert et le lien avec l'efficacité de blindage. Dans la deuxième partie le choix, le design, la validation de la cellule coaxiale seront décrits. La troisième partie de ce chapitre présente la mesure de l'efficacité de blindage des tresses métalliques avec différentes formes de tresses. Et ensuite la modélisation de l'efficacité de blindage en comparant deux

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

modèles existants avec un modèle proposé. L'application de mesure et la comparaison avec les simulations électromagnétiques sont présentées dans la quatrième partie. Enfin un modèle comportemental de l'efficacité de blindage des tresses métalliques est présenté et utilisé par la suite pour la prédiction de l'impédance de transfert.

2.2 Exigence du projet NextGen

L'objectif général du projet NextGen est de développer une nouvelle gaine de blindage électromagnétique des câbles électriques, mais nous devons tester des échantillons plats fabriqués par les partenaires industrielles (textiles métalliques bruts) tout au long du projet pour tester l'efficacité de blindage avant la fabrication des gaines.

L'exigence du projet est définie en terme d'impédance de transfert maximale de

$$Z_t = R_1 + j\omega L_1 \quad (2.2)$$

Avec $R_1 = 4 \left[\frac{m\Omega}{m} \right]$ et $L_1 = 2 \left[\frac{nH}{m} \right]$. Notons que la gaine actuelle à une résistance linéique de $5 \left[\frac{m\Omega}{m} \right]$.

En effet, cette forme d'impédance de transfert correspond à la gaine en forme de tresse métallique[1]. Les tresses métalliques sont fabriquées avec des fils conducteurs avec différents types de maillage, ce qui donne par exemple la forme d'une tresse comme illustré à la figure suivante.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

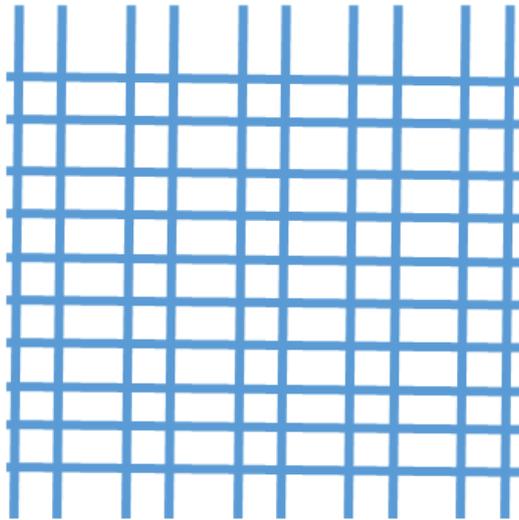


Figure 2.3 : Forme d'une tresse métallique

La transmission du champ électromagnétique à travers une grille dépend notamment :

- De la polarisation du champ par rapport à l'orientation de la tresse avec différences des dimensions horizontales et verticales des ouvertures
- De la dimension des ouvertures et le rapport entre cette dimension et la longueur d'onde λ à la fréquence considérée telle que $\lambda = \frac{c}{f}$ où $c = 3 * 10^8$ m/s correspond à la vitesse de propagation dans l'air.

En basse fréquence, puisque la longueur d'onde est plus grande que la dimension d'ouverture, la tresse réagit comme une feuille métallique homogène. La valeur de l'efficacité de blindage dépend de la résistivité du matériau, et plus la fréquence augmente plus la longueur d'onde diminue. Cela cause une transmission du champ à travers les ouvertures inversement proportionnelles à la longueur d'onde, et qui donne une efficacité de blindage diminuant avec la fréquence.

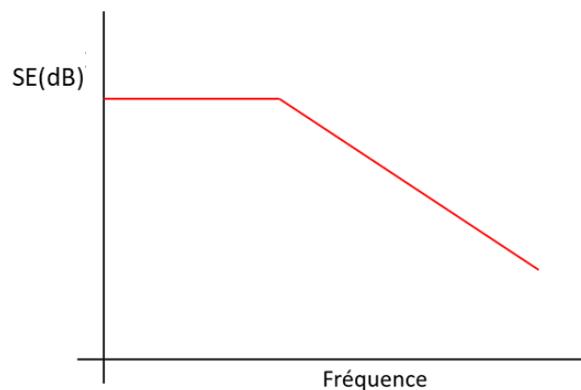


Figure 2.4 : Comportement de l'efficacité de blindage des tresses

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

Cette diminution de l'efficacité de blindage à haute fréquence peut être modélisée par un comportement inductif conduisant à une impédance complexe $Z = R + j\omega L$ [2]. La partie résistive est liée à la conductivité du matériau utilisé tandis que l'inductance est liée à l'effet des trous présents dans la tresse.

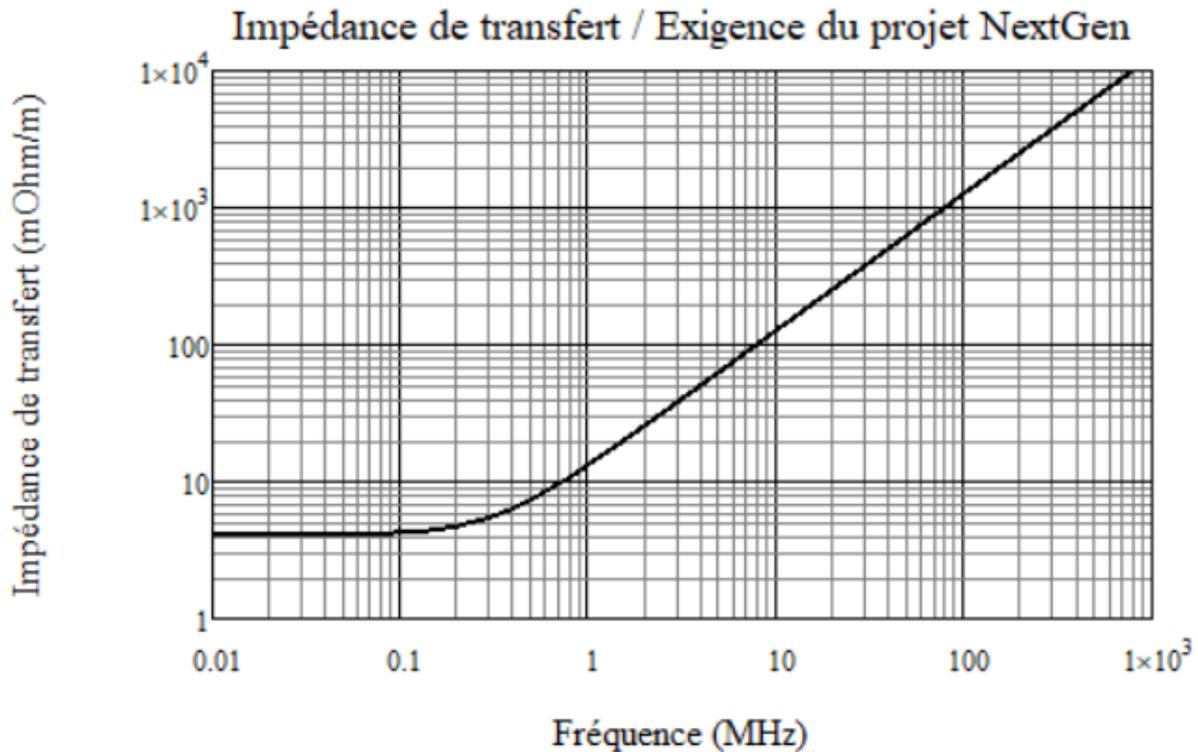


Figure 2.5 : Impédance de transfert, exigence du projet NextGen

La Figure 2.5 présente l'exigence du projet NextGen pour l'impédance de transfert de gaines mais comme indiqué précédemment les premières mesures sont des mesures de l'efficacité de blindage sur échantillons plats dans une configuration 50 Ohms. Pour cela nous avons développé un modèle numérique qui sert à traduire la valeur de l'impédance de transfert exigée en valeur d'efficacité de blindage correspondante en utilisant les équations suivantes :

$$Z_t = R_l \cdot \left[1 + j \cdot \left(\frac{F}{F_0} \right)^x \right] \quad (2.3)$$

Cette équation sera expliquée en détail dans la partie 3.5.

A partir de cette équation nous pouvons déduire la conductivité exigée pour atteindre une valeur de $4 \frac{m\Omega}{m}$, ainsi que la fréquence de coupure F_0 et le coefficient x pour arriver à $2 \frac{nH}{m}$.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

Ces valeurs sont utilisées pour calculer la valeur de l'efficacité de blindage exigée par le projet.

L'équation de l'efficacité de blindage (SE) sera détaillée dans les sections 2.8 et 2.9.

$$SE = 20 \cdot \log \left[\frac{1}{T \left(1 + j \left(\frac{F}{F_0} \right)^x \right)} \right] \quad (2.4)$$

Avec

$$T = (1 - \Gamma^2) e^{-\gamma d} \left[\frac{1}{1 - (\Gamma^2) e^{-2\gamma d}} \right] \quad (2.5)$$

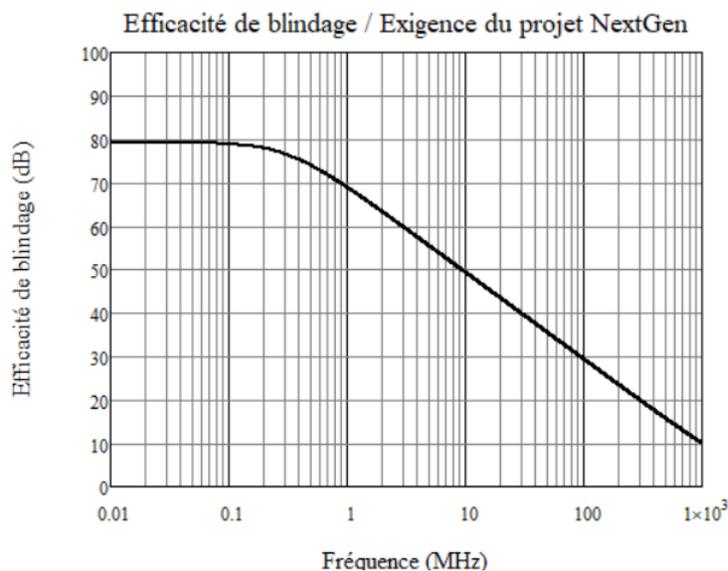


Figure 2.6 : Efficacité de blindage, exigence du projet NextGen

La Figure 2.6 présente la valeur de référence de l'efficacité de blindage qui devra être atteinte dans le projet. Cette valeur est de 80 dB avec une pente de 20 dB en haute fréquence, et elle est notre référence pour les mesures. Notons que la valeur de l'efficacité de blindage de la tresse finale acceptée doit être au-dessus de cette valeur.

Dans la section suivante nous présentons la cellule coaxiale utilisée dans les mesures comme établi au chapitre 1.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

2.3 Cellule coaxiale

2.3.1 Choix de la cellule coaxiale

Comme indiqué précédemment, pour obtenir une dynamique suffisante de 100dB, il faut tout d'abord assurer une transmission à vide la plus proche de 0 dB.

La transmission à vide d'un système sans fil par exemple entre 2 antennes ne peut pas arriver à 0 dB parce qu'elle dépend de la fréquence et de la distance entre elles. Par ailleurs, l'utilisation des antennes ne permet pas d'adresser les basses fréquences (inférieures à quelques MHz). Notre méthode est conforme à la norme ASTM 4935 [3] qui consiste à mesurer l'atténuation à travers un matériau placé transversalement dans une structure coaxiale d'impédance caractéristique de 50Ω coupée en deux morceaux identiques.

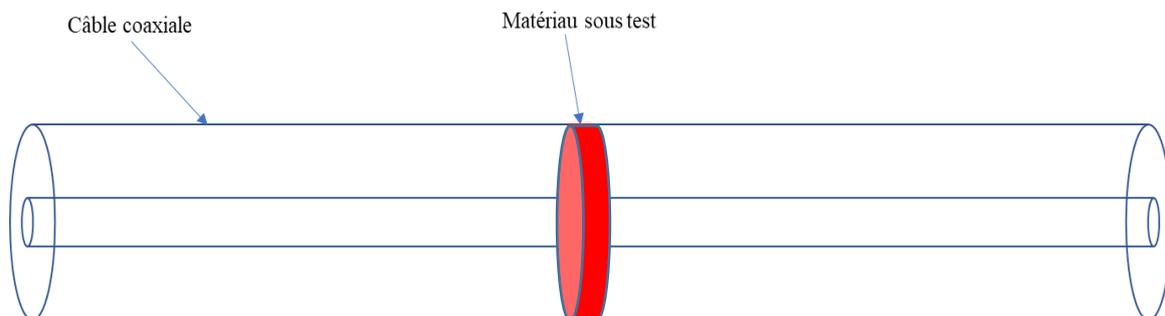


Figure 2.7 : Description de la méthode ASTM 4935

Dans cette configuration, si le conducteur central est coupé cela induit notamment un effet capacitif, ce qui limite la valeur minimale de la bande de fréquence à quelques MHz. Sans continuité du conducteur central, selon [4] cette méthode permet de tester l'efficacité de blindage à partir de 10 MHz. En revanche, la valeur de la fréquence minimale dépend de la capacité introduite alors du rayon du conducteur central et de l'épaisseur du matériau.

La partie suivante présente le design d'une cellule coaxiale avec continuité du conducteur central pour diminuer la fréquence minimale jusqu'au DC.

2.3.2 Design de la cellule coaxiale

Afin de maintenir l'impédance 50Ω et atteindre une section de 100 mm des échantillons à tester, la ligne coaxiale est progressivement agrandie depuis les accès vers le centre de la cellule afin de maintenir une impédance caractéristique constante tout le long de la structure.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

L'impédance caractéristique et les dimensions des conducteurs sont calculées selon l'équation suivante [5] :

$$Z_C = \frac{60}{\epsilon_r} * \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right) \quad (2.6)$$

avec

D_e : diamètre extérieur, D_i : diamètre intérieur et ϵ_r : permittivité relative de l'isolant entre les deux conducteurs (dans notre cas c'est de l'air, ce qui donne $\epsilon_r = 1$).

Par exemple, au centre de la cellule, le matériau à caractériser est disposé transversalement à la direction de propagation. Pour un conducteur central de $D_i = 40$ mm de diamètre, le diamètre intérieur du conducteur extérieur est de $D_e = 92$ mm, permettant l'insertion d'échantillons sous forme de disque de 100 à 110 mm de diamètre.

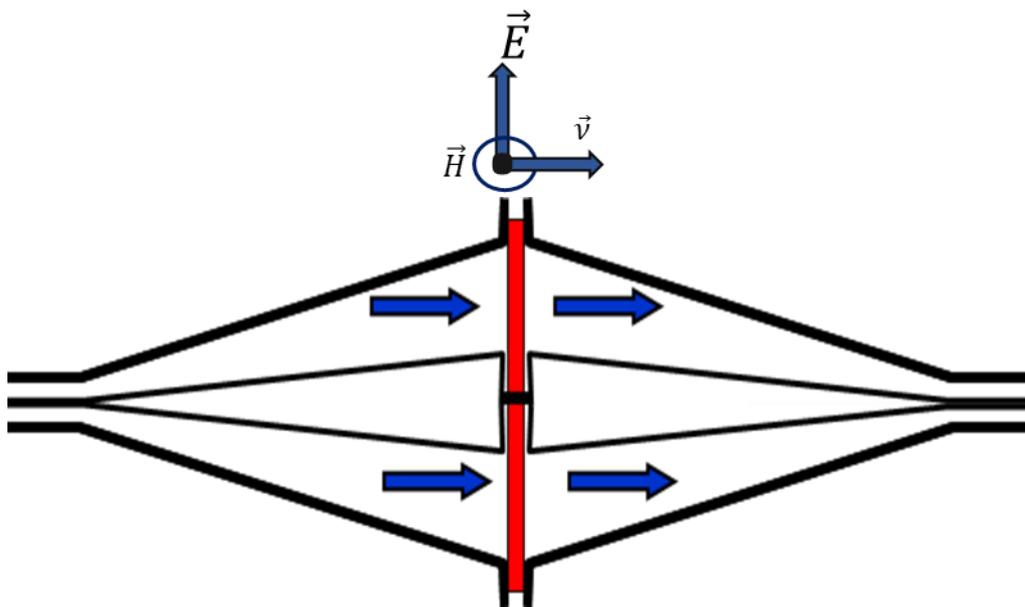


Figure 2.8 : Vue en coupe de la cellule coaxiale avec la propagation du champ

Chapitre 2 : Efficacité de blindage



Figure 2.9 : Cellule coaxiale fabriquée pour tester des échantillons de 100 mm de diamètre

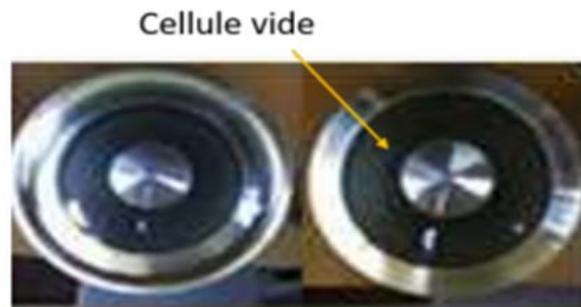


Figure 2.10 : Cellule coaxiale

La continuité entre le conducteur central de la cellule et le matériau sous test est assurée en ajoutant un pin de connexion des deux côtés de l'échantillon.



Figure 2.11 : Pin de connexion



Figure 2.12 : Assemblage entre pin de connexion et échantillon sous test

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

Avec cette configuration l'affaiblissement ou l'efficacité de blindage est obtenue par présence d'un court-circuit (Figure 2.13) entre le conducteur extérieur et le conducteur central, pour cela une très bonne continuité électrique est exigée et son impact est expliqué par la suite dans ce travail.

Echantillon : Structure tissée métallique



Figure 2.13 : Cellule coaxiale avec échantillon sous test

Les mesures faites pour la tresse présentée dans les figures précédentes sont données dans la partie suivante.

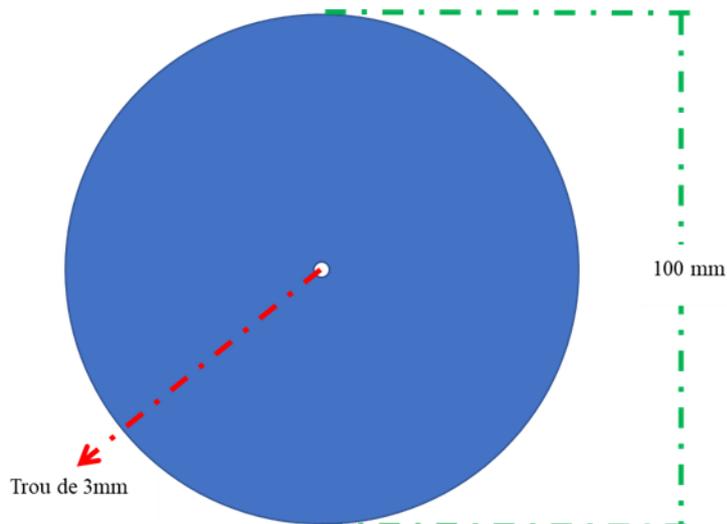


Figure 2.14 : Forme d'échantillon à tester dans la cellule coaxiale de diamètre de 100 mm

Afin de répondre aux différentes exigences des partenaires industriels, une autre cellule coaxiale a été conçue et fabriquée pour tester des échantillons de diamètre de 50 mm à 70 mm. Avec un diamètre intérieur $D_i = 17$ mm et un diamètre extérieur $D_e = 39$ mm.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

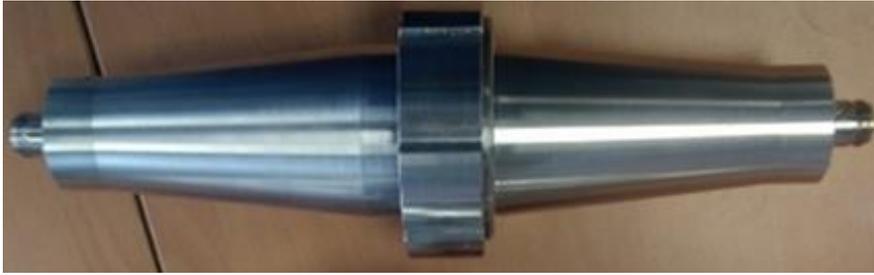


Figure 2.15 : Cellule coaxiale fabriquée avec diamètre d'échantillon de 50 mm à 70 mm

2.3.3 Validation de la cellule coaxiale

Premièrement une simulation électromagnétique de la partie centrale de la cellule coaxiale à vide (sans ajout de matériau à caractériser) est faite à l'aide de l'outil de simulations électromagnétique HFSS pour permettre de valider les mesures à vide dans un premier temps.

Une première simulation est faite pour la cellule coaxiale 50 mm en utilisant comme matériau l'aluminium intégré dans HFSS, la configuration simulée est présentée à la figure suivante.

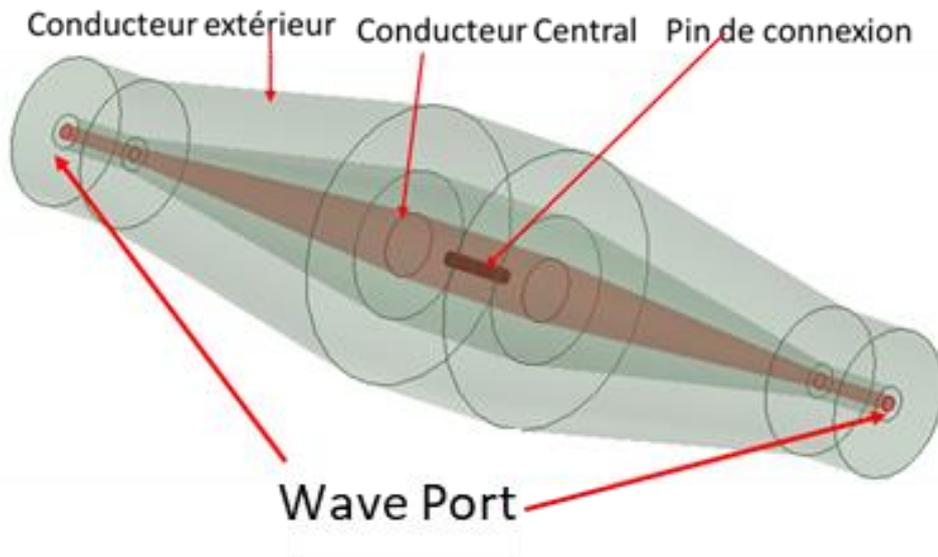


Figure 2.16 : Cellule coaxiale sur HFSS

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

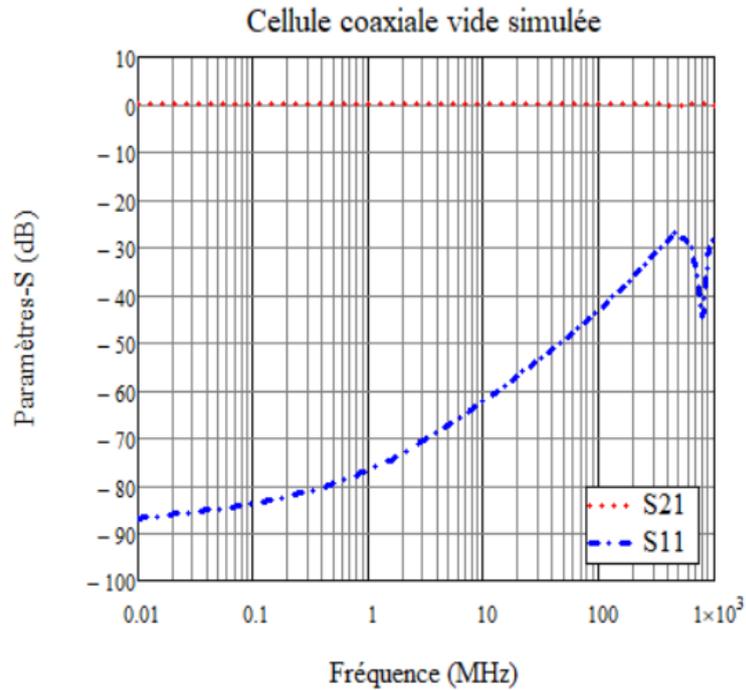
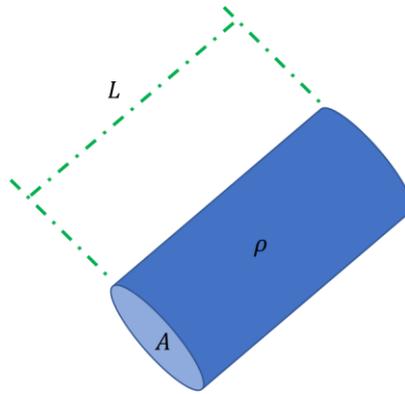


Figure 2.17 : Résultats de simulation de la cellule coaxiale vide

Les résultats de la Figure 2.17 montrent que cette forme coaxiale permet d'avoir une réflexion inférieure à -25 dB de DC jusqu'à 1 GHz et une transmission proche de 0dB sur toute la bande de fréquence.

Pour pouvoir faire une comparaison entre la simulation et la mesure de la cellule fabriquée, il faut connaître la résistivité du matériau de la cellule fabriquée.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage



(a)



(b)

Figure 2.18 : Mesure de la résistivité du matériau utilisé dans la fabrication de la cellule coaxiale

La Figure 2.18 montre la méthode de mesure de la résistivité du matériau par un milli-ohmmètre avec la méthode de 4 points [6]. Le cylindre mesuré à une longueur $L = 30$ mm et un diamètre de 8 mm, la résistance mesurée est $R = 3.347$ mΩ. La résistivité "ρ" et encore la conductivité "σ" sont calculées à partir des équations suivantes :

$$R = \frac{\rho * L}{A} \quad (2.7)$$

avec la surface $A = \pi * \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 50.265$ mm²

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = 1.783 * 10^5 \left(\frac{S}{m}\right) \quad (2.8)$$

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

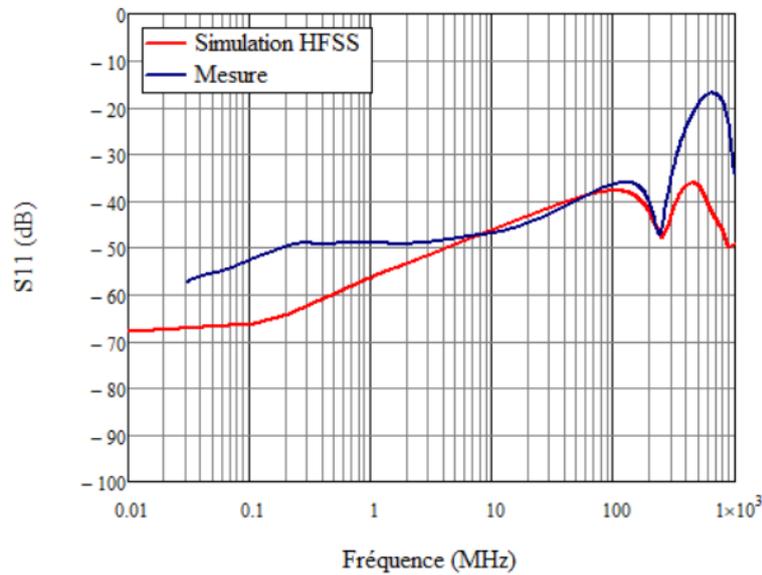


Figure 2.19 : Comparaison simulation et mesure de la réflexion de la cellule coaxiale vide

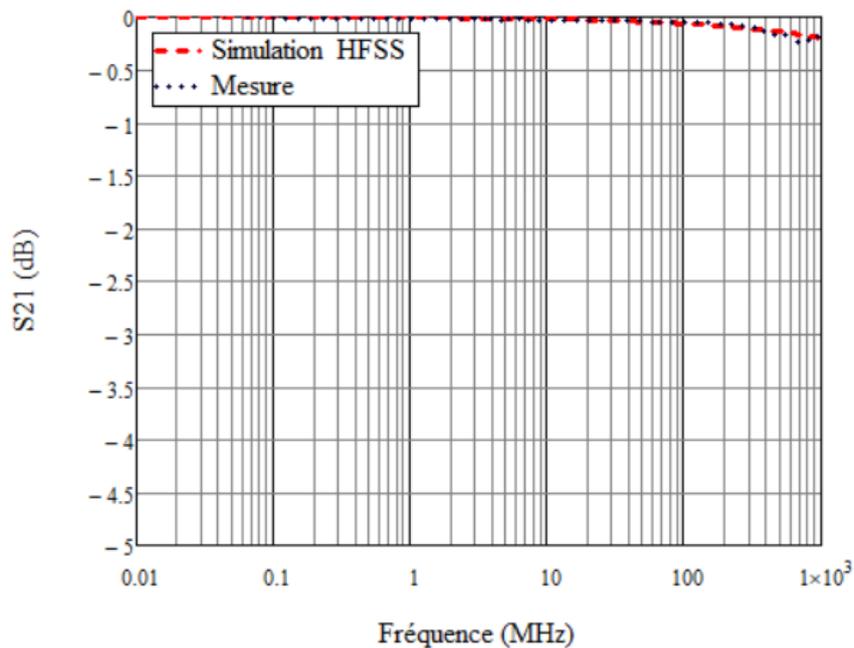


Figure 2.20 : Comparaison simulation et mesure de la transmission de la cellule coaxiale vide

La Figure 2.19 et la Figure 2.20 présentent la comparaison entre la réflexion et la transmission pour la cellule coaxiale vide entre la simulation et la mesure. Pour la transmission, les 2 courbes montrent que le S_{21} de la cellule coaxiale à vide est proche 0 dB sur toute la bande de fréquence ce qui est important pour la dynamique de mesure de l'efficacité de blindage.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

Pour la réflexion, on note que la mesure de la cellule coaxiale permet de garantir une réflexion de -15 dB jusqu'à 1 GHz. La différence entre la simulation et la mesure est liée à différents paramètres. Premièrement, entre le 10 kHz et 1 MHz cette différence est liée au niveau de bruit de l'appareil de mesure en réflexion (environ -50 dB). A partir de 200 MHz, la différence de niveau est peut-être due aux zones des connecteurs qui peut présenter des discontinuités liées à l'usinage mécanique.

Nous considérerons donc par la suite cette configuration pour nos simulations ultérieures.

2.3.4 Modélisation électrique de la cellule coaxiale

Nous présentons ici un modèle électrique de la cellule coaxiale en utilisant le logiciel ADS. La cellule est modélisée en première approximation par deux lignes d'impédance caractéristique 50Ω séparées par un réseau représentant le dispositif sous test d'impédance $Z = R + j\omega L$ placé en parallèle entre les deux lignes.

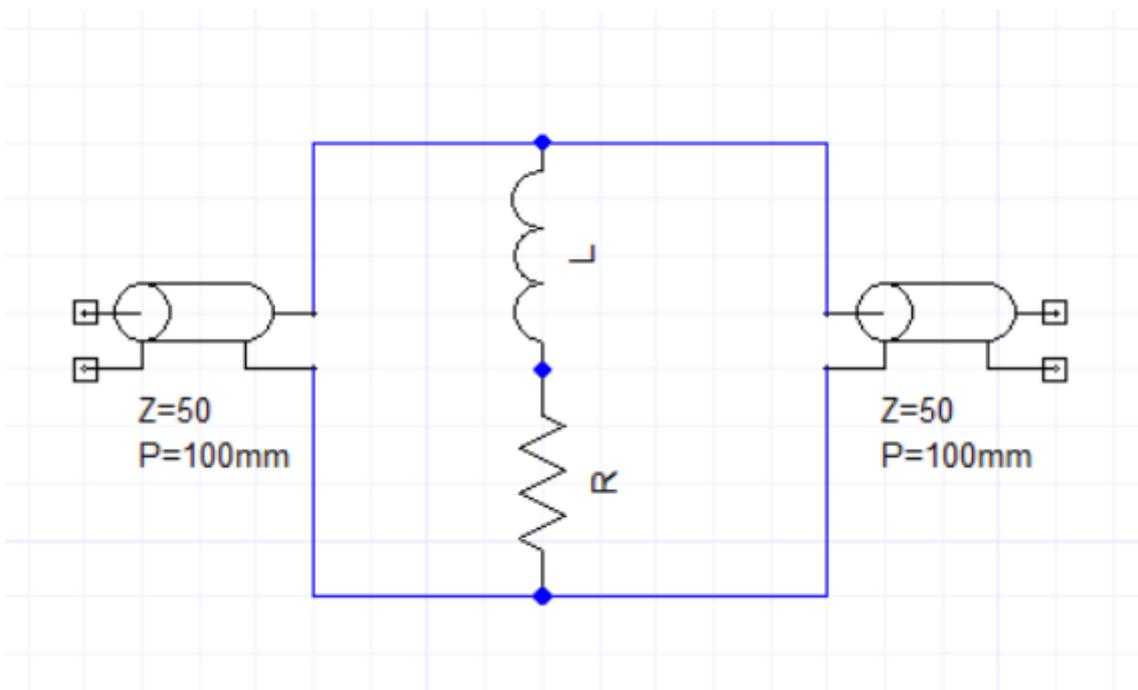


Figure 2.21 : Modèle électrique de la cellule coaxiale

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

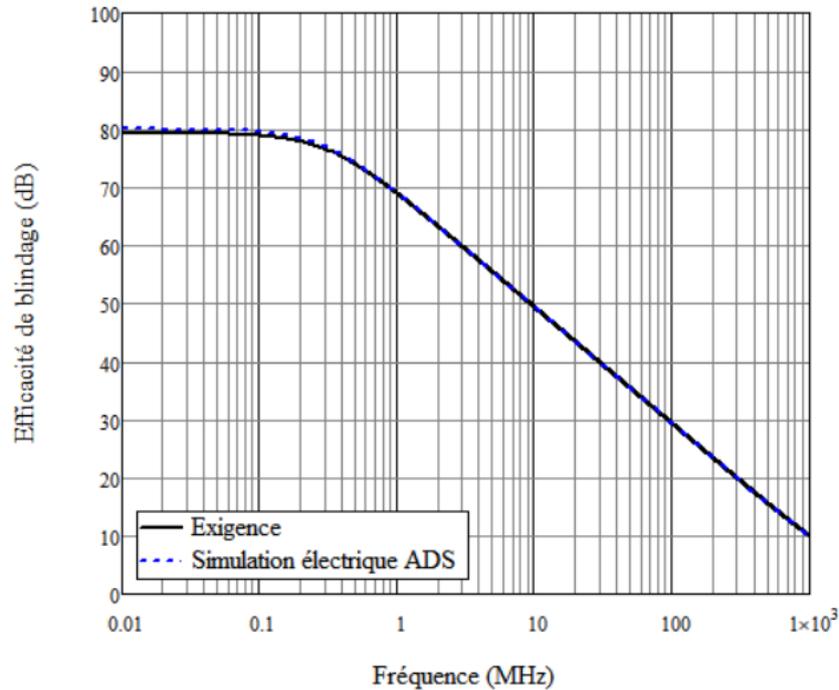


Figure 2.22 : Comparaison exigence et simulation électrique pour l'efficacité de blindage

La Figure 2.22 présente la comparaison entre l'exigence du projet et la simulation électrique de l'efficacité de blindage des tresses, avec ce modèle nous obtenons $R = 2.5m\Omega$ et $L = 1.35nH$.

Sur la Figure 2.23 nous présentons l'efficacité de blindage correspondant à des inductances de 0.1 nH, 0.5 nH et 1.35 nH avec une résistance R de 2.5 m Ω , cette valeur correspond à la résistance de la tresse de référence.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

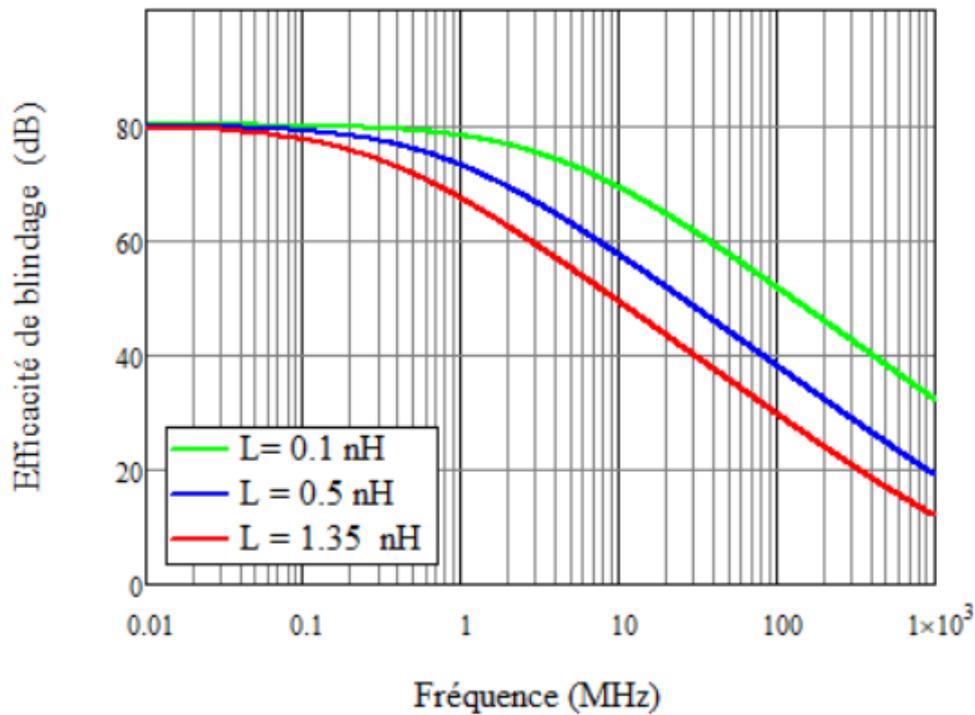


Figure 2.23 : Variation de l'efficacité de blindage avec l'inductance avec résistance de $2.5 \text{ m}\Omega$

Sur la Figure 2.23, on observe que plus l'inductance augmente plus l'efficacité de blindage diminue en hautes fréquences. A noter que cette inductance est proportionnelle à la taille et au nombre des ouvertures dans la tresse de blindage. Cet effet sera étudié dans les sections suivantes.

