

# Rapport de Stage

## **Evaluation d'une méthode de calibrage sur silicium pour l'amélioration de l'extraction des passifs RF jusqu'à 220GHz**

**Année** : 2019-2020

**Auteur** : Ibrahima DIENG

**Encadrants industriels** :

IMS de bordeaux : Pr. Marina DENG

STMicroelectronics : M. Romain DEBROUCKE, M. Cédric DURAND

**Encadrant Universitaire** : M. Philippe PANIER

## Remerciements

Ce stage a été une belle expérience professionnelle qui m'a permis de découvrir le monde du travail et de pouvoir participer au développement d'un projet d'ordre industriel.

Je tiens à remercier chaleureusement l'entreprise STMicroelectronics en collaboration avec le laboratoire IMS de bordeaux de m'avoir fait confiance pour ce stage.

Je remercie chaleureusement Madame Marina DENG et toute l'équipe de l'IMS pour leur accueil au sein du laboratoire.

Je remercie tout autant Monsieur Cédric DURAND et Monsieur Romain DEBROUCKE pour leur accompagnement tout au long de ce stage grâce à leurs conseils et leurs orientations qui m'ont permis de me situer par rapport au cahier des charges lié au stage.

Je remercie Monsieur Daniel GLORIA et toute l'équipe RFSS pour leur accueil lors de ma mission à Crolles de même que des échanges enrichissants que j'ai eus.

Je remercie aussi mon référent Monsieur Philippe PANIER d'avoir accepté de me tutorer pour ce stage.

# Sommaire

## Introduction

### Chapitre 1 : Contexte et Problématique du stage

- I. Contexte du Stage
  - II. Problématique du stage
- Conclusion

### Chapitre 2 : Présentation du plan d'expérience en B55, bancs de mesure RF, méthodes de calibrage et d'épluchage

- I. Présentation du plan d'expérience en B55
  - a. Présentation des structures de test
    - 1. Structure Short/ Structure Open
    - 2. Lignes de transmission
    - 3. Inductances
- II. Présentation des Bancs de mesures RF
  - a. Configuration des mesures de paramètres S
  - b. Bancs utilisés à l'IMS
- III. Les techniques de calibrage utilisées
  - a. Calibrage SOLT sur ISS
  - b. Calibrage TRL on-wafer
- IV. Les techniques d'épluchage utilisées
  - a. Epluchage Open-Short
  - b. Epluchage Short-Open
  - c. Application aux mesures calibrées

## Conclusion

### Chapitre 3 : Simulations électromagnétiques et mesures RF

- I. Modélisation EM des inductances
- II. Modélisation EM des lignes de transmission
- III. Comparaison entre résultats de mesures et simulations électromagnétiques
  - a. Inductances
  - b. Lignes de transmission

## Conclusion

## Conclusion générale

## Bibliographie

## Sommaire des annexes

## Annexes

## *Glossaire*

*ADS : Advanced design system*

*BEOL : Back end of line*

*DOE : Design of experiment*

*Deembedding : épluchage*

*Dummies : Structure utilisée dans les designs pour avoir une homogénéité de densité métallique*

*DUT : Device Under Test*

*HFSS : High Frequency Structure simulator*

*ISS : Impedance standard substrate*

*Momentum : Simulateur électromagnétique*

*SOLT sur ISS : méthode de calibrage qui se base sur les étalons Short, Open, Load et Thru*

*TRL on-wafer : méthode de calibrage qui se base sur les étalons Thru, Reflect, Line*



## *Introduction*

Les applications offertes par la gamme millimétrique sont diverses et prometteuses. De la communication à très haut débit aux radars à longue portée et des systèmes d'imagerie et de détection, l'usage de cette gamme de fréquence, qui permettrait d'avoir plus de débit, nécessite des innovations dans les outils de test et validation des composants RF dédiés à cette bande.

Ce stage s'inscrit donc dans un contexte d'amélioration de la corrélation entre les mesures en salle de caractérisation et les simulations électromagnétiques des passifs RF. L'objectif de ce stage est d'évaluer les méthodes de calibrage dont la TRL on-wafer en particulier pour l'extraction des passifs RF jusqu'à une fréquence de 220 GHz. Tout au long de ce stage, une confrontation entre mesures et simulations électromagnétiques a été faite pour pouvoir valider les résultats obtenus.

Pour effectuer ce travail, la technologie utilisée est la BICMOS55. C'est une technologie développée par STMicroelectronics dans le but de fournir une plateforme en technologie silicium pour le développement de systèmes en Radio fréquence. Cette technologie a la particularité d'offrir à la fois des transistors Bipolaire et CMOS dans la même puce. Le Bipolaire permet ainsi d'avoir plus de gain et de vitesse qui sont essentiels pour les composants analogiques en hautes fréquences et le CMOS, quant à lui, permet d'avoir des circuits logiques basses consommation.

En première partie nous allons poser le contexte et la problématique de ce stage ensuite présenter le DOE et les bancs de mesure utilisés de même que l'étude théorique des méthodes de calibrage et d'épluchage. En deuxième partie, une caractérisation des inductances et des lignes de transmission sera menée puis sera suivie d'une présentation des résultats de mesures sous pointes RF obtenus avec les différentes méthodes de calibrage et des simulations électromagnétiques. Pour finir, une confrontation entre mesures et simulations électromagnétiques sera menée pour évaluer les méthodes de caractérisation.

Le stage, qui a duré six mois, a coïncidé avec l'apparition de la pandémie de covid19 m'ayant contraint à travailler à distance pour la première partie de ce stage. J'ai donc profité des premières semaines pour faire une étude bibliographique et mener des simulations par rapport aux méthodes de deembedding sous ADS. Suite à la levée des restrictions du confinement, j'ai rejoint le laboratoire IMS où j'ai pu poursuivre mon stage. J'ai donc pu participer à la deuxième campagne de mesure en salle de caractérisation, étudier le DOE de passifs dédié et mener les simulations électromagnétiques.



## *Chapitre 1 : Contexte et Problématique du stage*

### *Contexte du stage*

Historiquement, l'intégration des passifs RF n'a pas suivi le même rythme que celle des composants actifs notamment des transistors. Depuis les années 90, du fait de l'amélioration du BEOL et de l'augmentation des fréquences des circuits vers les GHz facilitant ainsi la diminution de la taille des passifs, les inductances et les capacités sont désormais largement utilisées au sein des BEOL. Les composants passifs jouent un rôle clé dans la conception des blocs numériques/analogiques RF. Dans les chaînes de transmission, ils occupent une surface assez conséquente du fait de leur difficulté d'intégration. Pour répondre aux nouveaux challenges imposés par l'usage de nouvelles gammes de fréquences, l'intégration des passifs RF est plus que nécessaire pour la démocratisation et l'accès grand public aux applications millimétriques. L'industrie de la microélectronique s'est donc depuis penchée sur le développement de passifs RF à fort facteur de qualité répondant ainsi aux critères de performances et tout en occupant une faible surface silicium.

Par ailleurs, le développement de modèles précis et fiables dépend fortement des paramètres extraits des mesures des composants RF. Or la montée en fréquence dans la gamme millimétrique se heurte aux limites liées aux méthodes de mesure et de correction conventionnelles. En effet, en haute fréquence, il est difficile de déterminer avec précision les paramètres des composants RF. Les techniques de calibrage et d'épluchage dictées par les standards industriels ne sont pas forcément adaptées à tous les composants passifs RF pour avoir des mesures précises dans ces bandes de fréquences. Elles ne tiennent pas en compte du changement de substrat entre le kit de calibrage commercial sur substrat d'alumine (qu'on appellera ISS, pour Impedance Standard Substrate) et les structures de test, ou encore, les plans de référence ne sont pas définis de façon optimale. C'est pourquoi dans ce stage, nous allons évaluer les méthodes de calibrage notamment la méthode TRL on-wafer pour l'extraction des passifs RF dans les bandes DC-110GHz et 140-220GHz.

### *I. Problématique du stage*

La problématique posée dans le cadre de ce stage est l'amélioration de la corrélation entre les mesures et les simulations électromagnétiques des passifs RF. Il existe souvent un écart entre les simulations électromagnétiques et les mesures des composants RF du fait de la montée en fréquence pour laquelle certains effets ne sont pas nécessairement pris en compte par les méthodes de caractérisation standards.

C'est pourquoi dans ce stage, nous avons évalué les méthodes de caractérisation SOLT et TRL on-wafer pour étudier les performances des passifs RF, notamment les inductances et les lignes de transmission. Un focus sera fait sur la technique de calibrage TRL on-wafer. Cette méthode se démarque de la SOLT sur ISS par l'amélioration qu'elle apporte sur le positionnement du plan de référence mais aussi du fait que son environnement soit similaire à



celui du composant sous test (silicium). Ces spécificités permettent entre autres d'améliorer la précision des mesures.

Une confrontation entre mesure et simulation nous a permis de quantifier les différences entre les méthodes de calibrage SOLT sur ISS et TRL on-wafer et d'évaluer le potentiel de la TRL on-wafer par rapport aux autres méthodes industrielles standards.

## *Conclusion*

L'amélioration des méthodes de calibrage et d'épluchage est une étape importante dans l'intégration des passifs RF. La méthode TRL on-wafer qui se base sur les étalons Thru, Reflect et Line sera présentée dans ce rapport. Les résultats obtenus grâce à elle nous permettront donc d'évaluer son fort potentiel comparé à la méthode SOLT sur ISS. Dans la suite, une présentation des passifs RF avec le kit de calibrage TRL et des bancs de mesure sera faite.

## Chapitre 2: Présentation du plan d'expérience en B55, bancs de mesure RF, méthodes de calibrage et d'épluchage

Dans cette partie, nous allons en premier lieu présenter le kit de calibrage utilisé et les composants passifs étudiés dans le cadre de ce stage. Une présentation des bancs de mesures, couvrant les bandes DC-110 GHz et 140-220 GHz, utilisés à l'IMS sera faite en deuxième lieu.

### I. Présentation du plan d'expérience en B55

Pour effectuer la caractérisation des composants, un plan d'expérience (DOE) en technologie B55 a été développé contenant 26 structures de test utilisées pour la caractérisation des passifs RF.

On y retrouve :

- les structures dédiées pour le deembedding du plot RF après calibrage SOLT sur ISS : le Pad-Open, le Pad-Short
- les structures de test dédiées pour le calibrage TRL on-wafer : les structures Thru, Pad-Open ou Pad-Short (Reflect) et Line et Load
- trois inductances de diamètres 50 $\mu$ m, 46  $\mu$ m et 20  $\mu$ m, deux lignes de transmission et des capacités MIM, MOM (qui ne seront pas étudiées dans le cadre de ce stage).

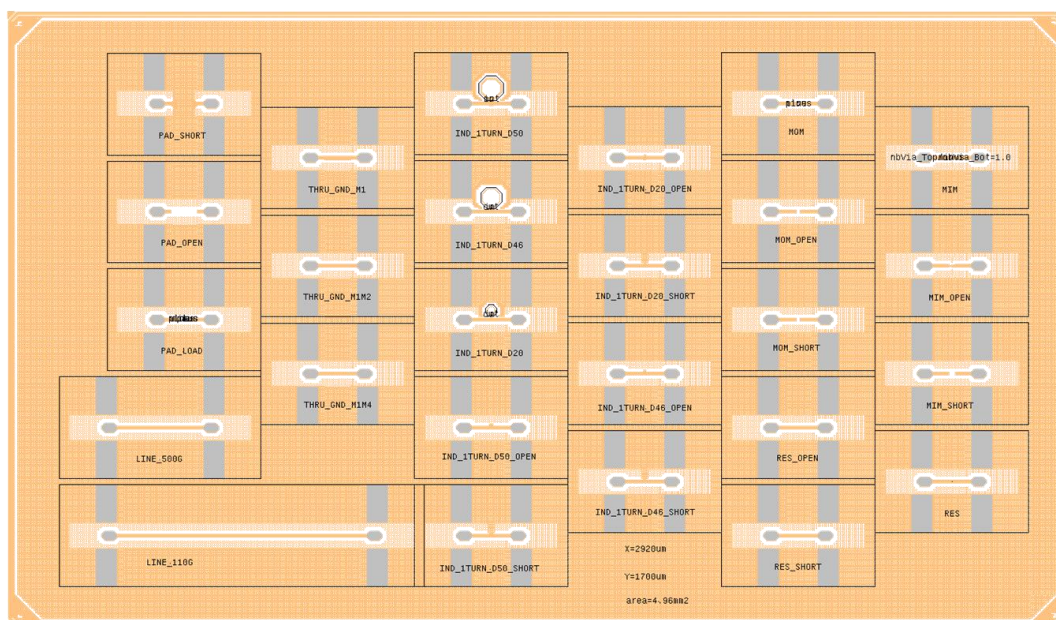


Figure 1 : DOE des passifs RF en techno B55

## a. Présentation des structures de test

### 1. Structures Short et Open

La structure de test Short est modélisée par un schéma en Té composée de trois inductances et des résistances alors que celle de l'Open est modélisée par un schéma en Pi et composée de capacités. Ces structures sont utilisées pour l'épluchage des inductances et des lignes de transmission pour le calibrage SOLT sur ISS.

