



ENSEA
Beyond Engineering

COMPTE RENDU DE TP

Composants et Systèmes RF

TP4 : Extraction du schéma équivalent à partir de simulations électromagnétiques

3^{eme} année

Année : 2025 - 2026

Camille LANFREDI, Valentin JOSSERON
Novembre 2025

Table des matières

1 Préparation	2
1.1 Matrice Z du schéma équivalent	2
1.2 Extraction des valeurs de Z_1 , Z_2 , Z_3 et Z_4	2
2 Simulation électromagnétique du té	3
2.1 Dessin de masque – Layout	3
2.2 Définition du substrat	3
2.3 Définition des ports d'accès	4
2.4 Paramètres du maillage	4
2.5 Définition de la plage de fréquence	5
2.6 Simulation et visualisation des paramètres Z	5
3 Définition du schéma équivalent	6
3.1 Visualisation des parties réelles et imaginaires de Z_1 , Z_2 et Z_3 et $1/Z_4$	6
3.2 Comparaison des résultats Z_{12} , Z_{21} , Z_{13} , Z_{23} , Z_{31} , Z_{32} calculés et simulés	8
4 Simulation électrique du schéma équivalent	10
4.1 Schéma équivalent du Té déterminée	10
4.2 Résultats de la simulation électrique et comparaison des résultats électrique et électromagnétique	11
4.3 Optimisation des éléments du schéma équivalent électrique	12
4.4 Comparaison du modèle constructeur vs. modèle théorique	14

1 Préparation

1.1 Matrice Z du schéma équivalent

On considère le té comme un tripôle dont les trois ports sont reliés par les impédances Z_1 , Z_2 , Z_3 et Z_4 , conformément au schéma équivalent de la figure 1.b.

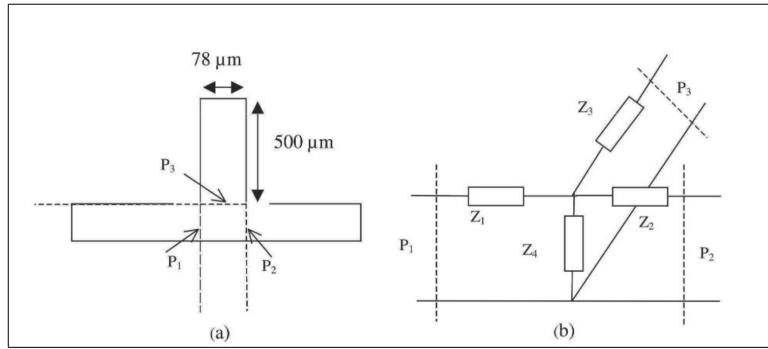


Figure 1: Layout du té et schéma équivalent associé

Les relations tension–courant s'écrivent :

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix}.$$

En appliquant les lois des mailles et des noeuds au schéma équivalent, on obtient :

$$\begin{aligned} V_1 &= (Z_1 + Z_4)I_1 + Z_4I_2 + Z_4I_3, \\ V_2 &= Z_4I_1 + (Z_2 + Z_4)I_2 + Z_4I_3, \\ V_3 &= Z_4I_1 + Z_4I_2 + (Z_3 + Z_4)I_3. \end{aligned}$$

On en déduit la matrice d'impédance du té :

$$Z = \begin{pmatrix} Z_1 + Z_4 & Z_4 & Z_4 \\ Z_4 & Z_2 + Z_4 & Z_4 \\ Z_4 & Z_4 & Z_3 + Z_4 \end{pmatrix}.$$

1.2 Extraction des valeurs de Z_1 , Z_2 , Z_3 et Z_4

L'identification terme à terme permet d'écrire :

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_1 + Z_4, & Z_{12} &= Z_4, & Z_{13} &= Z_4, \\ Z_{22} &= Z_2 + Z_4, & Z_{23} &= Z_4, \\ Z_{33} &= Z_3 + Z_4. \end{aligned}$$