2.4 Mesure de l'efficacité de blindage des tresses métalliques

Les tresses métalliques sont fabriquées à partir de fils métalliques, ce tressage donne la forme d'une grille.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

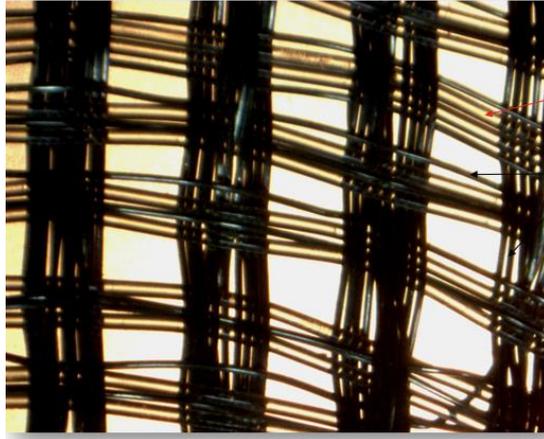


Figure 2.24 : Photo d'une tresse métallique agrandie

A partir de cette configuration deux grandes catégories affectent la valeur de l'efficacité de blindage.

- La résistance/section de l'échantillon qui est liée à la conductivité du matériau utilisée ce qui affecte le résultat de l'efficacité de blindage en basse fréquence.
- Le taux de remplissage ou la densité des trous par rapport à la surface totale de la tresse, ce remplissage est associé aux dimensionnements et aux nombres des ouvertures.

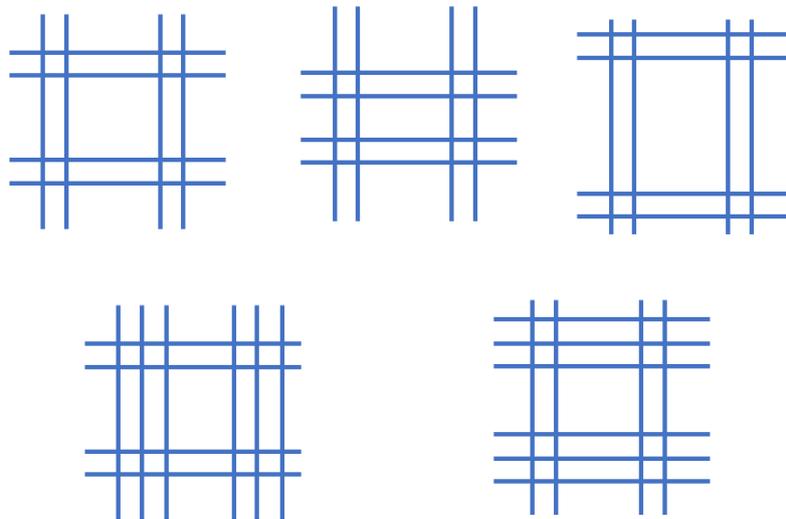


Figure 2.25 : Exemples de différentes configurations de tresse

L'étude physique liée aux problèmes indiqués ci-dessus est faite par une autre thèse dans le projet NextGen 'Thèse de Farid Haddad, laboratoire Hubert Curien, Université Jean Monnet, Saint Etienne).

Dans nos travaux, nos études sont effectuées à partir des mesures.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

2.4.1 Mesure de l'efficacité de blindage pour la tresse de référence

La mesure est faite pour une tresse métallique de référence pour le projet NextGen par la cellule coaxiale de diamètre d'échantillon de 100 mm et celle de diamètre d'échantillon de 70 mm.



Figure 2.26 : Tresse métallique de référence pour le projet NextGen

Cette tresse est fabriquée à partir d'un ruban tissé métallique de Cuivre Nickelé, elle est utilisée comme référence dans le projet.

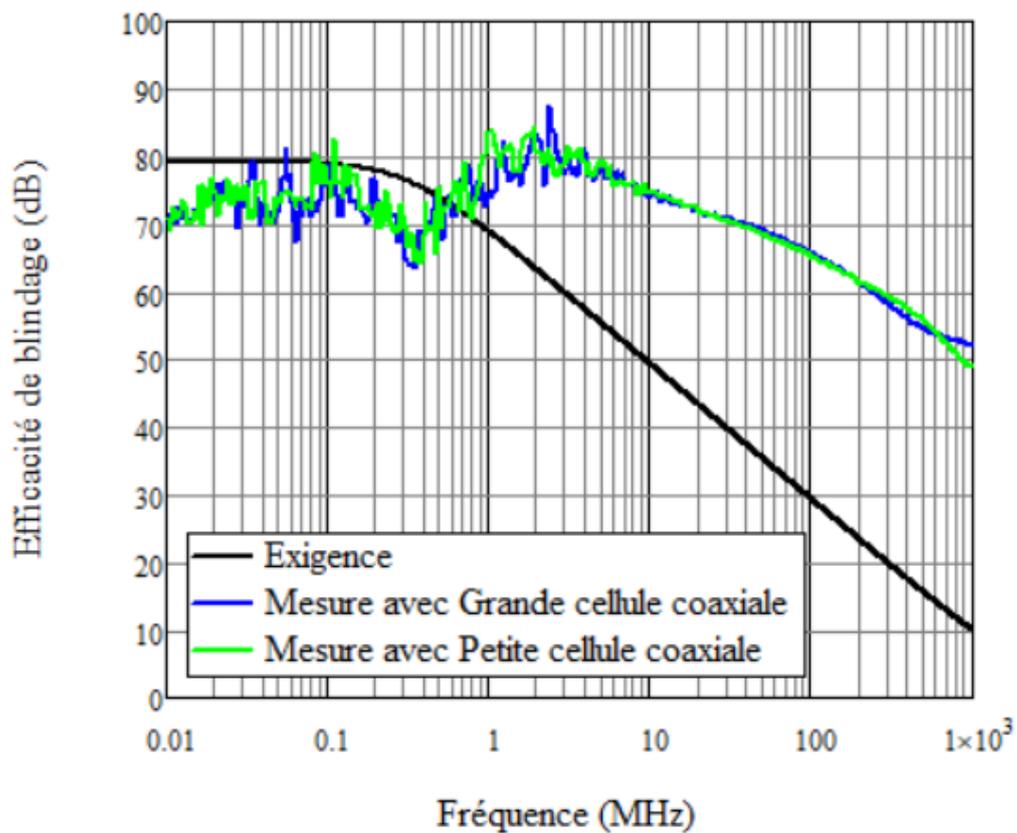


Figure 2.27 : Mesure de l'efficacité de blindage de la tresse de référence du projet avec les deux cellules coaxiales

La Figure 2.27 présente les mesures préliminaires de l'efficacité de blindage pour une tresse métallique de référence pour le projet. Les mesures sont faites par les deux cellules coaxiales.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

Les graphes montrent que les deux cellules coaxiales donnent un résultat identique. Néanmoins entre 10 kHz et 1 MHz, le résultat de la mesure n'est pas satisfaisant, dû au niveau de sensibilité du VNA. Cette mesure est faite par le VNA ROHDE&SHWARZ ZVL6 avec une IFBW de 1 kHz, cette bande passante n'est pas la résolution minimale mais les performances de l'appareil ne permettent pas de descendre en dessous pour une bande de fréquence allant de 10 kHz à 1 GHz. Une amélioration de la dynamique de mesure est donc indispensable pour obtenir des résultats corrects de mesure.

Par la suite nous considérons la petite cellule coaxiale avec le diamètre d'échantillon entre 50 mm et 70 mm.

2.4.2 Application : mesure de l'efficacité de blindage avec un taux de remplissage de la tresse dans la cellule coaxiale

Nous avons étudié l'impact du remplissage partiel de la tresse dans la cellule. (Figure 2.28)

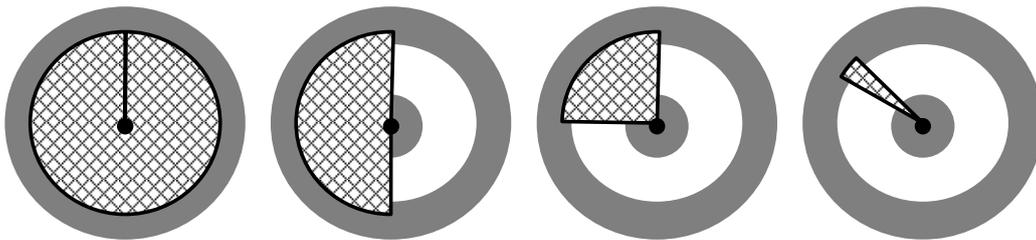


Figure 2.28 : Taux de remplissage de la surface de la cellule 100%, 50%, 25% et 10%

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

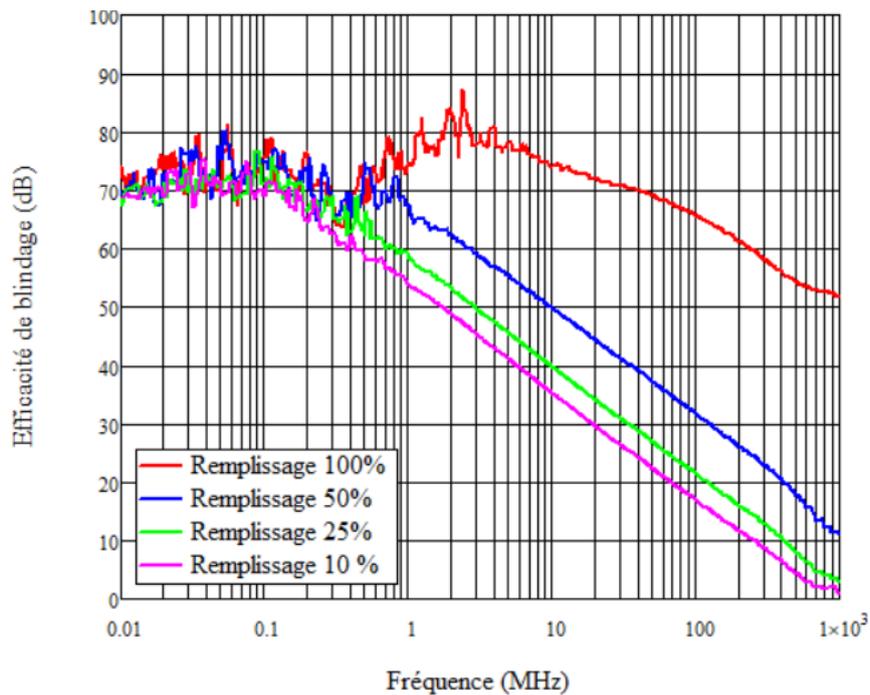


Figure 2.29 : Mesure de l'efficacité de blindage pour le taux de remplissage de la tresse de référence dans la cellule coaxiale

Les mesures de la Figure 2.29 montrent que l'efficacité de blindage mesurée par la cellule coaxiale est le résultat entre la résistance de l'échantillon et le passage des ondes électromagnétiques par l'ouverture. La conséquence est que la continuité électrique réalisée par l'échantillon entre le conducteur central et le conducteur extérieur de la cellule est essentielle.

Dans nos travaux nous avons mesuré différents types d'échantillons en forme de tresse avec différentes configurations de tressage (nombre de fil, dimensions des ouvertures, rabouillage).

2.4.3 Effet des ouvertures sur l'efficacité de blindage

Dans cette section nous présentons la mesure de deux tresses métalliques fabriquées avec le même fil métallique en Aluminium mais avec différents diamètres des ouvertures, dont les mesures sont illustrées dans les figures suivantes.



(a)



(b)

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

Figure 2.30 : Tresses métalliques en ALU, (a) ouverture diamètre 0.4 mm, (b) ouverture diamètre 0.45 mm

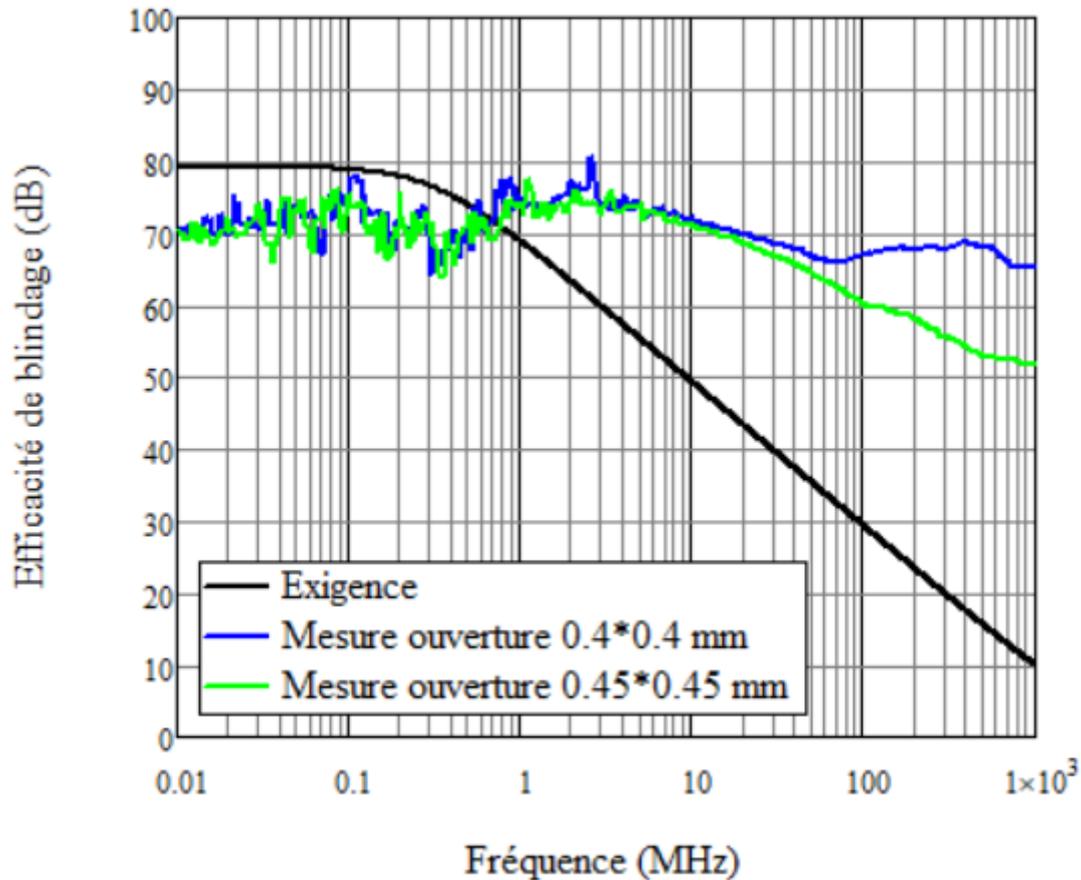


Figure 2.31 : Efficacité de blindage pour les tresses en ALU avec ouvertures de diamètres de 0.4 mm et 0.45 mm

La Figure 2.31 présente les résultats de mesure pour les tresses en ALU avec ouverture de 0.4 mm et 0.45 mm respectivement. Les graphes montrent qu'à basse fréquence les mesures sont identiques parce que ces tresses sont fabriquées du même fil métallique. Aux fréquences plus élevées, la valeur de l'efficacité de blindage augmente avec la diminution de l'ouverture.

2.4.4 Effet du nombre de fils sur la valeur de l'efficacité de blindage

La fabrication de la tresse est faite à partir des fils métalliques divers. Dans cette section nous présentons la comparaison de mesure pour une tresse métallique en Cuivre Nickelé mais avec des nombres de fils différents. Le nombre de fils est donné pour une surface de 6cm×4 cm.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage



Figure 2.32 : Tresses en Cuivre Nickelé, (a) 220 fils, (b) 440 fils

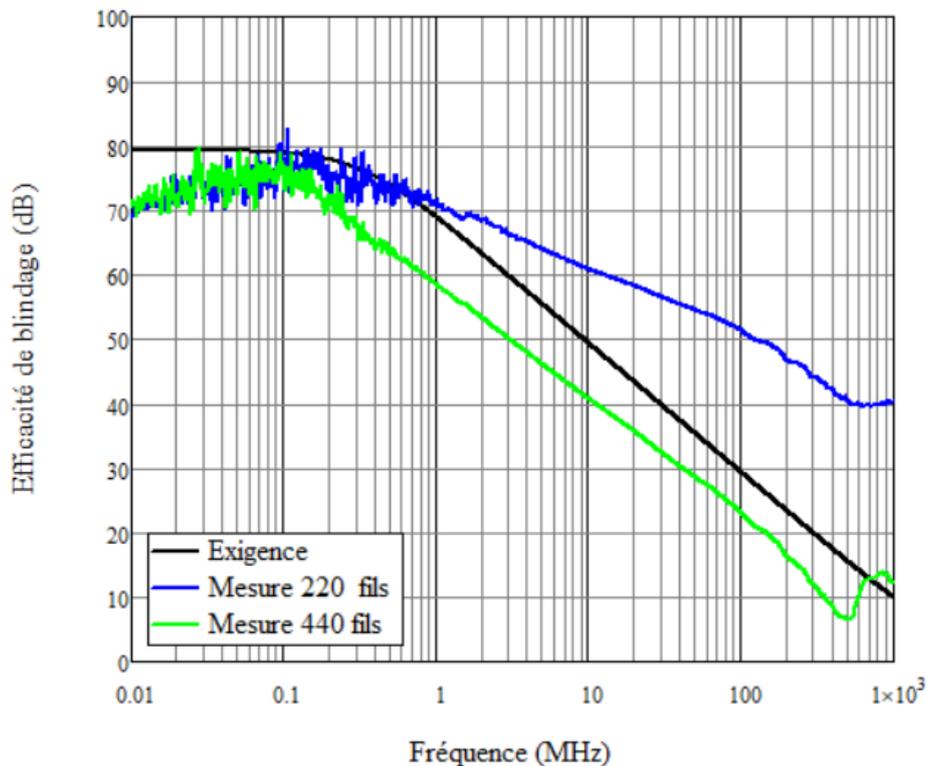


Figure 2.33 : Mesure de l'efficacité de blindage pour une tresse en cuivre Nickelé avec 220 fils et 440 fils respectivement

Sur la Figure 2.33, nous présentons les résultats de mesure de l'efficacité de blindage pour une tresse métallique en ALU avec 220 fils et 440 fils. En effet, pour la tresse de 440 fils il y a 10×10 duites/cm, ce qui donne 100 ouvertures, au lieu de 6×4 duites/cm (24 ouvertures) dans la tresse de 220 fils. La duite/cm, dans le maillage d'une tresse, c'est le nom donné aux passages de la trame à travers 1 cm de hauteur de la chaîne. Cela implique une augmentation de nombres des ouvertures, alors une augmentation de propagation de l'onde électromagnétique par ces ouvertures et par conséquence une diminution de la valeur de l'efficacité de blindage.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

2.4.5 Effet de raboutage sur la valeur de l'efficacité de blindage des tresses.

Les conditions de fabrications des tresses nécessitent un raboutage entre les bandes de tissus métalliques. Nous avons donc également étudié l'effet du raboutage sur la valeur de l'efficacité de blindage.

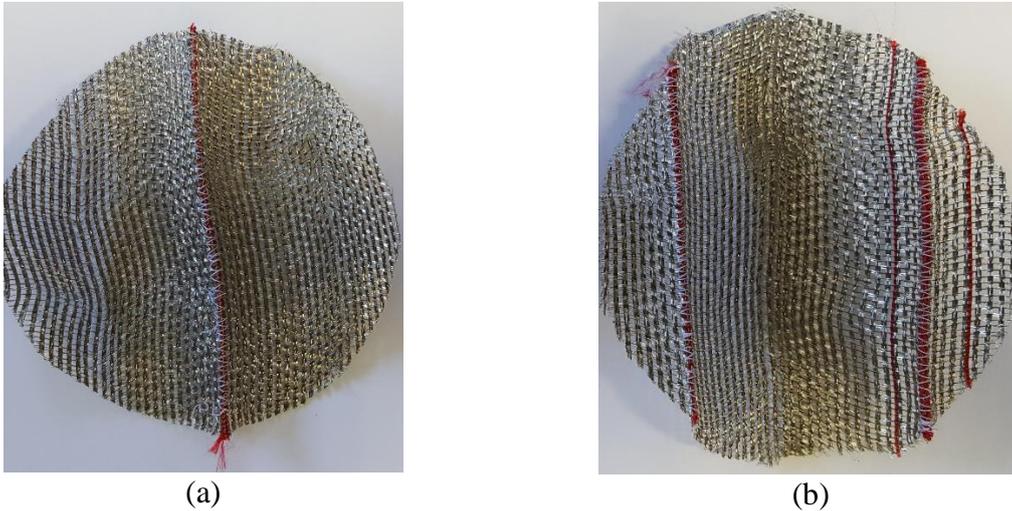


Figure 2.34 : Tresse en ALU avec raboutage, (a) 1 raboutage, (b) 2 raboutages

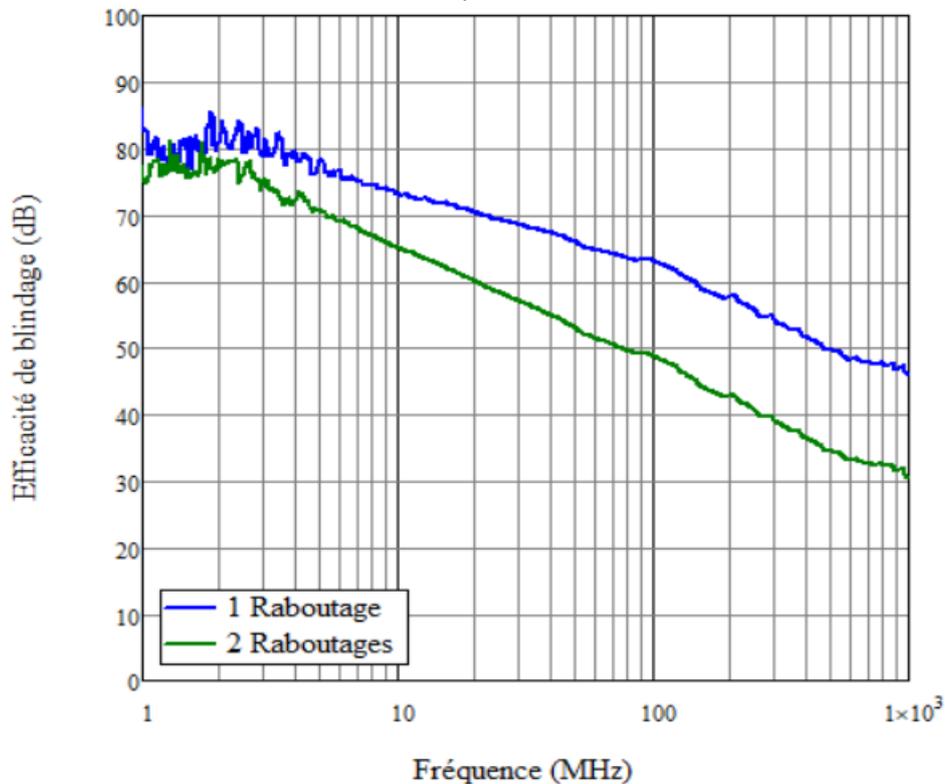


Figure 2.35 : Mesure de l'efficacité de blindage pour une tresse en ALU avec 1 et 2 raboutages respectivement

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

La Figure 2.35 présente les résultats de mesure de l'efficacité de blindage pour une tresse en ALU mais avec différents raboutages. La tresse avec un raboutage apparaît comme composée de deux pièces.

En basse fréquence il n'y a pas de différence sur les mesures, cependant aux fréquences plus élevées, le raboutage semble augmenter les ouvertures et donc en ajoutant un raboutage l'efficacité de blindage diminue.

Par ailleurs, ce type de raboutage entraîne une sensibilité du test à l'écrasement de l'échantillon, en plus de l'élasticité ce qui impacte la reproductibilité des mesures. Ce qui est présenté par la figure suivante.

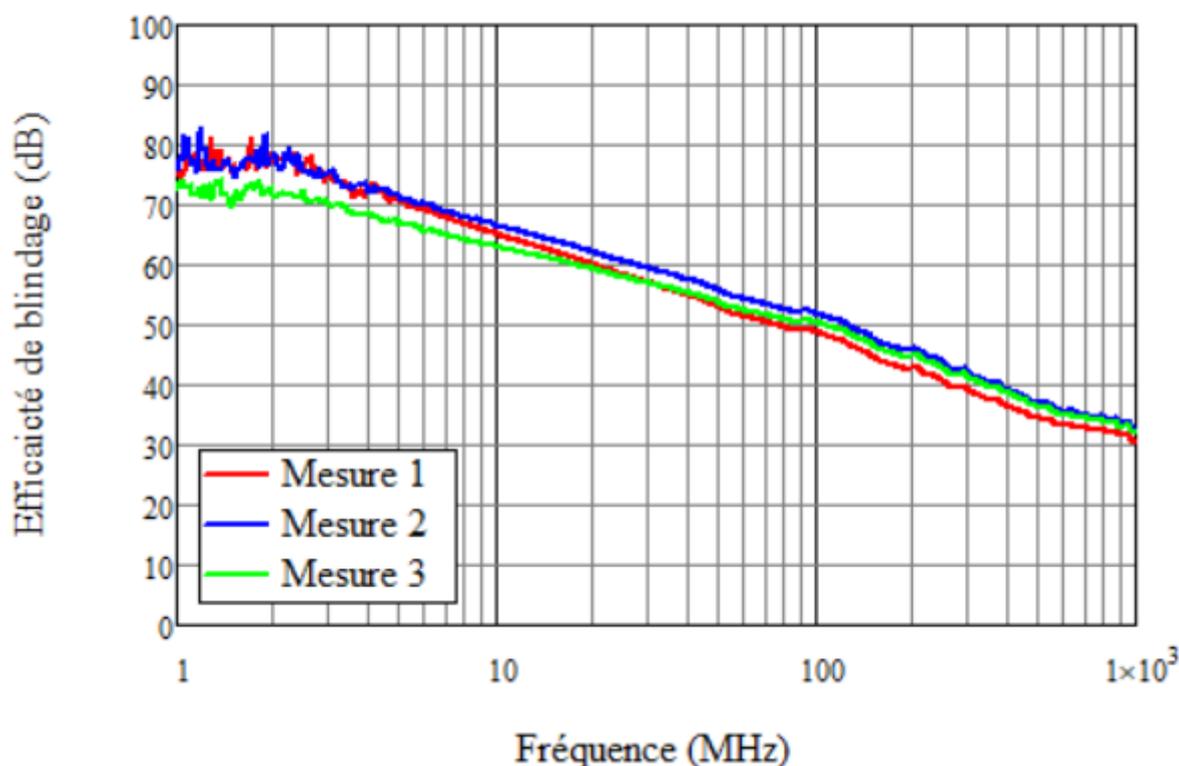


Figure 2.36 : Reproductibilité de mesure de l'efficacité de blindage pour la tresse en ALU avec 2 raboutages

La Figure 2.36 présente la reproductibilité de mesure de l'efficacité de blindage pour une tresse en ALU avec 2 raboutages. La mesure est faite trois fois, une incertitude de 1 à 3 dB est obtenue. Cette différence est liée en basse fréquence au serrage mécanique de la cellule coaxiale avec la tresse et en haute fréquence à l'élasticité de la tresse lors de l'assemblage avec la cellule de test.

Par conséquent l'efficacité de blindage des tresses dépend de la conductivité du matériau utilisé qui a un impact sur la valeur de l'efficacité de blindage en basse fréquence, le nombre

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

de trous, le diamètre des trous, le nombre de fils et aussi l'élasticité de la tresse sont des paramètres importants qui affectent le résultat de l'efficacité de blindage en haute fréquence.

2.5 Mesure de l'efficacité de blindage des tricots

Le tricotage est une autre méthode de fabrication des textiles métalliques pour le blindage électromagnétique.

L'avantage du tricotage par rapport au tressage est dans la quantité des fils conducteurs utilisés et cela résulte à une diminution du poids de la gaine. C'est un des objectifs du projet NextGen.



Figure 2.37 : Schémas de tricotage

Du point de vue électromagnétique, l'utilisation de tricotage diminue l'effet des réflexions multiples à l'intérieur d'une tresse.

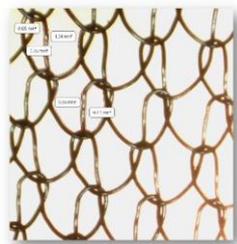


Figure 2.38 : Photo de tricot agrandi

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

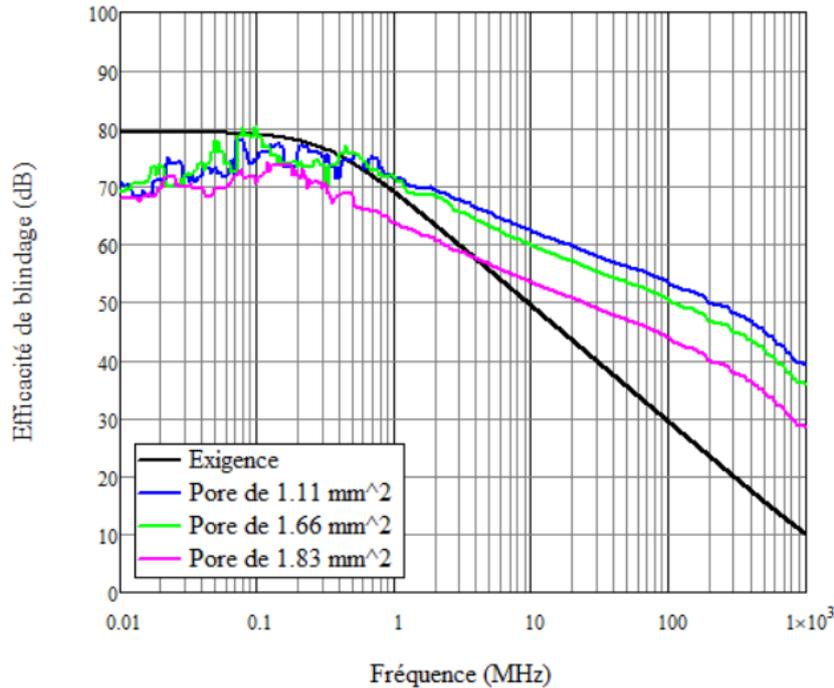


Figure 2.39 : Mesure de l'efficacité de blindage pour le tricot ci-dessus à différents pores.

La Figure 2.39 présente les résultats de mesure de l'efficacité de blindage faites sur des tricots de type de la Figure 2.38 en utilisant un fil de Cuivre Nickelé avec différentes tailles de pores en mm^2 , les pores ressemblent aux trous dans le tressage. Nous remarquons que le comportement de l'efficacité de blindage de tricots ressemble au comportement des tresses. La valeur en basse fréquence dépend de la conductivité de matériau. En haute fréquence, un des paramètres qui affecte l'efficacité de blindage est la taille des pores.

2.6 Amélioration de la dynamique de l'appareil de mesure

Rappelons tout d'abord que la dynamique de mesure correspond au rapport entre la mesure de l'efficacité de blindage à vide avec la mesure de l'efficacité de blindage d'un échantillon qui blinde parfaitement. Notons que la dynamique de mesure dépend des performances combinées de l'appareil de mesure et de la cellule de test.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

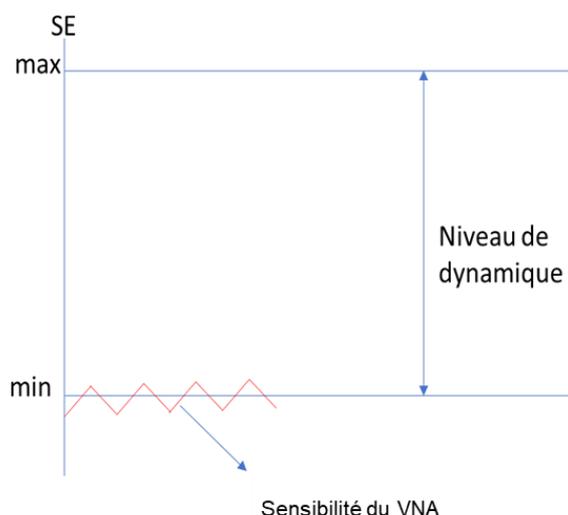


Figure 2.40 : Définition du niveau de dynamique

Pour améliorer le niveau de dynamique, une première idée consiste à baisser le niveau de bruit du VNA en diminuant la résolution en fréquence IFBW du VNA, la valeur minimale dépend de l'appareil utilisé. La Figure 2.41 présente la comparaison du niveau de bruit pour les deux analyseurs vectoriels utilisés. En prenant en compte la transmission à vide de la cellule coaxiale avec le VNA HP 8753 D, une dynamique de mesure meilleure que 100 dB est obtenue (puisque son niveau de bruit est inférieur à -100 dB sur toute la bande de fréquences considérée).

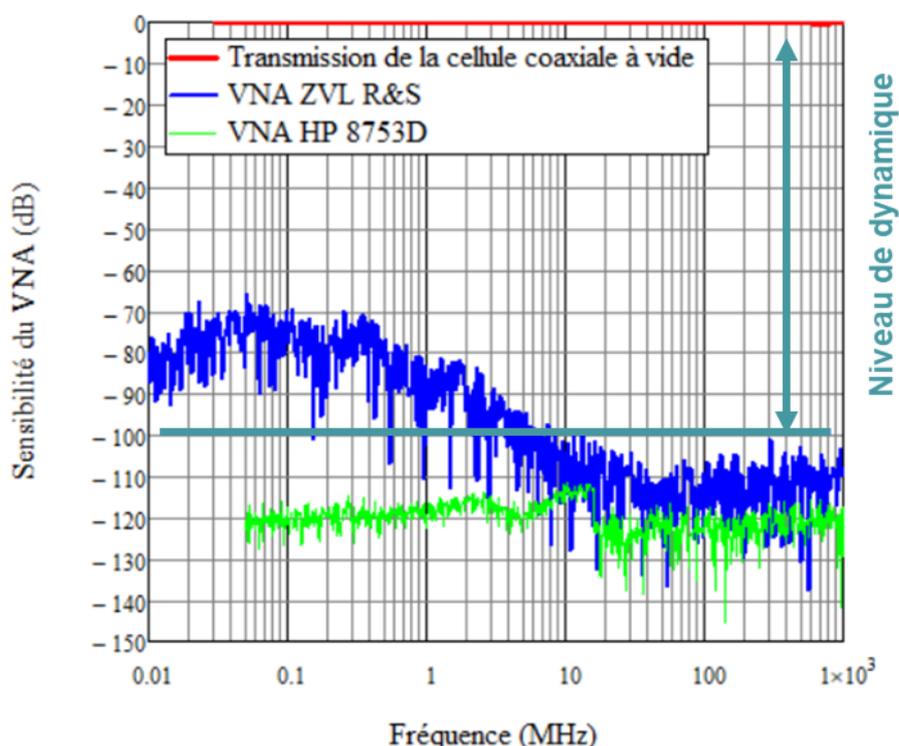


Figure 2.41 : Comparaison de la sensibilité obtenue avec les deux VNAs HP8753D et R&S

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

	VNA ROHDE&SHWARZ ZVL6	VNA HP 8753D
Bande de fréquence	10 kHz – 1 GHz	50 kHz – 1 GHz
Puissance	20 dBm	10 dBm
BW	1 kHz	10 Hz (minimal)

Tableau 2.1 : Paramètres des VNA utilisés dans les mesures

2.6.1 Application sur la tresse de référence

La tresse métallique de référence est mesurée avec les deux VNAs en prenant en compte les paramètres de mesure comme présenté dans le tableau ci-dessous.