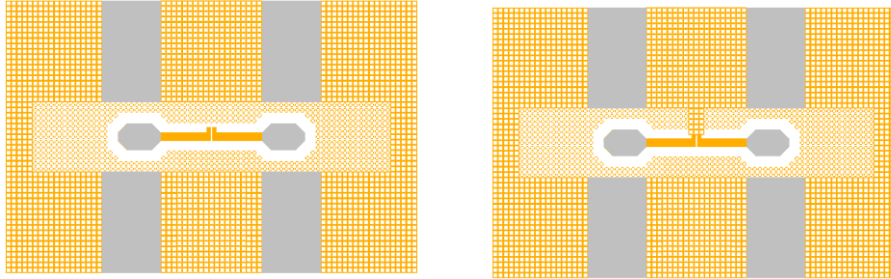


Figure 2 : Structure Open (à gauche) et Short (à droite)

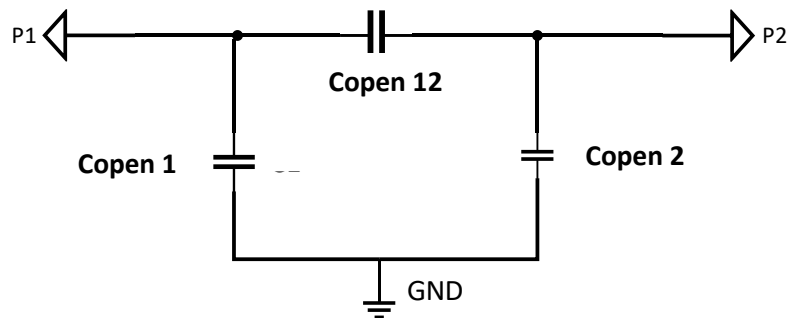


Figure 3 : Modèle électrique de l'Open en PI

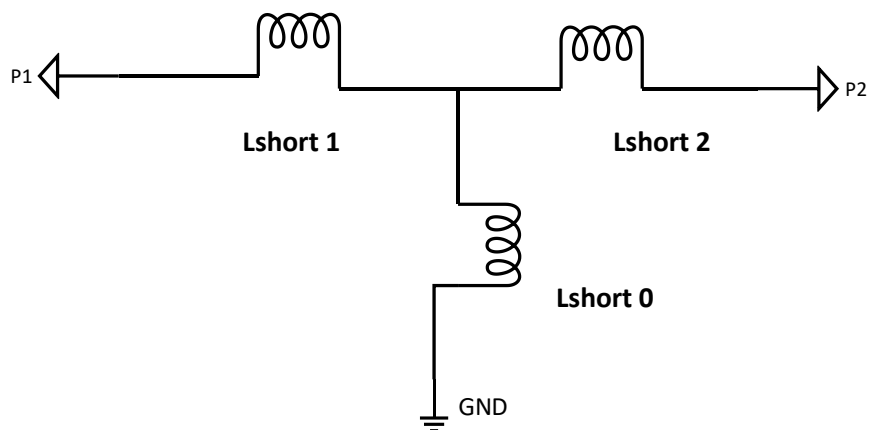


Figure 4 : Modèle électrique du Short en Té

### 2. Les lignes de transmission

Les lignes de transmission étudiées dans le cadre de ce stage sont les suivantes :

-les lignes Thru-M1, Thru-M1M2 et Thru-M1M4 utilisées pour la TRL on wafer

-Deux lignes de transmission, une utilisée pour les mesures de la bande 1-110GHz de longueur 585  $\mu\text{m}$  et une autre de longueur 185  $\mu\text{m}$  utilisée pour les mesures de la bande 140-220GHz.

### **-Les paramètres de la ligne de transmission :**

Pour étudier les lignes, en premier lieu nous allons voir les paramètres secondaires (paramètres électriques) ensuite une présentation des paramètres primaires, constituant le modèle télégraphiste représentant les paramètres linéiques (capa linéique, résistance linéique...) sera faite.

#### **Paramètres secondaires :**

##### **- Constante de propagation, d'atténuation et de phase :**

La constante de propagation d'une ligne de transmission est définie par la formule :

$$\gamma = \alpha + j\beta = (\cosh^{-1} A_{11})/L = \sqrt{(R + jL\omega)(G + jC\omega)}$$

Elle est composée de la constante d'atténuation  $\alpha$  qui est la partie réelle et de la constante de phase  $\beta$  de la ligne qui est la partie imaginaire. La constante d'atténuation  $\alpha$  s'exprime en  $\text{N.m}^{-1}$  (dans le cadre de ce stage, les pertes sont exprimées en dB/mm) et la constante de phase  $\beta$  en  $\text{rad.m}^{-1}$ .

##### **-Impédance caractéristique :**

L'impédance caractéristique est définie par la formule :

$$Z_0 = \sqrt{A_{12}/A_{21}} = \sqrt{\frac{(R + jL\omega)}{(G + jC\omega)}} \text{ s'exprime en } \Omega$$

#### **Les paramètres primaires :**

##### **-Les paramètres RLCG :**

Ils sont définis par les équations :

$$R = \text{Re}(\gamma * Z_0) \quad L = \frac{\text{imag}(\gamma * Z_0)}{\omega} \quad C = \frac{\text{imag}(\frac{\gamma}{Z_0})}{\omega} \quad G = \text{real}(\gamma/Z_0)$$

Les paramètres RLCG permettent d'évaluer les pertes dans les conducteurs résistifs (résistance linéique  $R_1$  en  $\Omega.\text{m}^{-1}$ ), l'aptitude du conducteur à s'opposer à une variation du courant électrique (inductance linéique  $L_1$  en  $\text{H.m}^{-1}$ ), le couplage entre les conducteurs (capacité linéique  $C_1$  en  $\text{F.m}^{-1}$ ) et les pertes liées aux fuites à travers le diélectrique non parfait (conductance linéique  $G$  en  $\text{S.m}^{-1}$ ).

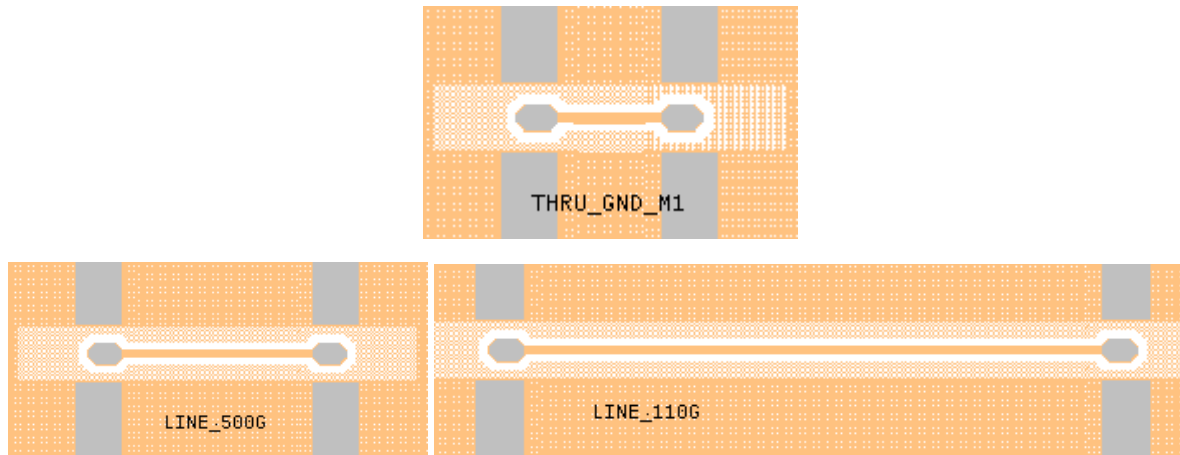


Figure 5 : Présentation des lignes M1, M1M2, M1M4 et Line\_110G et 500G

**Exemple de calcul de ligne pour la TRL on-wafer :**

$$f_{min} = \frac{c}{20 * (L_{line} - L_{Thru}) * \sqrt{\epsilon_{r,eff}}}$$

$$f_{max} = 9 * \frac{c}{20 * (L_{line} - L_{Thru}) * \sqrt{\epsilon_{r,eff}}}$$

*Formules de calcul des longueurs de lignes de la TRL on-wafer*

Avec un  $L_{Thru} = 65 \mu m$  :

Pour la ligne  $L_{line} = 585 \mu m$ , nous avons : **[15,41 GHz- 138,77GHz]**.

Pour la ligne  $L_{line} = 185 \mu m$ , la bande passante est de : **[66,81GHz- 601,33GHz]**.

### 3. Les inductances

Le DOE mis en place intègre trois inductances de diamètres différents (**50  $\mu m$  avec  $W=4 \mu m$ , 46  $\mu m$  avec  $W=1.5 \mu m$  et 20  $\mu m$  avec  $W=1 \mu m$** ) de fréquence de résonnance différente. L'objectif est d'évaluer les méthodes de caractérisation sur un échantillon représentatif d'un DOE servant à leur modélisation. Les structures de test de ces inductances ont été conçues par l'IMS avant le début de ce stage en vue de l'évaluation du calibrage TRL on-wafer pour la caractérisation de ces composants.

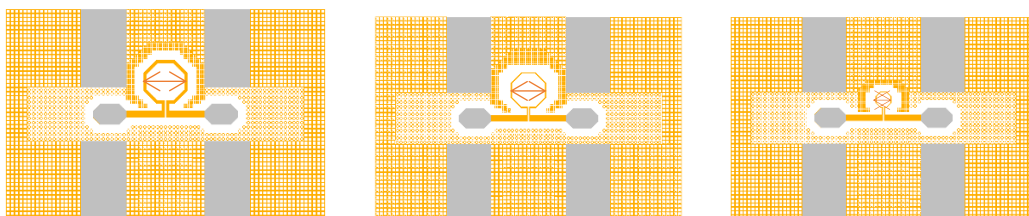


Figure 6 : Inductances de diamètre 50  $\mu m$  (à gauche), 46  $\mu m$  (au milieu) et 20  $\mu m$  (à droite)

**Paramètres de l'inductance :**

Les inductances sont définies principalement par les figures de mérites suivantes :

-Facteur de qualité :  $Q = -\frac{Im(Y_{2,1})}{Re(Y_{2,1})}$

-Inductance :  $L_s = -\frac{Im(1/Y_{2,1})}{2\pi \cdot freq}$

-Résistance Série :  $R_s = -Re(1/Y_{2,1})$

## II. Présentation des Bancs de mesure RF

### a. Configuration des bancs de mesure RF

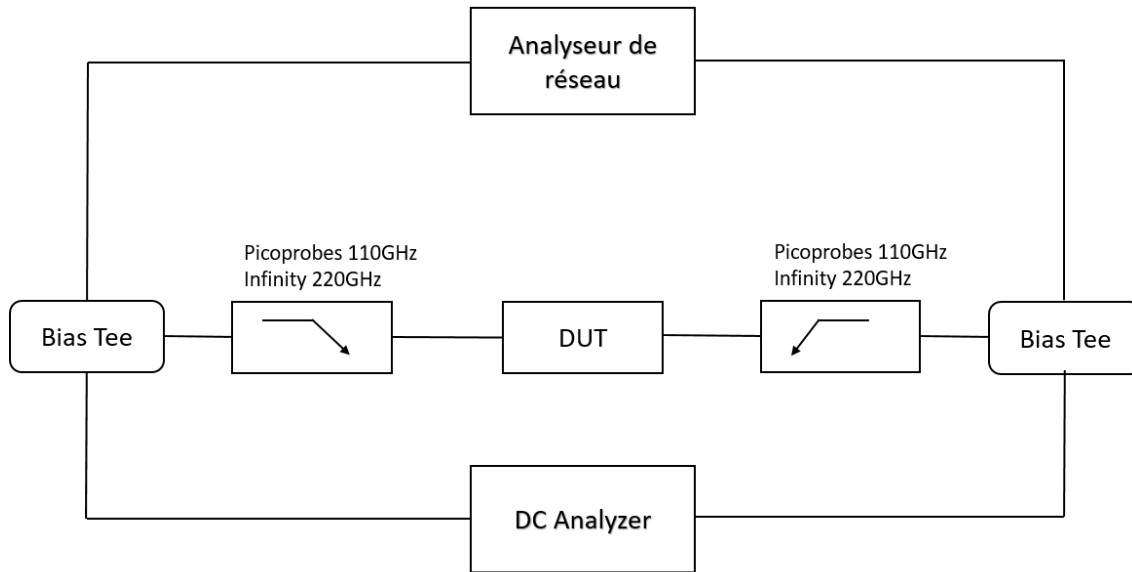


Figure 7 : Configuration d'un banc de mesure RF

Pour la bande 1-110GHz, l'analyseur de réseau utilisé est l'Agilent E8361A, avec une puissance RF appliquée de 15dBm et une pente de 0.1dB/GHz dans la bande 100MHz-67GHz pour combler les pertes liées à la connectique augmentant avec la fréquence. Il est couplé avec des têtes millimétriques de la marque Agilent Technologies NS5260-60003 permettant de monter jusqu'à une fréquence de 110 GHz. La source DC qui est envoyée à la sonde couvre la bande 10 MHz-50 GHz. Les sondes pour les mesures sous pointes sont de type Picoprobe.

Pour la bande 140-220GHz, l'analyseur de réseau utilisé est le ZVA de Rohde & Schwarz couvrant la bande 10MHz-26GHz, couplé avec les têtes millimétriques du même fabricant qui permettent de monter en fréquence pour couvrir la totalité de la bande 140-220 GHz. Les sondes permettant d'effectuer les mesures sous pointes sont de type Infinity.