Ainsi, l'impédance commune vaut :

$$Z_4 = Z_{12} = Z_{13} = Z_{23}.$$

Les impédances série s'obtiennent alors par :

$$Z_1 = Z_{11} - Z_4, \quad Z_2 = Z_{22} - Z_4, \quad Z_3 = Z_{33} - Z_4.$$

2 Simulation électromagnétique du té

2.1 Dessin de masque – Layout

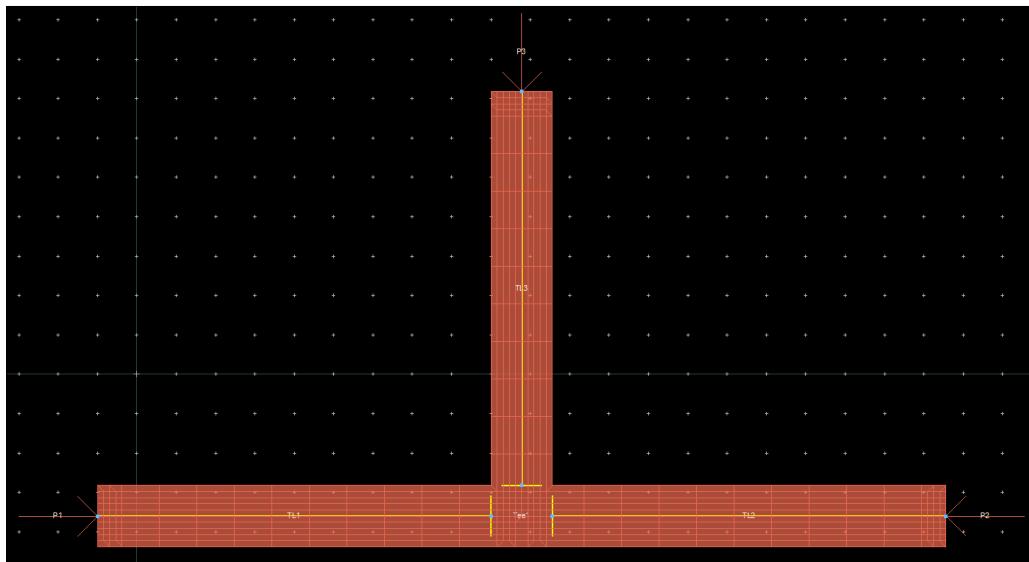


Figure 2: Dessin de masque du té.

2.2 Définition du substrat

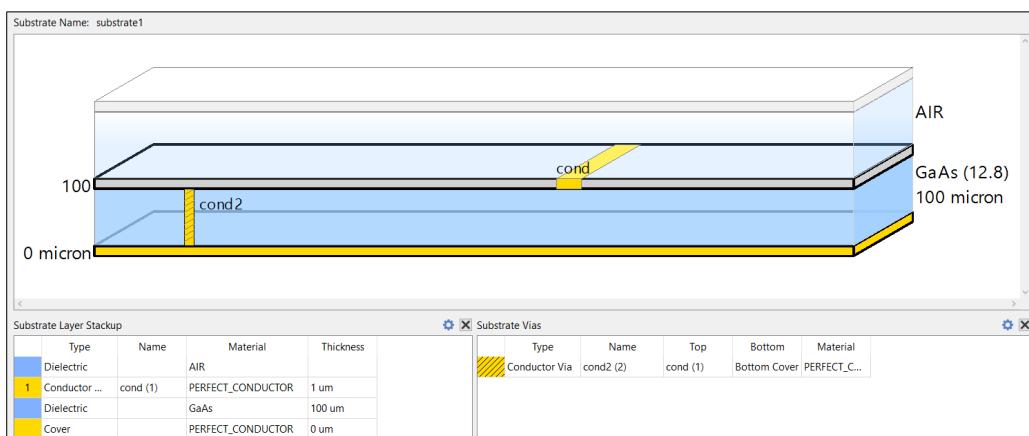


Figure 3: Définition du substrat.