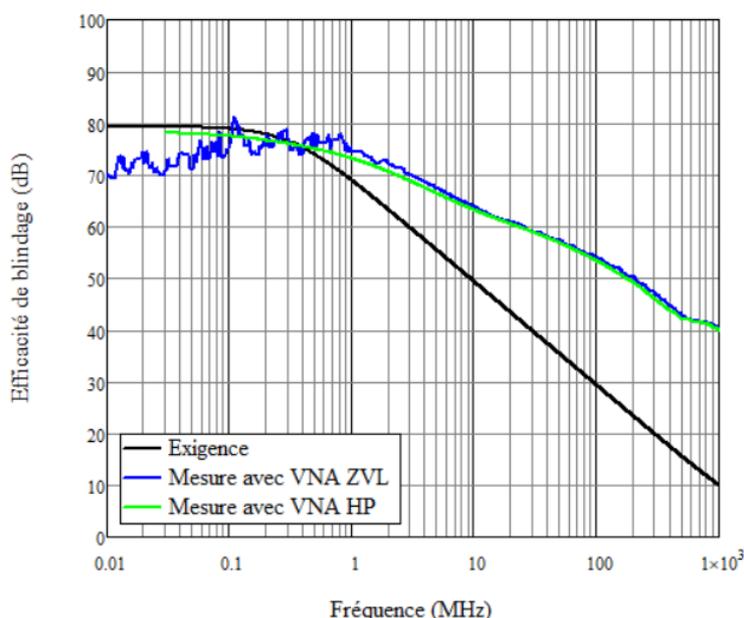


Figure 2.42 : Comparaison des mesures avec les deux VNA pour la tresse métallique de référence

La Figure 2.42 présente la comparaison des mesures de l'efficacité de blindage de l'échantillon de tresse métallique réalisée avec les deux VNA. La mesure à l'aide de l'analyseur HP8753D permet d'améliorer la mesure en dessous de 1 MHz. Notons que pour le VNA R&S la valeur de IFBW n'est pas la valeur minimale mais notre appareil donne une erreur de calibrage pour une IFBW de 10 Hz sur la bande de fréquence allant du 10kHz à 1 GHz.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

2.6.2 Validation de mesure sur autre tresse métallique

Dans cette partie nous présentons une application de mesure avec les deux analyseurs vectoriels sur une autre tresse métallique.



Figure 2.43 : Tresse IFTH5

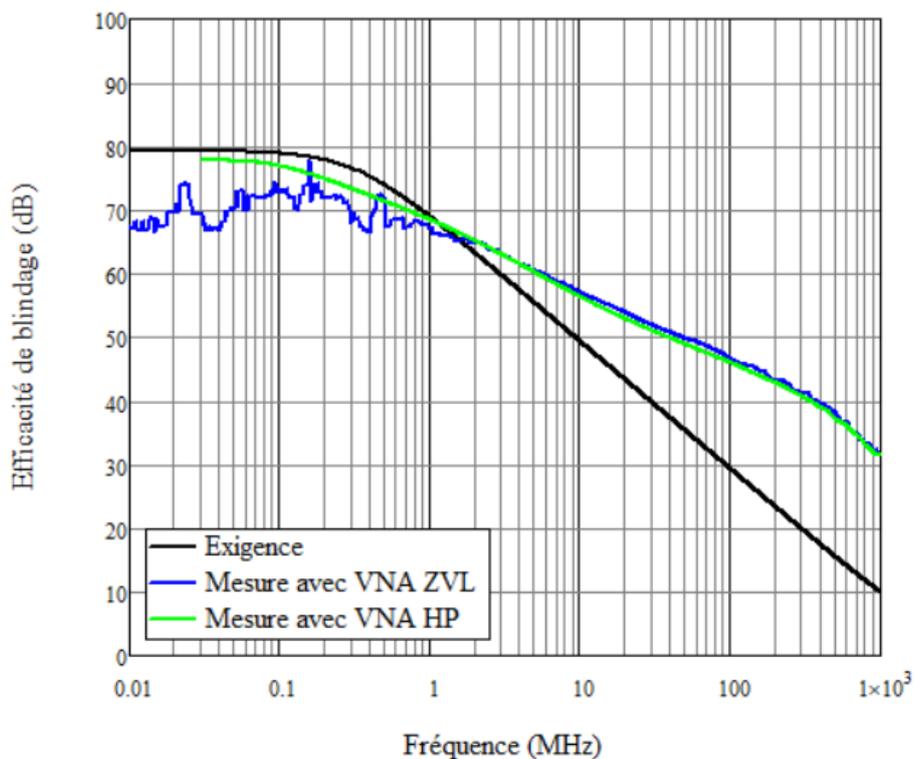


Figure 2.44 : Mesure de l'efficacité de blindage de la tresse IFTH5 avec les 2 VNAs

La Figure 2.44 présente les comparaisons de mesures faites par les deux VNAs sur la tresse IFTH 5. Cette tresse est fabriquée de fil de cuivre nickelé avec une épaisseur totale de 0.71 mm et 220 fils sur 6 cm*4 cm. Ces résultats montrent qu'en basse fréquence la valeur de l'efficacité de blindage est de 78 dB ce qui est proche de la valeur exigée par le projet de 80 dB. En haute fréquence, l'efficacité de blindage diminue à la suite du passage de l'onde électromagnétique à travers les trous.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

2.6.3 Exemple d'amélioration dans la fabrication d'une tresse à partir de nos mesures

A partir de nos mesures notre partenaire a mis au point une nouvelle tresse (IFTH8) avec le même fil conducteur mais une épaisseur totale de 0.72 mm et 210 fils sur 6 cm * 4cm.

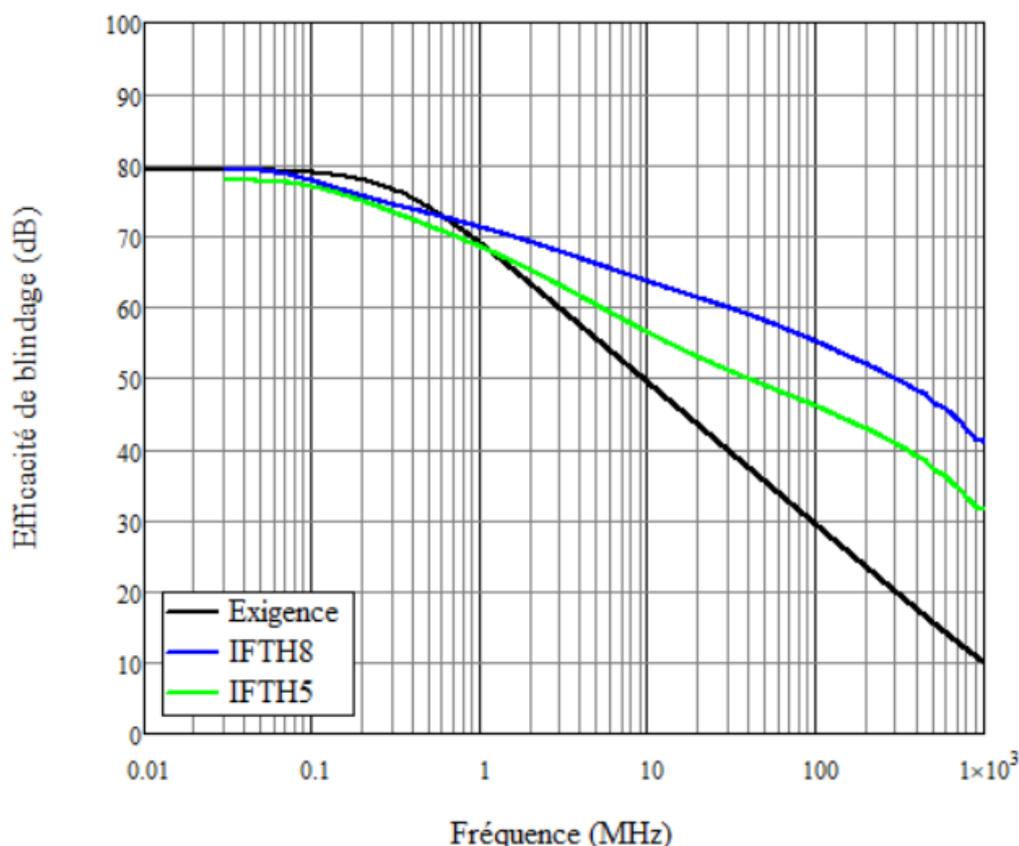


Figure 2.45 : Mesure de l'efficacité de blindage pour IFTH5 et IFTH8 en comparant avec l'exigence

La Figure 2.45 présente les résultats de mesure des deux tresses IFTH (IFTH5 et IFTH 8) en comparant avec la référence de l'efficacité de blindage exigée par le projet, les graphes montrent que les performances de la tresse ont été améliorées.

En effet le partenaire a travaillé sur l'épaisseur totale de l'échantillon ce qui a un impact sur la valeur de l'efficacité de blindage en basse fréquence, avec la nouvelle tresse IFTH8, cette valeur est de 80 dB au lieu de 78 dB pour IFTH5, cet effet de l'épaisseur sera étudié aussi prochainement. De plus, à haute fréquence l'amélioration de l'efficacité de blindage est atteinte avec le travail fait sur le nombre de fils.

La section suivante présente le problème de la continuité électrique indiquée dans la partie 2.4.2

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

2.7 Problème de continuité électrique

Le problème de continuité électrique nous est apparu dans la mesure d'un échantillon composite de polymère chargé. Cet échantillon est normalement fabriqué en mettant en sandwich les charges électriques dans une matrice de polymère.

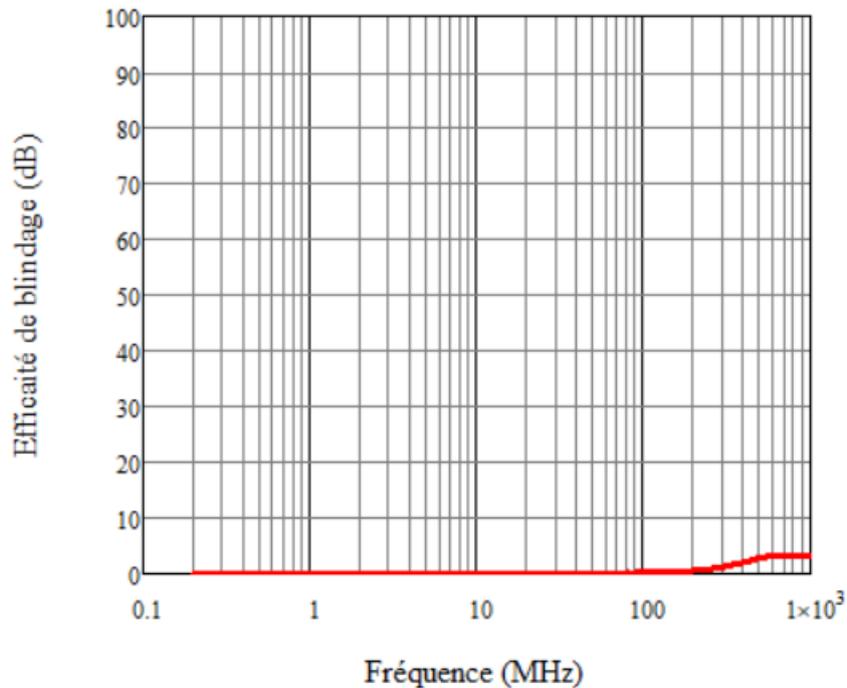


Figure 2.46 : Mesure de l'efficacité de blindage pour un échantillon composite polymère chargé

La mesure présentée dans la Figure 2.46 montre un résultat de 0 dB ce qui ne correspond pas à la valeur prévue par le partenaire.

A cette étape nous avons fait une étude pour vérifier ce problème. Ce cas est illustré en plaçant la tresse métallique de référence entre deux papiers (ce qui empêche la continuité électrique entre la cellule est le matériau sous test.



(a)



(b)

Figure 2.47 : Tresse métallique de référence (a), tresses métallique entourée par deux papiers (b)

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

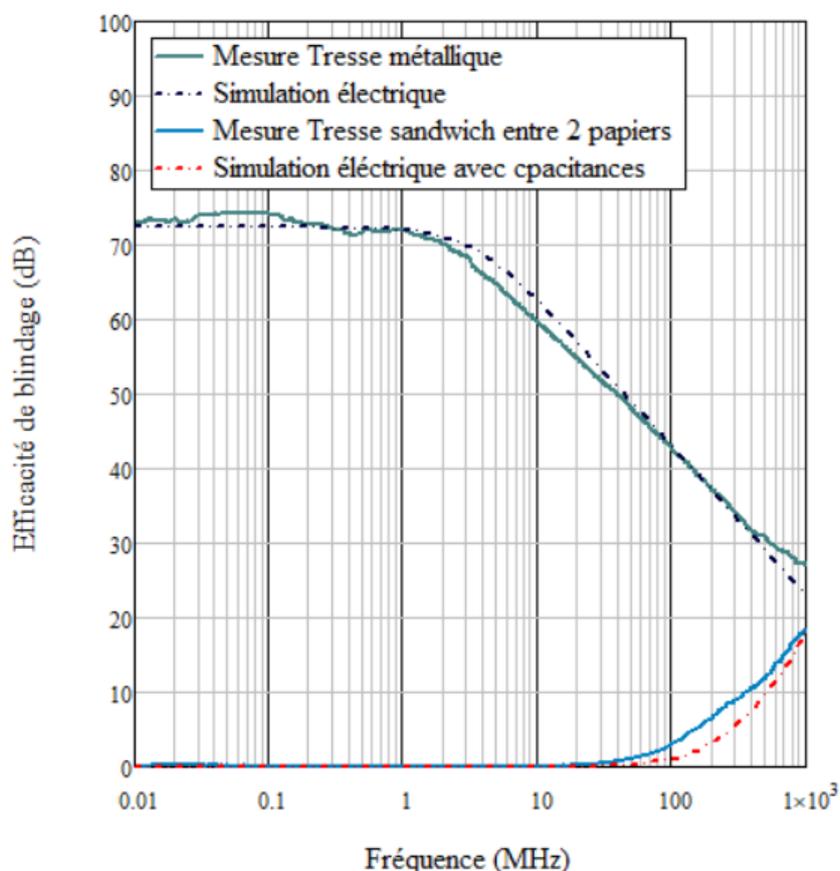


Figure 2.48 : Mesure de l'efficacité de blindage de la tresse de référence et la tresse en sandwich entre 2 papiers

La Figure 2.48 montre les résultats de mesures faites sur la tresse métallique de référence avec et sans papier. Dans ces conditions, l'efficacité de blindage mesurée est nulle en basse fréquence à cause du manque de continuité électrique qui rajoute une capacité entre l'échantillon et les conducteurs de la monture de la cellule coaxiale. Cela donne l'impression que le tissu métallique n'est pas présent : il n'y a pas de blindage. La remontée de l'efficacité de blindage en hautes fréquences résulte de l'effet capacitif. Le schéma équivalent correspondant permet de mieux appréhender l'effet capacitif introduit sur la mesure (voir Figure 2.49).

Ce comportement explique la nécessité de la reprise de continuité pour les gaines afin de réaliser le blindage dans les applications.

Cependant plus la fréquence augmente, plus la notion de la propagation d'ondes électromagnétiques (E, H) sera le phénomène dominant, et les ondes peuvent traverser les papiers et arriver au matériau. Par conséquent l'efficacité de blindage commence à avoir une

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

valeur supérieure à 0dB et cela est visible par la remontée de l'efficacité de blindage à partir de 100 MHz.

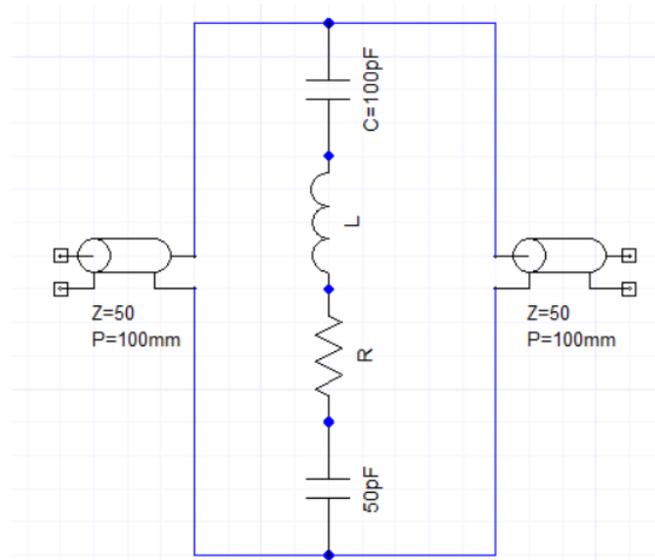


Figure 2.49 : Modèle électrique de la cellule coaxiale avec effet capacitif

En conséquence, un contrôle de la continuité électrique est indispensable pour les mesures d'efficacité de blindage dans la cellule coaxiale. Et le cas échéant cela nécessite de prévoir des plages de reprise de continuité électrique. De plus pour pouvoir mesurer des échantillons composites où les charges électriques se trouvent à l'intérieur de l'échantillon il faudra utiliser une autre méthode de mesure. Nous présentons, dans l'annexe D, une idée de la mesure en cellule TEM sans avoir besoin de continuité électrique.

2.8 Modélisation de l'efficacité de blindage

L'objectif de cette partie est de comparer les mesures avec une modélisation théorique et de développer un modèle comportemental de l'efficacité de blindage des tresses. Cela est nécessaire pour la prédiction de l'impédance de transfert à partir des mesures de l'efficacité de blindage.

2.8.1 Modèles existants

Les échantillons pleins constitués de métal homogène (Aluminium, Cuivre, Nickel...) permettent un bon affaiblissement du champ électromagnétique lorsqu'ils sont disposés entre la source du champ et le récepteur, comme présenté à la figure 3.3. Considérons un matériau

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

métallique d'épaisseur d , de conductivité σ , de permittivité relative ϵ_r , de perméabilité μ_r , et d'épaisseur de peau δ :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega * \mu * \sigma}} \quad (2.9)$$

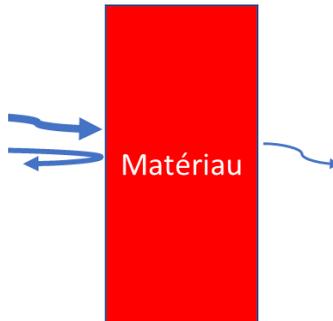


Figure 2.50 : Transmission à travers un matériau

Dans la littérature, Degauque et Démoulin [2] et Poulichet [7] présentent des modèles pour déterminer l'efficacité de blindage (SE) ou l'atténuation totale comme étant la somme de l'absorption A , des pertes par réflexion R et d'un terme correctif B lié aux réflexions multiples dans le matériau :

$$SE = A + R + B \quad (2.10)$$

2.8.1.1 Modèle de Démoulin

Dans le modèle de Démoulin [2], l'absorption A , les pertes par réflexion R (rapport entre les modules du champ transmis et celui du champ incident, exprimé en dB) et les réflexions multiples dans le conducteur sont données par :

$$A = 20 * \log \left(e^{\frac{d}{\delta}} \right) \quad (2.11)$$

$$R = 20 * \log \left| \frac{(Z_0 + Z_m)^2}{4 * Z_0 * Z_m} \right| \quad (2.12)$$

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

$$B = 20 * \log \left| 1 - \frac{(k-1)^2}{(k+1)^2} * e^{-2*\gamma*d} \right| \quad (2.13)$$

Z_0 représente l'impédance d'onde dans l'air ($Z_0 = 377 \Omega$) et Z_m l'impédance d'onde dans le matériau conducteur est donnée en première approximation (lorsque $\sigma \gg \omega\epsilon$) par :

$$Z_m = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = (1+j) \sqrt{\frac{\pi\mu f}{\sigma}} \quad (2.14)$$

k correspond au ratio de ces deux impédances :

$$k = \frac{Z_m}{Z_0} \quad (2.15)$$

et γ correspond à la constante de propagation dans le métal tel que

$$\gamma = \frac{(1+j)}{\delta} \quad (2.16)$$

nous rappelons que la permittivité relative complexe du matériau est donnée par :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (2.17)$$

L'efficacité de blindage est alors donnée par :

$$SE \text{ (dB)} = 20 * \log \left(e^{\frac{d}{\delta}} \right) + 20 * \log \left| \frac{(Z_0 + Z_m)^2}{4 * Z_0 * Z_m} \right| + 20 * \log \left| 1 - \frac{(k-1)^2}{(k+1)^2} * e^{-2*\gamma*d} \right| \quad (2.18)$$

2.8.1.2 Modèle de Poulichet

Dans le modèle de Modèle de Poulichet [7], une autre formulation est proposée pour la réflexion R et les réflexions multiples dans le conducteur B:

$$A = 8.69 * \frac{d}{\delta} \quad (2.19)$$

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

$$R = 168 - 10 * \log\left(\frac{\mu_r * F}{\sigma_r}\right) \quad (2.20)$$

$$B = 20 * \log\left(1 - e^{-\frac{2*d}{\delta}}\right) \quad (2.21)$$

$\sigma_r = \frac{\sigma}{\sigma_{cu}}$ correspond à la conductivité relative par rapport au cuivre $\sigma_{cu} = 5.82 * 10^7$ s/m et μ_r correspond à la perméabilité relative du conducteur.

L'efficacité de blindage est alors donnée par :

$$SE \text{ (dB)} = 8.69 * \frac{d}{\delta} + 168 - 10 * \log\left(\frac{\mu_r * F}{\sigma_r}\right) + 20 * \log\left(1 - e^{-\frac{2*d}{\delta}}\right) \quad (2.22)$$

2.8.2 Modèle de réflexions multiples proposé

La compacité des modèles ci-dessus ne permet pas de comprendre le comportement des ondes aux interfaces de l'échantillon. Une méthode basée sur les réflexions multiples est développée afin de mieux appréhender l'impact des différents paramètres.

- **Présentation du modèle**

Un modèle similaire au modèle de Démoulin est présenté ici. Il est développé à base de l'étude des ondes réfléchies et ondes transmises aux interfaces air/métal et métal/air. Cette formulation permet d'obtenir une expression compacte de l'efficacité de blindage en fonction de l'épaisseur de métal d , du coefficient de propagation γ défini à l'équation (2.16) et du coefficient de réflexion à l'interface air/matériau Γ , comme présenté à la Figure 2.51.

$$\Gamma = \Gamma_1 = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} = -\Gamma_2 \quad (2.23)$$

Ainsi, quand un champ électromagnétique arrive sur la feuille métallique, une partie de cette onde est réfléchi, une autre partie est absorbée et le reste est transmis, les ondes incidente E_i et transmise E_t étant les ondes présentes en entrée de la feuille et en sortie de la feuille.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

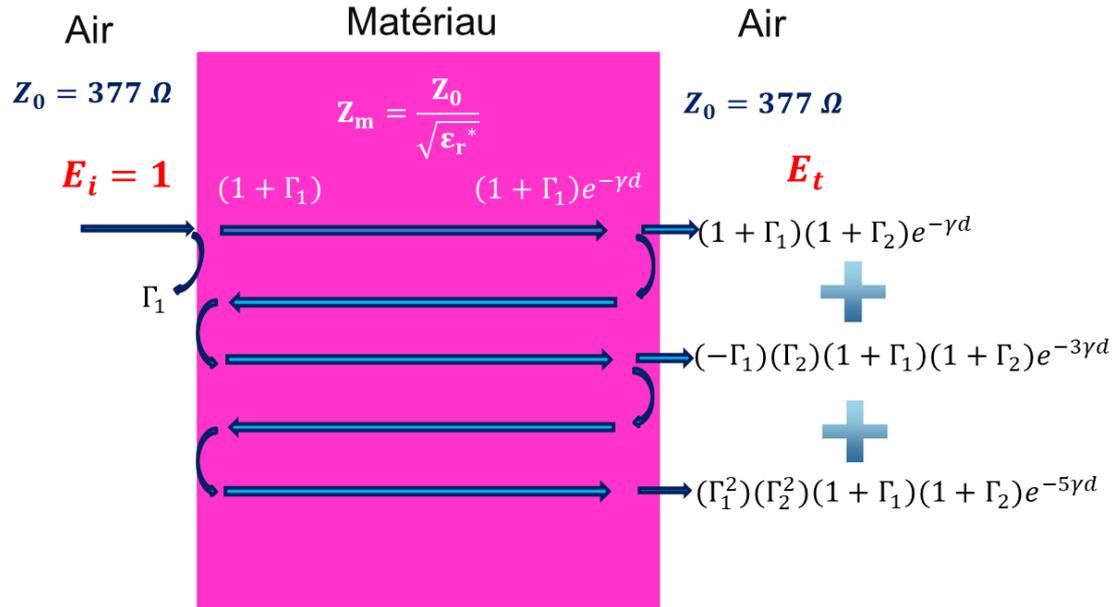


Figure 2.51 : Structure pour le développement du modèle des réflexions multiples

Ainsi, il est aisé d'obtenir le coefficient de transmission

$$T = (1 - \Gamma^2)e^{-\gamma d} \left[\frac{1}{1 - (\Gamma^2)e^{-2\gamma d}} \right] \quad (2.24)$$

Et par suite, l'efficacité de blindage :

$$SE \text{ (dB)} = 20 * \log \left(\frac{E_i}{E_t} \right) = 20 * \log \left(\frac{1}{T} \right) = 20 * \log \left[\frac{1 - (\Gamma^2)e^{-2\gamma d}}{(1 - \Gamma^2)e^{-\gamma d}} \right] \quad (2.25)$$

Les détails de calcul mathématique est présenté dans annexe B.

- **Comparaison du modèle avec les modèles de Démoulin et de Poulichet**

La Figure 2.52 montre la comparaison entre les modèles. Elle est faite pour une feuille de cuivre d'épaisseur $d = 30 \mu\text{m}$ et de conductivité $\sigma = 5.8 * 10^7 \text{ S/m}$.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

Les trois modèles présentent un bon accord, et, il faut noter que les modèles de Démoulin et celui développé dans ces travaux donnent des résultats identiques pour l'exemple proposé.

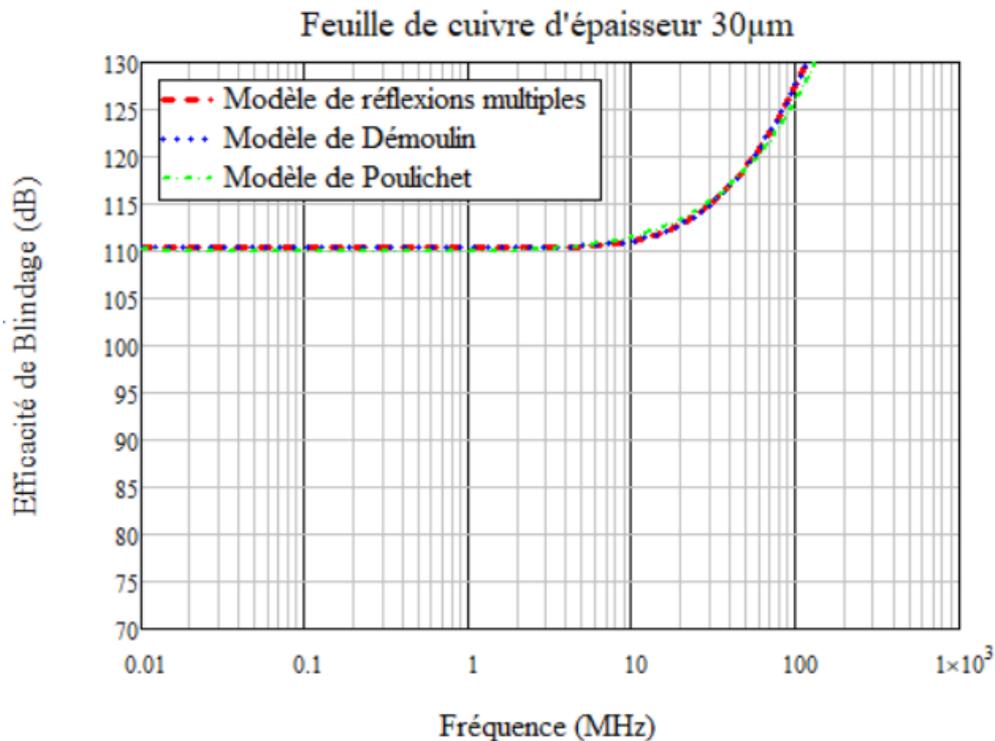


Figure 2.52 : Comparaison des modèles de Poulichet et de Démoulin avec le modèle de réflexion multiples proposé

Ce modèle va nous permettre de développer un modèle comportemental de l'efficacité de blindage pour les tresses métalliques ce qui sera présentés dans la partie 2.9.

2.8.3 Application à une plaque en Aluminium d'épaisseur 1 mm

Cette application va nous permettre de préciser le niveau de dynamique de mesure de notre cellule en plus de la comparaison à la modélisation théorique de l'efficacité de blindage.

Pour modéliser l'efficacité de blindage, il faudra calculer la conductivité du matériau, alors une étape de mesure de résistance est nécessaire.

Une mesure de résistance est alors réalisée à partir d'une méthode des 4 points avec un milli-ohmmètre (FI 908MO, Française d'instrumentation).

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

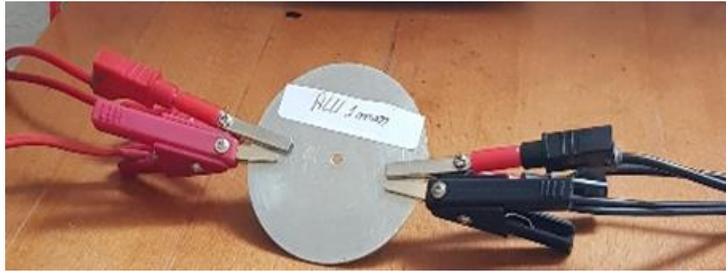


Figure 2.53 : Méthode de mesure de la résistance : exemple d'une plaque d'aluminium

La conductivité est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\sigma = \frac{\ln(2)}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot d} \quad [8] \quad (2.26)$$

où d est l'épaisseur du matériau.

Dans le cas d'une plaque en Aluminium d'épaisseur $d = 1$ mm, la mesure de la résistance donne $R = 1.3$ m Ω , conduisant à une conductivité $\sigma = 8.5 \cdot 10^4$ S/m.

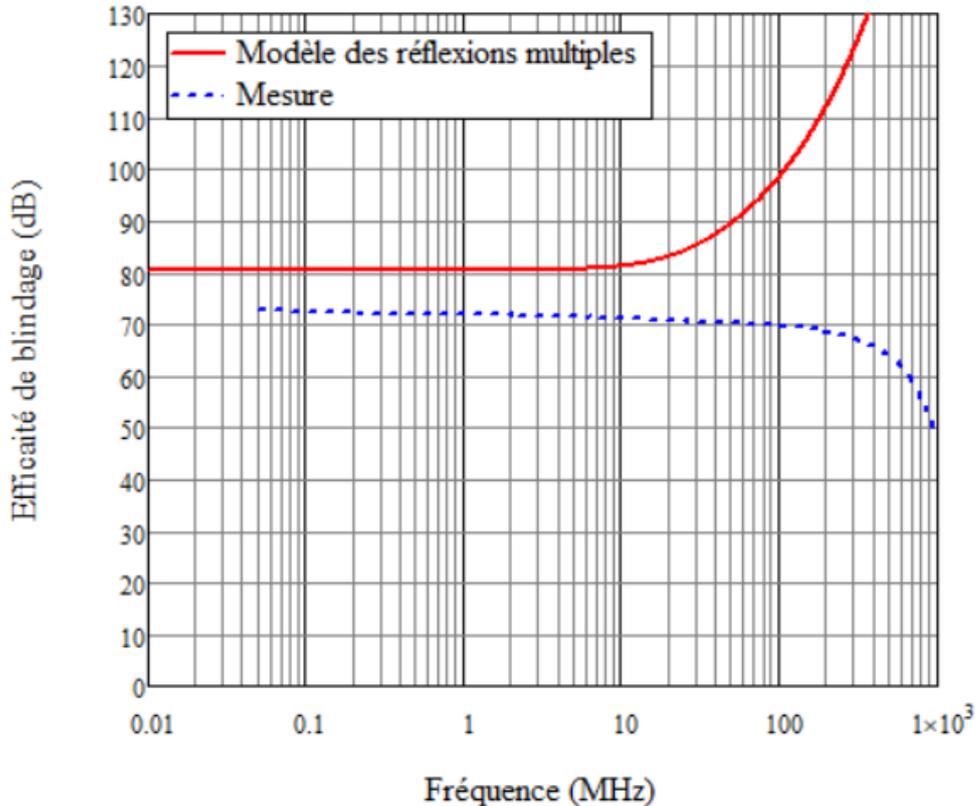


Figure 2.54 : Mesure de l'efficacité de blindage pour plaque ALU de 1 mm

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

La Figure 2.54 présente la mesure de l'efficacité de blindage faite sur une plaque en ALU d'épaisseur de 1 mm. En comparant la mesure avec la modélisation, nous trouvons une différence de 7 dB en basse fréquence et un comportement de mesure incorrect selon le modèle présenté. Cette différence est liée à la résistance de contact entre la plaque testée et la cellule coaxiale, ce qui est expliqué dans la partie suivante.

2.8.4 Effet de la résistance de contact

Le problème de contact commence à apparaître avec les matériaux homogènes de conductivité élevée, pour assurer ce contact entre la cellule coaxiale et les échantillons sous test, nous avons étudiés plusieurs propositions.

Les propositions étudiées sont :

- a. Ajouter des vis de serrage entre la cellule coaxiale et l'échantillon sous test

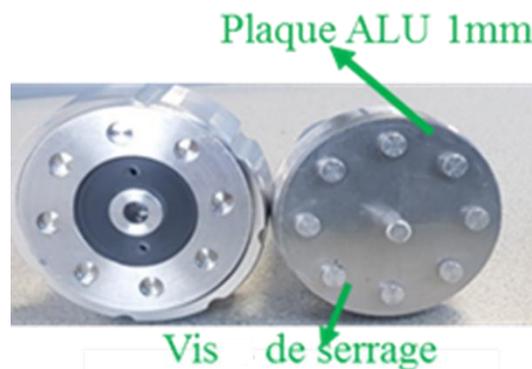


Figure 2.55 : Utilisation de vis de serrage

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

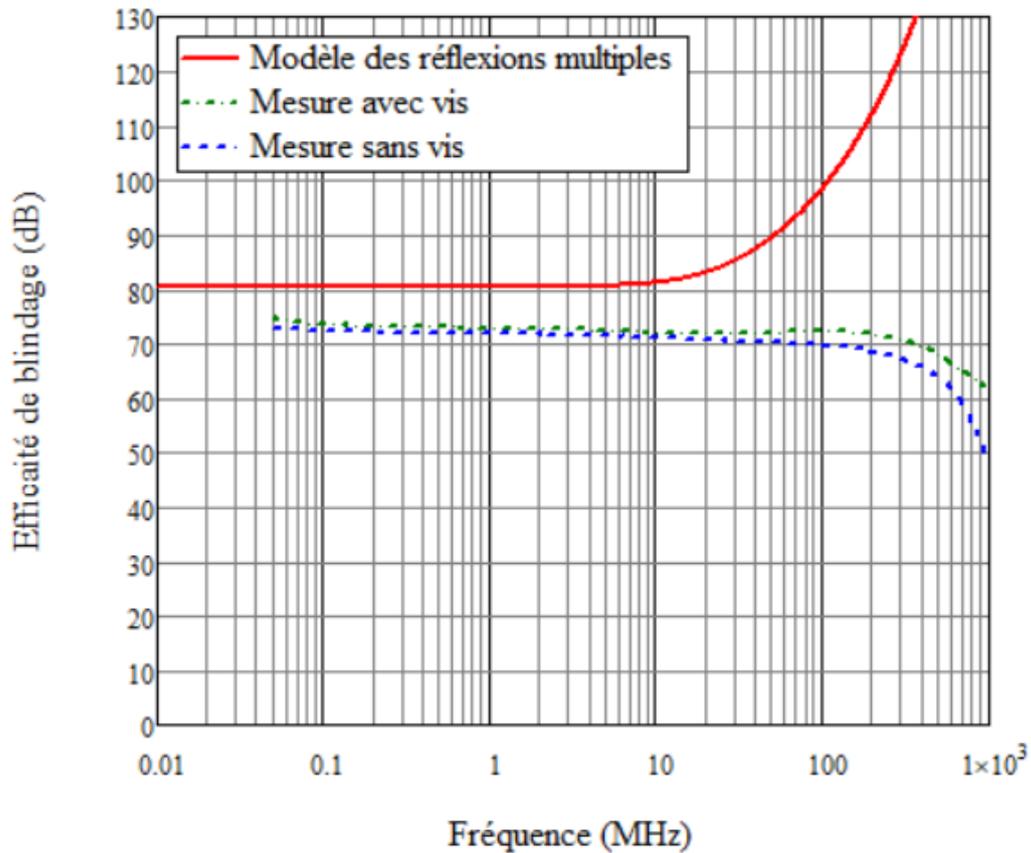


Figure 2.56 : Mesure de l'efficacité de blindage pour plaque ALU 1 mm avec et sans vis

Les résultats présentés à la Figure 2.56 montrent que l'ajout de vis entre la cellule coaxiale et l'échantillon sous test ne permet pas d'assurer un bon contact électrique, ce qui induit un résultat non satisfaisant et très différent du modèle quelle que soit la fréquence.

- b. Insérer des mousses conductrices entre la cellule et l'échantillon



Figure 2.57 : Utilisation des mousses conductrices.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

Ces mousses conductrices sont des mousses constituées de mousse Polyuréthane recouvertes d'un tissu conducteur en Cuivre Nickelé. Ces mousses sont généralement utilisées pour des applications CEM où un niveau efficace de fermeture est requis.