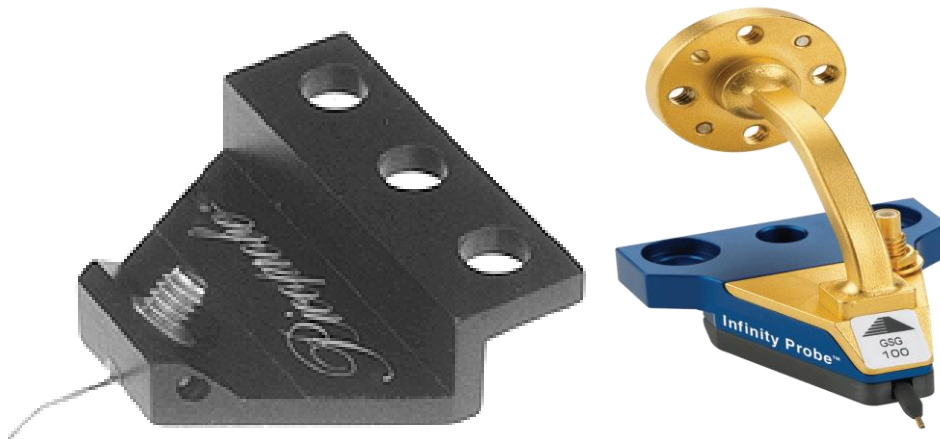


Figure 8 : Sonde Picoprobe (à gauche), sonde Infinity (à droite)

### b. Bancs de mesure utilisés à l'IMS

Le laboratoire IMS dispose de trois stations manuelles qui couvrent les quatre bandes de fréquences à savoir DC-110GHz, 140-220GHz, 220-330GHz et une dernière de 330-500GHz.

Les sondes utilisées sont de type Picoprobes et Infinity. En fonction des bandes nous avons différentes tailles de sondes :

Bandes	DC-110GHz	140-220GHz
Sondes	Sondes Picoprobe GSG Pitch=100 $\mu\text{m}$	Sondes Cascade Infinity Pitch= 100 $\mu\text{m}$

Tableau 1 : Bandes de mesure et sondes utilisés dans le cadre de ce stage

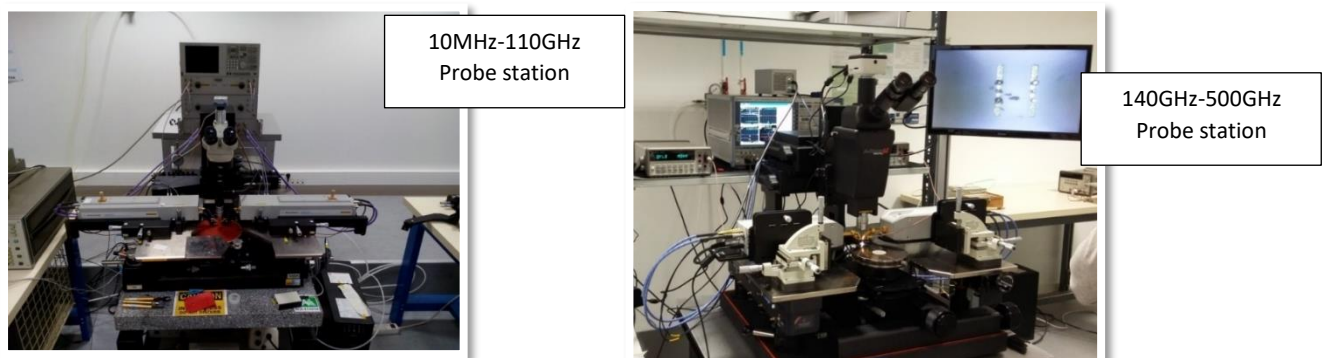


Figure 9 : Les bancs de mesures disponibles à l'IMS

### III. Les techniques de calibrage utilisées

Le calibrage et l'épluchage sont deux étapes nécessaires pour faire des mesures précises et fiables des composants RF. Deux méthodes de calibrage ont été utilisées dans le cadre de ce stage à savoir la SOLT sur ISS et la TRL on-wafer. Une comparaison des résultats obtenus grâce à ces méthodes nous a permis d'évaluer le potentiel de la méthode TRL on-wafer.

Le calibrage est indispensable pour faire une bonne caractérisation des composants RF. Il permet d'enlever les erreurs liées au VNA, aux probes et aux câbles RF utilisés dans les bancs de mesure. Le calibrage du système de mesure s'effectue sur un substrat conçu pour l'occasion appelé ISS contenant les structures d'étalonnage appelées standards permettant de déterminer les erreurs systématiques. L'ISS utilisé est de la famille Cascade Microtech et les structures sont faites de pistes d'or déposées sur un substrat d'alumine et ont une configuration de type GSG (ground signal ground).

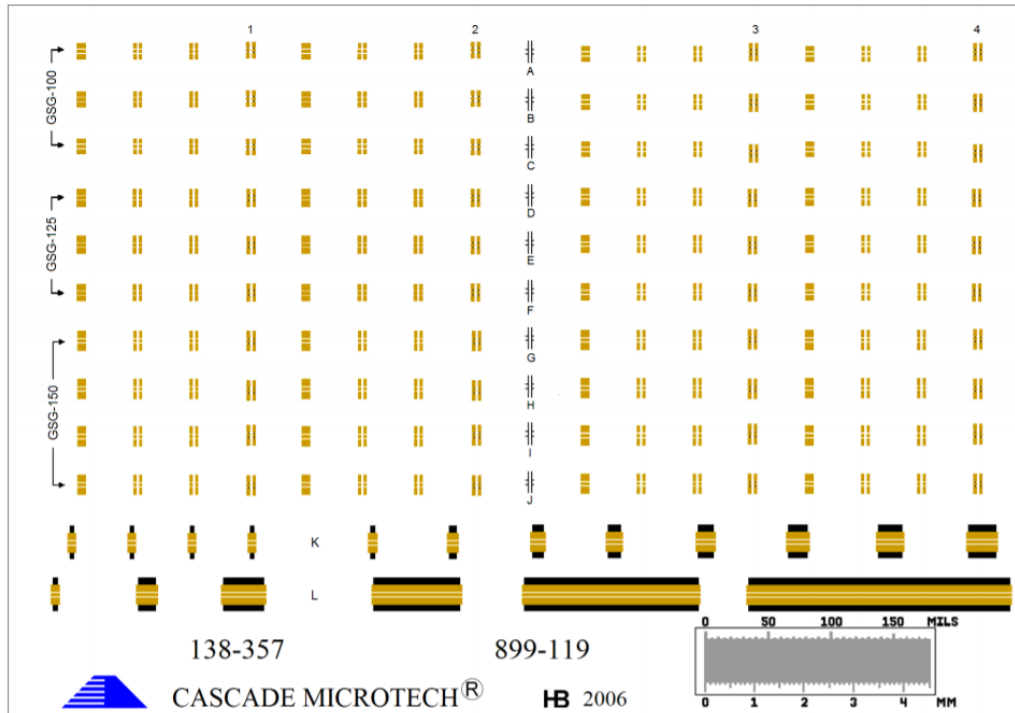


Figure 10 : ISS 138-357 de Cascade Microtech (kit de calibrage utilisé pour le calibrage SOLT 140-220 GHz)

On distingue plusieurs méthodes de calibrage dans le monde industriel, mais pour les mesures de ce stage deux techniques ont été retenues : la SOLT sur ISS et la TRL on-wafer.

#### a. Le calibrage SOLT sur ISS

Le calibrage off wafer SOLT sur ISS, qui est une méthode proche de la physique, est très utilisée dans l'industrie des semiconducteurs. C'est une méthode qui se base sur quatre étalons de l'ISS à savoir le Short, l'Open, le Load et le Thru dont les valeurs sont connues avec précision grâce à un usinage par laser. Cette méthode se base sur douze termes d'erreurs dont six en mesure directe et six en inverse. Ces termes d'erreur permettent de déterminer la directivité, la désadaptation de la source, les réponses fréquentielles en réflexion et transmission et la désadaptation directe et le couplage entre les ports [1].



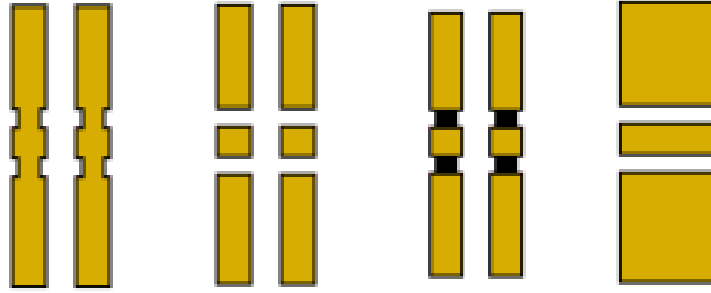


Figure 11 : *Etalons Short, Open, Load, Thru de l'ISS 138-357 utilisés pour le calibrage SOLT sur ISS*

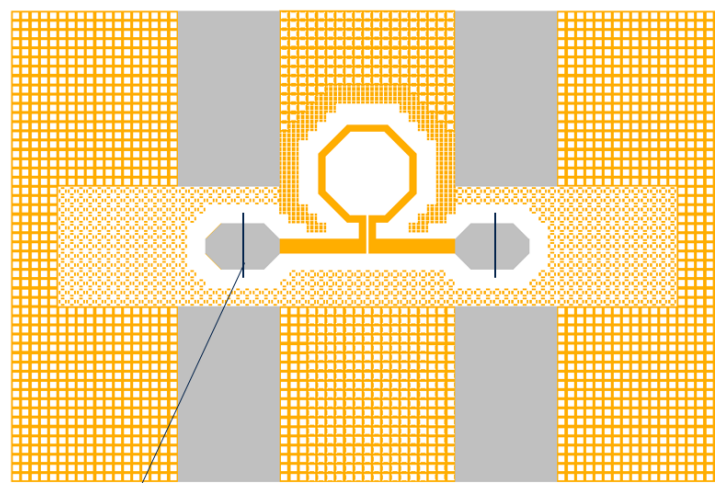
Chaque étalon à un rôle à jouer dans l'étape de calibrage SOLT sur ISS :

Etalons	Short	Open	Load	Thru
Rôle	Court-circuit = Inductance	Circuit-ouvert = Capacité	Charge adaptée = Résistance 50 $\Omega$	Délai = Ligne de transmission
Mesure directe/ Mesure inverse	Erreur de désadaptation de source	Erreur de désadaptation de source	Erreur de directivité	Erreur de désadaptation de charge

Tableau 2 : *Tableau des étalons avec leur rôle et leur fonction en mesure directe/inverse*

#### **-Plan de référence calibrage SOLT sur ISS**

La SOLT sur ISS a la particularité d'avoir un plan de référence qui se trouve au bout des pointes des sondes. Ainsi, comparé à la méthode on-wafer, l'épluchage est plus compliqué car il doit permettre de retrancher les effets parasites liés aux plots RF et aux lignes d'accès sur silicium. De même, la différence entre le posé des pointes sur substrat ISS et sur des structures de test sur silicium entraîne un effet de couplage entre probes/substrat différent non pris en compte dans le calibrage, ayant pour conséquence l'apparition d'erreurs systématiques dans les mesures.



Plan de réf. après calibrage

Figure 12 : *Illustration plan de référence SOLT sur une structure d'inductance*

La SOLT sur ISS est une méthode qui a l'avantage d'être proche de la physique [1]. Cependant, son plan de référence approximatif et sa dépendance des standards (précision des modèles électriques des standards) fait qu'à haute fréquence, on fait appel à d'autres techniques de calibrage comme la TRL on-wafer.

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Méthode proche de la physique	Dépend fortement des standards
	Moins précise à HF qu'à BF

Tableau 3 : *tableau récapitulatif des avantages et inconvénients de la SOLT sur ISS*

### *b. Le calibrage TRL on-wafer*

A la différence du calibrage SOLT sur ISS, la méthode TRL on-wafer utilise trois étalons du kit de calibrage à savoir le Thru, le Reflect et la Line. C'est une méthode qui se base sur huit termes d'erreurs. A la différence de la SOLT dont le modèle complet a douze termes d'erreurs, l'analyseur de réseau est supposé être un réflectomètre parfait et la commutation entre les mesures directe et inverse est considérée comme parfait aussi pour la TRL on-wafer. Ce qui fait qu'il n'y a pas d'effet de couplage entre les voies 1 et 2 et les erreurs de désadaptation sont égales dans les deux sens de mesure. Avec la TRL on-wafer, nous avons qu'une connaissance partielle des étalons, les paramètres non définis étant déterminés par un algorithme de résolution, c'est d'ailleurs pourquoi on l'appelle une méthode d'auto-calibrage [1].

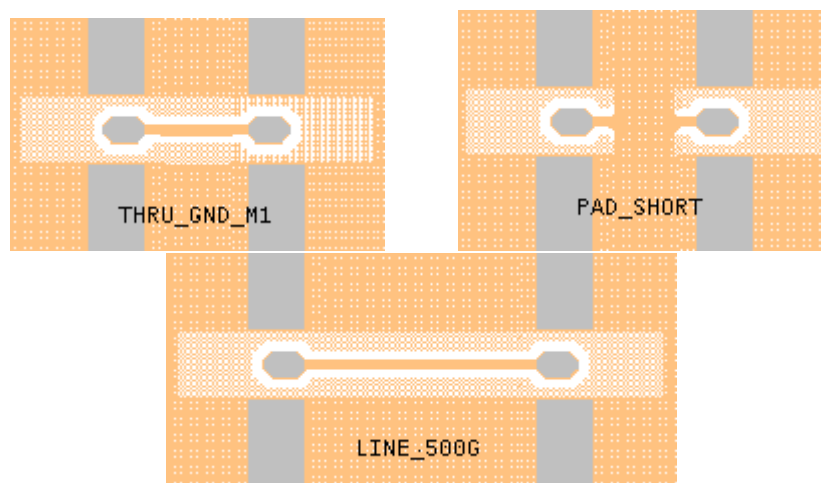


Figure 13 : *Etalons utilisés pour la TRL on-wafer*

Chaque étalon à un rôle à jouer dans la calibrage TRL on-wafer :

<b>Etalons</b>	Thru	Reflect	Line
<b>Rôle</b>	Ligne de transmission	Court-circuit= Short ou circuit ouvert=Open	Ligne de transmission
<b>Paramètres</b>	Réflexion=nuls Transmission=unitaires	Inconnus	Réflexion=nuls Transmission=unitaires

Tableau 4 : *Tableau des étalons de la TRL on-wafer, leur rôle et paramètres*

### -Plan de référence calibrage TRL on wafer

Le plan de référence TRL on-wafer est généralement défini au milieu du Thru. Cependant, grâce à un calcul algorithmique, le plan de référence est déplacé au bout du Pad-Open. Ce qui permettra donc d'avoir un épluchage plus simple car ne tenant pas en compte les effets liés aux plots mais uniquement ceux liés aux lignes d'accès.