2.3 Définition des ports d'accès

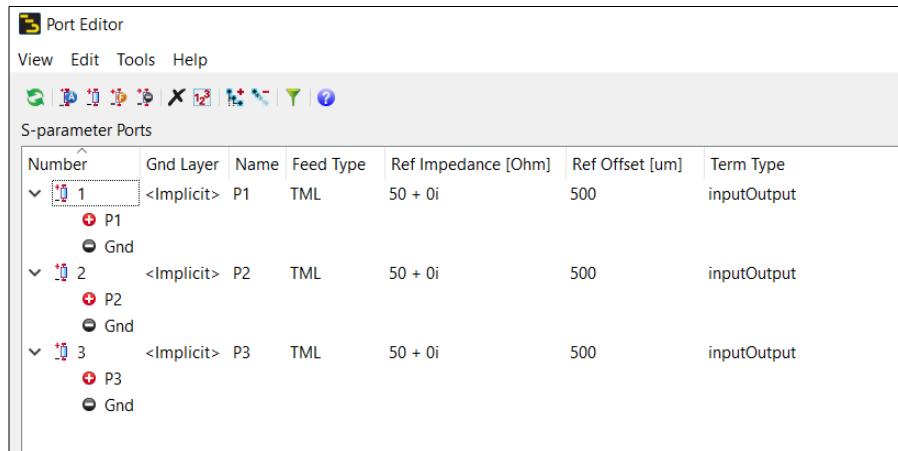


Figure 4: Définition des ports d'accès.

2.4 Paramètres du maillage

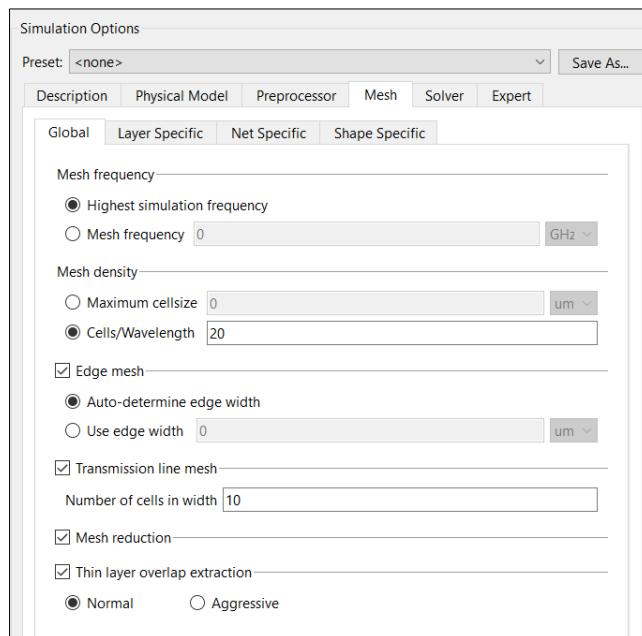


Figure 5: Paramètres du maillage.

2.5 Définition de la plage de fréquence

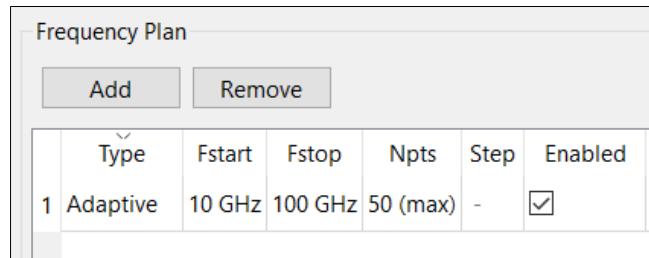


Figure 6: Définition de la plage de fréquence.