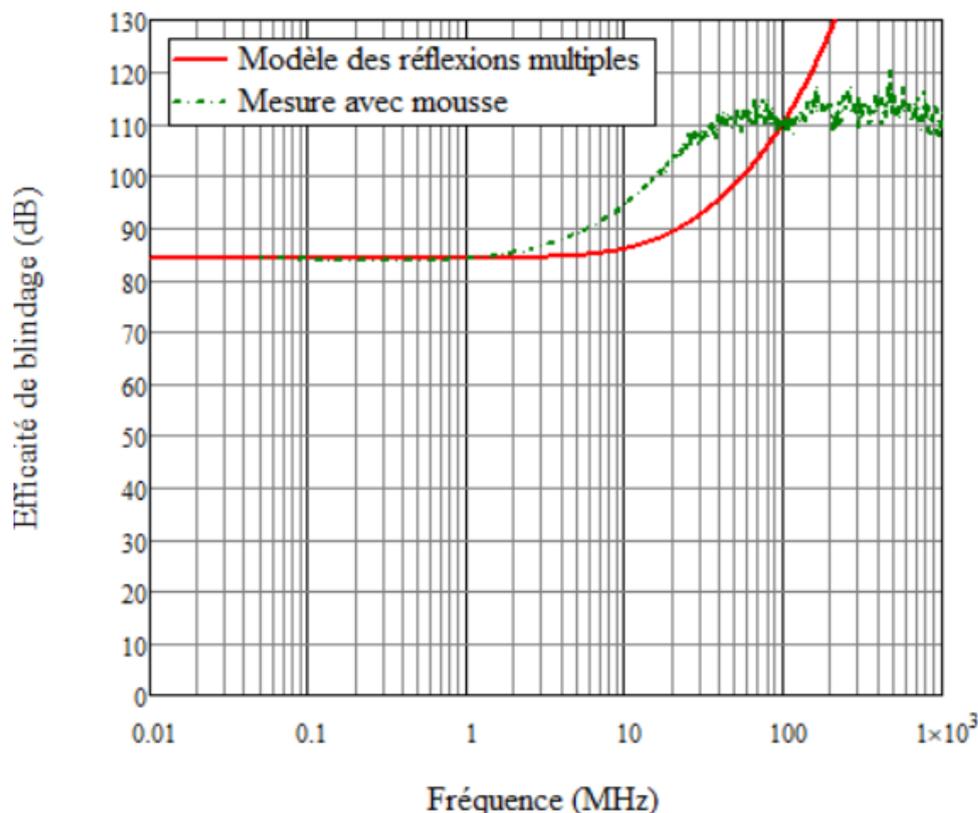


Figure 2.58 : Mesure de l'efficacité de blindage du plaque ALU 1 mm avec mousse

L'utilisation des mousses conductrices permet d'assurer une meilleure continuité électrique des basses fréquences jusqu'à la dizaine de MHz. Le modèle permet donc de prédire l'efficacité de blindage en basse fréquence.

Il faut cependant remarquer que le modèle ne permet pas de prédire efficacement la valeur de la fréquence de cassure pour laquelle l'efficacité de blindage augmente, mais nous observons un décalage fréquentiel entre mesure et simulation avec une allure similaire. Par ailleurs, au-delà de 100 MHz la mesure est de nouveau limitée par le niveau de bruit du VNA.

L'utilisation du modèle développé au paragraphe 2.8.2 montre que tout se passe comme si la plaque mesurée avait une épaisseur d_{eff} de 3mm au lieu de 1mm. Ce défaut semble lié à l'épaisseur des mousses et la colle de contact (Figure 2.59).

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

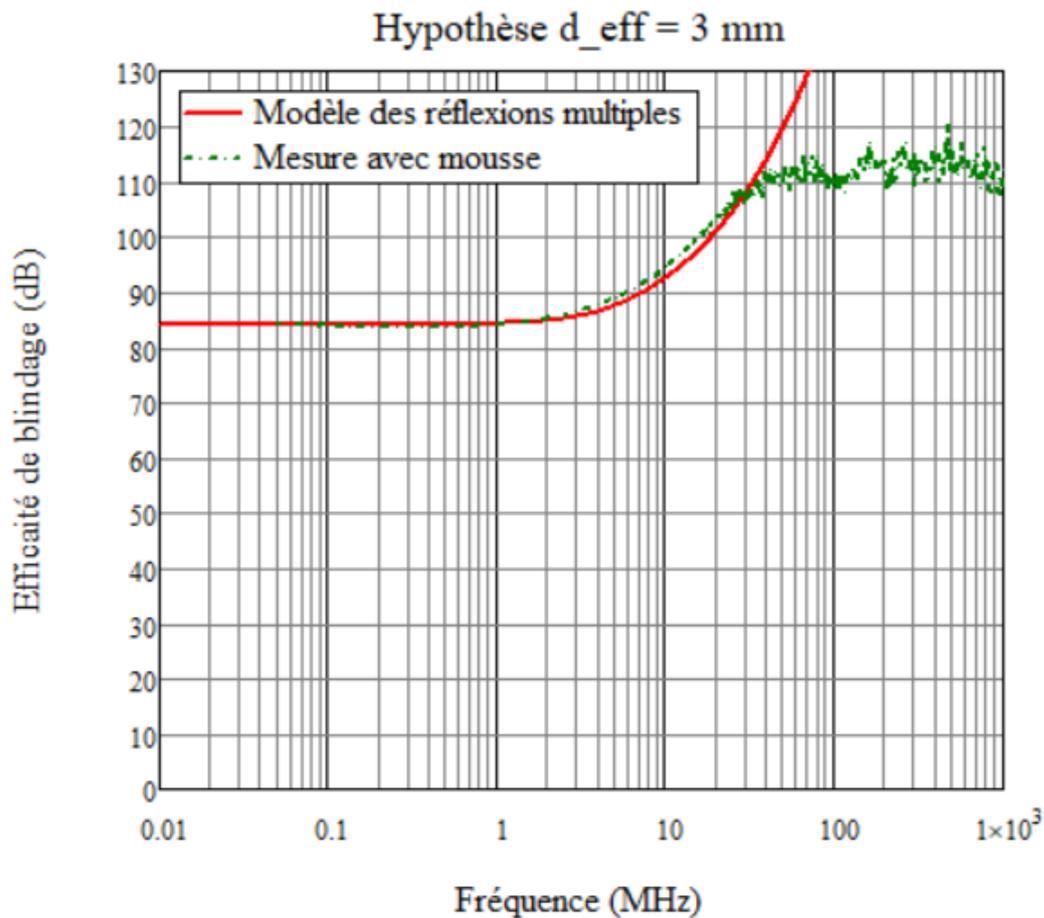


Figure 2.59 : Comparaison entre modèle des réflexions multiples et mesure pour l'Hypothèse ($d_{\text{eff}}=3\text{mm}$)

En attendant de mieux étudier l'impact des mousses et de la colle, nous avons remplacé ces mousses par des contacts CEM en forme de doigts métalliques qui sont utilisés dans les fermetures des installations CEM.

c. Utilisation des contacts CEM



Figure 2.60 : Contact CEM utilisés

Chapitre 2 : Efficacité de blindage



Figure 2.61 : Cellule coaxiale avec les contacts CEM

En mesurant l'efficacité de blindage de la même plaque en ALU de 1mm, nous remarquons que la valeur de l'efficacité de blindage mesurée est inférieure à celle mesurée auparavant. Nous savons que l'aluminium s'oxyde avec le temps ce qui amène à un changement de résistance mais aussi le résultat de l'efficacité de blindage mesuré.

La nouvelle résistance mesurée est $R = 2 \text{ (m}\Omega\text{)}$. Cette résistance est mesurée avec la méthode de 4 pointes comme présenté avant.

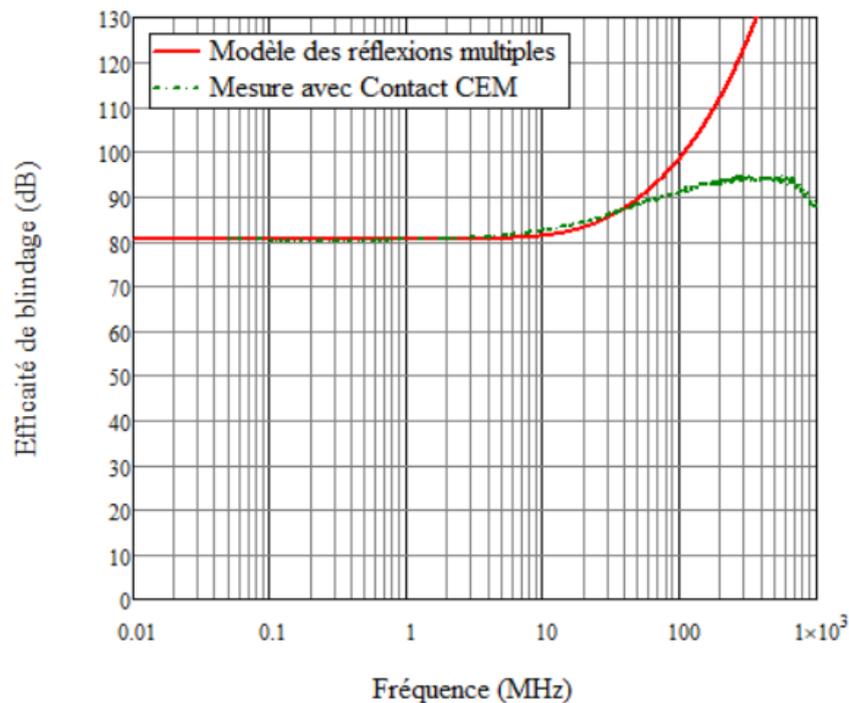


Figure 2.62 : Comparaison entre modèle proposé avec la mesure en utilisant des contacts CEM plaque ALU de 1 mm

La Figure 2.62 montre la comparaison entre le modèle proposé et la mesure de l'efficacité de blindage. Un très bon comportement est obtenu spécifiquement jusqu'à 50 MHz, au-delà de cette fréquence la réponse de la mesure est affectée par la sensibilité de l'appareil de pour des

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

valeurs au-dessus de 90 dB. Cette différence peut être corrigée en utilisant des appareils de mesure avec des performances plus élevées ($BW < 10\text{Hz}$).

Un essai pour résoudre ce problème est fait en utilisant un générateur RF et un analyseur de spectre RF. Cet analyseur est le 'SIGNAL HOUND SA44B', qui permet d'atteindre un niveau de BW de 1Hz et un niveau de dynamique de 130 dB en tracking manuel.

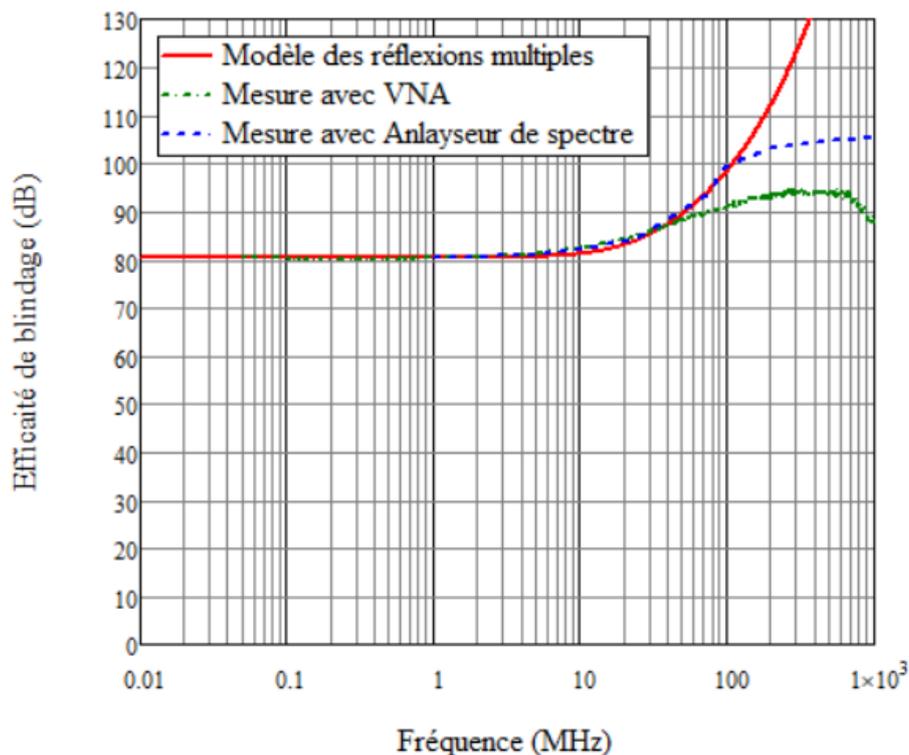


Figure 2.63 : Comparaison entre modèle proposé, mesure avec VNA et mesure avec analyseur de spectre pour plaque ALU 1 mm

Les résultats de la Figure 2.63 montrent que l'appareil de mesure joue un rôle important dans la mesure surtout pour des niveaux d'efficacité de blindage proche de 100dB alors pour arriver à ce niveau de mesure il faudra des appareils avec de bonnes performances surtout en terme de niveau de bruit.

2.8.5 Incertitude et reproductibilité de mesure

Pour assurer la reproductibilité et vérifier l'incertitude sur les résultats de nos mesures, toutes les mesures sont faites 3 fois.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

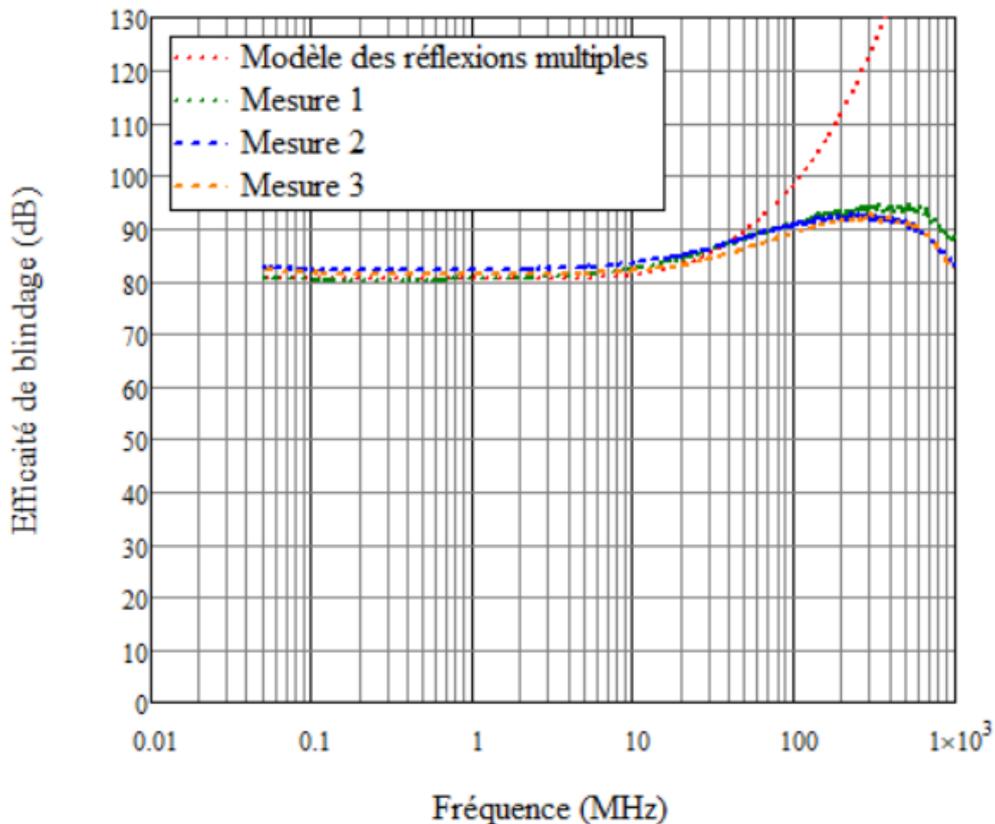


Figure 2.64 : Mesure de reproductibilité avec ALU 1 mm

La Figure 2.64 présente les résultats de mesure de la plaque d'ALU de 1 mm, les graphes montrent une incertitude de mesure de 3 dB. Cette différence est liée au serrage de la cellule après le placement de l'échantillon. A noter qu'avec la cellule actuelle, le serrage est fait à la main en vissant la bague de serrage.

2.8.6 Simulation électromagnétique de la cellule coaxiale avec matériau

Pour continuer notre étude, une simulation électromagnétique en utilisant le simulateur 'HFSS' est nécessaire. Cette simulation est faite en utilisant la cellule coaxiale simulée présentée précédemment avec un échantillon qui correspond à la plaque d'aluminium de 1 mm testés. Cette simulation va nous permettre de valider le modèle de réflexion multiple et aussi les mesures.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

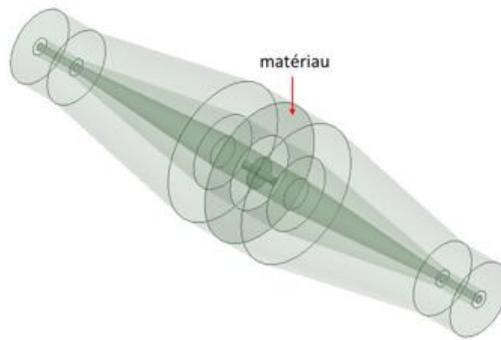


Figure 2.65 : Cellule coaxiale avec matériau

Le matériau est dessiné comme un cercle sans épaisseur et en appliquant la méthode de ‘Shell Element’ [9] intégrée dans HFSS. La méthode de ‘Shell Element’ consiste à appliquer ‘Sheet Boundary condition’ à une feuille au lieu de dessiner le matériau à tester comme une couche mince et cela simplifie le maillage.

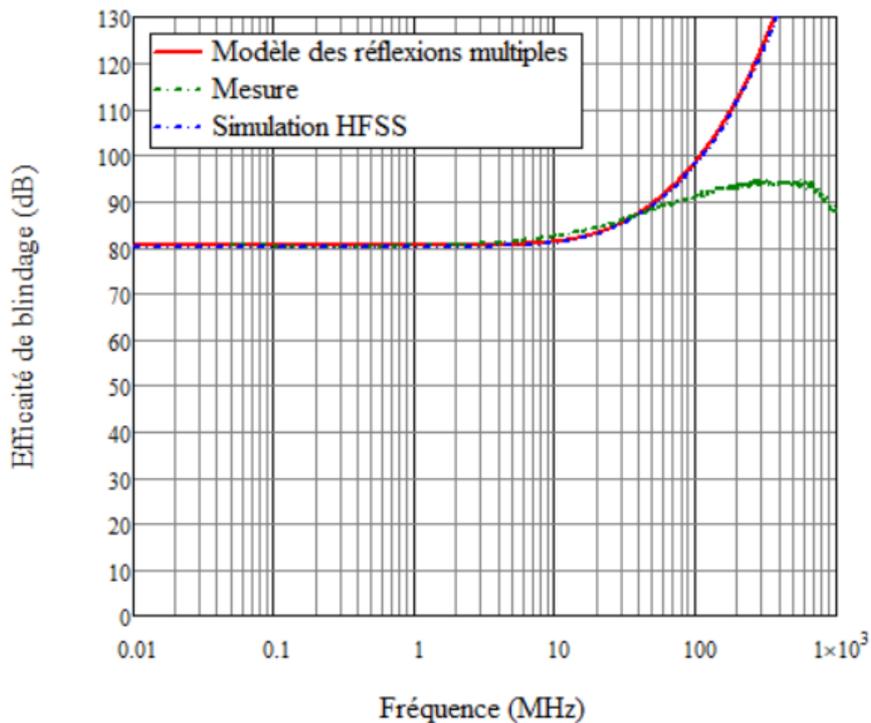


Figure 2.66 : Comparaison entre modèle proposé, mesure et simulation

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

Les graphes de la Figure 2.66 montrent un très bon accord entre la modélisation, la simulation électromagnétique et la mesure, la différence à partir de 50 MHz ayant été expliquée précédemment.

2.8.7 Effet de l'épaisseur sur l'efficacité de blindage

Afin d'étudier l'effet de l'épaisseur sur l'efficacité de blindage des échantillons plans, une simulation numérique (en utilisant les équations du modèle présenté précédemment) est faite avec une conductivité stable pour plusieurs valeurs d'épaisseurs.

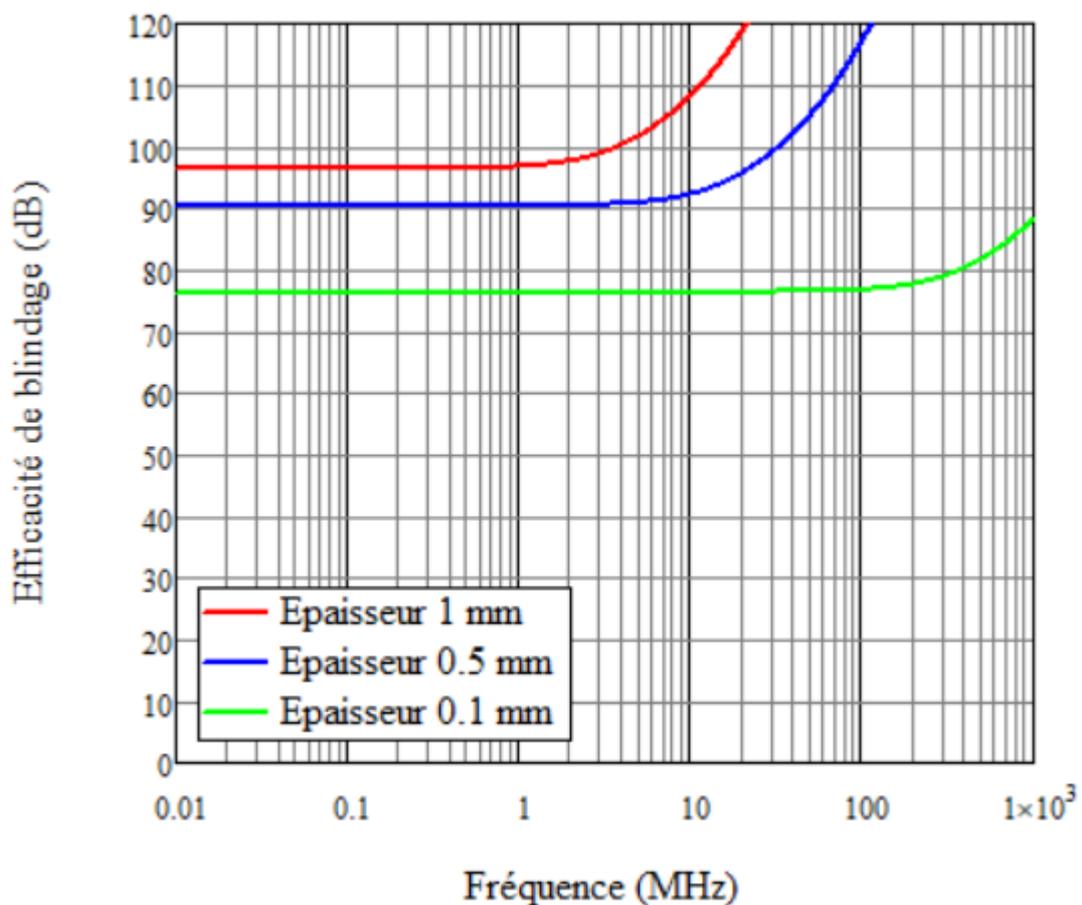


Figure 2.67 : Simulation de l'effet de l'épaisseur (modèles de réflexions multiples)

Après avoir observé les graphes de la Figure 2.67, deux commentaires peuvent être faits. Lorsque l'épaisseur de l'échantillon diminue

- L'efficacité de blindage diminue à cause de l'augmentation de la résistance.
- La fréquence de cassure est décalée vers une fréquence élevée.

Pour valider cette étape nous avons testé des plaques en ALU avec deux épaisseurs différentes.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage



(a)



(b)

Figure 2.68 : Plaque en ALU avec épaisseur de, 0.1 mm(a) et 0.3 mm (b)

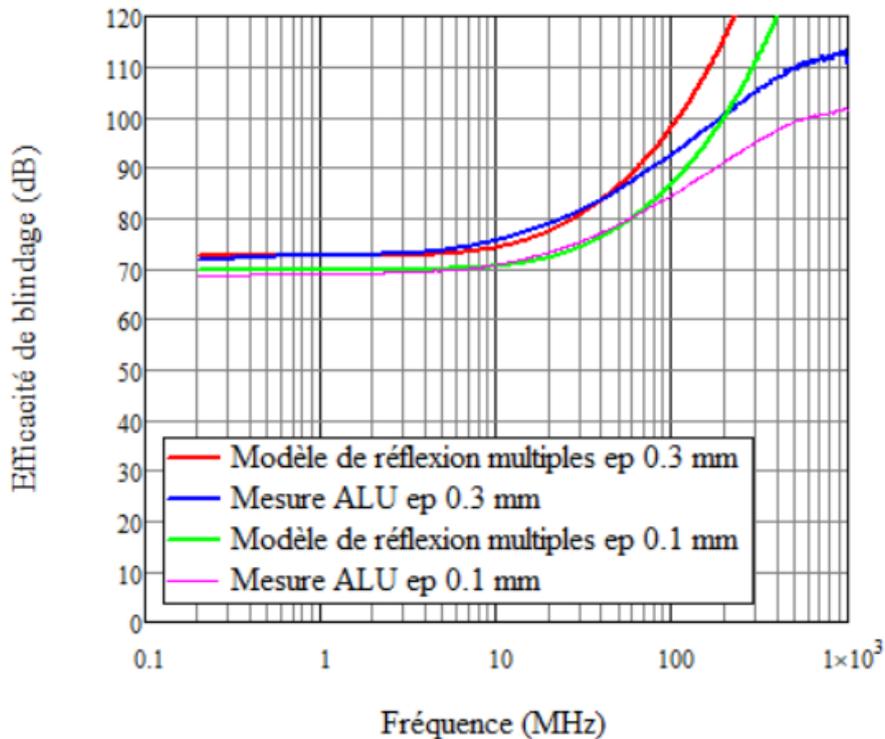


Figure 2.69 : Mesure de l'efficacité de blindage pour des échantillons en ALU avec différentes épaisseurs avec comparaison au modèle de réflexion multiples

Les graphes de la Figure 2.69 montrent la comparaison entre les mesures de l'efficacité de blindage pour des plaques en ALU de différentes épaisseurs (0.1 mm et 0.3 mm), ces résultats sont en accord avec l'effet de l'épaisseur présenté avant.

2.9 Modèle comportemental de l'efficacité de blindage des tresses

2.9.1 Présentation du modèle

Cette partie présente un modèle comportemental de l'efficacité de blindage des tresses métalliques à partir du modèle des réflexions multiples présenté précédemment. Ce modèle va

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

permettre de prédire l'impédance de transfert d'une gaine et sera présenté dans le chapitre suivant.

D'après les mesures faites pour différentes tresses métalliques, et d'après l'explication de la partie précédente le comportement de l'efficacité de blindage peut être assimilé à un filtre. Dans le cas d'échantillons pleins, l'efficacité de blindage est donnée par les équations (2.24) et (2.25).

Dans le cas des tresses métalliques, ce modèle peut être assimilé de manière empirique à :

$$SE \text{ (dB)} = 20 * \log \left[\frac{1}{T \left(1 + j \left(\frac{F}{F_0} \right)^x \right)} \right] \quad (2.27)$$

F_0 : Fréquence de coupure extraite directement de la mesure à **-3dB à partir des mesures**

x : facteur à déterminer, notons que ce facteur x dépend de la configuration de tressage selon le nombre de fils, les dimensionnent des ouvertures, la densité et la surface des trous par rapport à la surface totale de l'échantillon.

Ce modèle comportemental va permettre d'extraire la fréquence de coupure F_0 et le facteur x utilisés dans la prédiction de l'impédance de transfert de la gaine.

2.9.2 Application à la tresse de référence.

Ce modèle a été d'abord appliqué à la tresse métallique de référence. La fréquence de coupure

$F_0 = 0.61$ MHz, est extraite à -3 dB à partir de la mesure de l'efficacité de blindage de la tresse de référence par la cellule coaxiale.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

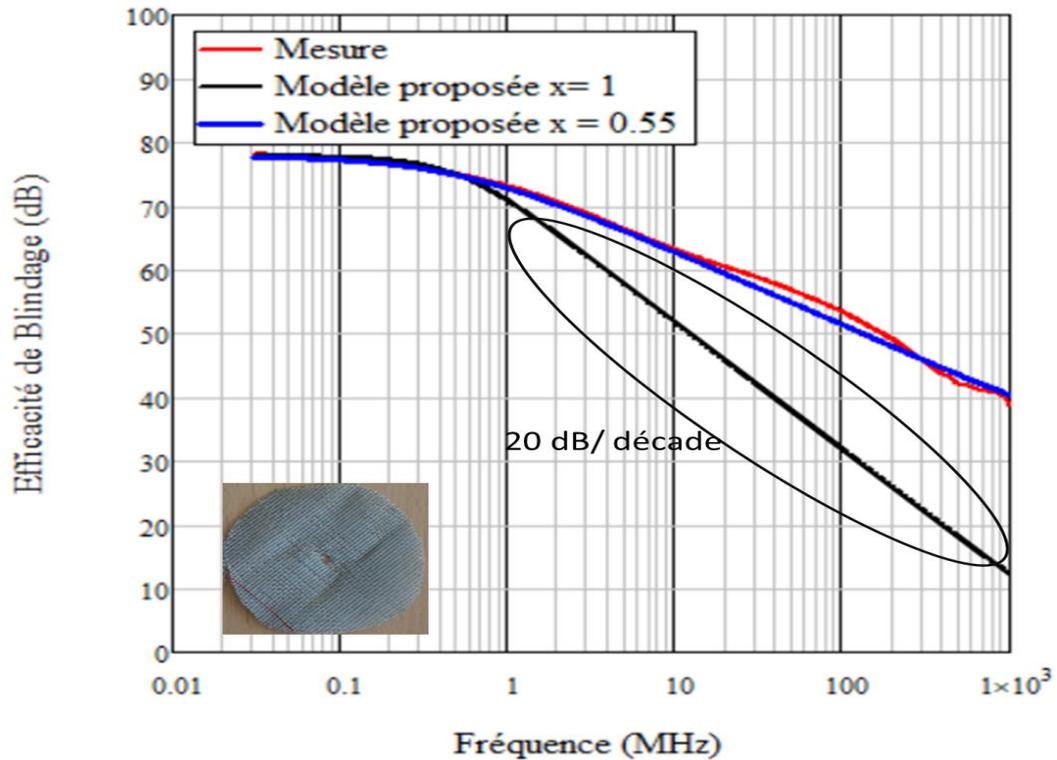


Figure 2.70 : Comparaison modèle proposé et mesure pour la tresse métallique de référence

La Figure 2.70 montre qu'en utilisant un $x=1$ dans le modèle, on trouve la réponse d'un filtre passe-bas de premier degré et cette réponse donne une pente de -20 dB/décade. En prenant une valeur de $x=0.55$ on obtient une réponse proche de la mesure. Ce modèle permettra par la suite de déduire l'impédance de transfert de la gaine.

2.9.3 Validation du modèle sur d'autres tresses métalliques

Pour valider le modèle en fonction de l'extraction de la fréquence de coupure F_0 à partir des mesures et la variation du coefficient x , des applications sont faites pour les tresses métalliques IFTH5 (Figure 2.43) et IFTH8.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

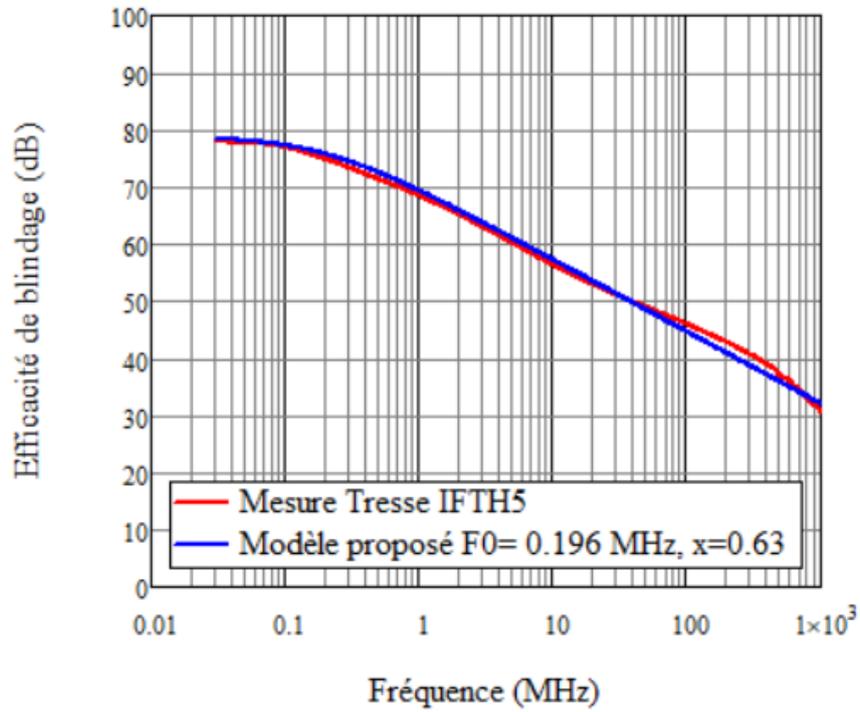


Figure 2.71 : Application du modèle d'extraction de F_0 et x avec mesure de la tresse métallique IFTH5

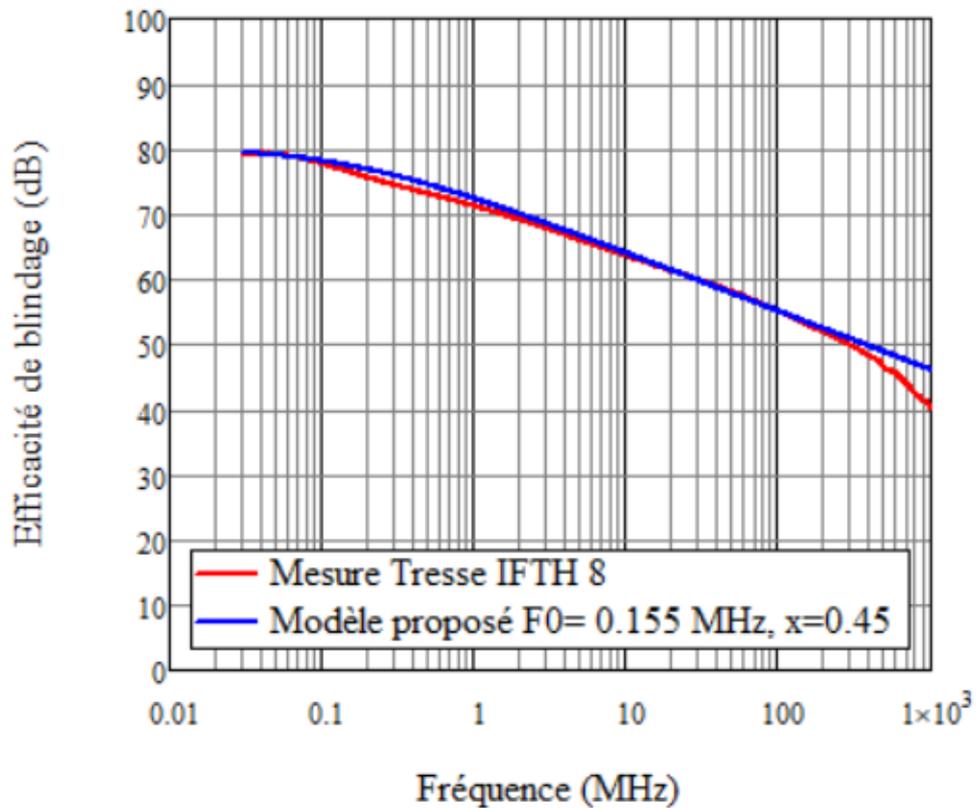


Figure 2.72 : Application du modèle d'extraction de F_0 et x avec mesure de la tresse métallique IFTH8

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

La Figure 2.71 et la Figure 2.72 présentent une application, pour les tresses métalliques IFTH5 et IFHT8, au modèle d'extraction de F_0 à -3dB à partir des mesures de l'efficacité de blindage et la variation de coefficient x . A partir de ces valeurs nous sommes capables de prédire l'impédance de transfert d'une gaine ce qui est présenté dans le chapitre suivant.

2.9.4 Application : effet de trous sur l'efficacité de blindage

Pour étudier la variation de l'efficacité de blindage avec les trous, des plaques d'aluminium de 1mm d'épaisseur avec et sans trous ont été mesurées.