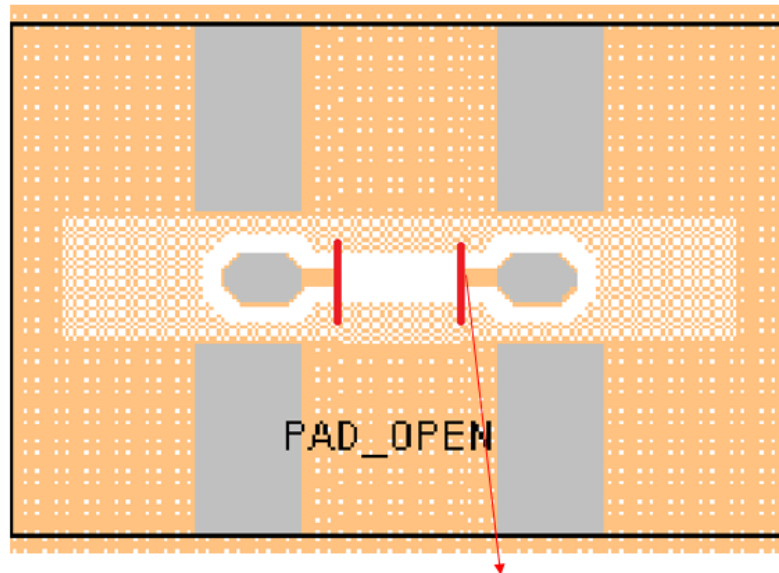


Figure 14 : Illustration plan de référence TRL on-wafer au bout du Pad-Open

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Très utilisée pour les mmW GaAs	Nécessite d'importante longueur de ligne
Nécessite peu d'infos sur les standards	Limitation en BF

Tableau 5 : tableau récapitulatif des avantages et inconvénients de la TRL on-wafer

## *IV. Les techniques d'épluchage utilisées*

L'épluchage encore appelé le deembedding est une étape cruciale dans l'évaluation des performances des composants RF. Durant cette étape de correction de plan de référence de mesure, l'objectif est d'enlever les effets parasites liés aux plots et aux lignes d'accès du composant à mesurer. Cependant, en haute fréquence, les composants RF sont de plus en plus petits par rapport à la taille des accès, et le BEOL de plus en plus complexe (jusqu'à huit niveaux de métal pour le BICMOS55) ce qui ne facilite pas l'étape d'épluchage.

Il existe différentes méthodes d'épluchage. Dans le cadre de ce stage, nous allons étudier l'épluchage Open/Short et le Short/Open.

### *a. Epluchage Open/Short*

Le deembedding Open-Short est une méthode d'épluchage utilisée pour enlever les parasites lors des caractérisations des composants RF. La structure Open peut être modélisée par un réseau en pi de capacités et la structure Short par un réseau en T d'inductances. Pour utiliser la méthode Open-Short, la procédure à suivre est la suivante :

- Enlever les capacités du DUT en soustrayant les admittances de l'open
- Enlever les capacités du short en soustrayant les admittances de l'open
- Enlever les inductances du DUT en soustrayant les impédances du short

Pour faire les simulations des méthodes d'épluchage, nous avons utilisé le logiciel ADS en utilisant les modèles électriques équivalent des lignes d'accès et des plots RF.

### *Exemple d'implémentation de la méthode Open-Short sous ADS*

Soit la structure suivante à éplucher :

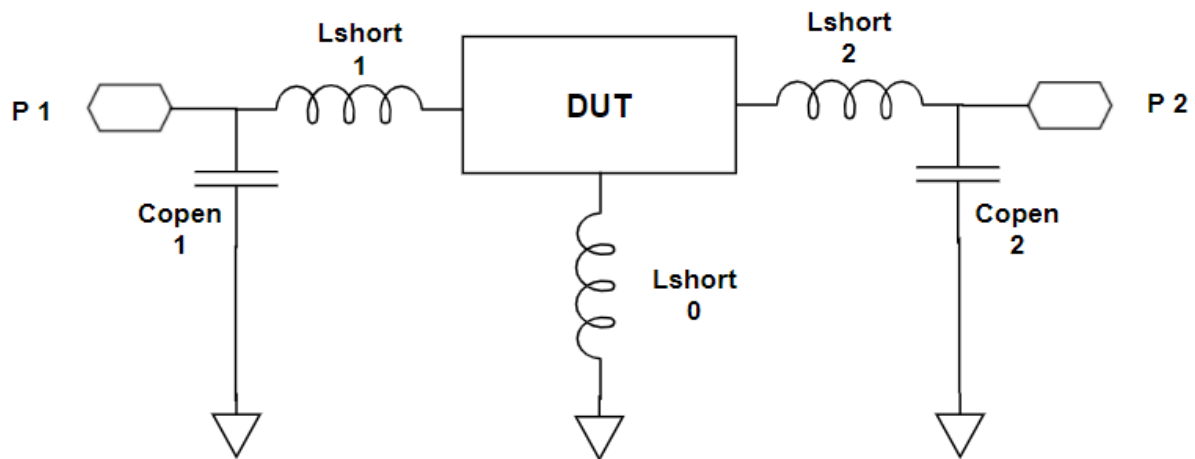


Figure 15 : Modèle équivalent des accès pour l'épluchage Open/Short

#### Les paramètres Y du short épluché de l'Open

$$Y_{\text{short\_ep}} = Y_{\text{short\_complet}} - Y_{\text{open}} \rightarrow Z_{\text{short\_ep}} = \text{ytoz}(Y_{\text{short\_ep}})$$

#### Les paramètres Y du C DUT épluchés de l'Open

$$Y_{C\_DUT\_ep} = Y_{C\_DUT} - Y_{\text{open}} \rightarrow Z_{C\_DUT\_ep} = \text{ytoz}(Y_{C\_DUT\_ep})$$

#### Les paramètres Z du DUT sont épluchés du Z Short\_ep

$$Z_{C\_DUT} = Z_{C\_DUT\_ep} - Z_{\text{short\_ep}}$$

### *b. Epluchage Short/Open*

Cette méthode d'épluchage fonctionne suivant le même principe que celle de l'Open-Short. Le schéma électrique est constitué d'un réseau en Té d'inductances et d'un réseau en Pi de capacités.

Pour utiliser la méthode Short-Open, la procédure à suivre est la suivante :

- Enlever les inductances du DUT en soustrayant les impédances du short

- Enlever les inductances l'open en soustrayant les impédances du short
- Enlever les capacités du DUT en soustrayant les admittances de l'open

### *Exemple d'implémentation de la méthode Short- Open sous ADS*

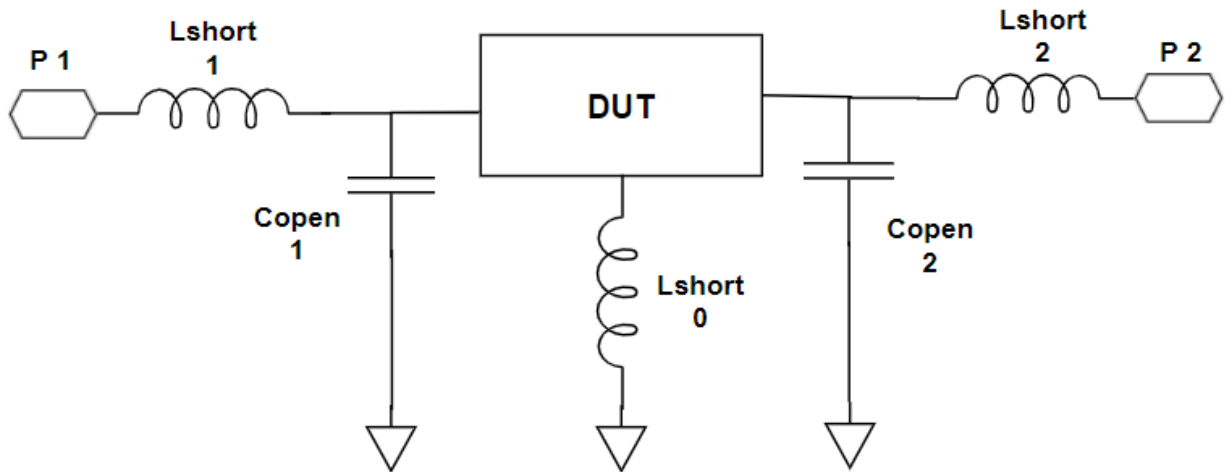


Figure 16 : Modèle équivalent des accès pour l'épluchage Short/Open

#### Epluchage de C DUT avec le short en paramètre Z

$$Z_{C\_DUT\_ep} = Z_{C\_DUT} - Z_{Short} \rightarrow Y_{C\_DUT\_ep} = y_{toz}(Z_{C\_DUT\_ep})$$

#### Epluchage de l'Open avec le Short

$$Z_{Open\_ep} = Z_{Open} - Z_{Short} \rightarrow Y_{Open\_ep} = y_{toz}(Z_{Open\_ep})$$

#### Epluchage final du DUT avec l'Open épluché

$$Y_{C\_DUT} = Y_{C\_DUT\_ep} - Y_{Open\_ep} \rightarrow Z_{C\_DUT} = y_{toz}(Y_{C\_DUT})$$

### *c. Applications aux mesures calibrées*

Dans le cadre de ce stage, des mesures calibrées ont été effectuées sur des composants du DOE B55. Nous avons effectué les mesures pour les deux types de calibrage SOLT sur ISS et TRL on-wafer des structures Open et Short des inductances.

Après les étapes de calibrage SOLT sur ISS et TRL on-wafer, nous récupérons les données sur ICCAP. Par la suite, nous appliquons les épluchages nécessaires pour déterminer les paramètres des structures étudiées.

#### Présentation de ICCAP :

ICCAP est un programme utilisé pour la modélisation des composants RF et DC. Il permet l'extraction de paramètres de modèle en s'appuyant sur la mesure des composants. Un

traitement de mesures peut être appliqué sous ICCAP en y programmant des fonctions spécifiques telles que les méthodes d'épluchage ou les caractéristiques de composants.

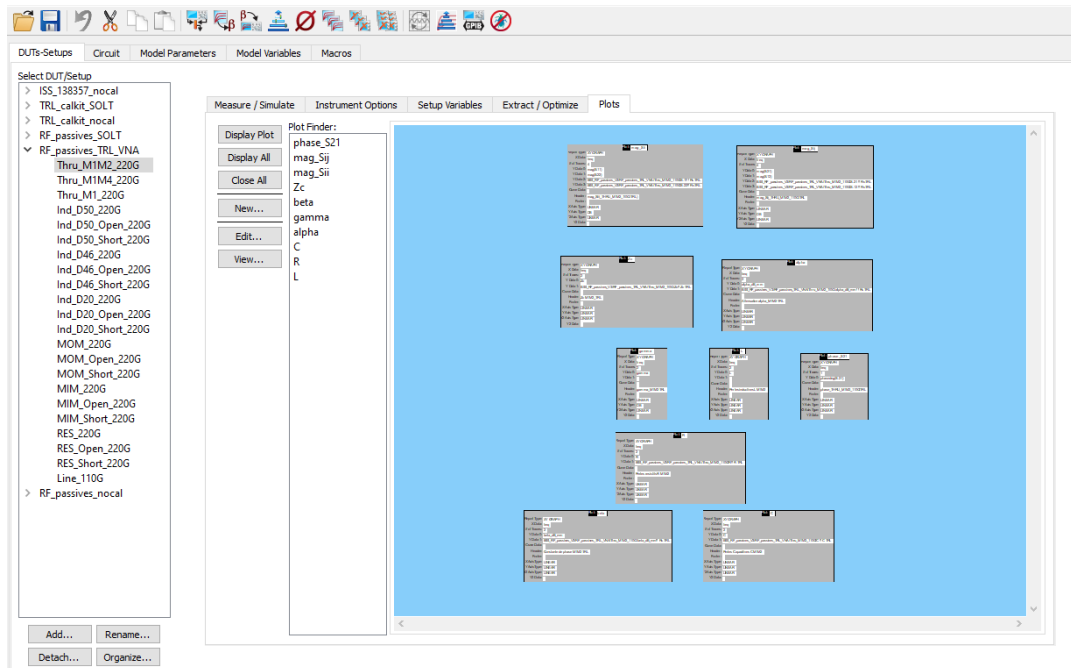


Figure 17 : Environnement de travail ICCAP

Pour les structures de test Open et Short des inductances :

Après récupération sur ICCAP les paramètres mesurés après calibrage, en utilisant les structures de de-embedding adéquates, nous appliquons l'épluchage Open/Short pour le calibrage SOLT sur ISS et Short/Open pour le calibrage TRL on-wafer pour déterminer les paramètres du DUT concerné. Par exemple après calibrage TRL on-wafer, le plan de référence est placé au bout du Pad-Open et pour un calibrage SOLT sur ISS au bout des pointes. Ainsi, pour ce dernier, un épluchage du plot avec la méthode Pad-Open/Pad-Short est nécessaire pour être dans le même plan de référence que le calibrage TRL on-wafer.