2.6 Simulation et visualisation des paramètres Z

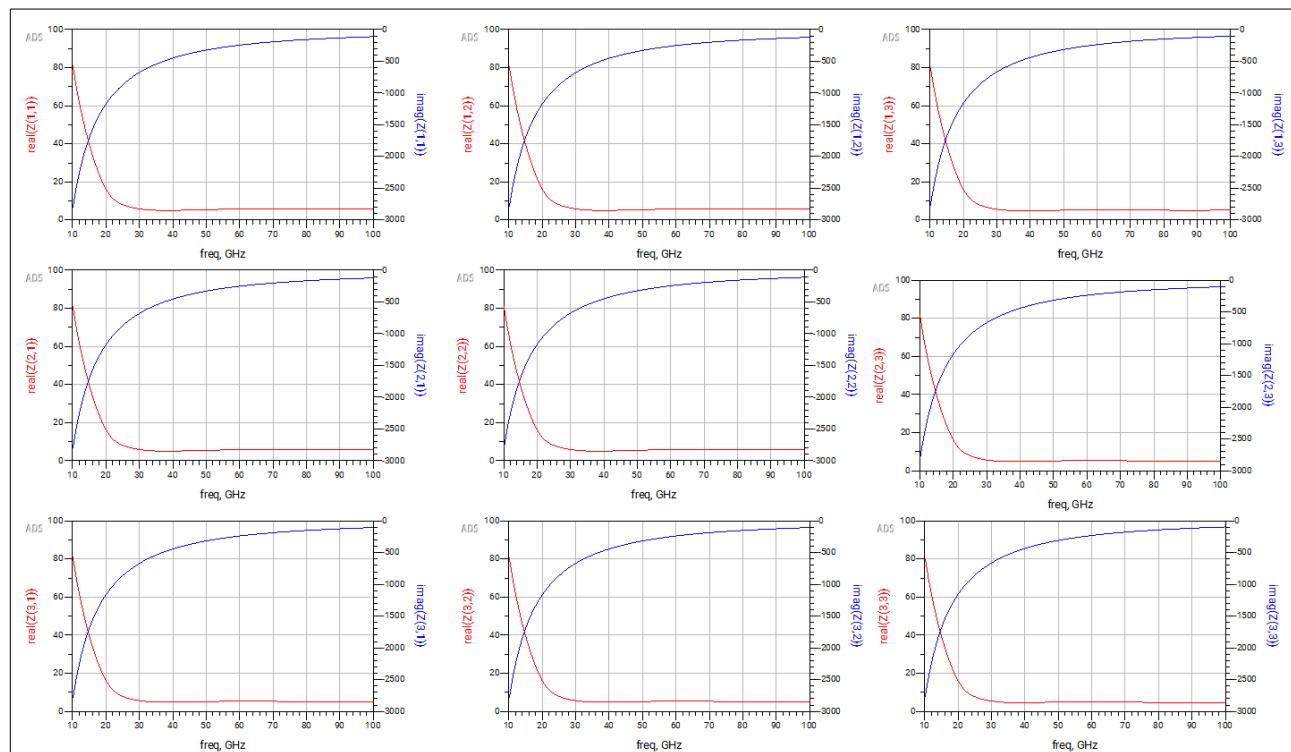


Figure 7: Paramètres Z du té.

3 Définition du schéma équivalent

3.1 Visualisation des parties réelles et imaginaires de Z_1 , Z_2 et Z_3 et $1/Z_4$

Pour obtenir la matrice Z nous utilisons la fonction *stoz* pour récupérer la matrice Z à partir de la matrice S.

D'après les équations de la matrice d'impédance du té déterminée lors de la préparation 1.2. , nous pouvons tracer les parties réelles et imaginaires des impédances Z_1 , Z_2 , Z_3 et de l'admittance $Y_4 = 1/Z_4$ en fonction de la fréquence.

$$\text{EqnZ1}=Z(1,1)-Z(1,2)$$

$$\text{EqnZ2}=Z(2,2)-Z(2,1)$$

$$\text{EqnZ3}=Z(3,3)-Z(3,1)$$

$$\text{EqnZ4inv}=1/Z(2,1)$$

Figure 8: Equations de Z_1 , Z_2 , Z_3 et Y_4 .