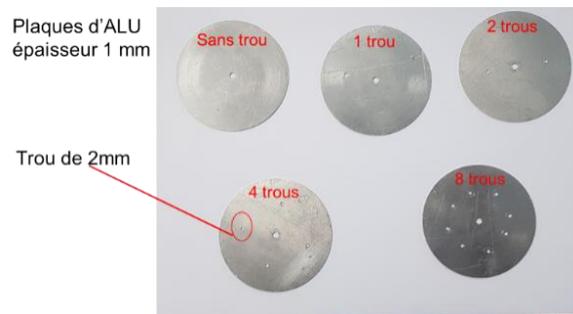


Figure 2.73 : plaques d'ALU avec différents trous

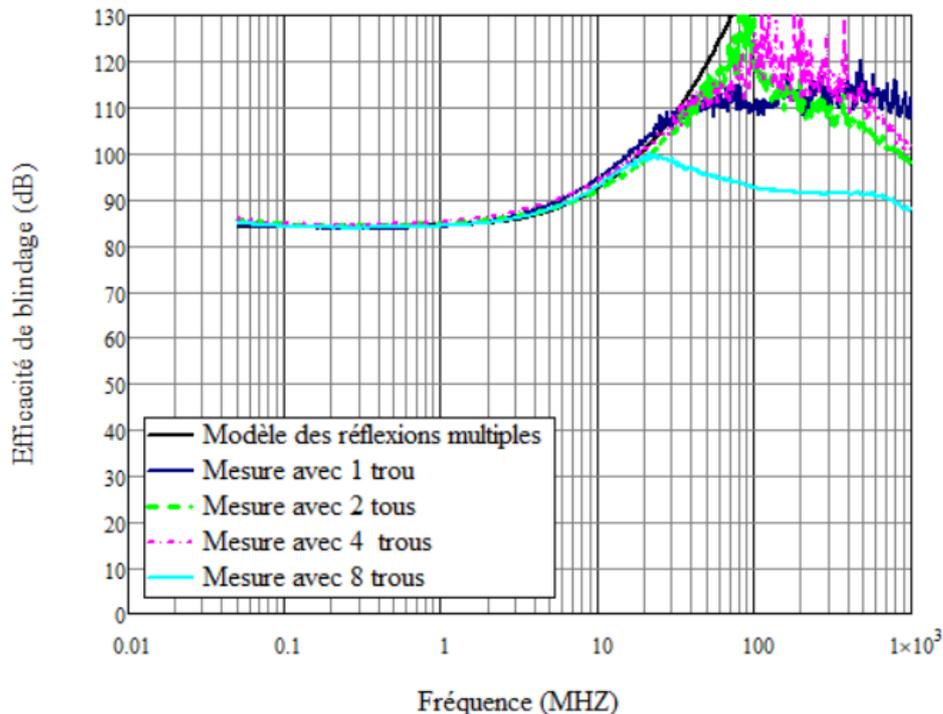


Figure 2.74 : Résultats de mesures des plaques d'ALU 1 mm avec un nombre de trous variant de 0 à 8

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

Les graphes de la Figure 2.74 montrent un accord avec la théorie de l'efficacité de blindage des tresses, à partir de 8 trous la plaque d'ALU commence à ressembler à une tresse, c'est pour cela que la valeur de l'efficacité de blindage commence à diminuer.

2.10 Dynamique globale de mesure

La dynamique globale de mesure est attachée à l'aptitude de l'appareil de mesure mais également à l'assemblage de la cellule coaxiale et l'échantillon sous test.

Afin de vérifier cette dynamique nous avons testé l'efficacité de blindage de la tresse métallique de référence sur plusieurs couches.

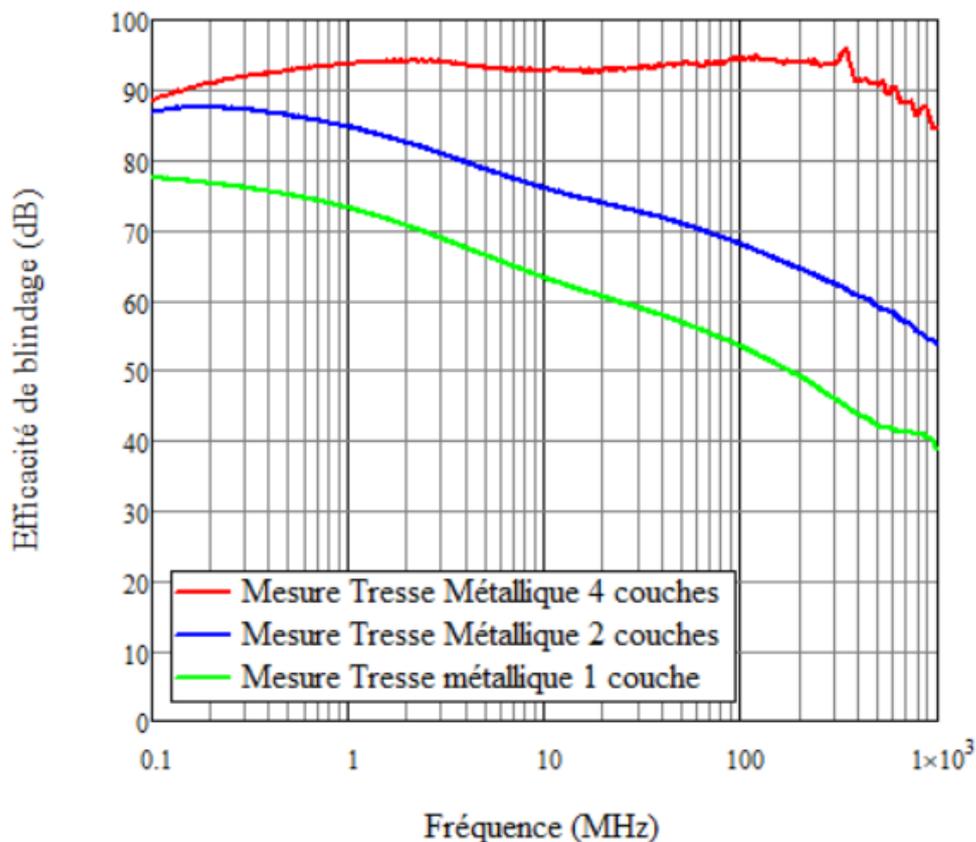


Figure 2.75 : Mesure de l'efficacité de blindage de la tresse métallique de référence avec plusieurs couches

La Figure 2.75 présente les mesures faites sur la tresse métallique à plusieurs couches. La mesure de 2 couches donne un résultat de la même allure que celle de la première couche mais avec une augmentation de la valeur de l'efficacité de blindage due à l'augmentation de recouvrement des ouvertures de l'échantillons.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

De plus, en mesurant la tresse avec 4 couches, 2 remarques peuvent être faites :

- Dans la mise en œuvre d'une tresse avec 4 couches, des trous sont recouverts par les fils de l'autre couche ce qui semble diminuer le nombre de trous total, ce qui explique la réponse de la mesure à 4 couches en fonction du décalage de la descente de la courbe à une fréquence plus élevée.
- L'aptitude de l'appareil de mesure joue un rôle très important sur les mesures à plus 90 dB ce qui peut expliquer la baisse en BF de la mesure avec 4 couches.

Par conséquent nous pouvons atteindre par notre système une dynamique entre 90 et 100 dB mais cela demande de prendre en compte toutes les précautions possibles en particulier le contact électrique, les performances de l'appareil de mesure.

2.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'exigence du projet NextGen concernant l'efficacité de blindage. A partir de la norme ASTM 4935, une cellule coaxiale a été conçue, fabriquée et validée pour effectuer les mesures de l'efficacité de blindage, cette cellule à vide permet d'atteindre 10 dB en réflexion jusqu'à 1 GHz. En prenant en compte toutes les améliorations faites, une dynamique de 100 dB peut être atteinte.

En effet, l'efficacité de blindage des tresses et des tricots dépend de la conductivité du matériau à basse fréquence. Les tresses métalliques sont fabriquées à partir de fils métalliques. Le nombre de fils et des trous, les dimensions de ces trous et l'angle de tressage sont des paramètres qui jouent un rôle très important sur la valeur de l'efficacité de blindage représentée par un effet inductif.

Les mesures des échantillons homogènes sont validées par la modélisation des réflexions multiples ainsi que la simulation électromagnétique en utilisant le logiciel HFSS.

Une modélisation comportementale de l'efficacité de blindage des tresses a été présentée. Cette modélisation va permettre de développer un modèle de prédiction de l'impédance de transfert des gaines.

Avec notre cellule, une dynamique de mesure entre 90 et 100 dB est atteinte avec une incertitude de mesure entre 1 et 3dB maximum. L'incertitude de mesure est liée au serrage de l'échantillon sous test avec la cellule coaxiale et aussi à l'élasticité de l'échantillon.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

Dans le chapitre suivant nous discutons de l'impédance de transfert, la mesure par la cellule triaxiale et la modélisation à partir de la mesure de l'efficacité de blindage.

Chapitre 2 : Efficacité de blindage

Chapitre 2 : Bibliographie

- [1] L. Koné, "Conception d'outils numériques et de bancs de mesures permettant d'évaluer l'efficacité de blindage des câbles et des connecteurs", Thèse, Université Lille1 - sciences et technologies, 1989
- [2] P. Degauque. B. Demoulin, "Blindages électromagnétiques", Techniques de l'ingénieur, vol. 2 Réf D1320, 10, Nov. 2000.
- [3] Norme ASTM 4935
- [4] CHMERICS PREMIER, "Test report Shielding Effectivness per ASTM 4935" Document #TR 1006 EN 0206, February3, 2006.
- [5] F. Ndagijimana, Intégrité du signal, compatibilité électromagnétique dans les interconnexions haut débit. ISTE EDITIONS
- [6] R. Meraw et al "What is Kelvin Test ? ", in IPC APEX EXPO Conference Proceedings, [En ligne] https://www.circuitinsight.com/pdf/what_is_kelvin_test_ipc.pdf
- [7] P. Poulichet. "Efficacité de blindage des feuilles métalliques", Chapitre 2, Février 2004, ESIEE, Paris, [En ligne] https://perso.esiee.fr/~poulichp/CEM/Blindage_electromagnetique/chapitre2.PDF
- [8] R. Ellingson and M. Heben "Sheet Resistance : Measurement and significance" University of Toledo, October 2011, [En ligne] http://astro1.panet.utoledo.edu/~relling2/teach/archives/4580.6280.2011/20111025_lecture_4.2_phys4580.6280.pdf
- [9] Ansys HFSS "Modeling Layered Structures with Shell Element" [En ligne] http://www.peraglobal.com/upload/contents/2017/06/20170609112427_69306.pdf

Chapitre 3 : Impédance de transfert

Chapitre 3 Impédance de transfert

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons traité les problématiques liées à la mesure de l'efficacité de blindage électromagnétique pour les échantillons plans. Mais dans les applications pratiques des protections des câbles, on utilise des blindages sous forme de gaine.

En effet, par exemple, dans les applications aéronautiques, le blindage doit protéger les câbles contre la foudre où l'impulsion créée peut atteindre 200 kA, le blindage doit servir également pour la protection contre les émissions des autres équipements tels que les radars et les autres émetteurs radio fréquences de puissance.

L'exigence de performance des gaines utilisées en aéronautique est spécifiée en terme d'impédance de transfert. L'impédance de transfert Z_t est définie comme le quotient de la tension V_1 induite au circuit intérieur par le courant I_2 introduit dans le circuit externe. Pour cela une longueur de couplage entre la gaine et la cellule de test doit être prise en consideration dans le calcul de l'impédance de transfert.

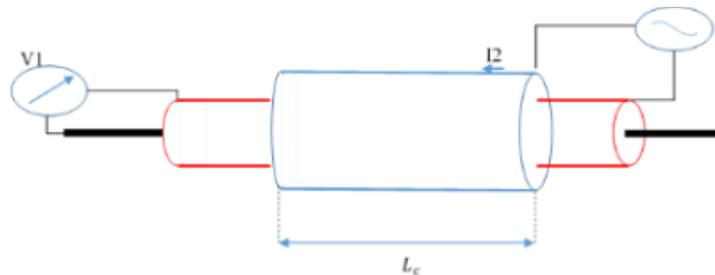


Figure 3.1 : Structure de définition de l'impédance de transfert

$$Z_t = \frac{V_1}{I_2 * L_c} \left(\frac{\Omega}{m} \right) \quad (3.1)$$

Dans ce chapitre, dans la première partie nous présentons les modèles existants de l'impédance de transfert. La méthode de test en cellule triaxiale est décrite dans la troisième partie avec une application de mesure de l'impédance de transfert. Ensuite la prédiction de l'impédance de transfert à partir de la mesure de l'efficacité de blindage. Puis l'application de méthodes d'adaptation de la cellule triaxiale pour la mesure jusqu'à 1 GHz est présentée. Enfin des

Chapitre 3 : Impédance de transfert

mesures d'impédance de transfert comparées aux simulations électromagnétiques sont données dans la dernière partie de ce chapitre.

3.2 Modélisation de l'impédance de transfert

Ce chapitre commence par la modélisation de l'impédance de transfert pour bien comprendre son comportement en fonction des différentes structures de la gaine.

Rappelons qu'il existe les trois types de structure de gaine [1] :

- Gaine à partir de tissu homogène,
- Gaine à partir des tresses ou tricots,
- Gaine à partir des bandes enroulées en forme hélicoïdale.

Dans nos travaux, nous avons traité des gaines métalliques homogènes et des tresses.

3.2.1 Modèle électrique de l'impédance de transfert des gaines en forme de tresse métallique

Pour les gaines tressées, Démoulin [2] présente un modèle simplifié de l'impédance de transfert

$$Z_t = R_l + j\omega L_l \quad (3.2)$$

Où R_l est la résistance linéique (quelques $m\Omega/m$) et L_l est l'inductance linéique (peut varier entre $0.2 \rightarrow 2nH/m$) [3]. La valeur de la résistance est liée à la résistivité du matériau utilisé tandis que l'inductance dépend des ouvertures présentes dans la tresse.

Pour bien maîtriser ce comportement avant de commencer les mesures, nous avons effectué des simulations numériques en deux étapes : la première consistant à changer l'inductance et la deuxième en variant la résistance.

- Changement de l'inductance avec $R_l = 4 \frac{m\Omega}{m}$

$L_l \left(\frac{nH}{m} \right)$	0.1	0.5	2
-----------------------------------	-----	-----	---

Chapitre 3 : Impédance de transfert

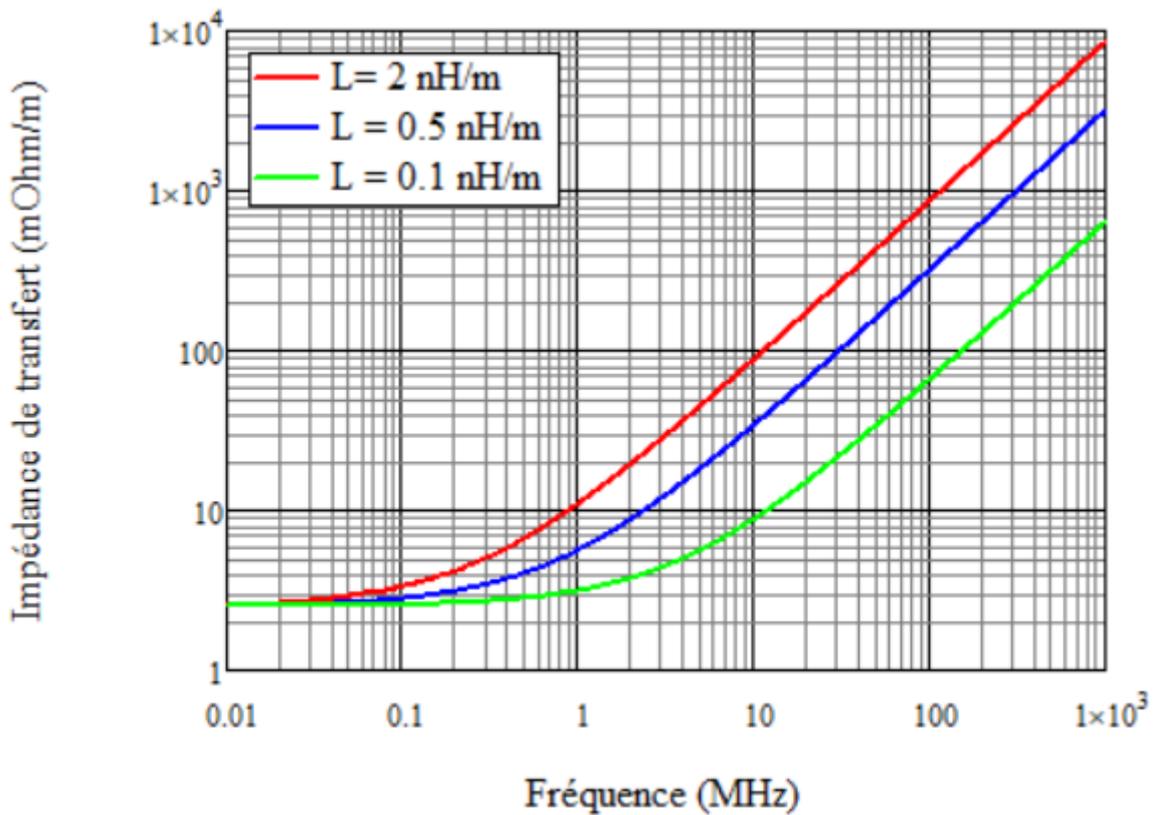


Figure 3.2 : Module de l'impédance de transfert avec changement de l'inductance et $\epsilon = 4 \frac{m\Omega}{m}$

La Figure 3.2 présente la variation du module de l'impédance de transfert en fonction de l'inductance. Les graphes montrent que l'augmentation de la valeur de l'inductance, et la diminution de la fréquence de coupure permettent de valider les résultats du modèle électrique de l'efficacité de blindage présentés dans le chapitre précédent.

En plus au modèle électrique, nous présentons ici un modèle numérique pour calculer l'efficacité de blindage à partir de l'impédance de transfert.

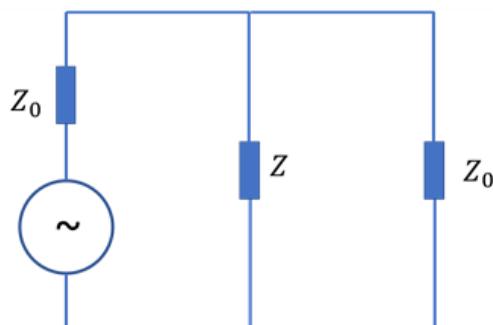


Figure 3.3 : Modèle numérique de la cellule coaxiale à partir de l'impédance de transfert

Chapitre 3 : Impédance de transfert

Les équations suivantes sont utilisées pour calculer l'efficacité de blindage à partir de l'impédance de transfert.

$$Z = R + j\omega L \quad (3.3)$$

$$Z_p = \frac{Z_0 * Z}{Z_0 + Z} \quad (3.4)$$

$$S_{21} = \frac{2 * Z_p}{Z_0 + Z_p} \quad (3.5)$$

$$SE = -20 * \log (S_{21}) \quad (3.6)$$

Le détail de calcul est présenté dans l'annexe A.

En utilisant les équations (2.3), (2.4) et (2.5) et le modèle électrique nous pouvons déduire l'efficacité de blindage.

La valeur de résistance correspondant est $R = 2.5 \text{ m}\Omega$ et les valeurs d'inductances seront les suivantes :

$L_l \left(\frac{nH}{m} \right)$	0.1	0.5	2
$L \text{ (nH)}$	0.07	0.4	1.35

Chapitre 3 : Impédance de transfert

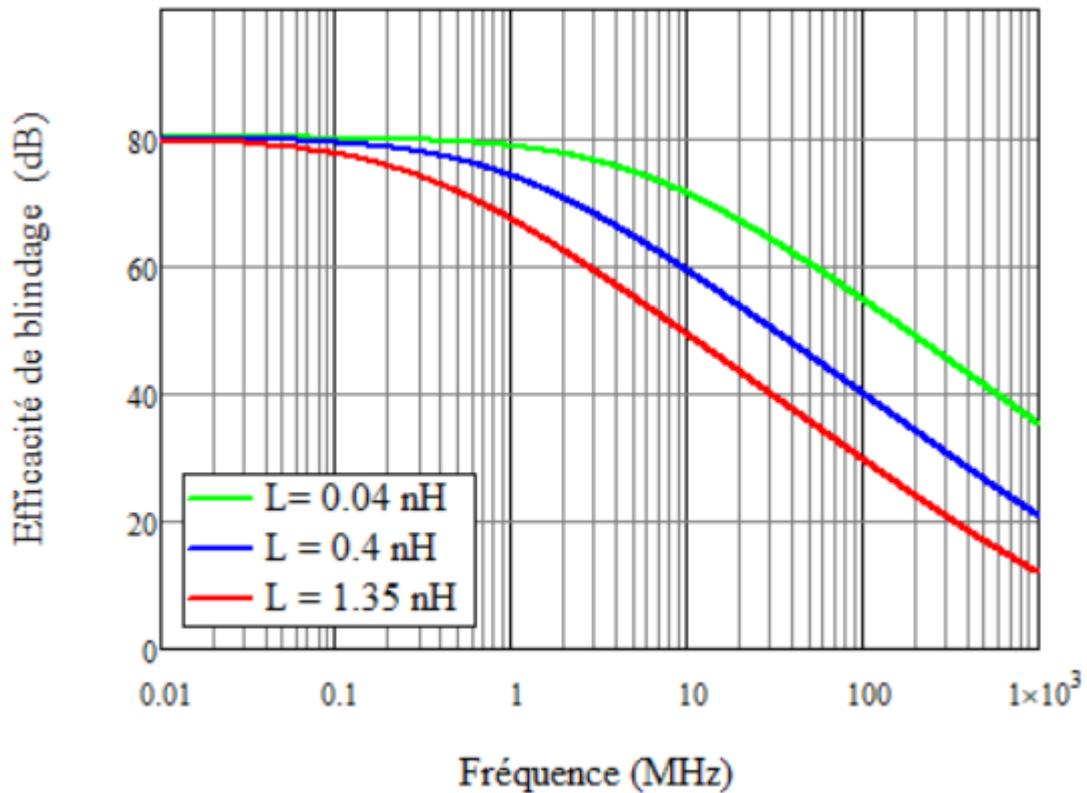


Figure 3.4 : Efficacité de blindage à partir l'impédance de transfert avec variation de L et R=2.5mΩ

La Figure 3.4 montre l'effet de l'inductance sur l'efficacité de blindage à partir du modèle de l'impédance de transfert. Les graphes montrent qu'en augmentant l'inductance, la pente de l'efficacité de blindage commence à une fréquence inférieure et cela cause une diminution de la valeur de l'efficacité de blindage.

- Changement de résistance avec $L_l = 2 \frac{nH}{m}$

$R_l \left(\frac{m\Omega}{m} \right)$	1	4	7
--	---	---	---

Chapitre 3 : Impédance de transfert

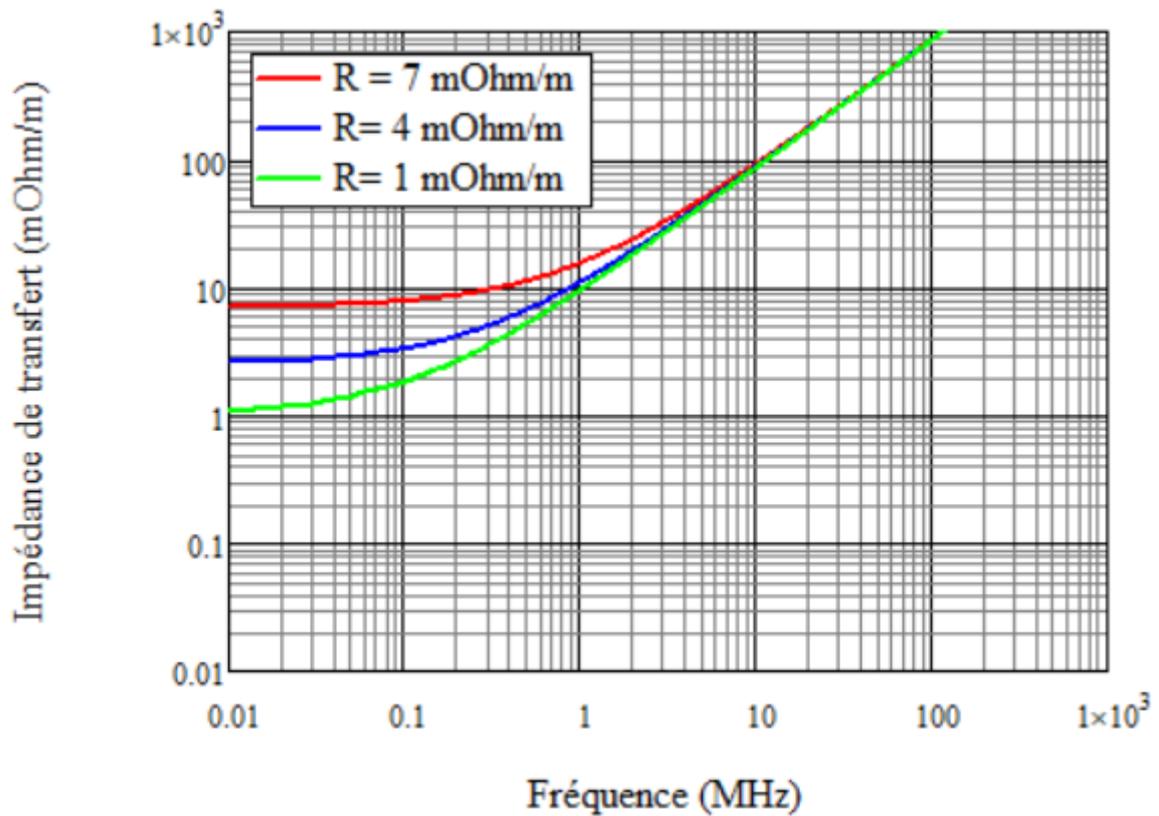


Figure 3.5 : Module de l'impédance de transfert avec changement de résistance et $L = 2nH/m$

La Figure 3.5 montre qu'en diminuant la résistance, la valeur de l'impédance de transfert diminue à basse fréquence et la montée de l'impédance de transfert liée aux trous reste la même à haute fréquence. Ce changement de résistance va causer des variations de la valeur de l'efficacité de blindage à basse fréquence. (Figure 3.6)

La valeur de l'inductance correspondante est $L = 1.35nH$ et les valeurs des résistances sont

$R_l \left(\frac{m\Omega}{m} \right)$	1	4	7
$R \text{ (} m\Omega \text{)}$	0.7	2.5	5

Chapitre 3 : Impédance de transfert

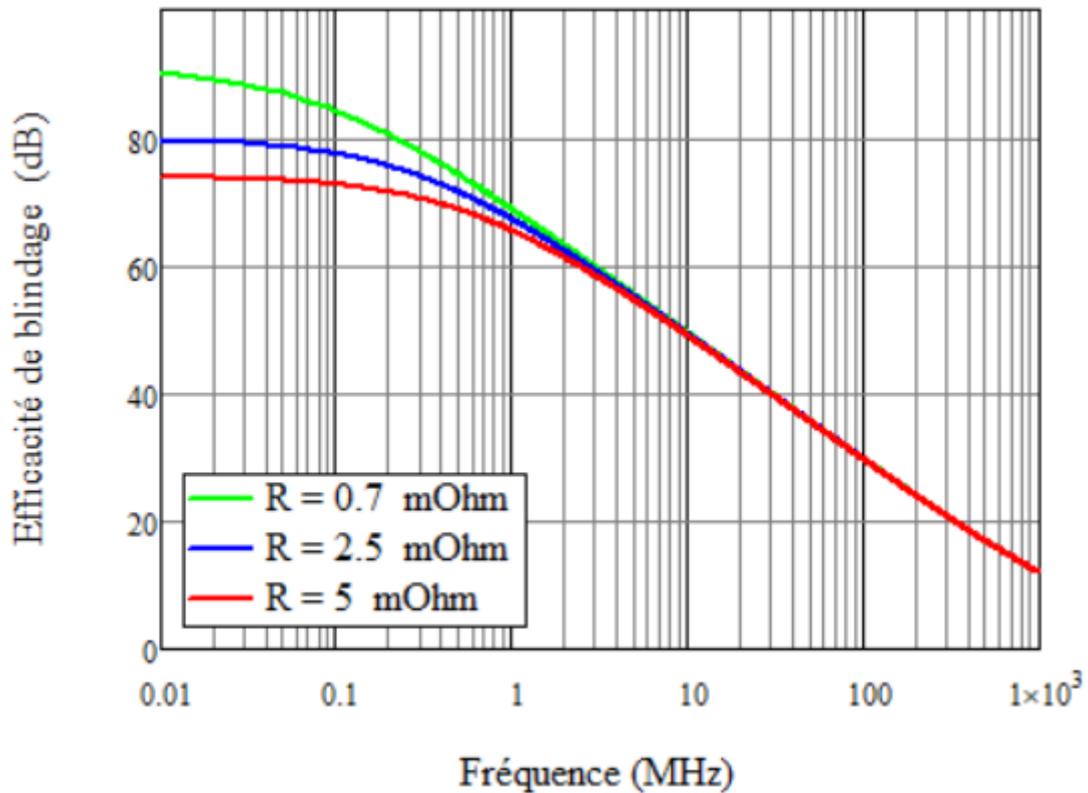


Figure 3.6 : Efficacité de blindage à partir l'impédance de transfert avec variation de R et $L=1.35$ nH

3.2.2 Modèle Physique de l'impédance de transfert pour les gaines homogènes

Selon le modèle de Shelkunoff, pour les gaines en forme de tube homogène, l'impédance de transfert dépend de l'épaisseur du matériau d et de l'épaisseur de peau δ [4].

$$Z_t = R * \frac{(1 + j) \frac{d}{\delta}}{\sinh \left[(1 + j) \frac{d}{\delta} \right]} \quad (3.7)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{w * \mu * \sigma}} \quad (3.8)$$

Ce modèle dépend de la conductivité du matériau, l'épaisseur et alors l'effet de peau.

Chapitre 3 : Impédance de transfert

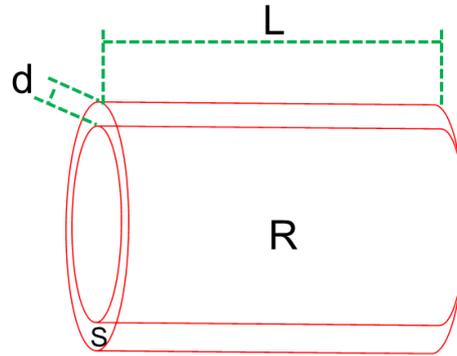


Figure 3.7 : Forme d'une gaine en homogène

La résistivité du matériau et donc la conductivité du matériau sont calculés par les équations suivantes. (Pour simplifications $l = 1 \text{ m}$)

$$\rho = \frac{R * S}{l} \tag{3.9}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{3.10}$$

- Application : variation de résistance avec épaisseur $d = 0.1 \text{ mm}$.

$R \left(\frac{m\Omega}{m} \right)$	1	4	7
$R (m\Omega)$	0.7	2.5	5

Chapitre 3 : Impédance de transfert

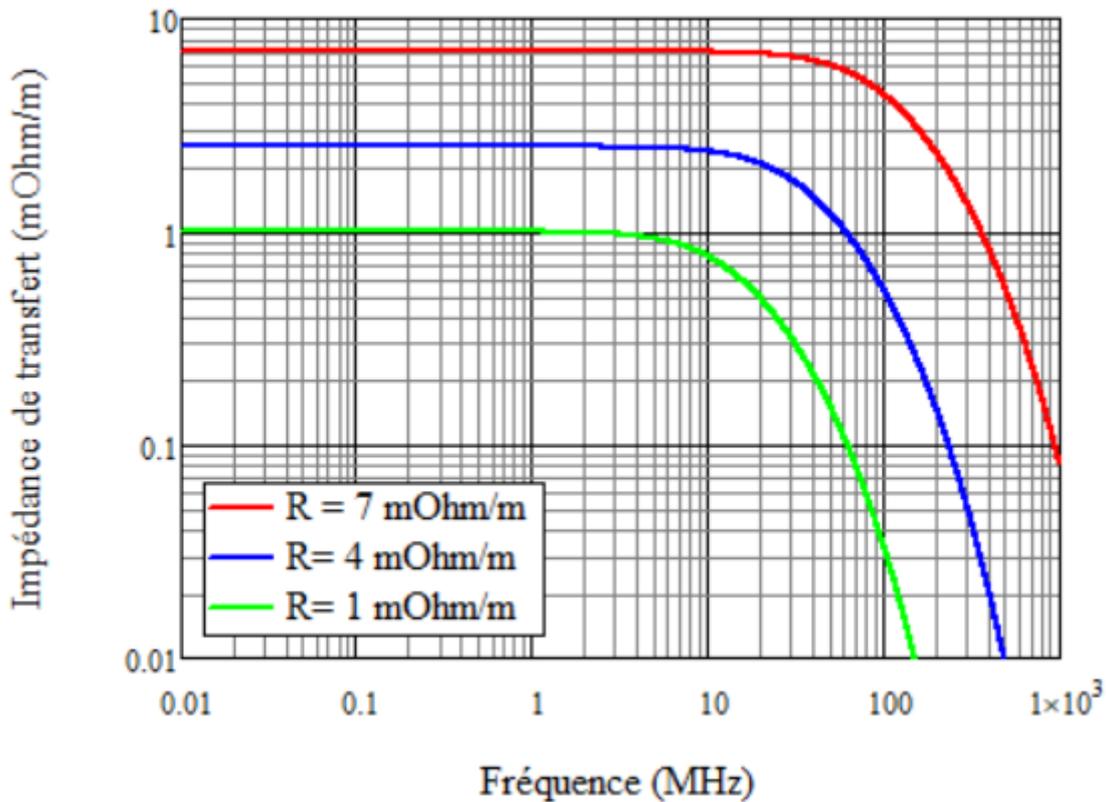


Figure 3.8 : Module de l'impédance de transfert en changeant la résistance Avec $d= 0.1mm$

La Figure 3.8 montre que l'impédance de transfert diminue avec la résistance en basse fréquence. En hautes fréquences la grande diminution de Z_t est liée à l'effet de peau, vu également avec l'augmentation de l'efficacité de blindage pour les échantillons pleins présentés dans le chapitre précédent. Ce phénomène est présenté dans laFigure 3.9. Rappelons que le passage de l'impédance de transfert à l'efficacité de blindage est fait à partir de modèle de réflexions multiples présenté dans le chapitre précédent.

Chapitre 3 : Impédance de transfert

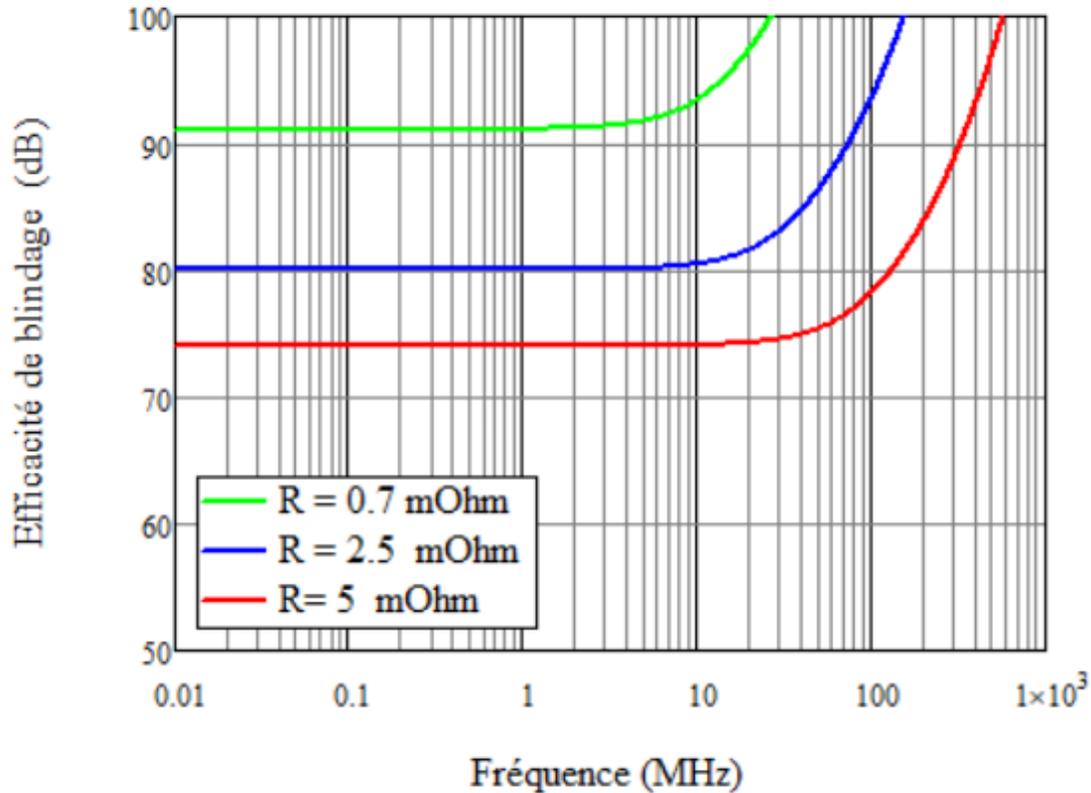


Figure 3.9 : Efficacité de blindage à partir de l'impédance de transfert avec une variation de résistance

3.2.3 Modèle géométrique de l'impédance de transfert pour les gaines métalliques en forme de tresses

Comme indiqué précédemment, l'impédance de transfert des gaines en forme de tresse métalliques dépend de la conductivité du matériau utilisé, mais aussi de la forme géométrique de la tresse en fonction du nombre de fils, nombres et dimensions des ouvertures, angle de tressage... Kley a présenté un modèle comportemental de l'impédance de transfert des tresses [5].

$$Z_t = Z_R + \frac{k}{l} * jWM_{LL} + \frac{k}{l} (1 + j)W * L_{SL} \quad (3.11)$$

Avec

Z_R : impédance de transfert pour un tube calculé à partir du modèle de Shelkunoff.