Deembedding Open/Short pour la SOLT sur ISS :

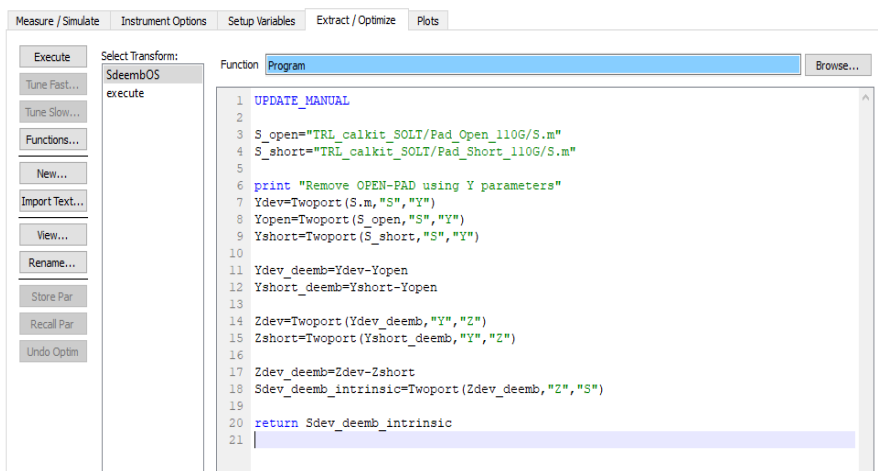


Figure 18 : Algorithme de deembedding Open/Short

## Deembedding Short/ Open pour la TRL on-wafer :

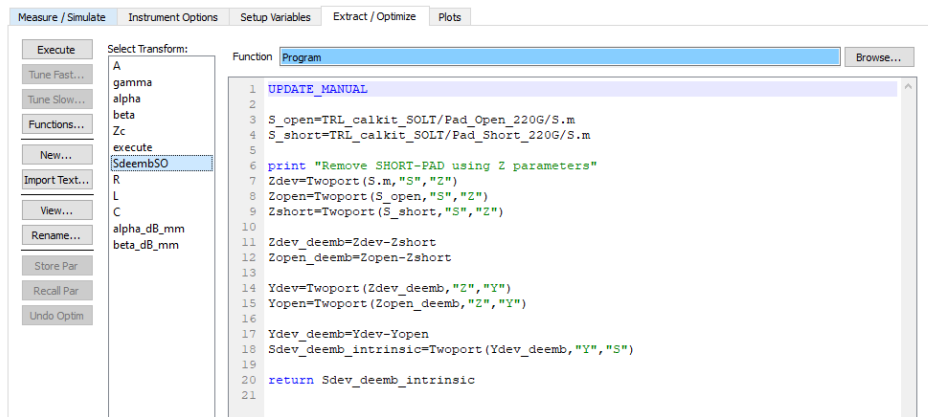


Figure 19 : Algorithme de deembedding Short/Open

## Présentation des Résultats :

### • Pour les structures de test Open des inductances :

La structure de test Open est un modèle en Pi composé de trois capacité C1, C2 et C12. Les mesures avec les deux types de calibrages donnent les résultats suivants :

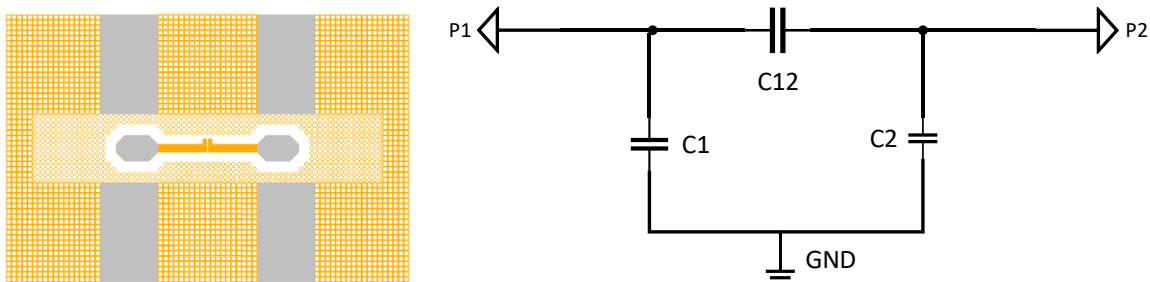


Figure 20 : Structure de test Open de l'inductance

### ○ Pour la SOLT sur ISS :

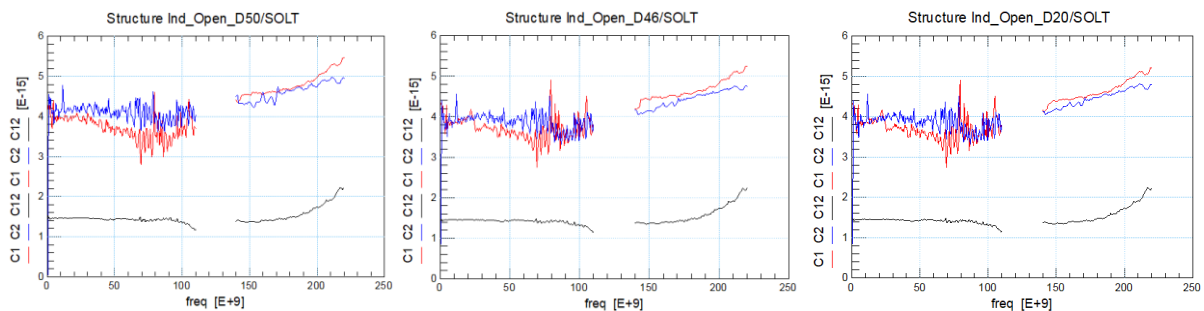


Figure 21 : Variation des capacités des structures de test Open pour la SOLT sur ISS

(Après épluchage Pad-Open/Pad-Short jusqu'à 220 GHz)

- Pour la TRL on-wafer :

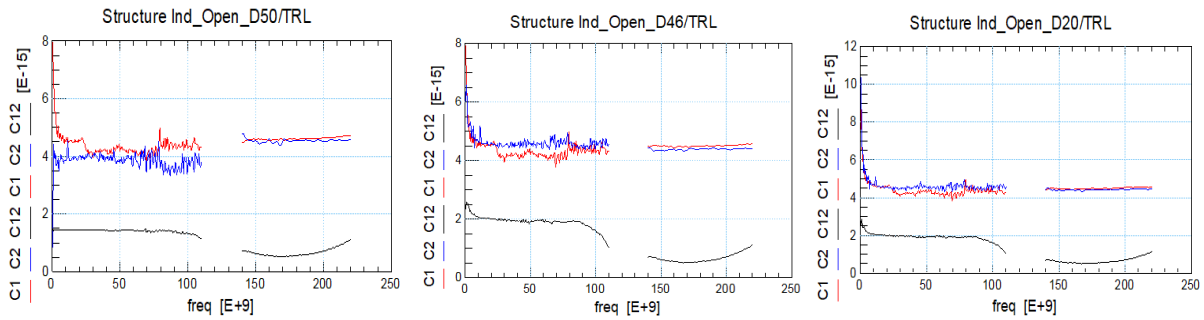


Figure 22 : Variation des capacités des structures de test Open pour la TRL on-wafer  
(Sans épluchage jusqu'à 220 GHz)

- **Pour les structures de test Short des inductances :**

La structure de test Short est représentée par un modèle en Té composé par trois inductances accompagnées par des résistances série. Nous déterminons donc les valeurs des inductances et résistances du modèle pour le calibrage SOLT sur ISS et TRL on-wafer.

- **Pour les inductances :**

- Pour la SOLT sur ISS

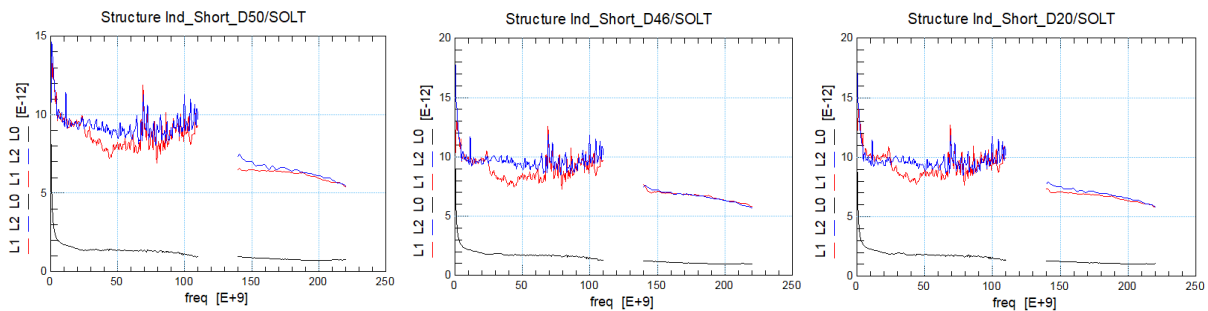


Figure 23 : Variation des inductances des structures de test Short pour la SOLT sur ISS  
(Après épluchage Pad-Open/Pad-Short jusqu'à 220 GHz)

- Pour la TRL on-wafer

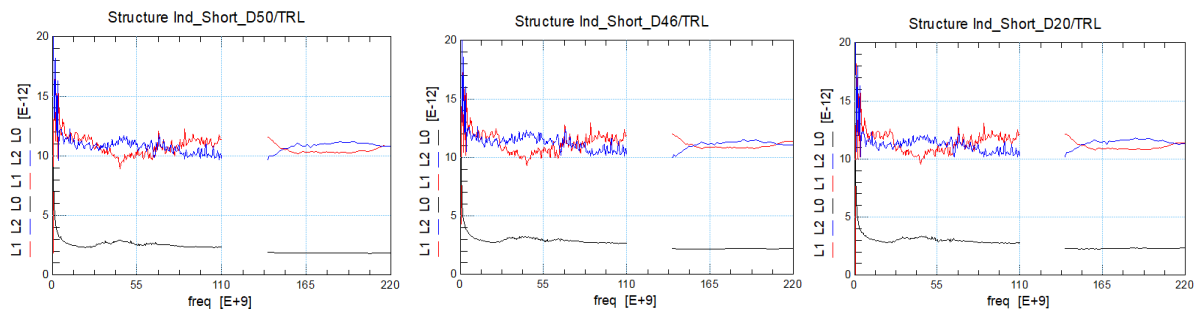




Figure 24 : Variation des inductances des structures de test Short pour la TRL on-wafer  
(Sans épluchage jusqu'à 220 GHz)

- **Pour les résistances :**

- Pour la SOLT sur ISS

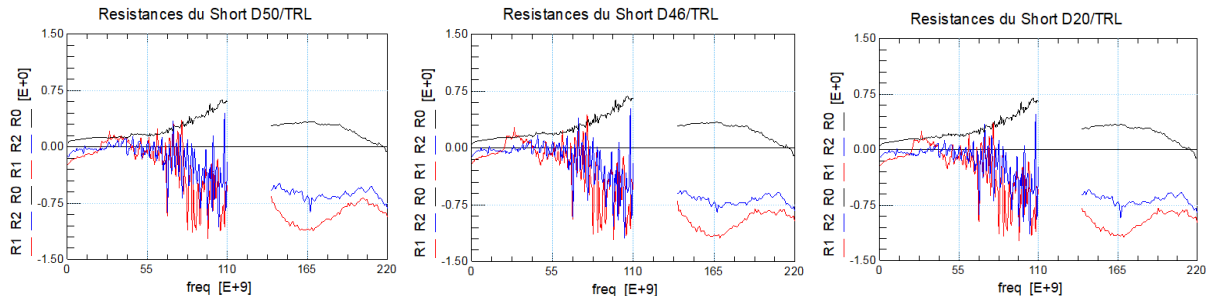


Figure 25 : Variation des résistances des structures de test Short pour la SOLT sur ISS  
(Après épluchage Pad-Open/Pad-Short jusqu'à 220 GHz)

- Pour la TRL on-wafer

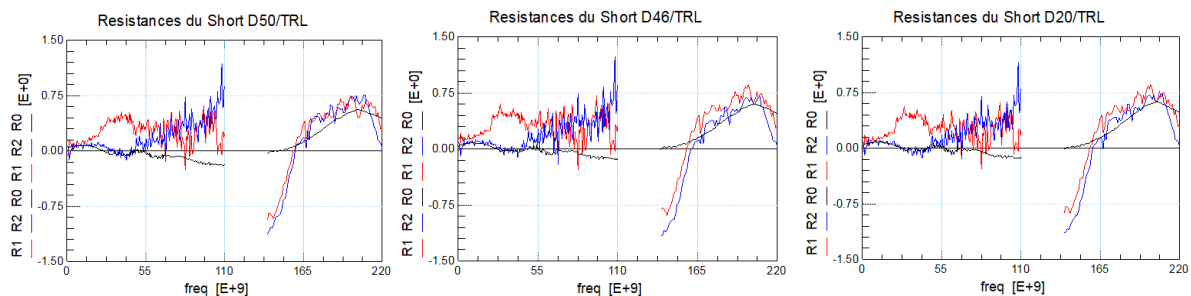


Figure 26 : Variation des résistances des structures de test Short pour la TRL on-wafer  
(Sans épluchage jusqu'à 220 GHz)

Cette étude nous permet d'évaluer la méthode de calibrage de la TRL on wafer par rapport à la SOLT sur ISS. Pour les structures de test Open et Short des inductances, la TRL on-wafer présente une continuité des valeurs des capacités et des inductances dans les deux bandes qui est meilleure que celle de la SOLT sur ISS. Le bruit dans la première bande pourrait provenir des sondes Picoprobe utilisées pour les mesures de la bande DC-110GHz.