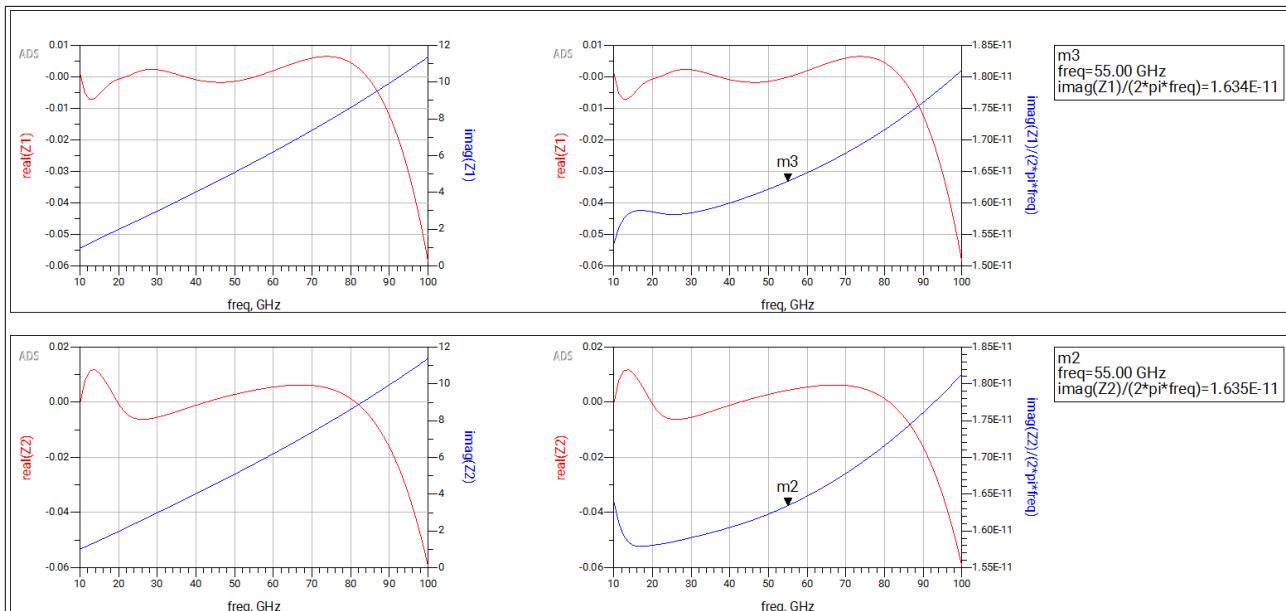


Figure 9: Parties réelles et imaginaires de Z_1 et Z_2 .

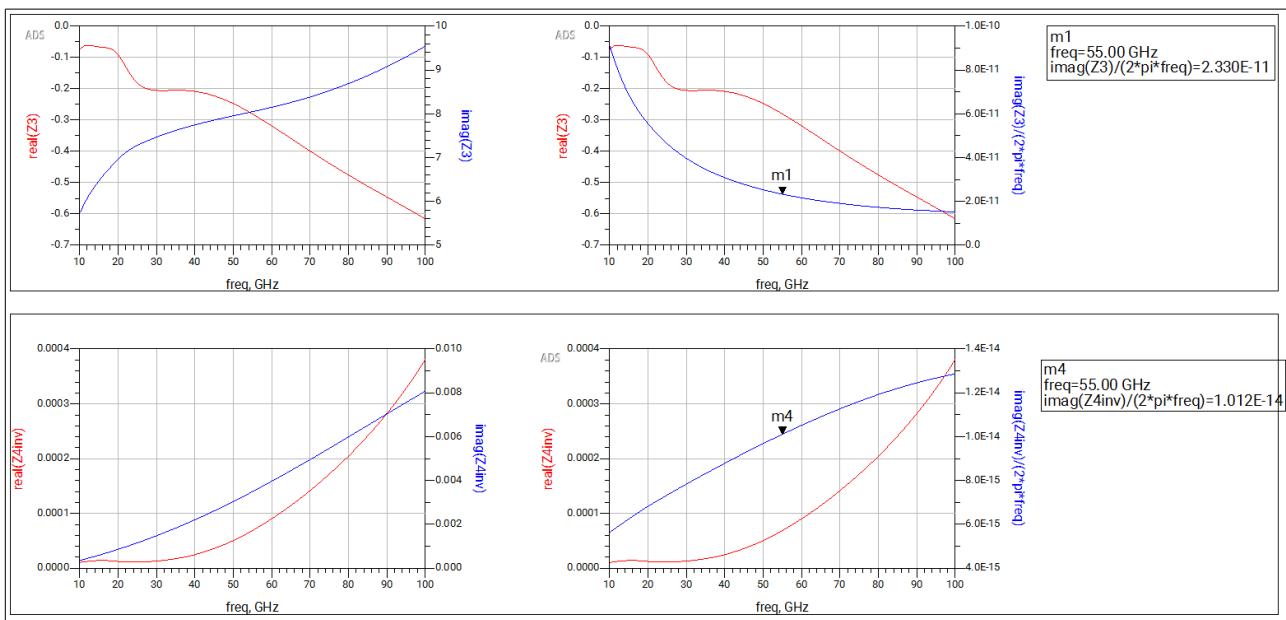


Figure 10: Parties réelles et imaginaires de Z_3 et Y_4 .

A partir des impédances extraites Z_1 , Z_2 , Z_3 et Z_4 , nous pouvons déterminer de quelle nature sont les éléments du schéma équivalent en té.