M_{LL} : Inductance de l'ouverture

Chapitre 3 : Impédance de transfert

L_{SL} : inductance de peau

k : nombre des ouvertures et l : longueur de la gaine.

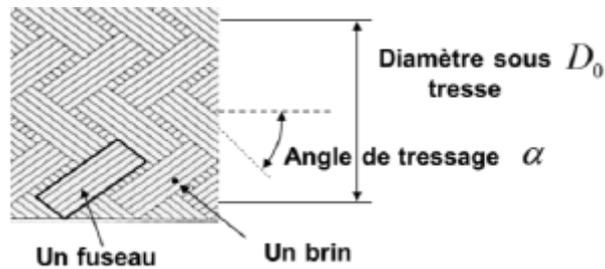


Figure 3.10 : Configuration géométrique d'une tresse [6]

Nous présentons ce modèle ici, pour montrer que la prédiction de l'impédance de transfert des tresses dépend de la forme géométrique de la tresse en termes de nombre de fils, nombre et taille des ouvertures, l'angle de tressage...

En appliquant ces données, le laboratoire Hubert Curien (partenaire dans le projet NextGen) travaille sur la simulation et l'étude de ces paramètres pour pouvoir prédire l'impédance de transfert

Dans nos travaux nous avons travaillé sur la prédiction de l'impédance de transfert à partir de la mesure de l'efficacité de blindage.

3.3 Cellule Triaxiale pour la mesure de l'impédance de transfert

3.3.1 Cellule triaxiale selon la norme IEC 62153-4-3

La norme *IEC 62153-4-3* [7] décrit la méthode de mesure qui consiste à utiliser la forme triaxiale. La cellule est constituée d'un conducteur central et d'une gaine qui forme un système coaxial intérieur et d'un tube métallique extérieur fermant totalement l'ensemble. L'assemblage de la gaine et du tube forme un autre système coaxial.

En générant une tension sur le système intérieur, le couplage entre les deux lignes induit un courant sur le système extérieur ce qui permet de mesurer l'impédance de transfert

Chapitre 3 : Impédance de transfert

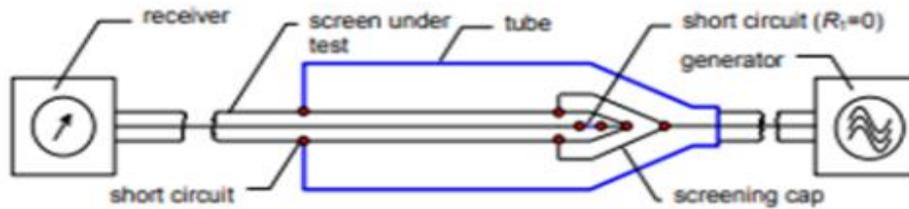


Figure 3.11 : Méthode de test IEC 62153-4-3 [8]

$$Z_{tIEC} = \frac{50}{2 \cdot L_c} * 10^{-\left(\frac{a_{meas} - a_{cal}}{20}\right)} \left(\frac{\Omega}{m}\right) \quad (3.12)$$

La formule (3.12) donne cette impédance de transfert en fonction de l'atténuation mesurée a_{meas} , l'atténuation des câbles de connexions a_{cal} (si non éliminée par calibration), et la longueur de couplage L_c .

Concernant le projet NextGen l'exigence de l'impédance de transfert est :

$$Z_t = 4 \left[\frac{m\Omega}{m} \right] + j \cdot \omega \cdot 2 \left[\frac{nH}{m} \right] \quad (3.13)$$

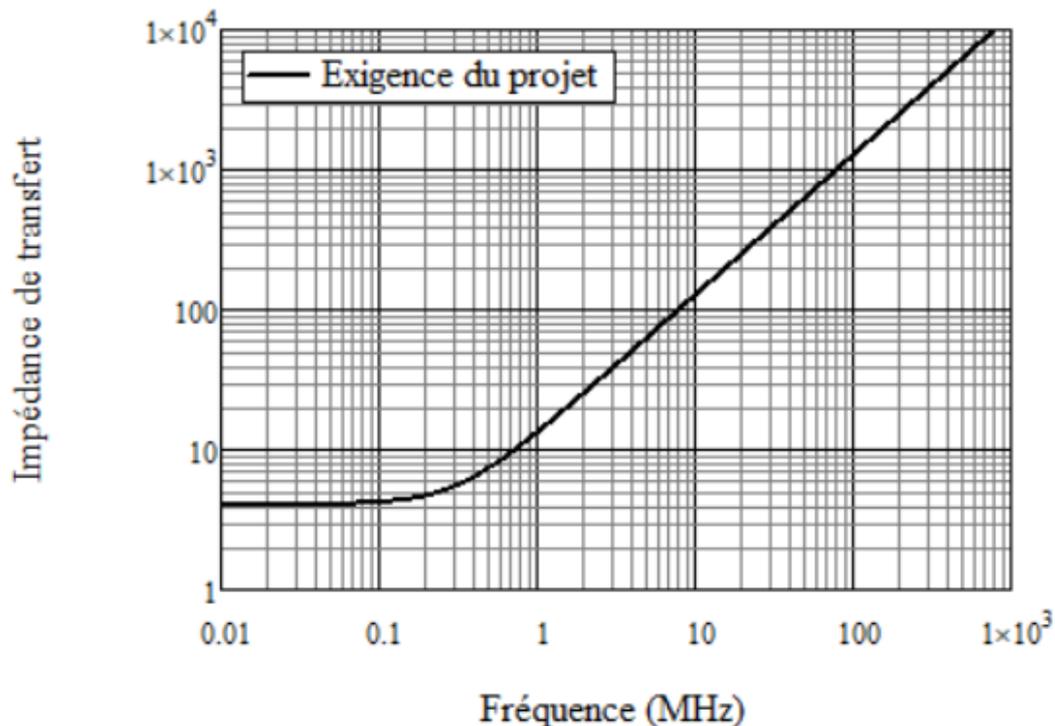


Figure 3.12 : Exigence du projet NextGen pour le module de l'impédance de transfert

Chapitre 3 : Impédance de transfert

3.3.2 Modèle électrique proposé

En plus des modèles présentés avant, nous proposons un modèle électrique pour la cellule triaxiale réalisé en utilisant le logiciel ADS. La cellule triaxiale est constituée de deux lignes coaxiales concentriques couplées entre elles.

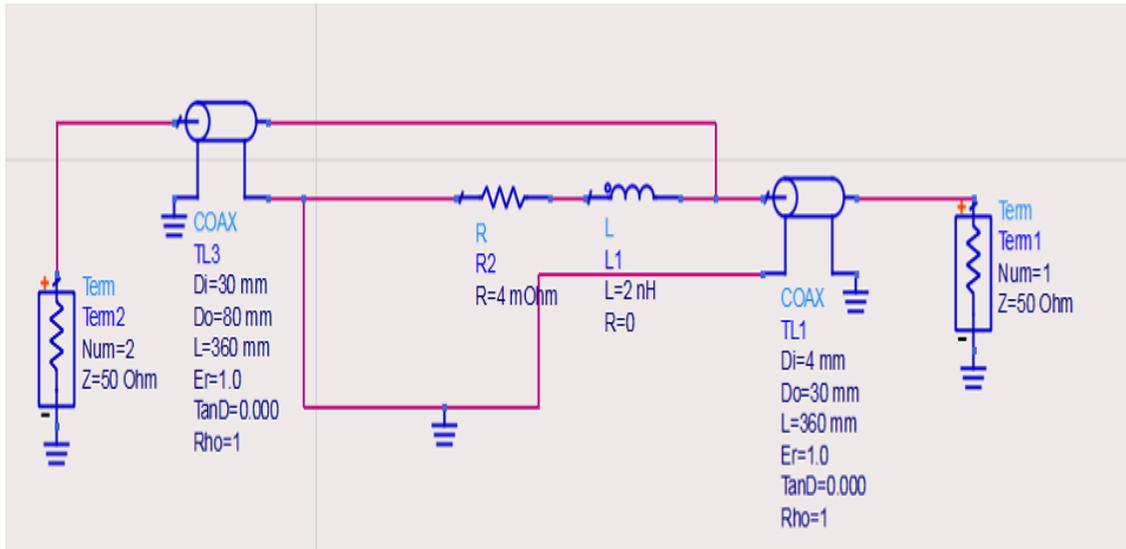


Figure 3.13 : Modèle électrique proposé de la cellule triaxiale

Nous avons choisi la longueur de couplage de 360 mm par rapport à la cellule fabriquée, ce qui sera expliqué dans la partie suivante. Notons que les simulations sont normalisées pour une longueur de couplage de 1 m.

Chapitre 3 : Impédance de transfert

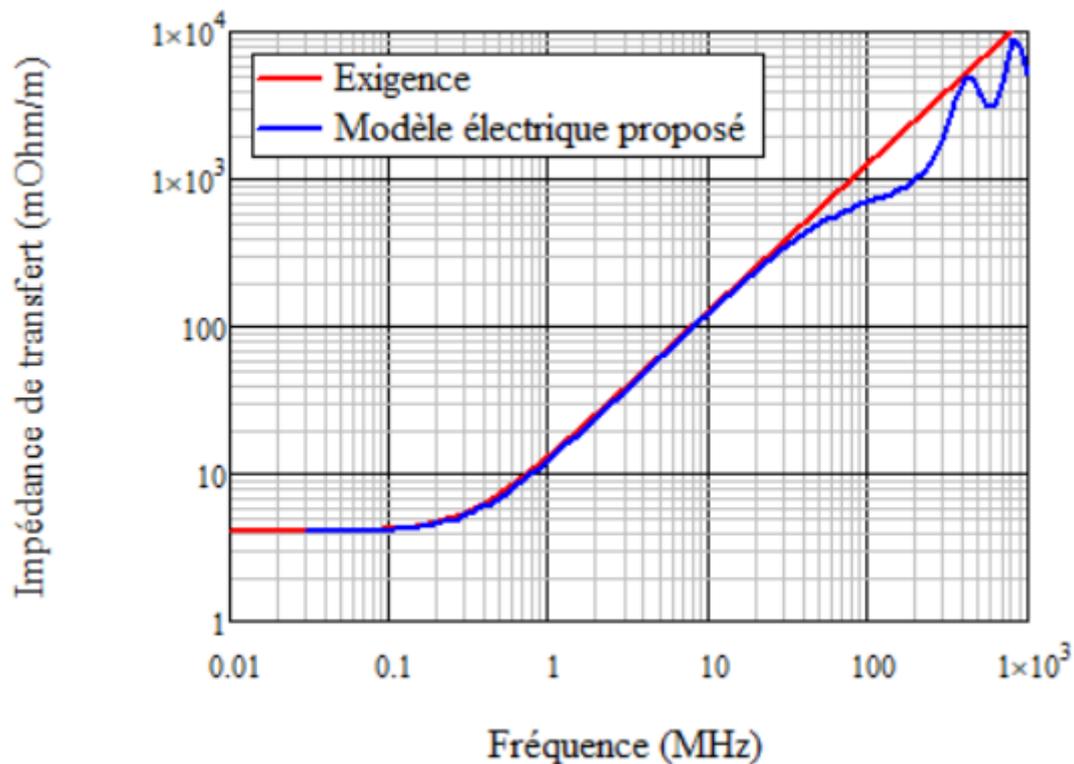


Figure 3.14 : Comparaison entre Exigence du projet et modèle électrique proposé pour la cellule triaxiale.

La Figure 3.14 présente la comparaison entre l'exigence du projet et le modèle électrique de la cellule triaxiale, les graphes montrent un bon comportement jusqu'au 50 MHz, à partir de cette fréquence des résonnances commence à apparaître.

Généralement la longueur de couplage est choisie de façon que

$$L_c \ll \lambda [3] \quad (3.14)$$

Normalement la longueur de couplage est

$$L_c < \frac{\lambda}{10} [8] \quad (3.15)$$

Chapitre 3 : Impédance de transfert

3.3.3 Design et fabrication

Nous avons réalisé la conception d'une cellule triaxiale et réalisé la fabrication selon la norme. Afin de comparer notre mesure avec les mesures faites chez nos partenaires, une longueur de couplage de 360 mm a été choisie pour la cellule à fabriquer.

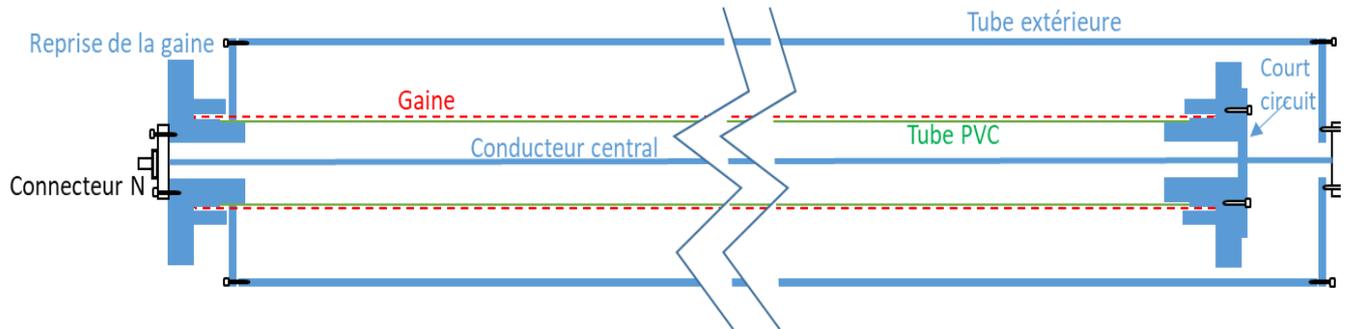


Figure 3.15 : Design de la cellule triaxiale

3.3.3.1 Cellule de 360 mm

La cellule est constituée d'un conducteur central et d'un tube métallique extérieur avec les plaques de reprise de gaine. Un tube de PVC est intercalé entre le conducteur central et le tube métallique extérieur afin de centrer le conducteur central dans la gaine (Figure 3.16).



Figure 3.16 : cellule triaxiale de 360 mm

Chapitre 3 : Impédance de transfert

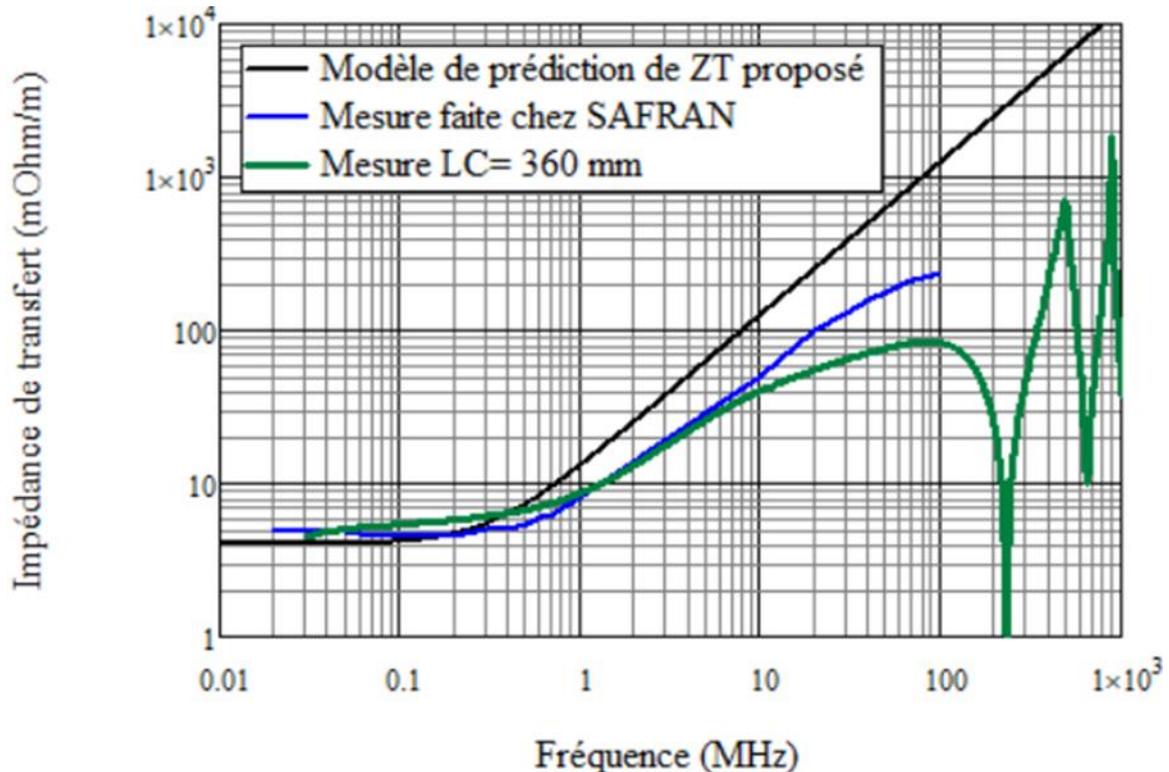


Figure 3.17 : mesure du module de l'impédance de transfert par la cellule de 360 mm

La Figure 3.17 présente le résultat de mesure de la gaine en le comparant avec la mesure faite chez SAFRAN notre partenaire et avec l'exigence du projet. Deux interprétations peuvent être notées :

- En comparant les graphes, on observe une impédance Z_t plus faible au-dessus de 10 MHz pour nos mesures, correspondant probablement à une inductance parasite de reprise de gaine plus faible dans notre montage.
- En prenant en compte les résonances, liées aux désadaptations des différentes sections coaxiales, dans notre mesure, l'impédance de transfert peut être caractérisée jusqu'à 100 MHz.

L'objectif de la thèse dans cette partie est de développer un banc triaxial jusqu'à 1 GHz.

La première idée pour améliorer la bande de fréquence est de diminuer le plus possible la longueur de couplage L_c . Afin d'augmenter la fréquence de résonance, la longueur de couplage doit être inférieure à la longueur d'onde, en pratique $L_c = \frac{\lambda}{10}$. Pour cela une cellule de longueur

Chapitre 3 : Impédance de transfert

de couplage de 100 mm a été fabriquée avec une fréquence maximale de travail prévue de 300 MHz.

3.3.3.2 Cellule de 100 mm



Figure 3.18 : cellule triaxiale de 100 mm

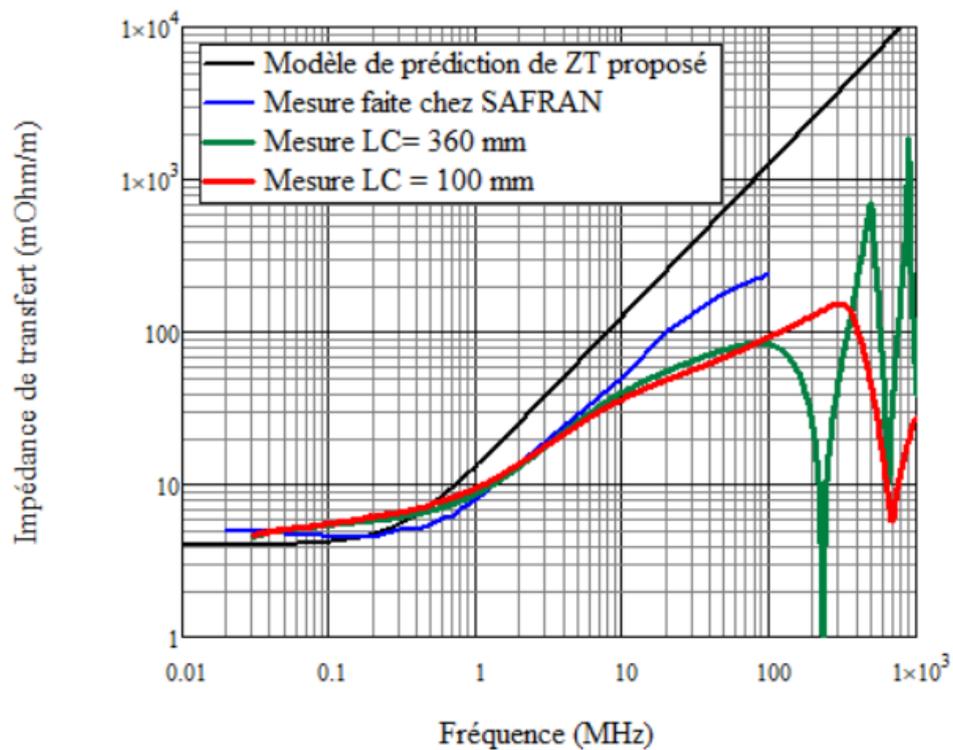


Figure 3.19 : Module de l'impédance de transfert - comparaison des mesures

En comparant les deux cellules et en prenant en compte les résonances, la cellule de 100 mm est valable jusqu'au 300 MHz. Une longueur de couplage inférieure à 100 mm serait difficile à caractériser parce que l'effet des câbles et des connecteurs devient plus important.

Chapitre 3 : Impédance de transfert

3.3.4 Validation

Cette cellule est validée sur les tresses et les tissus mesurés plus haut dans le chapitre sur l'efficacité de blindage.

D'abord, nous avons choisi un tissu métallisé HNG80 qui est réalisé en fils de polyester métallisés d'épaisseur 0.07 mm, et une résistance carrée $R_{\square} = 0.02\Omega$ et qui est spécifié pour une atténuation d'environ 80dB. Puisque cette gaine est de forme homogène Le modèle de Shelkunoff [4] est utilisé dans la comparaison.

$$Z_t = R_{\square} * \frac{(1 + j) \frac{d}{\delta}}{\sinh \left[(1 + j) \frac{d}{\delta} \right]} \quad (3.16)$$



Figure 3.20 : Assemblage de la cellule triaxiale et la gaine

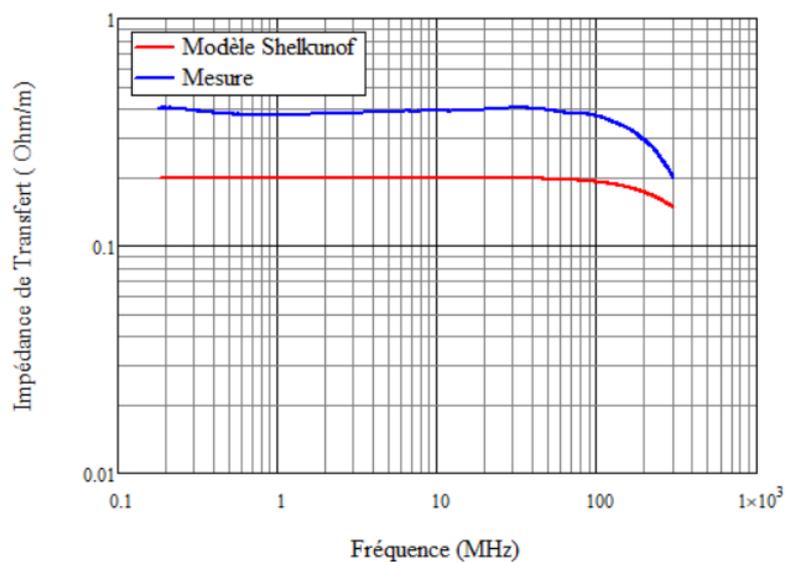


Figure 3.21 : Comparaison entre modèle, et mesure du module de l'impédance de transfert pour le tissu HNG80

Chapitre 3 : Impédance de transfert

La Figure 3.21 présente la comparaison des résultats du module de l'impédance de transfert par modélisation et mesure pour le tissu HNG80. La différence entre la mesure et la simulation correspond à une résistance plus élevée en mesure qui provient des résistances de contact entre la cellule triaxiale et la gaine à tester au niveau des bagues de serrage. La prise en compte de ces résistances de contact est l'objectif de la partie suivante.

3.3.5 Effet de résistance de contact sur la mesure de l'impédance de transfert

La résistance de contact entre la cellule triaxiale et la gaine sous test est une résistance critique dans la mesure de l'impédance de transfert. Dans notre cellule, la résistance de contact est présentée sur le schéma suivant :

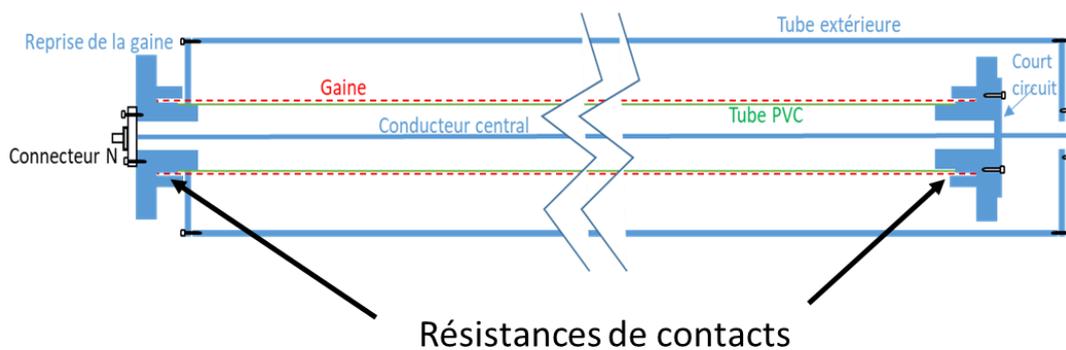


Figure 3.22 : Présentation de la place des résistances de contact

Une procédure de mesure de cette résistance de contact a été mise en place pour corriger la valeur de l'impédance de transfert. La mesure de résistance est faite en utilisant un milli-ohmmètre en le connectant à une des extrémités de la cellule, l'autre extrémité est court-circuitée.

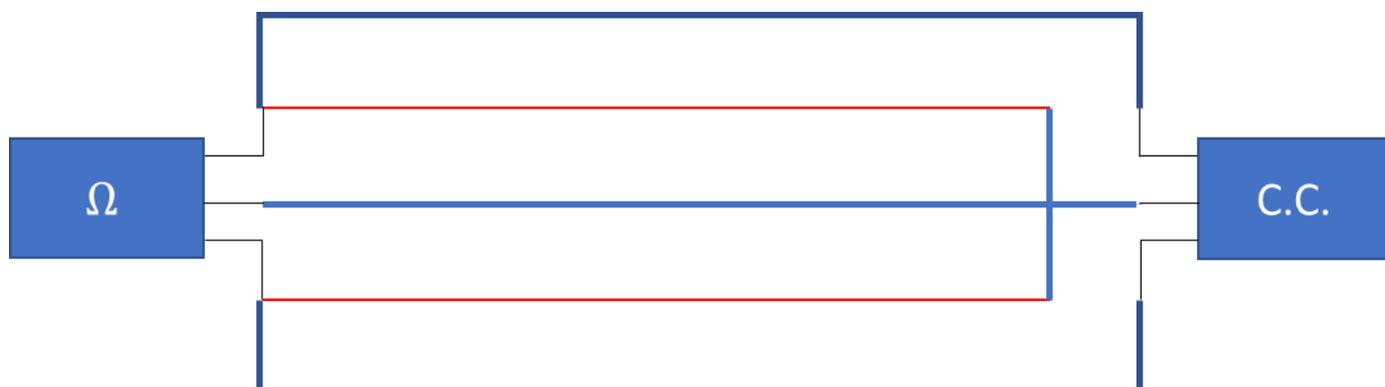


Figure 3.23 : Mesure de résistance de contact

Chapitre 3 : Impédance de transfert

La mesure de la résistance de contact est faite en deux étapes :

- a. Mesure de la résistance de l'assemblage total de la cellule triaxiale avec la gaine. $R_1 = 20.5 \text{ m}\Omega$



Figure 3.24 : Assemblage de la cellule triaxiale avec la gaine

- b. Mesure de la résistance de la cellule triaxiale avec l'assemblage du tissu seulement sur les plaques de reprises de la gaine (où il y a un contact entre la gaine et la cellule) $R_2 = 42.2 \text{ m}\Omega$.



Figure 3.25 : assemblage de la cellule triaxiale avec tissu en contact

La différence entre ces deux valeurs est $\Delta R = R_2 - R_1 = 21.7 \text{ m}\Omega$. Dans la cellule triaxiale il y a deux points de contact entre la gaine et la cellule triaxiale ce qui implique que la résistance de contact totale est $R_c = 2 * 21.7 = 43.4 \text{ m}\Omega$. Notons que cette résistance est en parallèle avec la résistance de la gaine. Ainsi, pour corriger la valeur de l'impédance de transfert il faut enlever cette résistance de contact en utilisant l'équation suivante

$$Z_{t_corriger} = \frac{1}{L_c} * \frac{R_c * Z_{t_mesurer} * L_c}{R_c + Z_{t_mesurer} * L_c} \quad (3.17)$$

Chapitre 3 : Impédance de transfert

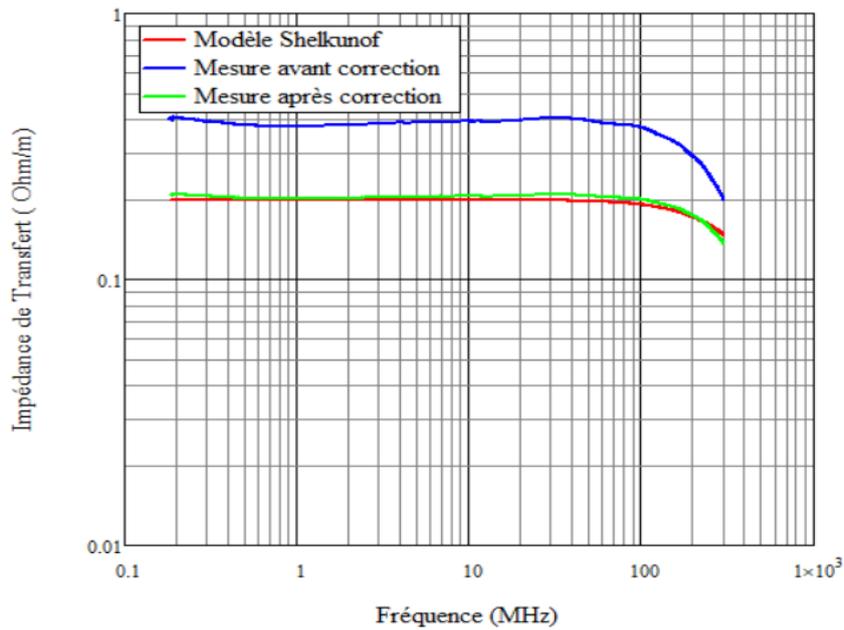


Figure 3.26 : Comparaison, modèle, et mesure du module de l'impédance de transfert avant et après correction, pour le tissu HNG80

Après correction de la mesure brute, un bon accord entre le modèle et la mesure corrigée est observé jusqu'au 300 MHz compte tenu des résonances de la cellule au-delà de cette fréquence.

3.4 Application : Influence de chevauchement de la gaine sur la mesure de l'impédance de transfert

A partir de l'efficacité de blindage d'un matériau plan, l'impédance de transfert de la gaine correspondante est étudiée dans le cas idéal d'une gaine cylindrique. De plus l'influence du chevauchement est analysée dans le cas pratique d'une gaine ouverte, qui correspond à une mise en œuvre dans les applications aéronautiques.

Chapitre 3 : Impédance de transfert

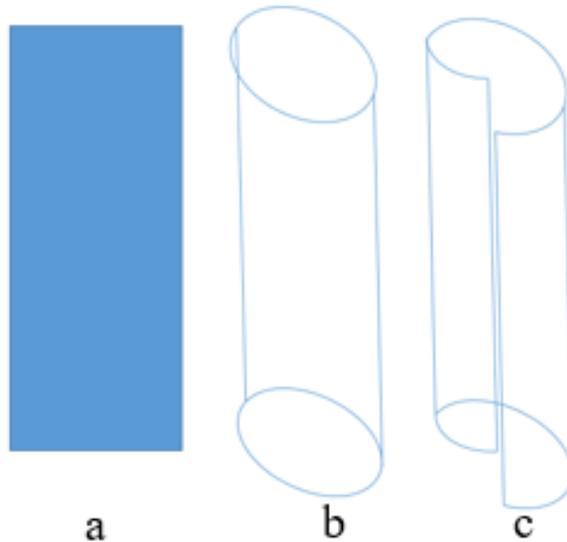


Figure 3.27 : Schéma de mise en œuvre des gaines

La Figure 3.27 montre le schéma de mise en œuvre des gaines à partir d'un matériau plein pour la mesure de l'efficacité de blindage. La gaine peut être fabriquée pour avoir une forme cylindrique idéal, mais également un cylindre ouvert pour faciliter l'assemblage final avec un câble (Figure 3.28).

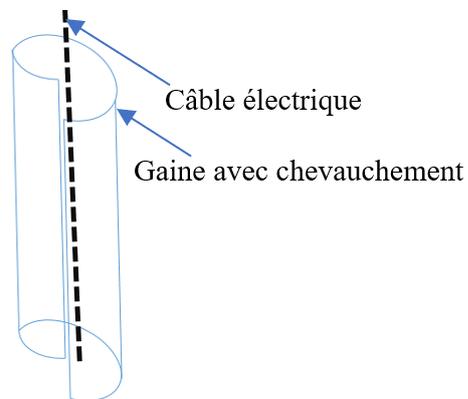


Figure 3.28 : assemblage gaine et câble

Les gaines mesurées doivent être assemblées sous forme d'un tube à partir d'un tissu plan, un over-lap de quelques mm doit exister pour pouvoir obtenir le cylindre « fermé ». Afin de vérifier l'influence de l'over-lap sur l'impédance de transfert deux mesures sont considérées :

- a. Mesure de l'impédance de transfert sans over-lap (Figure 3.29)
- b. Mesure de l'impédance de transfert avec over-lap de 1 cm et de 3cm (Figure 3.30)

Chapitre 3 : Impédance de transfert



Figure 3.29 : Gaine sans Over-lap



Figure 3.30 : Gaine avec Over-lap

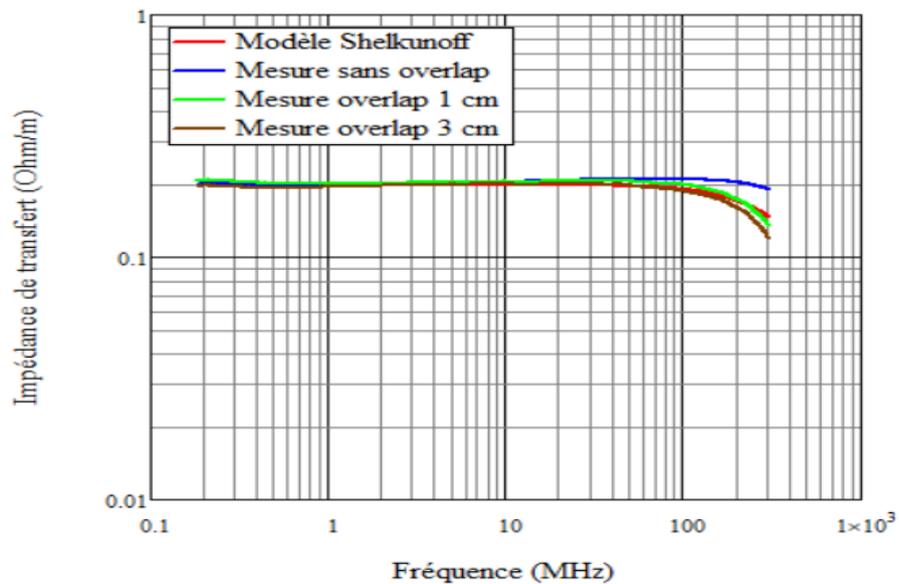


Figure 3.31 : Résultats de mesure de l'impédance de transfert, sans et avec over-lap, pour le tissu HNG80

La Figure 3.31 présente l'effet de l'over-lap du tissu sur la valeur de l'impédance de transfert. En normalisant toutes les mesures brutes avec la résistance de contact, l'impédance de transfert mesurée est validée jusqu'à 300 MHz, notons que la différence entre 1 cm et 3 cm de chevauchement est négligeable.

Une autre mesure est faite mais maintenant en diminuant le largeur du tissu de 1 cm ce qui ressemble à un cylindre avec une ouverture sur toute la longueur.