Pour les résistances des structures Short des inductances, nous constatons dans la bande DC-110GHz pour la SOLT sur ISS, une variation très bruitée de R1, R2 et R0 avec des valeurs de résistances négatives pour R1 et R2. Tandis que pour la TRL on wafer, on note moins de bruit.

Les valeurs de résistance négatives pour la SOLT sur ISS peuvent être expliquées par le fait que la position des sondes RF après calibrage est différente entre le Pad Short et la structure Short de l'inductance. Les résultats bruités pourraient provenir du couplage entre le substrat du DOE et celui de l'ISS. De même, les valeurs de résistances qu'on veut mesurer sont trop petites,

une petite erreur de mesure ou un petit écart des sondes de mesures par rapport aux plans de références peut fausser les résultats.

En conclusion, la TRL on-wafer présente des résultats meilleurs que la SOLT sur ISS grâce au plan de référence pour la TRL qui se trouve directement placé après le plot RF du composant sur silicium. A l'opposé de la SOLT sur ISS. C'est une méthode prometteuse, qui sera étudié en détail dans la suite de ce travail avec les inductances et les lignes de transmission.

## *Conclusion*

Dans ce chapitre nous avons vu les méthodes de calibrage SOLT sur ISS et TRL on-wafer qui seront utilisées dans la suite de ce stage pour la caractérisation des composants RF (inductances et lignes de transmission). Les différences recensées entre ces méthodes de calibrage expliqueront les écarts notés entre les mesures SOLT sur ISS et TRL on-wafer par la suite. De plus, une application aux mesures calibrées des méthodes d'épluchage Open/Short et Short/Open a été menée et nous a permis de confronter ces deux méthodes de calibrage afin de mettre en avant leurs différences notamment les effets liés au couplage et à la sensibilité du positionnement des pointes.

## Chapitre 3 : Simulations électromagnétiques et mesures RF

Avant de réaliser les mesures en salle de caractérisation, une modélisation électromagnétique des inductances et des lignes de transmission a été effectuée. Elle a permis de valider les modèles électromagnétiques des inductances et des lignes de transmission pour permettre ainsi une comparaison entre mesures et simulations électromagnétiques.

### 1. Modélisation EM des inductances

Les inductances sont très utilisées dans les chaînes de communication radio fréquence. Dans les émetteurs-récepteurs RF, nous retrouvons plusieurs blocs RF constitués de composants passifs et actifs à savoir les oscillateurs contrôlés en tension (VCO), les filtres LC, les amplificateurs de puissance et les amplificateurs faible bruit. Pour le fonctionnement de ces blocs RF, l'usage d'inductances de fort facteur de qualité, occupant une faible surface et à forts courants est nécessaire pour répondre aux besoins de performances dans la gamme millimétrique. Il existe principalement deux grandes familles d'inductances : les inductances hors puce (filaires, discrètes, technologie IPD, SIP...) et celles intégrées sur silicium (Above IC, MEMS, BEOL).

L'entreprise STMicroelectronics propose 3 familles d'inductances en technologie B55 à savoir le **HQ inductor** (*High Quality Inductor*), le **LoHQ inductor** (*Low value High Quality*), et le **mmW inductors** (*millimeter-Wave-inductor*). Dans le cadre de ce stage, les inductances étudiées sont de type mmW.

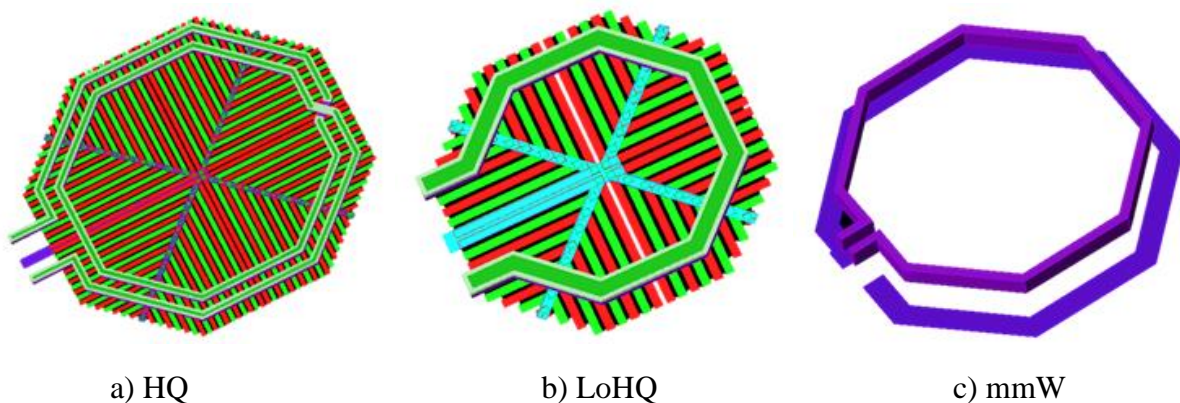


Figure 27 : Familles d'inductances développées à ST

Les simulations électromagnétiques des inductances sont effectuées à l'aide du logiciel Momentum. Des simplifications ont été apportées sur le layout (design des masque) des inductances pour ainsi réduire le temps de simulation. Les trois inductances de diamètre  $20\ \mu\text{m}$ ,  $46\ \mu\text{m}$  et  $50\ \mu\text{m}$  ont une configuration 1-turn, les dummies qui permettent d'avoir une densité de métal uniforme sont enlevées de même que les vias, seules les couches M1 et M8 ont été considérées pour les simulations électromagnétiques.

#### -Les options de simulations :

Type de simulation	Bande de fréquence	Mesh Density	Substrate File
--------------------	--------------------	--------------	----------------

RF	1 GHz-220 GHz	100	BICMOS055_8M4X0Y2Z1U_RCTYP.ltd
----	---------------	-----	--------------------------------

Tableau 6 : Récapitulatif des options de simulations

Le maillage est paramétré suivant le choix du mesh density qui est à 100 dans notre cas et qui permet d'avoir plus de précision. Le choix du type de simulation RF et non Microwave pourrait être expliqué par le fait que le mode RF est plus adéquat pour les designs qui sont complexes géométriquement, électriquement petit et qui ne tiennent pas compte des radiations [8].

#### Layout des inductances sous Momentum

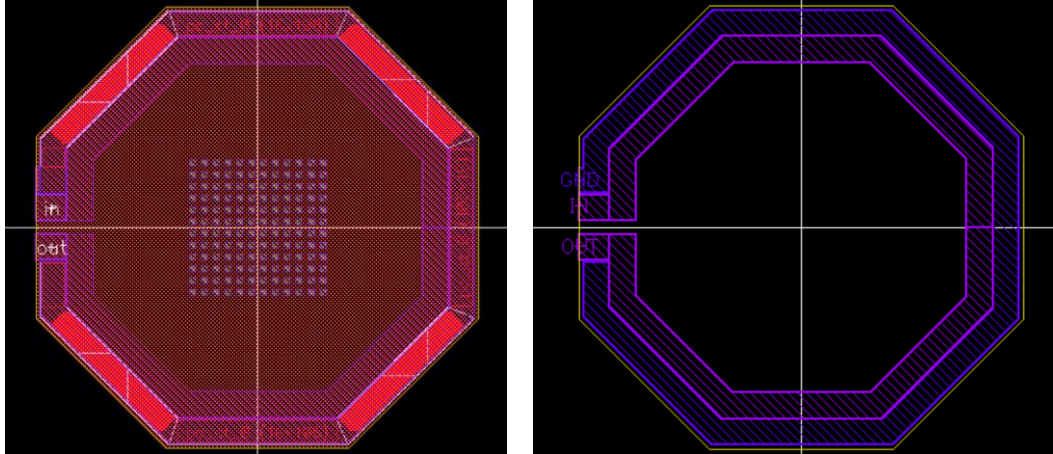


Figure 28 : Layout inductance complet (à gauche), Layout simplifié (à droite)

## II. Modélisation EM des lignes de transmission

L'objectif de cette partie est de faire une présentation des lignes de transmission et de modéliser, grâce aux designs électromagnétiques, les effets intrinsèques liés aux lignes (effets de peau, pertes diélectriques...) et leurs paramètres (RLCG, constante de propagation, atténuation, phase...).

Les lignes de transmission sont très utilisées en radio fréquence. Elles permettent de réaliser les connections entre les différents composants. Il existe plusieurs types de ligne de transmission mais les plus utilisées sont les lignes microruban (microstrip) et le guide d'onde coplanaire (CPW). En technologie microruban, le plan de masse se trouve dans la face inférieure et en technologie CPW dans la face avant [6].

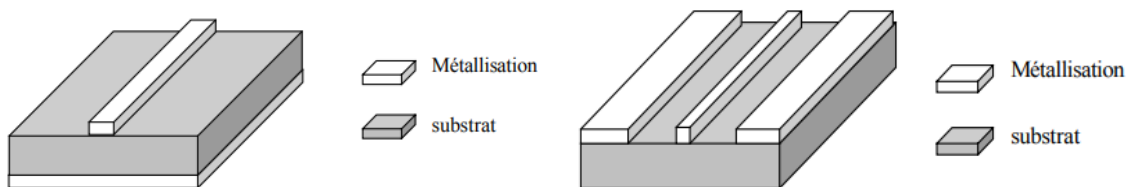


Figure 29 : Ligne Microruban (à gauche), ligne coplanaire à droite

Dans le cadre de ce stage, nous avons étudié trois lignes de transmission M1, M1M2 et M1M4 correspondant au stack de leurs plans de masse respectifs. Les lignes ont été désignées avec le logiciel HFSS. Pour alléger les simulations, les niveaux de métaux et les vias sont

regroupés. Ce qui fait qu'on aura un plan de masse, une couche pour M1M2, une autre M3M8 de part et d'autre du plan de masse et une couche M8 au milieu.

- Pour les lignes M1M2, M1M4 et M1, les couches de métal M1 à M8 pour le design sont de type cuivre de même que le CO, l'isolant est le dioxyde de silicium.

*Layout des lignes sous HFSS :*

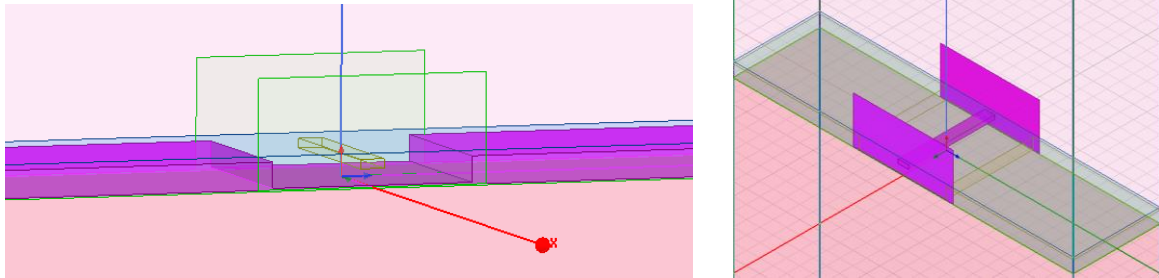


Figure 30 : Vue en face (gauche) et de dessus (droite) de la ligne M1M2 désignée sous HFSS

### *III. Comparaison entre simulations EM et mesures des inductances et des lignes de transmission*

#### *a. Pour les inductances*

Pour les trois inductances, nous avons évalué la valeur de l'inductance  $L_s$ , la valeur de la résistance série  $R_s$  et le facteur de qualité  $Q$  pour chacun. Les simulations électromagnétiques sont superposées avec les résultats des simulations du modèle Spice. Les simulations Spice ont été faites par des collègues de STMicroelectronics. Nous avons exploité les fichiers contenant les paramètres S du modèle Spice et nous avons superposé les résultats avec ceux des simulations Momentum.

*Modélisation des inductances sous Momentum :*

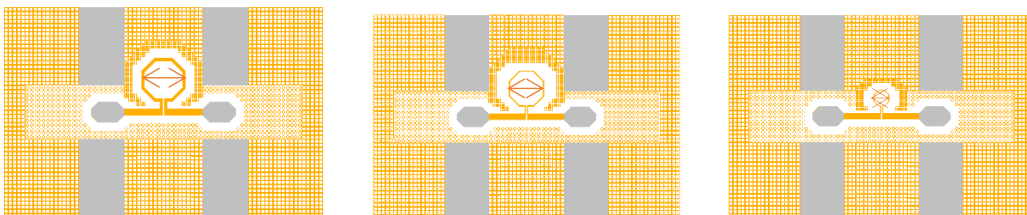


Figure 31 : Rappel des trois Inductances étudiées de gauche à droite :

(Couples diamètre intérieur/largeur du ruban : inductance d50 (50  $\mu\text{m}$ , 4  $\mu\text{m}$ ), inductance d46 (46  $\mu\text{m}$ , 1.5  $\mu\text{m}$ ) et inductance d20 (20  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ ))



- Pour l'inductance IND d20 :

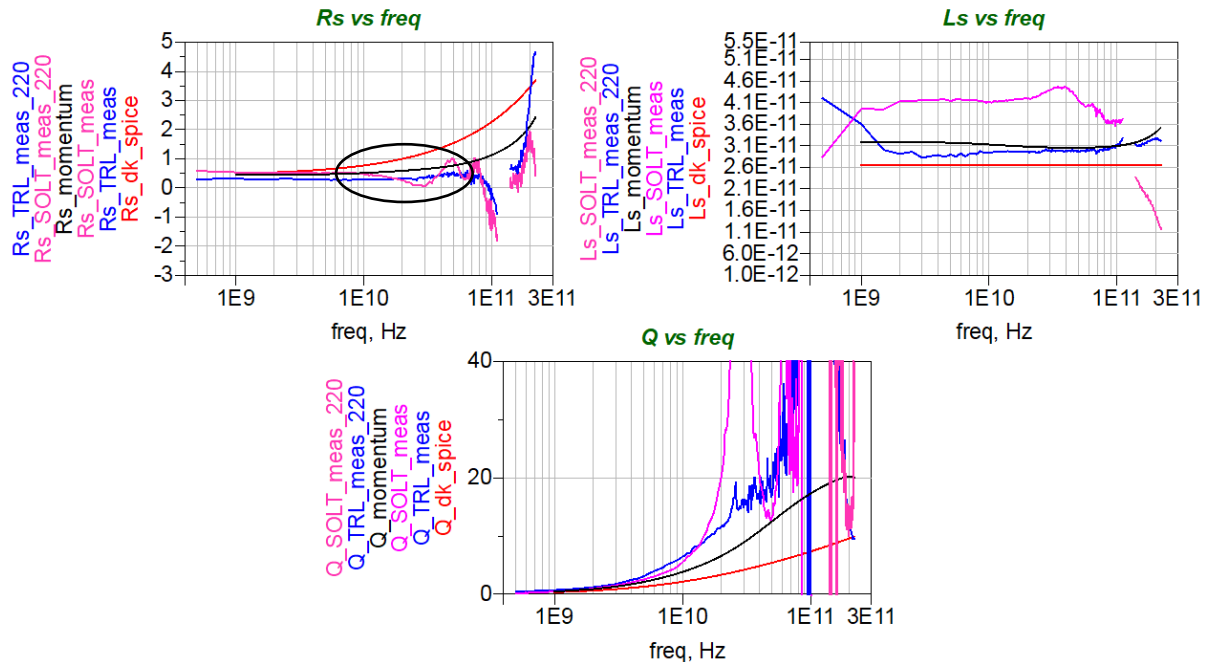


Figure 32 : Résultats des simulations électromagnétiques pour IND\_d20

### Analyse des résultats de simulations pour l'inductance d20 :

- **Pour l'inductance de diamètre 20  $\mu\text{m}$** , dans la bande 1-110GHz, nous avons un bon accord entre les valeurs de l'inductance pour les simulations du modèle Spice/EM et les mesures. Sur Momentum, nous obtenons une valeur de **Ls=31 pH** et avec le modèle Spice **Ls=26 pH**. Pour les mesures, nous avons une valeur moyenne **Ls=29 pH** (TRL on wafer) et **Ls=40 pH** (SOLT sur ISS). Soit un rapport ( $Ls_{EM}/Ls_{Measure}$ ) de **1,06** entre la simulation EM et la mesure TRL on-wafer et un rapport de **0,775** entre simulation EM et mesure SOLT sur ISS.

Par ailleurs, dans la bande 140-220GHz, nous observons une continuité de la valeur de Ls avec la TRL on-wafer et une divergence de la valeur de Ls avec la SOLT sur ISS. Nous notons donc un meilleur accord entre la mesure TRL on-wafer et la simulation EM notamment dans la bande **10-80 GHz**.

Pour la résistance Rs qui représente les pertes ohmiques, nous avons à basse fréquence la même valeur **Rs=0.48  $\Omega$**  avec une légère différence entre mesure TRL on-wafer et SOLT sur ISS. Cette différence peut être expliquée par l'impédance de la ligne utilisée comme standard dans le calibrage TRL on-wafer qui n'est pas parfaitement 50 ohms. Dans la bande 10-80GHz, nous notons un écart progressif qui peut aller jusqu'à **0.45  $\Omega$**  entre les résultats de simulations EM et mesures. Cependant, l'allure reste la même pour les deux résultats. A partir de 80GHz, nous observons une chute de la mesure Rs qui pourrait être expliquée par un couplage entre les sondes RF.

Dans la bande 140-220GHz, une résonance à 220 GHz sur les mesures de  $R_s$  à la fois avec TRL on-wafer et SOLT sur ISS est constatée, conforme à la prédiction de la simulation électromagnétique, bien qu'un décalage en fréquence entre la simulation EM et les mesures soit constaté.

Et enfin pour le facteur de qualité qui traduit l'énergie magnétique nette stockée dans l'inductance, nous notons une valeur de **Qmax= 20** pour la simulation Momentum et pour les mesures, la SOLT sur ISS présente plus de résonance que la TRL on wafer dans la bande 10-110GHz.

- Pour l'inductance IND d50 :

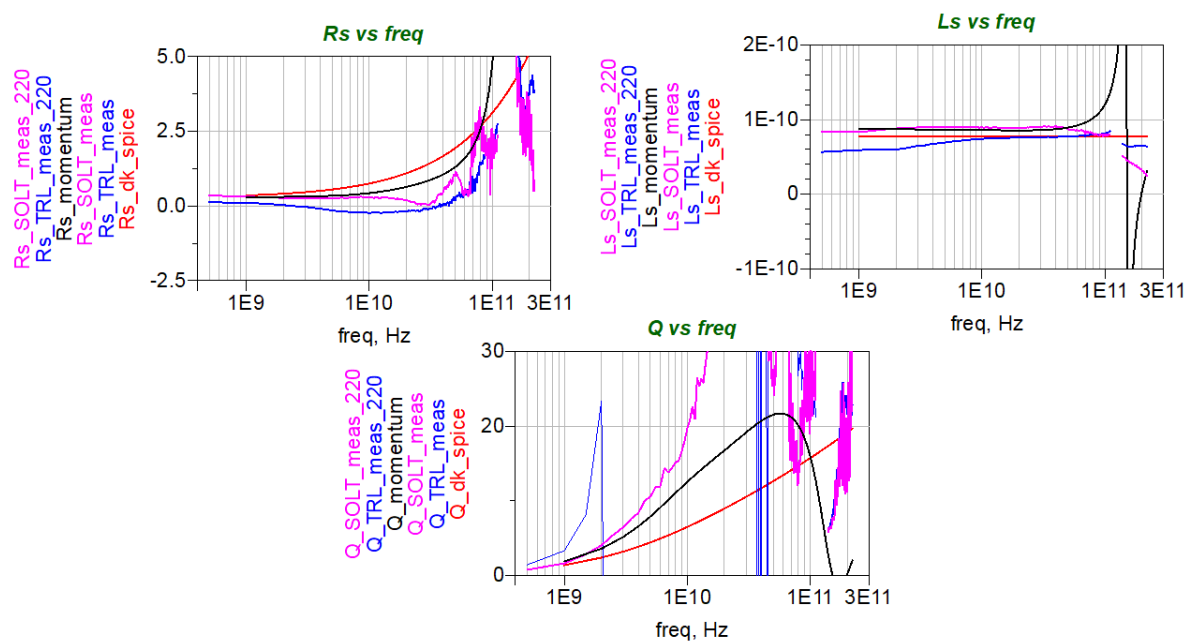


Figure 33 : Résultats des simulations électromagnétiques pour IND\_d50

- Pour l'inductance IND d46 :

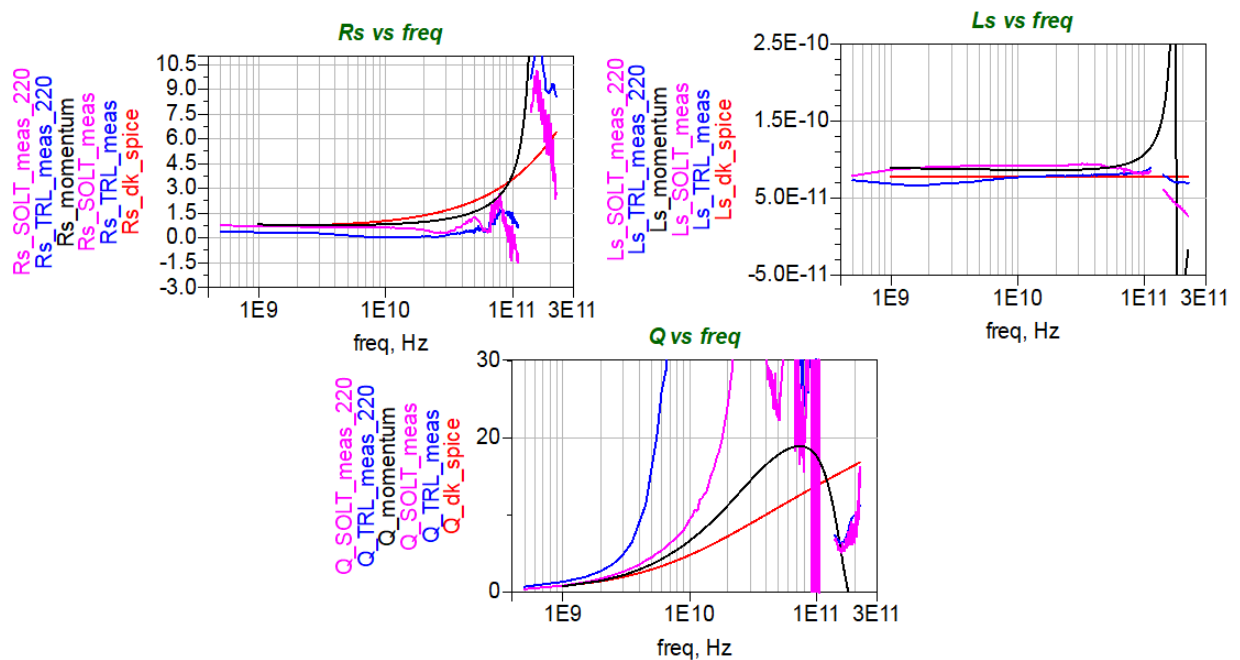


Figure 34 : Résultats des simulations électromagnétiques pour IND\_d46

#### Analyse des résultats de simulations pour les inductances d50 et d46 :

- **Pour les inductances de diamètre 50  $\mu\text{m}$  et 46  $\mu\text{m}$ ,** nous notons une légère différence entre les valeurs des simulations Momentum et des mesures. Pour la simulation Momentum, la valeur de l'inductance tourne autour de **Ls=90 pH** entre 1GHz-80GHz et on observe une résonance dans la bande non couverte par la mesure soit entre 110 GHz et 140GHz. La superposition des résultats de mesures nous permet de voir la symétrie entre les mesures SOLT sur ISS, TRL on-wafer et la simulation EM. En basse fréquence, on note un léger écart entre les mesures SOLT sur ISS et TRL on-wafer de l'ordre de 25 pH. Ensuite, à partir de 10GHz, les courbes de mesures se superposent aux courbes de simulations EM autour de 90 pH.

La variation de Ls pour la simulation Momentum à partir de 110 GHz pour les deux inductances pourrait être expliquée par un souci lié à la simulation Momentum dans cette bande de fréquence.

Dans la bande 140-220GHz, nous notons une continuité de la TRL on-wafer meilleure que celle de la SOLT sur ISS avec une valeur de **Ls=65 pH** pour la TRL on-wafer et une variation de **Ls=45 pH** à **Ls= 35 pH** pour la SOLT sur ISS.

Pour l'inductance de diamètre 50, en BF, nous avons une symétrie entre les simulations EM et les mesures soit une valeur de **Rs=0.30  $\Omega$**  avec un léger écart entre les mesures SOLT et TRL. Avec la montée en fréquence, la valeur de Rs augmente et nous constatons un écart entre les mesures et les simulations électromagnétiques de **0.66  $\Omega$**  dans la bande 1-110GHz.

Pour l'inductance de diamètre 46, en BF nous notons la même chose que pour celle de diamètre 50. La valeur de **Rs=0.80  $\Omega$**  pour les deux simulations, puis nous constatons un écart



de  $0.6 \Omega$  entre les deux simulations. Les deux courbes se recoupent à la fréquence 94 GHz, puis la résistance de la simulation Momentum suit un pic qui pourrait être expliqué par la même raison que celle de l'inductance de diamètre 50  $\mu\text{m}$ .

Pour les facteurs de qualité, en simulation électromagnétique, nous avons un  $Q_{\text{max}}=21.690$  et une fréquence de coupure de  $f_c=151 \text{ GHz}$  pour l'inductance de diamètre 50  $\mu\text{m}$  et pour celle de diamètre 46  $\mu\text{m}$  un  $Q_{\text{max}}= 18.881$  et une fréquence de coupure fréquence de coupure  $f_c=177 \text{ GHz}$ . Cependant, pour la TRL, la d50 présente des résonances importantes à partir de 2GHz. La SOLT quant à elle présente des résonances à partir de 80 GHz mais suit la variation du facteur de qualité de la simulation électromagnétique. Pour la d46, le facteur de qualité pour la SOLT sur ISS présente des résonances beaucoup plus importantes que la TRL on-wafer à partir de 80GHz.

### Conclusion :

Les très faibles valeurs de résistances, inférieurs à 0.5 ohms, pour ces trois géométries d'inductance sont extrêmement difficiles à extraire précisément à partir de mesures hyperfréquence à cause des limites de précision de l'instrumentation. Toutefois, la TRL on-wafer permet d'extraire plus précisément les valeurs d'inductance par rapport à la SOLT sur ISS.