Chapitre 3 : Impédance de transfert



Figure 3.32 : Gaine avec ouverture

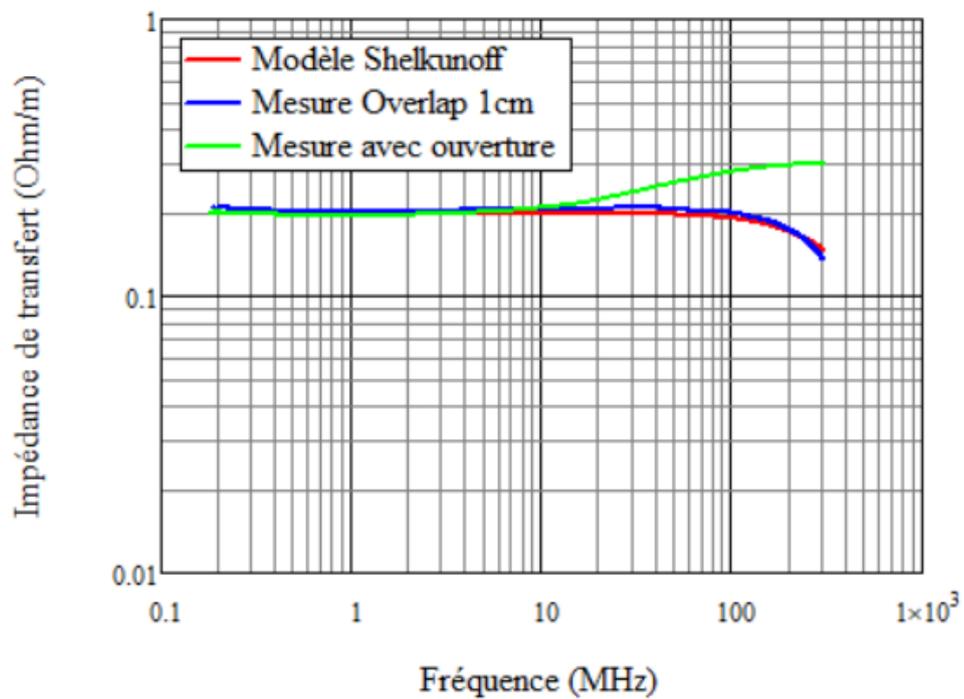


Figure 3.33 : Résultats de mesure du module de l'impédance de transfert, over-lap 1cm et avec ouverture 1cm, pour le tissu HNG80

La Figure 3.33 présente les résultats de mesure du module de l'impédance de transfert de la gaine sans over-lap et la gaine avec une ouverture de 1 cm de largeur sur 10 cm de longueur

Chapitre 3 : Impédance de transfert

(Figure 3.32). Les graphes montrent qu'un effet inductif est visible entre 10 et 300 MHz, qui est lié à la présence de l'ouverture sur toute la longueur de la gaine.

3.5 Modèle de l'impédance de transfert des tresses à partir du modèle de l'efficacité de blindage

En plus des modèles présentés précédemment nous avons cherché à développer un modèle de prédiction de l'impédance de transfert des tresses métalliques à partir de la mesure de l'efficacité de blindage.

L'impédance des tresses métalliques est la contribution d'une résistance et d'une inductance. La résistance de la gaine est mesurée directement avec un milli-ohmmètre en prenant en compte la longueur de couplage. La valeur de l'inductance est liée aux trous de la tresse, l'inductance joue un rôle dans la pente de la mesure et ainsi de la simulation ce qui implique que la fréquence de coupure F_0 est liée aussi à l'inductance.

Le modèle comportemental de l'efficacité de blindage des tresses proposé dans le chapitre précédent va nous servir à proposer un modèle empirique de l'impédance de transfert Z_t .

Rappelons que le modèle de l'efficacité de blindage, à partir des réflexions multiples, proposé est :

$$SE \text{ (dB)} = 20 * \log \left[\frac{1}{T \left(1 + j \left(\frac{F}{F_0} \right)^x \right)} \right] \quad (3.18)$$

Avec

$$T = (1 - \Gamma^2) e^{-\gamma d} \left[\frac{1}{1 - (\Gamma^2) e^{-2\gamma d}} \right] \quad (3.19)$$

Le modèle de l'impédance de transfert proposé est :

$$Z_t \left(\frac{\Omega}{m} \right) = \frac{R}{L_c} * \left(1 + j \left(\frac{F}{F_0} \right)^x \right) \quad (3.20)$$

Avec

Chapitre 3 : Impédance de transfert

R: résistance de la gaine , L_c : longueur de couplage , F_0 : fréquence de coupure à -3 dB et x étant les mêmes valeurs utilisées dans le modèle de l'efficacité de blindage.

La première mesure était faite sur la gaine métallique de référence, $F_0 = 0.61$ MHz et $x = 0.55$ sont les valeurs extraites des mesures de l'impédance de transfert de la tresse de référence.



Figure 3.34 : Gaine métallique de référence

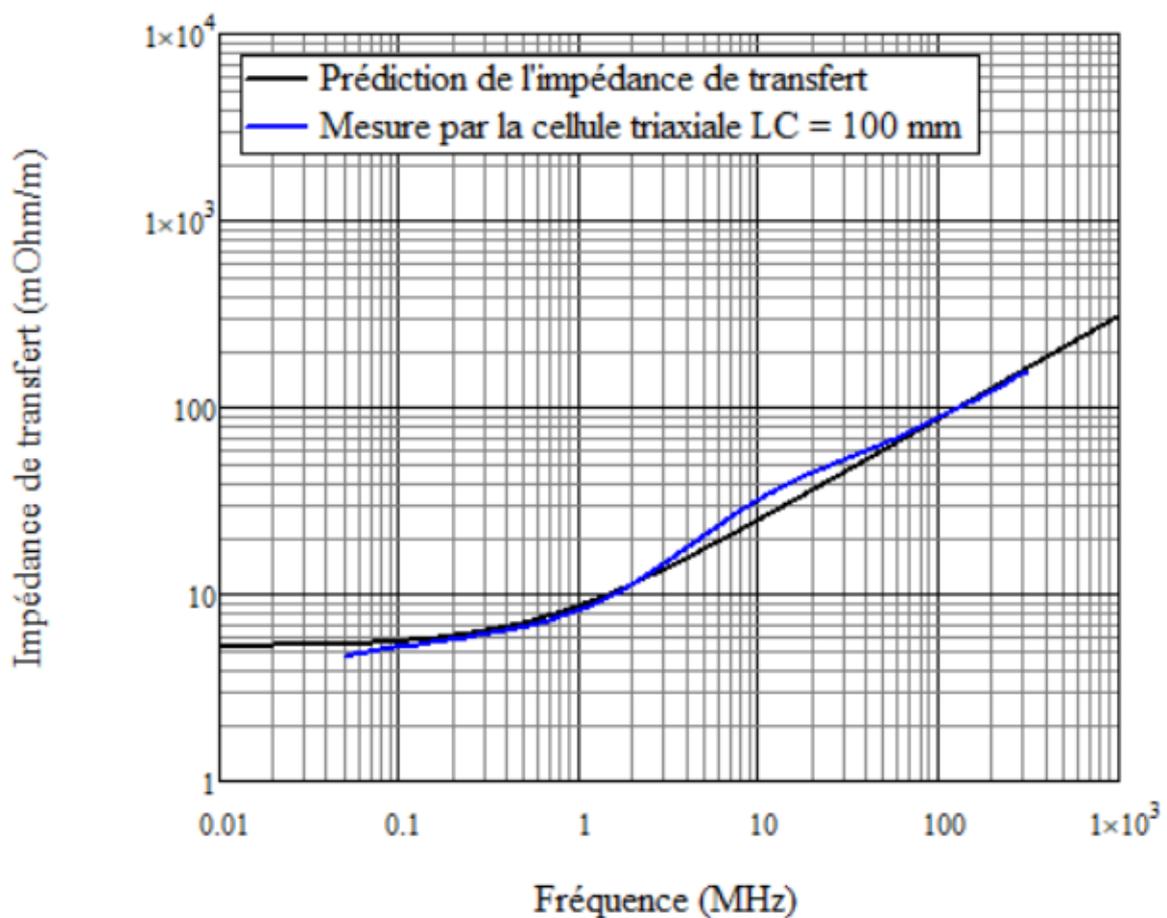


Figure 3.35 : Comparaison Modèle de prédiction de ZT avec mesure sur la gaine de référence pour une longueur de couplage de 100 mm

Chapitre 3 : Impédance de transfert

La Figure 3.35 présente la comparaison entre le modèle de prédiction de l'impédance de transfert et la mesure faite par la cellule triaxiale de longueur de couplage de 100 mm. Les graphes montrent qu'à partir de la mesure de l'efficacité de blindage, une prédiction de l'impédance de transfert est alors possible. L'adaptation de la cellule triaxiale permettra de mesurer l'impédance de transfert jusqu'à 1GHz.

3.6 Exemple de mesure de validation de modèle de l'impédance de transfert

Dans cette partie nous présentons un exemple de validation de modèle de prédiction à partir de la mesure de l'efficacité de blindage. Pour cela nous avons choisi un échantillon en ALU d'épaisseur de 0.1 mm, nous avons effectué des trous sur cet échantillon et nous avons testé l'efficacité de blindage par la cellule coaxiale. Puis appliquer le modèle de prédiction de l'impédance de transfert. Ensuite nous avons fabriqué une gaine du même métal, mesuré l'impédance de transfert et fait la comparaison. Notons que la mesure est présentée dans la partie suivante après adaptation de la cellule triaxiale.



Figure 3.36 : Plaque ALU 0.1 mm

Chapitre 3 : Impédance de transfert



Figure 3.37 : Plaque ALU 0.1 mm avec trous pour la mesure en cellule triaxiale coaxiale

Pour calculer la conductivité du matériau nous avons testé la résistance en 4 point par un milli-Ohmmètre $R = 6.8 \text{ m}\Omega \rightarrow \sigma = 1.622 * 10^5 \left[\frac{\text{S}}{\text{m}} \right]$.

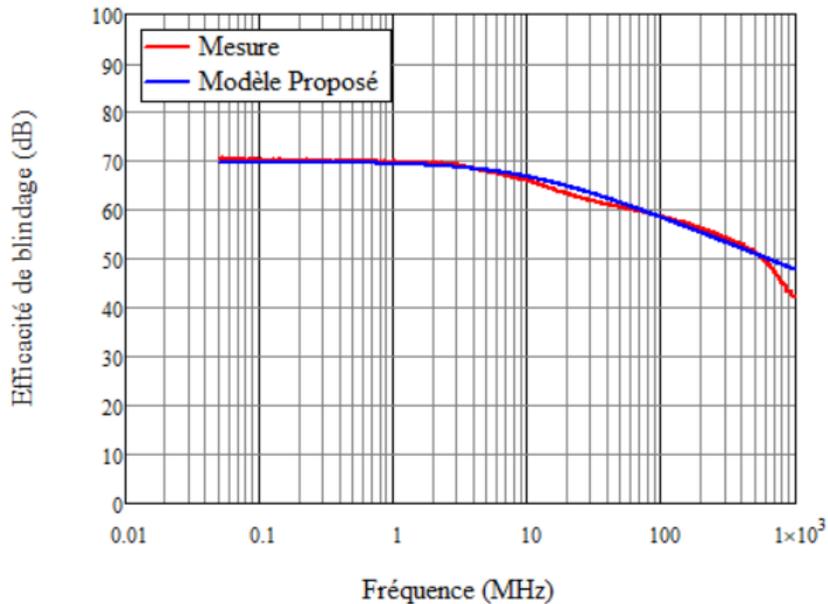


Figure 3.38 : Mesure de l'efficacité de blindage de plaque ALU 0.1 mm avec trous

La Figure 3.38 présente la mesure de l'efficacité de blindage faite par la cellule coaxiale en appliquant le modèle d'extraction de F_0 et x (3.18) et (3.20), nous trouvons $F_0 = 10 \text{ MHz}$ à -3dB et $x = 0.55$.

En appliquant l'équation (3.19) nous pouvons prédire l'impédance de transfert de la gaine. La comparaison avec la mesure sera présentée dans la partie suivante.

Chapitre 3 : Impédance de transfert

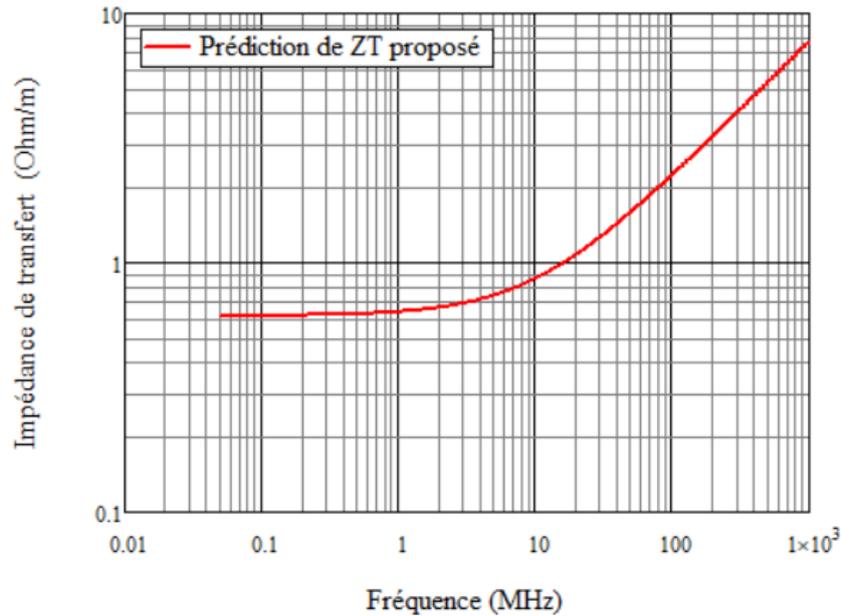


Figure 3.39 : Prédiction de l'impédance de transfert pour une gaine en ALU d'épaisseur de 0.1 m

3.7 Adaptation de la cellule triaxiale jusqu'à 1 GHz

Dans [8] une configuration de la cellule triaxiale avec des résistances d'adaptation est présentée.

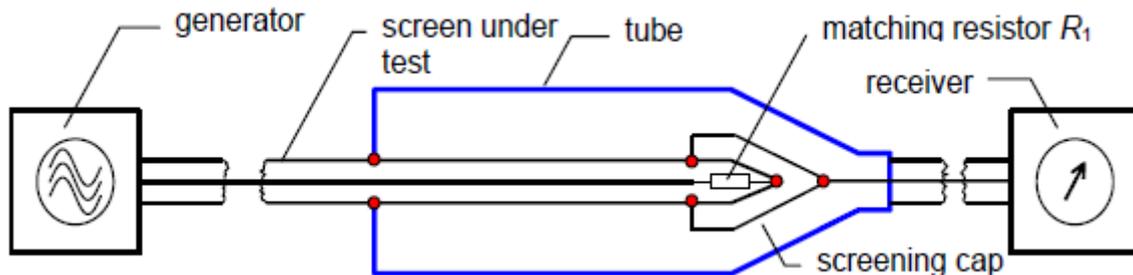


Figure 3.40 : cellule triaxiale avec résistances d'adaptations [8]

Pour un système avec R_1 l'équation d'extraction de l'impédance de transfert, de la norme IEC est la suivante

$$Z_{tIEC} = \frac{50 + 110}{2 \cdot L_c} * 10^{-\left(\frac{a_{meas} - a_{cal}}{20}\right)} \left(\frac{\Omega}{m}\right) \quad (3.21)$$

Pour adapter la cellule, il faut remplacer toutes les parties qui font un court-circuit en bout des lignes de transmission par des impédances d'adaptation (Figure 3.41). La résistance R_1 représente l'impédance caractéristique du système intérieur formé du conducteur central et la gaine. Un disque de résistances remplace la fermeture entre la gaine et le tube extérieur. Ce disque est fabriqué sur un substrat diélectrique avec 4 résistances en parallèle permettant d'avoir

Chapitre 3 : Impédance de transfert

une résistance équivalente égale à l'impédance caractéristique du système extérieur formé de la gaine et du tube extérieur. Pour compléter l'adaptation des cônes de connexion seront nécessaires afin de garder les impédances tout au long de la cellule.

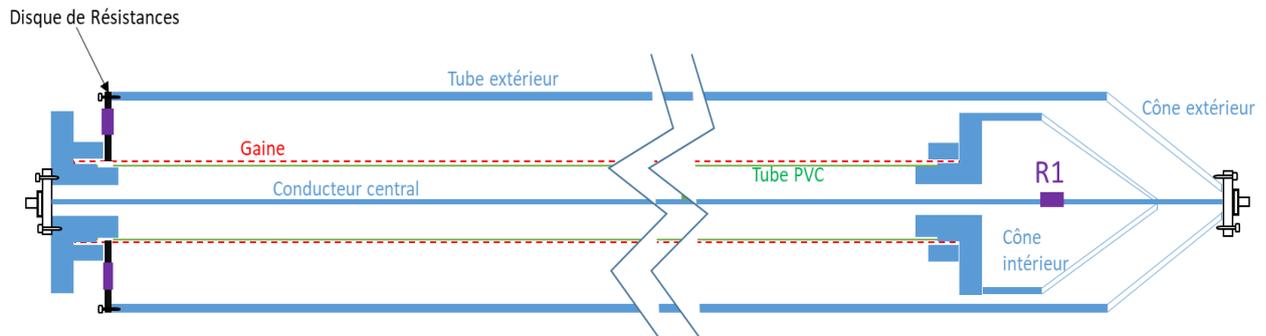


Figure 3.41 : Design d'adaptation de la cellule triaxiale



Figure 3.42 : Cellule Triaxiale fabriquée avec adaptation

Simulation électromagnétique

Pour valider les étapes d'adaptation, des simulations électromagnétiques avec HFSS sont réalisées. Ces simulations décomposent la cellule triaxiale en des lignes coaxiales simples puis avec des résistances et des cônes afin d'arriver à la version complète.

3.7.1 Simulation du système intérieur

Le système intérieur est constitué du conducteur central et de la gaine. Le conducteur central a un diamètre de 5 mm ceci pour faciliter la connexion aux connecteurs N. Tandis que la gaine a 2 diamètres, le premier est le diamètre intérieur et le deuxième dépend de l'épaisseur du matériau utilisée pour former la gaine.

Dans notre cas nous avons choisi un diamètre intérieur de la gaine de 32 mm après échanges avec nos partenaires qui est un des diamètres réellement utilisés pour les gaines de protection

Chapitre 3 : Impédance de transfert

des câbles. Afin de faciliter les simulations nous avons commencé par des gaines en forme de tubes homogènes avec une épaisseur de 1 mm

Rappelons que l'impédance caractéristique d'un câble coaxial est calculée à partir de l'équation suivante.

$$Z_c = \frac{60}{\epsilon_r} * \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right) [9] \quad (3.22)$$

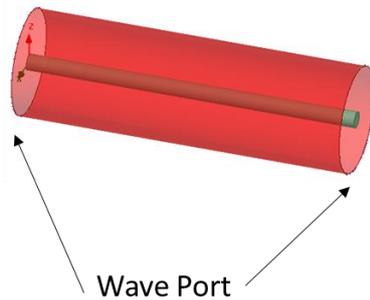


Figure 3.43 : Simulation du système intérieur $D_i = 5 \text{ mm}$, $D_e = 32 \text{ mm}$

La conductivité utilisée dans les simulations est la même que celle utilisée pour la cellule coaxiale présentée dans le chapitre précédent.

$$\sigma = 1.783 * 10^5 \left(\frac{S}{m}\right) \quad (3.23)$$

La première simulation est faite avec des ports d'impédance 50Ω correspondants à l'appareil de mesure, puis de 111Ω pour avoir la même valeur de l'impédance caractéristique de la structure.

Chapitre 3 : Impédance de transfert

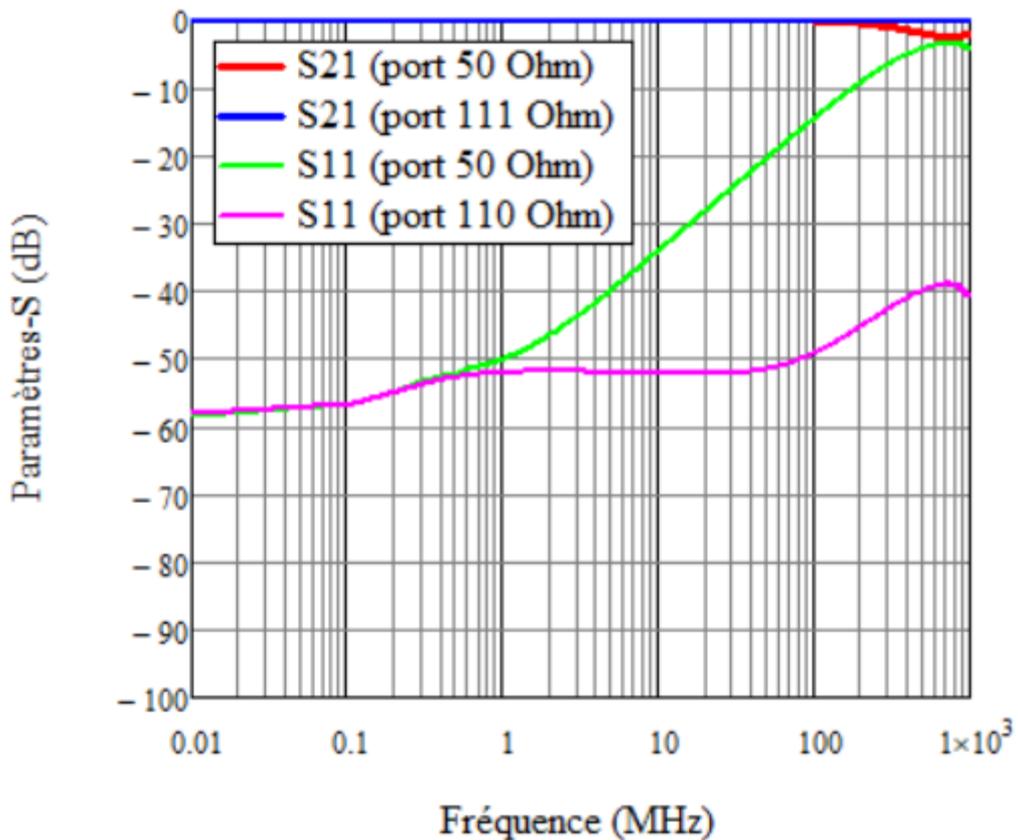


Figure 3.44 : Résultats des simulations du système intérieur (conducteur centrale et gaine).

La Figure 3.44 présente les résultats de simulation du système intérieur constitué du conducteur central avec un diamètre de 5 mm et de la gaine avec un diamètre intérieur de 32 mm. Ces résultats permettent de valider que ce câble est bien adapté à 111 Ohm.

La deuxième étape consiste à compléter le système intérieur par les reprises de la gaine, la résistance d'adaptation et le cône intérieur.

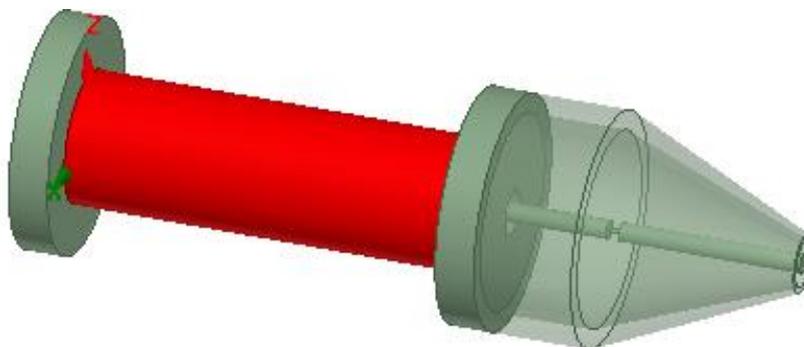


Figure 3.45 : Système intérieur complet

Chapitre 3 : Impédance de transfert

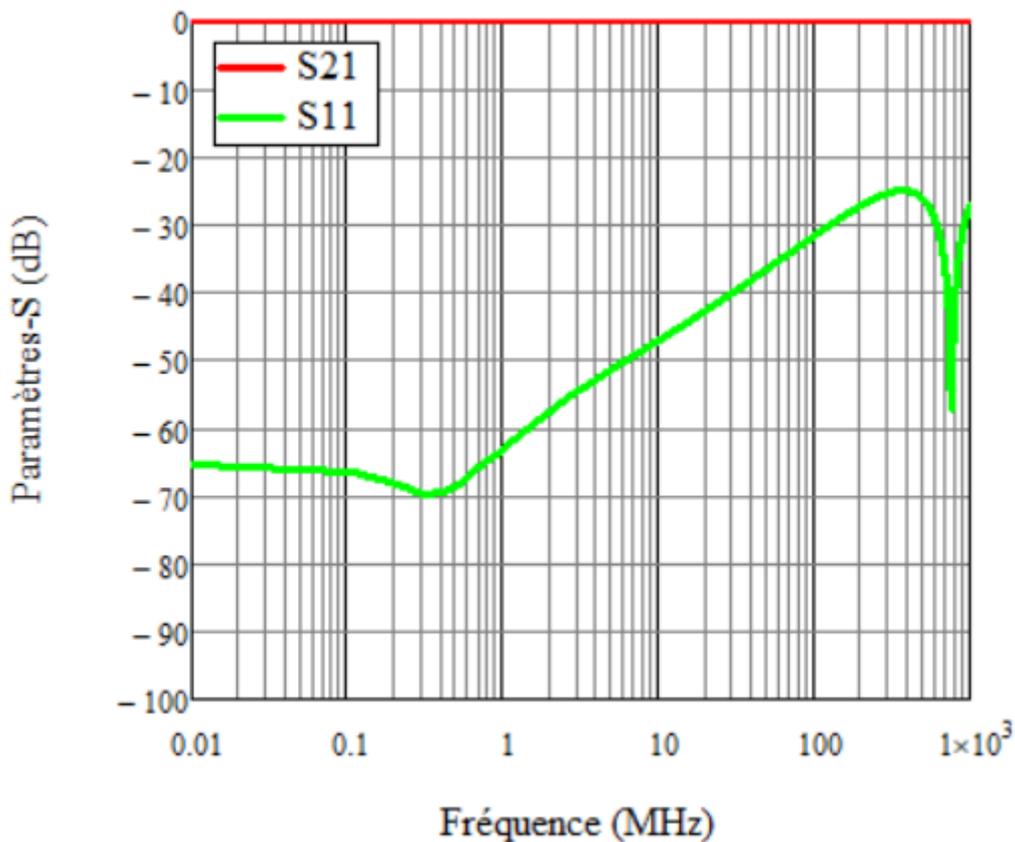


Figure 3.46 : Résultat de la simulation du système intérieur

La Figure 3.46 montre qu'après ajout de la résistance d'adaptation et du cône et en utilisant des ports de 50 Ohm le système est adapté à -25 dB sur toute la bande de fréquence.

3.7.2 Simulation du système extérieur

Le système extérieur est composé de la gaine avec le tube de fermeture. Le diamètre de la gaine est de 34 mm et le tube a un diamètre de 80mm. Le calcul de l'impédance caractéristique du système extérieur donne une valeur proche de 50 Ohm. Rappelons que cette valeur varie avec l'épaisseur de la gaine.

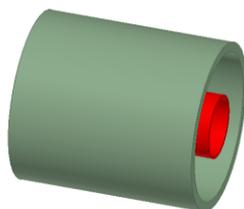


Figure 3.47 : Simulation du système extérieur

Chapitre 3 : Impédance de transfert

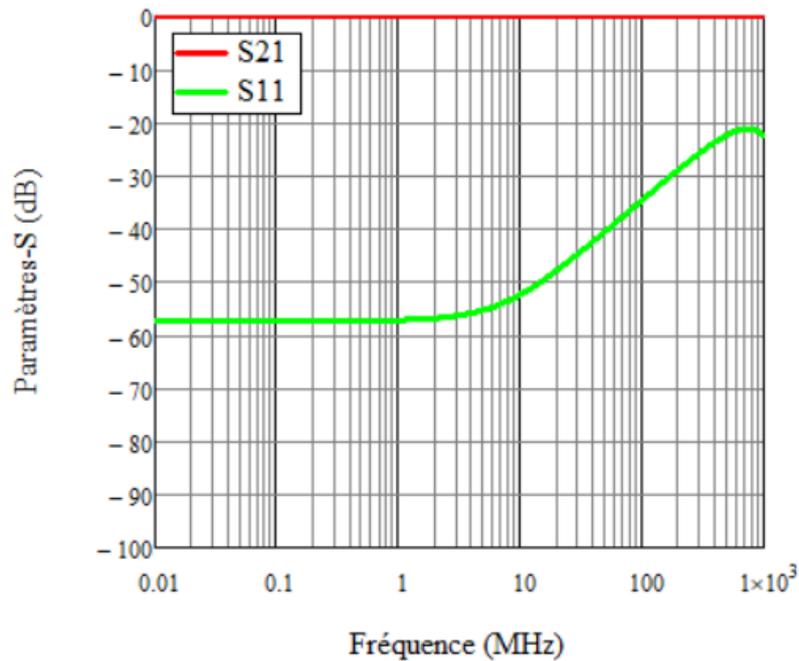


Figure 3.48 : Résultat de simulation du système extérieur

La Figure 3.48 montre que le système extérieur avec les dimensions indiquées n'a pas besoin d'une adaptation interne. On observe aussi que la présence du cône de fermeture reste nécessaire pour garder l'impédance adaptée sur toute la longueur et sur toute la bande de la fréquence.

3.7.3 Cellule triaxiale complète

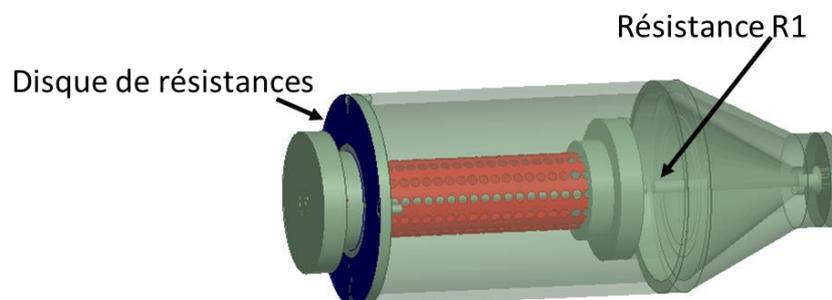


Figure 3.49 : Cellule triaxiale complète

Chapitre 3 : Impédance de transfert

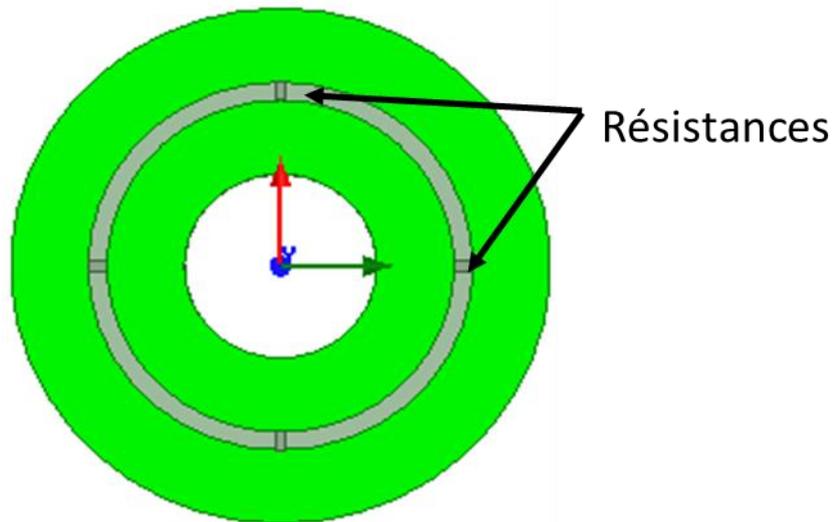


Figure 3.50 : Disque de résistances

Ce disque a été fabriqué sur un substrat FR4. Chaque résistance a une valeur de 200Ω ce qui donne une résistance équivalente de 50Ω , qui pourra changer avec le changement de l'épaisseur de la gaine.

La simulation de la cellule triaxiale a pris en compte les dimensions exactes de la cellule fabriquée avec les contraintes mécaniques lors de la fabrication.

Dans la cellule fabriquée, les dimensions de la fermeture du cône donnent une impédance caractéristique de 107Ω au lieu de 50Ω .

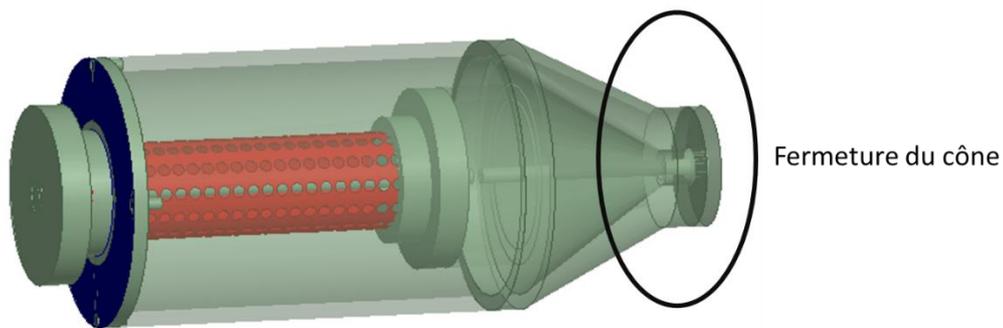


Figure 3.51 : Cellule Triaxiale avec fermeture de cône

Pour vérifier si ce changement de dimensions va causer une désadaptation des simulations de la fermeture sont faites en comparant les dimensions fabriquées et les dimensions souhaitées. Notons que la fermeture correspond à un câble coaxial d'impédance 107Ω sur une longueur de 15 mm.

Chapitre 3 : Impédance de transfert



Figure 3.52 : Dimensions fabriquées de la fermeture du cône ($D1=5\text{ mm}$, $D2=30\text{mm}$, $L=15\text{ mm}$, $Z_c=107\ \Omega$)

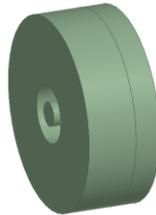


Figure 3.53 : Dimension idéales souhaitées de la fermeture du cône ($D1=5\text{ mm}$, $D2=11.5\text{mm}$, $L=15\text{ mm}$, $Z_c=107\ \Omega$)

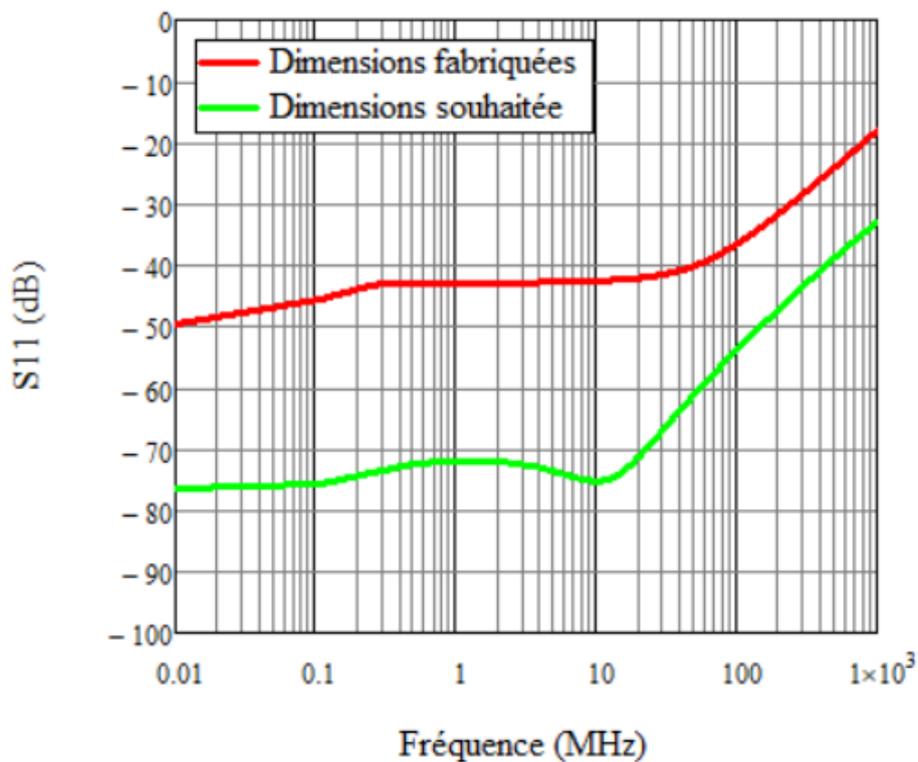


Figure 3.54 : Simulation de fermeture du cône seule

La Figure 3.54 montre que la différence en réflexion, du câble coaxial simulé qui représente la fermeture du cône, est de 20 dB environ entre les dimensions fabriquées et les dimensions souhaitées. On en déduit que l'impact du tronçon désadapté ($107\ \Omega$) sur 15 mm sera limité.

Chapitre 3 : Impédance de transfert

3.7.4 Simulation électromagnétique de la cellule triaxiale complète

Pour pouvoir faire une simulation de l'impédance de transfert et comparer avec la mesure et valider la prédiction de l'impédance de transfert à partir de la mesure de l'efficacité de blindage, nous avons fabriqué une gaine avec le matériau en ALU d'épaisseur 0.1 mm en respectant la même densité de trous que la plaque testée en cellule coaxiale (3 trous / 1 cm²).



Figure 3.55 : Plaque ALU 0.1 mm avec trous pour la fabrication de la gaine



Figure 3.56 : Gaine fabriquée à partir de plaque ALU en 0.1 mm avec trous

Avant faire la mesure de l'impédance de transfert, nous avons mesuré la résistance de contact entre la gaine et la cellule triaxiale selon la méthode présentée dans la partie 3.3.5, la résistance de contact étant de 0.65 Ω . L'impédance de transfert est calculée à partir des équations (3.16) et (3.20).