### b. Pour les lignes de transmission

En effectuant la superposition des paramètres des lignes de transmission issus de la simulation électromagnétique et des mesures nous obtenons les résultats suivants :

- Pour la ligne M1M2 :

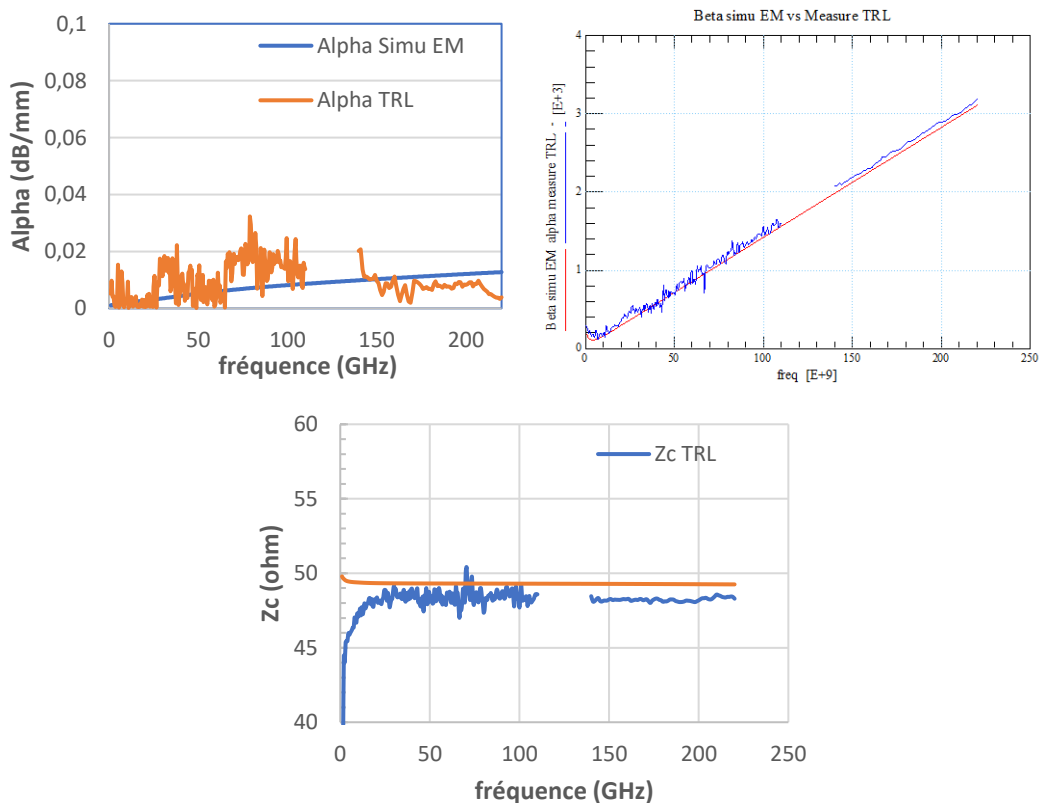


Figure 35 : Simu EM vs Measure Paramètres Alpha, Beta et Zc de la ligne M1M2

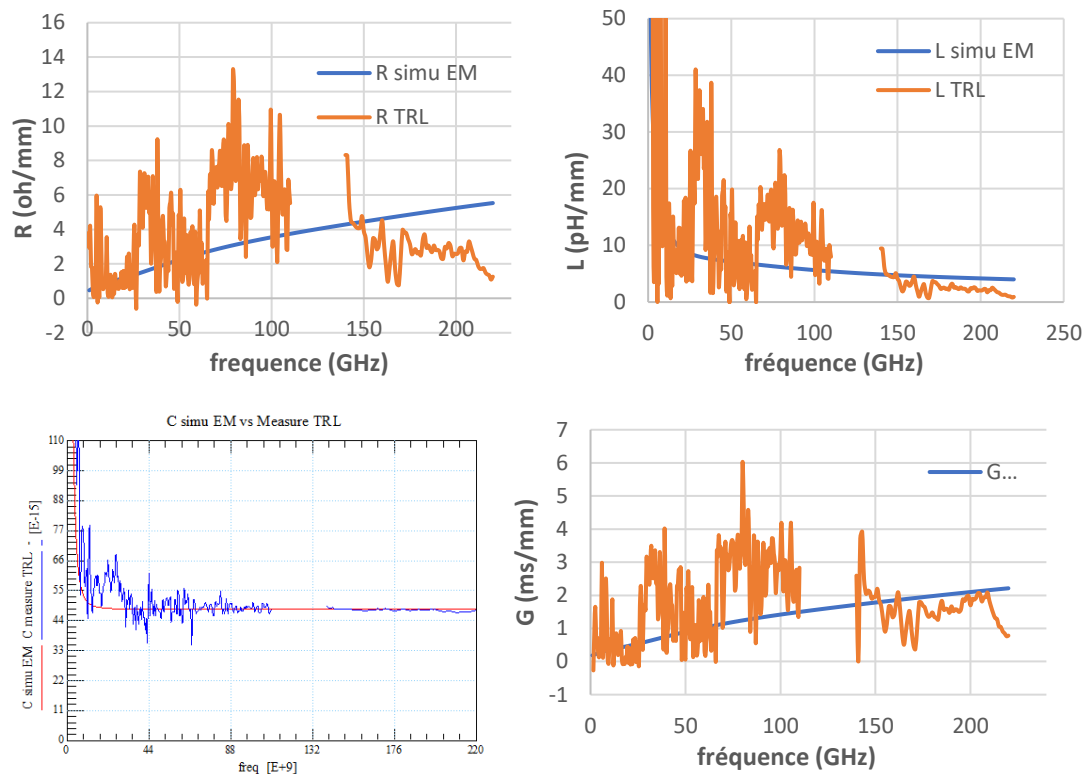


Figure 36 : Paramètres RLCG Simulations EM vs Measure TRL ligne de transmission M1M2

- Pour la ligne M1M4 :  
(Étude en cours)

### Analyse des résultats de simulations :

**Pour la ligne M1M2 :** les figures de mérite tracées sont l'atténuation alpha, la constante de phase Beta, l'impédance caractéristique  $Z_c$  et les paramètres RLCG.

Pour la constante de phase Beta, nous avons bien un accord entre mesure et simulation électromagnétique. Les valeurs s'expriment en rad/m.

On constate pour l'atténuation alpha exprimée en dB/mm et l'impédance caractéristique  $Z_c$  exprimé en ohm une bonne corrélation entre les mesures TRL et les simulations électromagnétiques.  $Z_c$  de la TRL varie linéairement pour atteindre une valeur de 46 ohms entre 0-15 GHz puis augmente et reste constante autour de 48,5 ohms sur toute la plage de fréquence étudiée. L'atténuation simulée avec HFSS augmente en fonction de la fréquence ce qui peut être expliquée par l'augmentation des pertes avec la montée en fréquence. Pour la phase Beta, on note une continuité des deux bandes pour la mesure TRL. Il y'a un écart entre la simulation électromagnétique et la mesure TRL qui augmente en fonction de la fréquence soit un rapport de 2.7 à 220GHz.

On note une bonne corrélation entre les paramètres RLCG de la TRL et de la simulation électromagnétique. Ce qui traduit un bon accord entre les deux. Les résultats de la TRL on-

wafer sont concluants pour la ligne M1M2. La variation bruitée importante enregistrée est à investiguer dans la suite de ce stage.

### *Conclusion*

Dans cette partie nous avons vu les modélisations électromagnétiques des inductances et des lignes de transmission. Des simplifications ont été apportées pour faciliter les simulations électromagnétiques. Les résultats de simulation électromagnétiques obtenus pour les inductances et les lignes ont été comparés avec les mesures TRL. Cependant, on note un écart entre mesure TRL et SOLT pour les inductances. Les résultats de la TRL sont plus proches des simulations électromagnétiques que la SOLT sur ISS. De même, pour les lignes de transmission, on obtient un meilleur accord entre mesure TRL et simulation électromagnétique. Bien que la caractérisation des inductances de petite géométrie étudiées dans ce stage soit en limitation de l'instrumentation pour la mesure sous pointes, la méthode de calibrage TRL on-wafer semble très prometteuse pour la caractérisation à la fois des inductances et des lignes de transmission jusqu'à 220 GHz.

### *Conclusion Générale*

L'objectif de ce stage était d'évaluer la méthode de calibrage TRL on wafer pour l'amélioration de la caractérisation des passifs RF. Nous avons donc présenté, en première partie, le contexte et la problématique du stage. Ainsi, nous avons vu que pour répondre aux nouveaux challenges imposés par l'usage de gammes de fréquences millimétriques, l'amélioration des méthodes de calibrage et d'épluchage est nécessaire pour avoir des modèles précis et fiables.

Une présentation du plan d'expérience, de l'environnement de mesure et des méthodes de calibrage et d'épluchage a été faite au chapitre 2. Les différences entre le calibrage SOLT sur ISS et la TRL on-wafer ont été soulevées notamment le plan de référence qui change en fonction du type de calibrage et le couplage substrat qui apparait avec la SOLT sur ISS. Ensuite, une application des deux méthodes de calibrage avec la technique d'épluchage adéquate sur les structures de test Open et Short des inductances a été présenté au chapitre 2. Une présentation de l'algorithme d'épluchage sous l'environnement ICCAP a été faite. L'objectif de l'épluchage étant d'enlever les effets parasites liés aux plots et aux lignes d'accès du composant à mesurer, nous avons constaté avec les applications aux mesures calibrées une meilleure précision de la TRL on-wafer par rapport à la SOLT sur ISS. Grâce à une meilleure continuité des valeurs de capacités et d'inductances des structures Open et Short obtenue avec la TRL on-wafer jusqu'à 220 GHz.

Une confrontation entre mesures et simulations électromagnétiques a permis d'évaluer les performances des inductances et des lignes de transmission. Pour effectuer les simulations électromagnétiques, nous avons procédé à des simplifications du layout pour avoir un temps de simulation raisonnable. Pour les inductances, nous avons enlevé les dummies, et considéré uniquement les couches M1 et M8 et pour les lignes, les vias et les niveaux de métal sont regroupés. Nous avons au final, obtenu les courbes superposées des mesures et des simulations électromagnétiques. Ce qui nous a permis d'évaluer les différentes méthodes de calibrage.

Les résultats obtenus avec le calibrage TRL on-wafer pour les structures de test et les passifs étudiés sont prometteurs. En effet, avec la TRL on-wafer, nous avons une meilleure continuité et une meilleure précision que la SOLT sur ISS. Ce qui pourrait être expliqué par le plan de référence qui se trouve au milieu du Thru et qui est calculé algorithmiquement comparé à la SOLT sur ISS qui a son plan de référence au niveau des plots.

Les valeurs des figures de mérite des inductances obtenues avec les mesures TRL sont meilleures que la SOLT et sont plus proches des valeurs théoriques notamment avec l'amélioration apportée sur la bande 10-70GHz (avec la TRL). Des résultats similaires sont notés avec les lignes de transmission. Nous avons une bonne corrélation entre mesure et simulation électromagnétique des figures de mérite  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $Z_c$  et des paramètres RLCG.

Cependant, nous avons rencontré un problème avec les mesures de la bande 1-110GHz. Nous avons soupçonné les sondes picoprobes comme étant la source des bruits importants enregistrés. Pour vérifier cela, des mesures avec des sondes Infinity sont prévues par la suite. De même, les résultats de la résistance DC au-delà de 70GHz (chute de  $R_s$ ) et la correction des impédances des lignes de la TRL) sont à investiguer.

## Bibliographie

### Pages web

- [0] <https://best.st.com/Pages/BeST.aspx>
- [6] [http://easytp.cnam.fr/algani/images/MMIC\\_ESCPI\\_CNAM\\_5.pdf](http://easytp.cnam.fr/algani/images/MMIC_ESCPI_CNAM_5.pdf)
- [7] [https://www.cascademicrotech.com/files/TLINE\\_AN.pdf](https://www.cascademicrotech.com/files/TLINE_AN.pdf)

### Thèses

- [1] Marina Deng, *Contribution à la caractérisation et la modélisation jusqu'à 325GHz de transistors HBT des technologies BiCMOS*, thèse, Université de Lille, 2014
- [2] L. Poulain, *développement d'un outil de caractérisation millimétrique de bruit dans la bande de fréquence*.
- [3] Anne-Laure Franc, *Lignes de propagation intégrées à fort facteur de qualité en technologie CMOS- Application à la synthèse de circuits passifs millimétriques*, thèse, 2011
- [9] Carine Pastore, *Evaluation de Back-End Of Line Optimisés pour les Inductances Intégrées en Technologies CMOS et BiCMOS Avancées visant les Applications Radiofréquences*, thèse, Université Joseph Fourier de Grenoble, 2011

### Rapport de Stage

- [5] David Ouattara, *Etude des problèmes de corrélation entre simulations électromagnétiques et mesures concernant les passifs aux fréquences RF et mmW*
- [8] Khli Iheb, *RF passives Benchmark, Rapport de stage*

### Papiers

- [4] Sébastien Fregonese, Marina Deng, Magali De Matos, Chandan Yadav, Member, IEEE, Simon Joly, Bernard Plano, Christian Raya, Bertrand Ardouin and Thomas Zimmer, *Comparison of On-Wafer TRL Calibrage to ISS SOLT Calibrage with Open-Short deembedding up to 500 GHz*, Publication, 2019