Chapitre 3 : Impédance de transfert

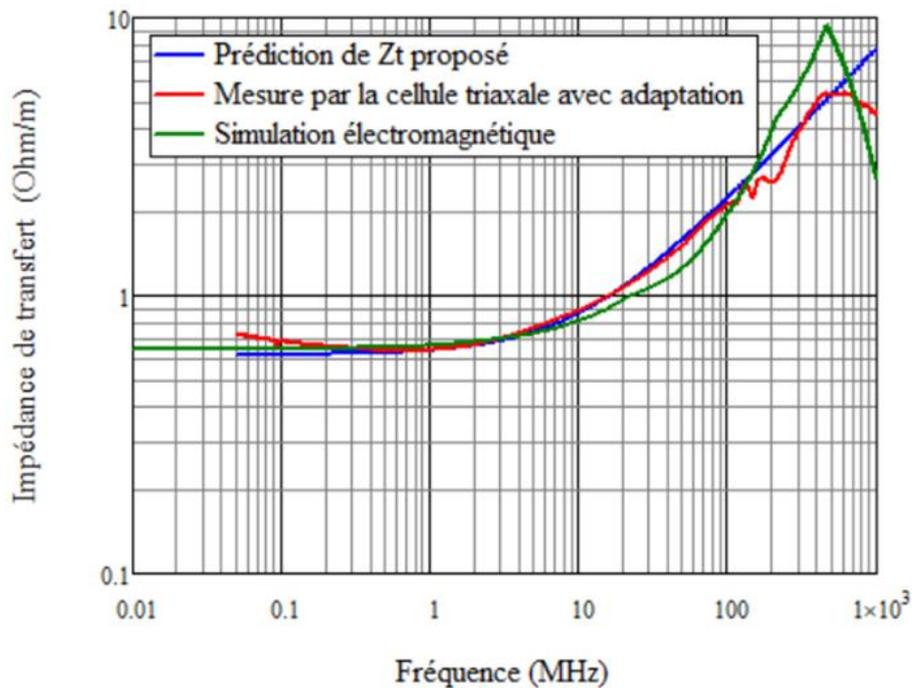


Figure 3.57 : Mesure, Simulation électromagnétique et mesure de l'impédance de transfert pour une gaine en ALU 0.1 mm avec trous

La Figure 3.57 présente la mesure de l'impédance de transfert d'une gaine en Alu d'épaisseur de 0.1 mm en comparaison avec la prédiction de l'impédance de transfert à partir la mesure de l'efficacité de blindage et la simulation électromagnétique avec HFSS. L'interprétation des graphes, donne lieu aux observations suivantes :

- Entre 100 kHz et 100 MHz un bon accord est observé
- Les petites résonances entre 110 et 200 MHz dans la mesure sont liés à la difficulté de la mise en œuvre de la gaine à partir d'une plaque et maintenir la forme cylindrique sur toute la longueur.
- Le décalage fréquentiel est dû au nombre des trous prise dans la simulation.
- En fabriquant une cellule triaxiale avec toutes les adaptations et les contraintes mécaniques, la mesure de l'impédance de transfert jusqu'à 1 GHz sera possible.

Notons que cette étape nécessite encore du travail pour être validée totalement en prenant en considération toutes les adaptations possibles et aussi les contraintes de fabrication mécaniques.

Chapitre 3 : Impédance de transfert

3.8 Conclusion

L'impédance de transfert a été présentée dans ce chapitre en termes de modélisation, simulation et mesure. Le chapitre a commencé par l'application de l'exigence du projet NextGen à la relation électrique avec l'efficacité de blindage. Une cellule triaxiale pour la mesure a été conçue et fabriquée avec deux longueurs de couplage différentes. La prédiction de l'impédance de transfert à partir de la mesure de l'efficacité de blindage a été proposée. Une cellule adaptée a été simulée, réalisée et validée, permettant de monter à 500MHz. Les simulations électromagnétiques faites montrent la possibilité de fabriquer une cellule triaxiale pour la mesure de l'impédance de transfert jusqu'à 1 GHz.

Chapitre 3 : Impédance de transfert

Chapitre 3 : Bibliographie

- [1] L. Koné, "Conception d'outils numériques et de bancs de mesures permettant d'évaluer l'efficacité de blindage des câbles et des connecteurs", Thèse, Université Lille1 - sciences et technologies, 1989
- [2] P. Degauque et B. Demoulin, "Blindages électromagnétiques", Techniques de l'ingénieur, vol. 2 Réf D1320, 10, Nov. 2000
- [3] B. Demoulin L. Koné, "Mesure de l'atténuation procurée par des blindages", Techniques de l'ingénieur, Réf D1325, 10 Mai 2012.
- [4] Schelkunoff (SA), "Electromagnetic Waves", Van Nostrand, ED. 1943.
- [5] T. KLEY, "Optimized Single-Braided Cable Shields", ", Vol. 35, n°1, February 1993.
- [6] J. Genoulaz, M. Boukhelifa et C. Jullien 'Modélisation de l'impédance de transfert d'un blindage tressé sur harnais plat', 19^{ème} Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ElectroMagnétique (CEM2018), Paris, France.
- [7] Standard IEC 62153-4-3
- [8] L. Halme, B. Mund, "EMC of Cables, Connectors, and Components with Triaxial set-up", Proceedings of the 62nd IWCS conference.
- [9] F. Ndagijimana, "Intégrité du signal, compatibilité électromagnétique dans les interconnexions haut débit", ISTE EDITION

Conclusion générale et Perspectives

L'objectif général de cette thèse a été de développer des techniques de caractérisation de l'efficacité de blindage pour les matériaux plats et d'impédance de transfert pour des gaines.

La thèse s'est déroulée dans le cadre du projet NextGen, dont le but est de fabriquer une nouvelle gaine pour le blindage électromagnétique des câbles, en diminuant le poids de la gaine actuelle tout en améliorant les performances électriques et mécaniques.

Le consortium du projet est composé de plusieurs partenaires industriels et universitaire. Notre rôle a consisté à mesurer l'efficacité de blindage de DC – 1 GHz et à mesurer l'impédance de transfert.

Dans le premier chapitre de cette thèse nous avons présenté des méthodes (normatives ou non) pour la mesure de l'efficacité de blindage des matériaux plats en forme homogène ou tresse métallique. Ces méthodes sont différentes par la source et l'orientation du champ électromagnétique, le type de mesure (espace libre, chambre réverbérante, chambre anéchoïde, guide d'onde, cellule coaxiale), le dimensionnement de l'échantillon sous test et la bande de fréquence. Pour des raisons normatives imposées par le projet nous avons choisi la méthode décrite par la norme ASTM 4935 qui utilise la cellule coaxiale entre 30 MHz et 1GHz.

De plus, dans ce chapitre nous avons présenté les méthodes d'extraction de l'impédance de gaine et nous avons choisi de travailler avec la cellule triaxiale selon la norme IEC 62153-4-3.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la modélisation, la simulation électromagnétique et la mesure de l'efficacité de blindage des échantillons plats de DC – 1GHz.

Pour mesurer l'efficacité de blindage à basse fréquence, la cellule coaxiale est la méthode la plus performante car elle garantit une transmission parfaite (0 dB) à vide, ce qui permet d'atténir

un niveau de dynamique de 100 dB afin de mesurer différents types de matériaux utilisés dans le blindage électromagnétique. Mais pour obtenir des résultats corrects, une très bonne continuité électrique est requise entre la cellule coaxiale et le matériau sous test, une utilisation des contacts CEM entre la cellule et l'échantillon est nécessaire pour garantir cette continuité. Nos études ont montré que la fabrication d'une cellule coaxiale avec un matériau conducteur qui ne s'oxyde pas et un serrage mécanique reproductible est essentielle. Par ailleurs, il est recommandé d'utiliser un appareil de mesure présentant un filtre IF bande étroite ($BW \leq 10\text{Hz}$).

De plus, dans ce chapitre, nous avons testé des échantillons de forme homogène, l'efficacité de blindage de ces matériaux dépend de la résistance à basse fréquence et commence à augmenter avec la fréquence, cela est le résultat de l'effet de peau. Ces mesures ont été vérifiées avec de la modélisation et la simulation électromagnétique en utilisant le logiciel HFSS.

D'autre part nous avons mesuré des échantillons en forme de tresse métallique et de tricotage, toujours à basse fréquence la valeur de l'efficacité de blindage dépend de la résistance du matériau mais à haute fréquence la valeur diminue avec la fréquence à cause de l'inductance qui dépend de la présence des trous ce qui permet à l'onde électromagnétique de traverser facilement le matériau. Cette inductance est liée au diamètre et nombres des trous, nombres de fils, angle de tressage et ou tricotage.

Ensuite nous avons proposé un modèle comportemental à partir des mesures de l'efficacité de blindage ce modèle a permis de développer un lien entre la mesure de l'efficacité de blindage et l'extraction de l'impédance de transfert.

Dans le dernier chapitre de cette thèse, nous avons travaillé sur l'impédance de transfert et la méthode de mesure par la cellule triaxiale. Une cellule triaxiale avec deux longueurs de

couplages différentes (360 mm et 100 mm) a été conçue et fabriquée. La cellule de 100 mm permet de mesurer l'impédance de transfert jusqu'au 300 MHz en court-circuit.

Enfin dans ce chapitre nous avons présenté une idée pour adapter la cellule afin d'arriver à 1 GHz dans les mesures. Cette méthode consiste à remplacer toutes les pièces de court-circuit par des résistances d'adaptations. Des simulations électromagnétiques ont été faites pour valider cette idée mais pour des raisons mécaniques de fabrication, la mesure a été validée jusqu'au 500 MHz. Pour arriver à 1 GHz, il faudra modifier la fabrication en cherchant à améliorer les problèmes d'adaptations. La prédiction de l'impédance de transfert des tresses est présentée dans ce chapitre, à partir des mesures de l'efficacité de blindage par l'extrait de fréquence de coupure F_0 et un valeur x qui varie selon les paramètres géométriques des tresses mesurées.

Enfin dans l'annexe C, nous avons présentés une alternative de mesure de l'efficacité de blindage des gaines par la cellule TEM. Cette méthode aurait besoin de plus d'étude pour être validée (en termes de système de réception du champ à l'intérieur de la gaine, positionnement et l'orientation de la gaine dans la cellule TEM, la dynamique de mesure...) et il est préférable de faire des mesures avec une cellule TEM fermée pour éviter les perturbations extérieures. De plus la cette méthode devrait permettre de mesurer l'efficacité de blindage des enceintes métalliques

Annexes

A. Modèle numérique de l'efficacité de blindage

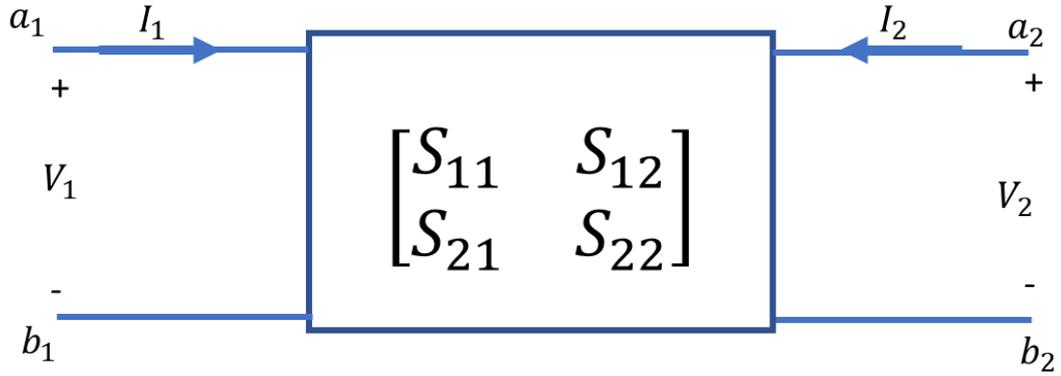


Figure A.1 : Configuration de paramètres S

$$a_1 = \frac{V_1 + Z_0 * I_1}{2 * \sqrt{Z_0}} \quad (\text{A.1})$$

$$a_2 = \frac{V_2 + Z_0 * I_2}{2 * \sqrt{Z_0}} \quad (\text{A.2})$$

$$b_1 = \frac{V_1 - Z_0 * I_2}{2 * \sqrt{Z_0}} \quad (\text{A.3})$$

$$b_2 = \frac{V_2 - Z_0 * I_2}{2 * \sqrt{Z_0}} \quad (\text{A.4})$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} = \frac{V_2 - Z_0 * I_2}{V_1 + Z_0 * I_1} \quad (\text{A.5})$$

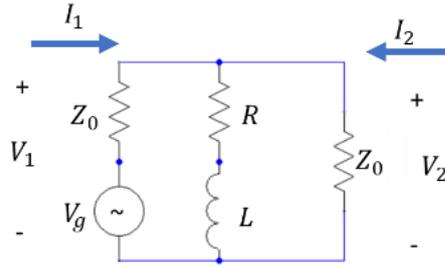


Figure A.2 : Modèle électrique proposé

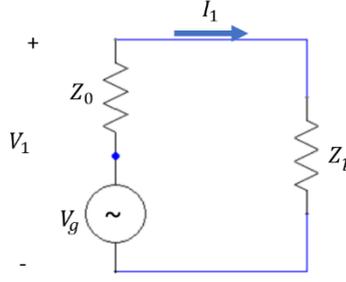


Figure A.3: Modèle électrique simplifié

$$Z = R + j\omega L \quad (\text{A.6})$$

$$Z_p = \frac{Z_0 * Z}{Z_0 + Z} \quad (\text{A.7})$$

A partir du calcul électrique et des paramètres S du modèle nous trouvons.

$$a_2 = 0 \Rightarrow V_2 = -I_2 * Z_0 \quad (\text{A.8})$$

$$I_2 = -I_1 * \frac{Z}{Z+Z_0} \quad (\text{Figure A. 2}) \quad (\text{A.9})$$

$$V_1 = I_1 * Z_p \quad (\text{Figure A. 3}) \quad (\text{A.10})$$

Les équations précédentes donnent

$$S_{21} = \frac{V_2 - Z_0 * I_2}{V_1 + I_1 * Z_0} = \frac{-2 * I_2 * Z_0}{I_1 * Z_p + I_1 * Z_0} = \frac{2 * I_1 * Z_0 * \frac{Z}{Z + Z_0}}{I_1 * (Z_p + Z_0)} = \frac{2 * Z_p}{Z_p + Z_0} \quad (\text{A.11})$$

Et par conséquence

$$SE \text{ (dB)} = -20 * \log(S_{21}) \quad (\text{A.12})$$

B. Modèle de l'efficacité de blindage des échantillons plans à partir des réflexions multiples.

Considérons un matériau métallique de conductivité σ , de permittivité relative ϵ_r , de perméabilité μ_r .

Soit Z_0 l'impédance d'onde dans l'air ($Z_0 = 377 \Omega$) et Z_m l'impédance d'onde dans le matériau :

$$Z_m = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r^*}}$$

où ϵ_r^* représente la permittivité relative complexe du matériau :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0}$$

Dans le matériau, le coefficient de propagation est donné par :

$$\gamma = \frac{(1 + j)}{\delta}$$

où δ est l'épaisseur de peau :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega * \mu * \sigma}}$$

Considérons à présent la structure présentée à la Figure B.1. Quand un champ électromagnétique arrive sur la feuille métallique d'épaisseur d , une partie de cette onde est réfléchiée, une autre partie est absorbée et le reste est transmis, es ondes incidente E_i et transmise E_t étant les ondes présentes en entrée de la feuille et en sortie de la feuille.

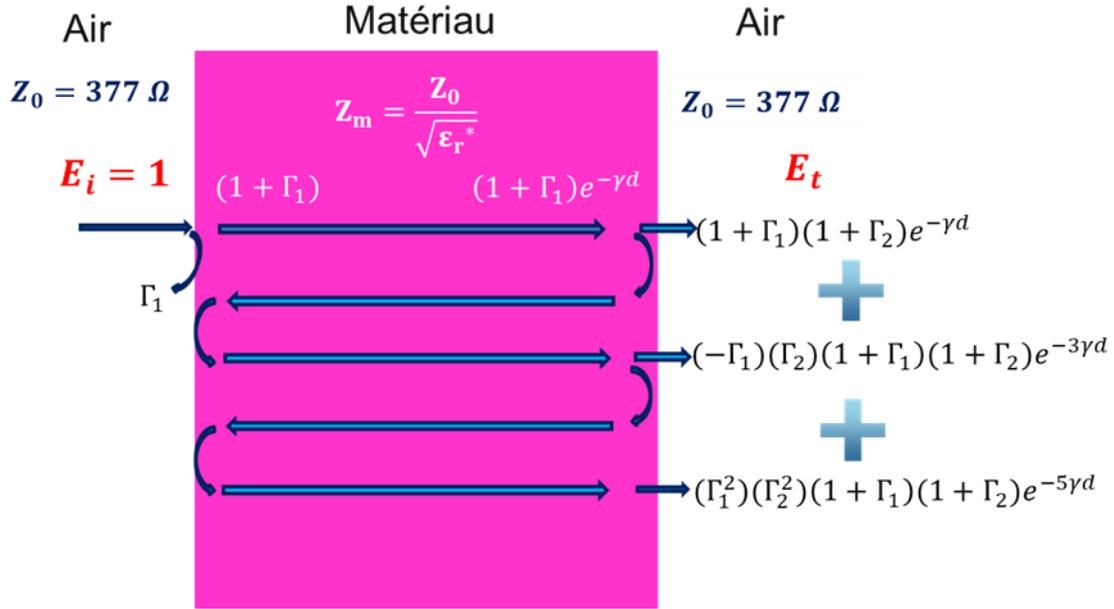


Figure B. 1 : structure du modèle proposé

Il est alors possible de définir à l'interface air/matériau le coefficient de réflexion Γ

$$\Gamma_1 = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0}$$

En faisant la somme du champ E transmit, nous avons :

$$E_t = (1 + \Gamma_1)(1 + \Gamma_2)e^{-\gamma d} - (\Gamma_1)(\Gamma_2)(1 + \Gamma_1)(1 + \Gamma_2)e^{-3\gamma d} + (\Gamma_1^2)(\Gamma_2^2)(1 + \Gamma_1)(1 + \Gamma_2)e^{-5\gamma d} + \dots$$

Ce qui donne

$$E_t = (1 + \Gamma_1)(1 + \Gamma_2)e^{-\gamma d} [1 - (\Gamma_1)(\Gamma_2)e^{-2\gamma d} + (\Gamma_1^2)(\Gamma_2^2)e^{-4\gamma d} + \dots]$$

De plus

$$\Gamma_2 = -\Gamma_1 = \Gamma \Rightarrow$$

$$E_t = (1 - \Gamma^2)e^{-\gamma d} [1 + (\Gamma^2)e^{-2\gamma d} + (\Gamma^4)e^{-4\gamma d} + \dots]$$

La somme " $[1 + (\Gamma^2)e^{-2\gamma d} + (\Gamma^4)e^{-4\gamma d} + \dots]$ " est une série géométrique de la forme $1 + X + X^2 + X^3 + \dots$ avec $X = (\Gamma^2)e^{-2\gamma d}$

$$1 + X + X^2 + X^3 + \dots = \frac{1}{1-X} ; X < 1$$

Le calcul de la somme géométrique donne

$$[1 + (\Gamma^2)e^{-2\gamma d} + (\Gamma^4)e^{-4\gamma d} + \dots] = \frac{1}{1 - (\Gamma^2)e^{-2\gamma d}}$$

Alors

$$Et = (1 - \Gamma^2)e^{-\gamma d} \left[\frac{1}{1 - (\Gamma^2)e^{-2\gamma d}} \right]$$

Enfin

Le calcul permet alors d'obtenir une expression de SE :

$$SE \text{ (dB)} = 20 * \log \left(\frac{Ei}{Et} \right) = 20 * \log \left(\frac{1}{T} \right) = 20 * \log \left[\frac{1 - \Gamma^2 \cdot e^{-2\gamma d}}{(1 - \Gamma^2) \cdot e^{-\gamma d}} \right]$$

Avec

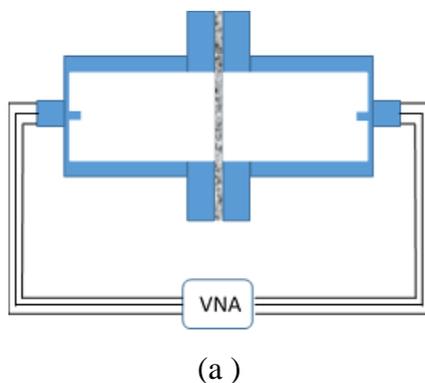
$$T = \left[\frac{(1 - \Gamma^2)e^{-\gamma d}}{1 - \Gamma^2 \cdot e^{-2\gamma d}} \right]$$

C. Mesure de l'efficacité de blindage pour les tissus métalliques en guide d'onde

Pour caractériser les matériaux de blindage en termes d'efficacité de blindage, il existe plusieurs méthodes, normatives ou non, qui dépendent de la bande de fréquence et de la forme du matériau utilisé. La méthode considérée ici consiste à insérer le matériau à tester entre deux sections d'un guide d'onde WR340(R26) fonctionnant dans la bande de fréquence de 2GHz – 3.8 GHz, et de mesurer la transmission avec un analyseur vectoriel (voir figure1).

$$SE(dB) = \text{transmission à vide} - \text{transmission avec matériau} \quad (13)$$

Compte tenu de la transmission à vide proche de 0dB, la transmission avec conducteur parfait permet d'atteindre une dynamique de mesure de 100 dB.



(a)



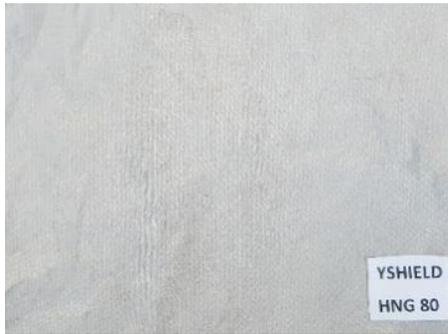
(b)

Figure C.1 : (a) Méthode de test, (b) photo du banc

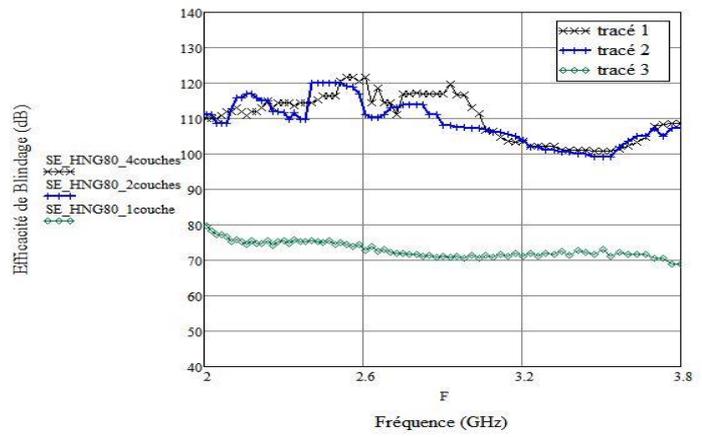
La méthode de test a été d'abord appliquée au tissu métallisé HNG80 qui est un tissu en polyester métallisé d'épaisseur 0.07 mm, et qui peut servir à de revêtement mural, plafonds etc..., et qui est spécifié pour une atténuation d'environ 80dB.

Comme présenté à la Figure C.2, la mesure montre une efficacité de blindage comprise entre 70 et 80 dB dans la bande considérée pour une couche, et de l'ordre de 110dB pour 2 et 4 couches superposées. La saturation est conforme à la dynamique propre de l'analyseur vectoriel utilisé (HP8753D) qui est de -110dB en transmission.

Deux autres types de matériau de blindage ont également été testés : (i) un film transparent d'épaisseur 0.06mm pour le blindage des vitres (SPECTRA40) présentant une efficacité de blindage de 20 à 30 dB (voir Figure C.3) et (ii) une peinture conductrice pour le blindage des murs (HSF54) présentant une efficacité de blindage de 5dB (respectivement 8dB) en monocouche (respectivement en double couche) (Figure C.4).



(a)

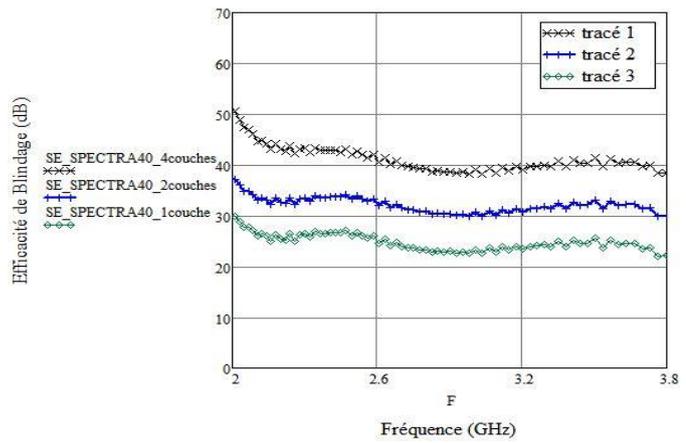


(b)

Figure C.2: (a) tissu métallisé Yshield-HNG80, (b) efficacité de blindage mesuré



(a)

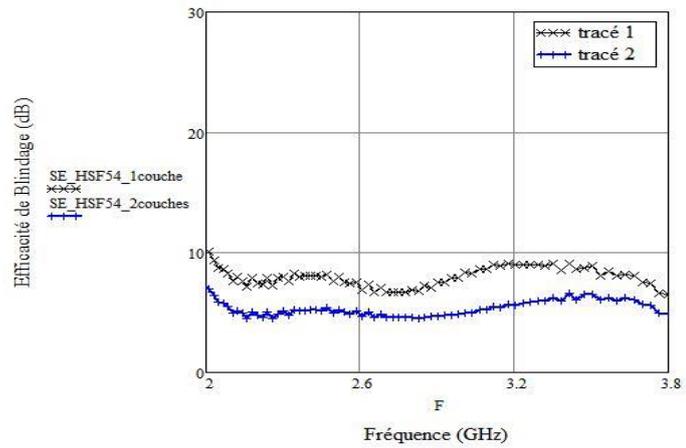


(b)

Figure C.3: (a) film transparent traité anti UV SPECTRA40, (b) efficacité de blindage mesuré



(a)



(b)

Figure C.4:(a) peinture conductrice Yshield-HSF54, (b) efficacité de blindage mesuré.

Conclusion

Une méthode de caractérisation des matériaux de blindage pour la protection des bâtiments est proposée ici. Elle permet de mesurer l'efficacité de blindage de matériaux utilisables dans le bâtiment sécurisé sur la bande de fréquence considérée est de 2 – 3.8GHz avec une dynamique de 100dB. Elle est extensible aux fréquences plus hautes utilisées par les télécommunications par une de taille de guide appropriée.

D. Mesure de l'efficacité de blindage des gaines en cellule TEM

D.1. Introduction à la cellule TEM

La cellule TEM (Transverse Electro-Magnétique) est une ligne coaxiale d'impédance caractéristique de 50Ω agrandie progressivement afin de garantir un espace pour placer des dispositifs sous test.

L'idée est de faire la mesure dans une cellule TEM et d'avoir une ouverture sur la mesure de l'efficacité de blindage des gaines directement sans passer par la mesure des échantillons plats.

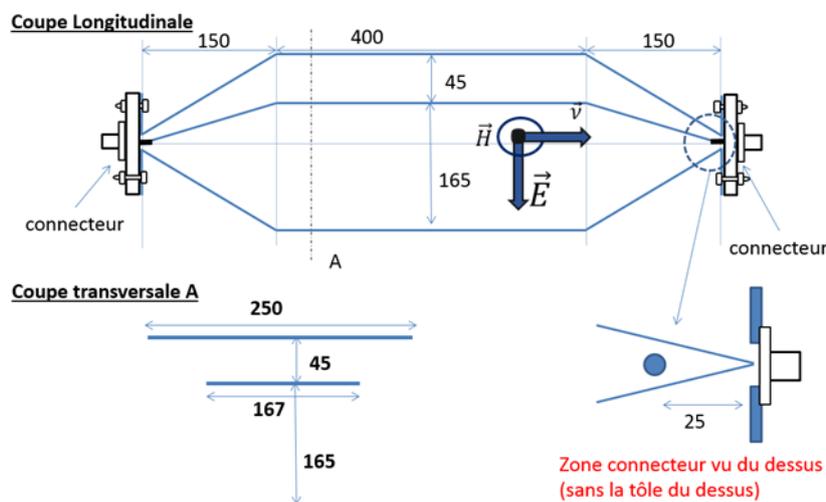


Figure D.1 : Design de la cellule TEM



Figure D.2: Cellule TEM fabriquée (DC- 1 GHz)

D.2. Méthode de test

La mesure de l'efficacité de blindage est mesurée en utilisant une structure de référence (un fil ou une antenne monopole) (Figure D.3) pour obtenir la transmission sans échantillon puis la structure de référence est entourée par la gaine à tester, la résistance R est égale à l'impédance caractéristique du ligne coaxiale formé par le fil de référence et la gaine (Figure D.3).

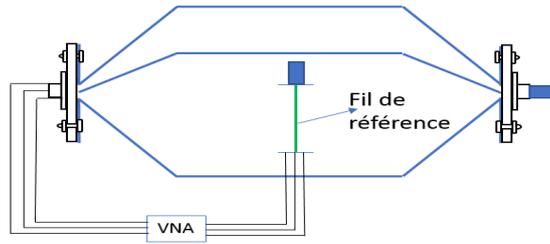


Figure D.3: Cellule TEM avec fil de référence

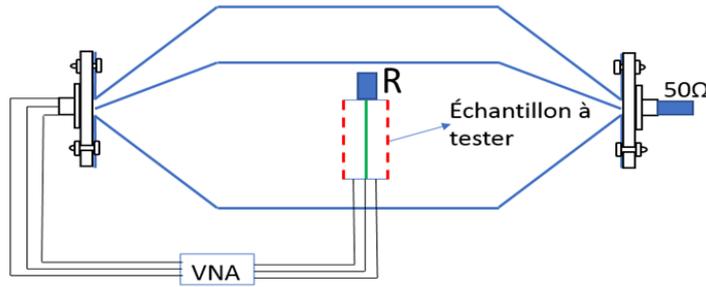


Figure D.4: Cellule TEM avec gaine sous test

L'efficacité de blindage est toujours la différence entre la mesure sans la gaine et la mesure avec la gaine .

Avec cette configuration, la mesure dépend de l'orientation du fil de référence selon la propagation du champ et aussi du positionnement du système à l'intérieur puisque le champ \vec{E} à l'intérieur de la cellule est uniforme mais sa valeur dépend de la hauteur de mesure par rapport au conducteur central

D.3. Choix de l'orientation de l'échantillon

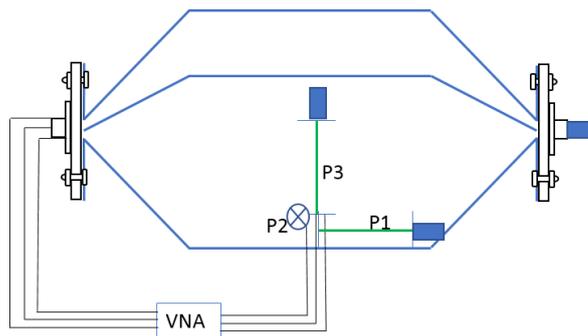


Figure D.5: Choix de l'orientation du fil de référence dans la cellule TEM

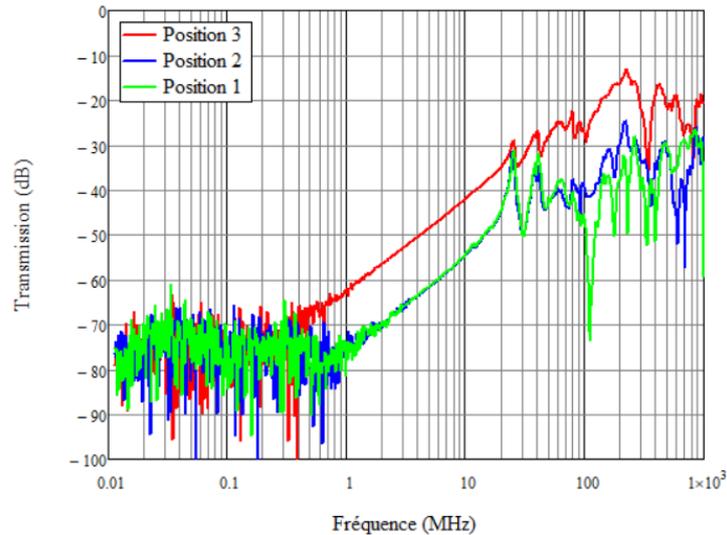


Figure D.6: Transmission du fil de référence en trois positions dans la cellule TEM

la Figure D.6 présente la transmission du fil de référence dans 3 orientations de la Figure D.5. Les graphes montrent que de DC \rightarrow 1 MHz, le niveau de référence est confondu avec le niveau de bruit de l'appareil de mesure. A partir de 1 MHz le niveau de mesure commence à augmenter pour atteindre -20 dB à 1 GHz, rappelons que nous cherchons à mesurer avec un niveau de mesure de 100 dB pour cela la mesure de la transmission à vide doit être le plus proche de 0 dB.

Pour obtenir une dynamique de mesure la plus grande possible, il faut relever le niveau de référence, il faut utiliser un amplificateur de réception entre l'échantillon et le VNA. Dans la suite nous avons choisi de travailler avec la position 3.

D.4. Application de mesure sur la gaine

Pour faire une application de mesure et pouvoir comparer avec la mesure de cellule coaxiale nous avons fait une mesure sur une gaine de tresse métallique. Cette gaine est fabriquée avec le même matériau que la tresse mesurée en cellule coaxiale.



Figure D.7: Gaine mesurée

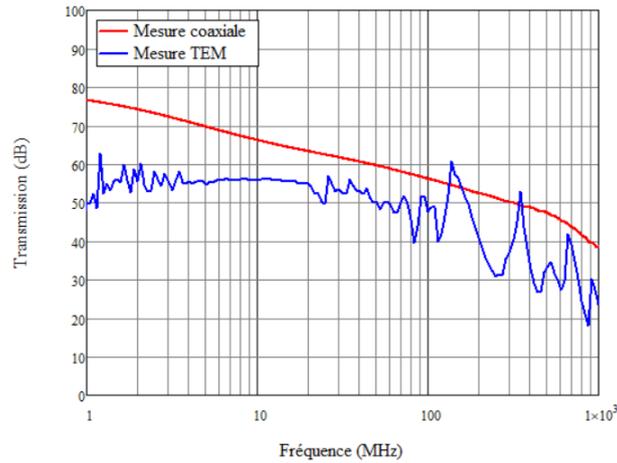


Figure D.8: Comparaison de mesure entre cellule coaxiale et cellule TEM

la Figure D.8 présente la comparaison entre la mesure faite par la cellule coaxiale pour un échantillon en forme plat et la mesure faite par la cellule TEM pour la gaine. La mesure de l'efficacité de blindage de la gaine dans la cellule TEM montre le même comportement que pour l'échantillon plat (Figure D.8), mais le niveau est inférieur globalement de 20dB. Cette différence est probablement due à la différence de polarisation du champ électromagnétique sur l'échantillon entre les deux configurations. Les pics à haute fréquence sont dus au décalage des impédances : une adaptation de la structure sera conçue pour améliorer la mesure. De plus pour arriver un niveau de dynamique de référence (mesure sans gaine) dans la cellule TEM il faudra amplifier le signal d'entrée et encore la sortie par un 'Op-amp' et faire des mesures dans une cellule TEM fermée pour éviter les perturbations extérieures.

La continuation de cette méthode va peut-être permettre d'avoir un lien ou un modèle de prédiction de l'efficacité de blindage des gaines à partir de la mesure de l'efficacité de blindage des échantillons plats en cellule coaxiale.

Publications

Conférences

J. Alaa Eddine, C. Retailleau, A. Serghei, E. Pistono, F. Ndagijimana, ‘Modele de l’impédance de transfert pour l’affaiblissement de blindage Mesure en cellule coaxiale. 19^{ème} Colloque international et exposition sur la compatibilité électromagnétique (CEM2018), Paris, France

J. Alaa Eddine, E. Pistono, F. Ndagijimana, ‘influence du chevauchement de la gaine sur la mesure de l’impédance de transfert. 20^{ème} Colloque international et exposition sur la compatibilité électromagnétique (CEM2020), Lyon, FRANCE.

Journées Scientifiques

J. Alaa Eddine, E. Pistono, F. Ndagijimana, ‘Mesure de l’efficacité de blindage électromagnétique pour le blindage des bâtiments’, GDR ondes GT5, 2019, Paris, FRANCE.

J. Alaa Eddine, E. Pistono, F. Ndagijimana, ‘De l’efficacité de blindage à l’impédance de transfert’ GRD ondes GT5 CEM, 2020 Grenoble, FRANCE.