- Z_1 , Z_2 et Z_3 présentent une partie imaginaire positive croissante avec la fréquence. Ce sont donc des inductances.
- $Y_4 = 1/Z_4$ présente partie imaginaire positive. Donc Z_4 présente une partie imaginaire négative décroissante avec la fréquence. C'est donc une capacité.

Pour déterminer les valeurs des éléments du schéma équivalent, nous nous plaçons un point au milieu de la bande passante, ici 55 GHz, et utilisons les formules suivantes :

$$L_1 = \frac{\text{Im}(Z_1)}{2\pi f}, \quad L_2 = \frac{\text{Im}(Z_2)}{2\pi f}, \quad L_3 = \frac{\text{Im}(Z_3)}{2\pi f},$$

et, à partir de l'admittance $Y_4 = 1/Z_4$:

$$C_4 = \frac{\text{Im}(Y_4)}{2\pi f}.$$

Les valeurs des éléments du schéma équivalent en té sont donc :

$L_1 = 16.34 \text{ nH}, L_2 = 16.35 \text{ nH}, L_3 = 23.30 \text{ nH}, C_4 = 10.1 \text{ fF}.$

3.2 Comparaison des résultats Z_{12} , Z_{21} , Z_{13} , Z_{23} , Z_{31} , Z_{32} calculés et simulés

Nous comparons ici les résultats des paramètres d'impédance extraits de la simulation électromagnétique avec ceux calculés dans la préparation. (1.1)

La préparation nous a permis de déterminer que

$$Z_{12} = Z_{21} = Z_{13} = Z_{23} = Z_{31} = Z_{32} = Z_4.$$

Après simulation électromagnétique du té, nous retrouvons bien le résultat déterminé en préparation. Les parties réelles et imaginaires des paramètres d'impédance Z_{12} , Z_{21} , Z_{13} , Z_{23} , Z_{31} et Z_{32} sont toutes identiques.

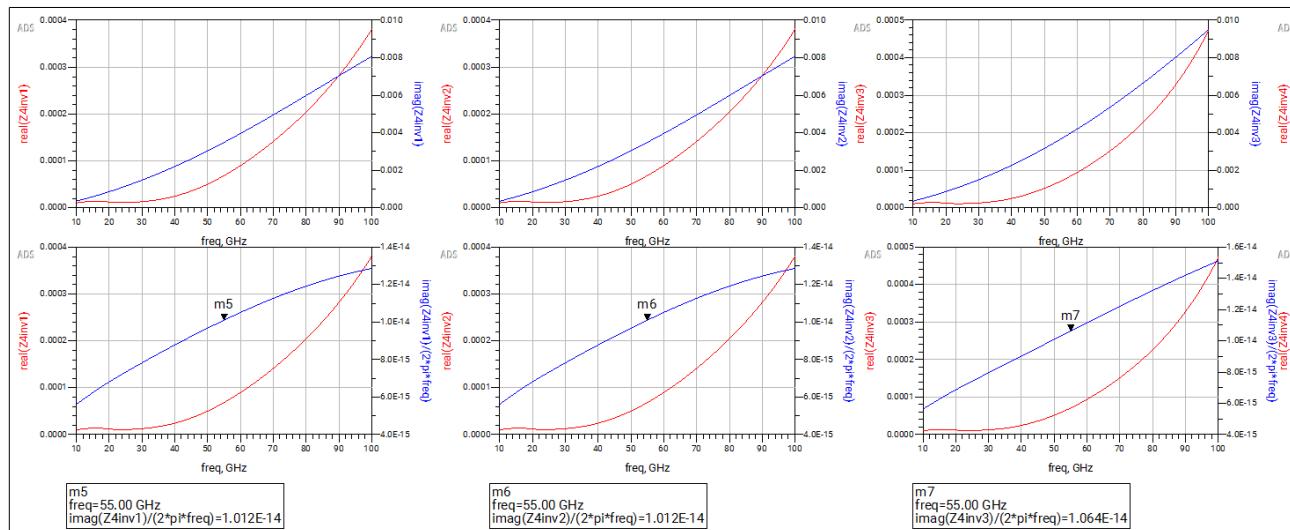


Figure 11: résultats de Z_{12} , Z_{21} , Z_{13}

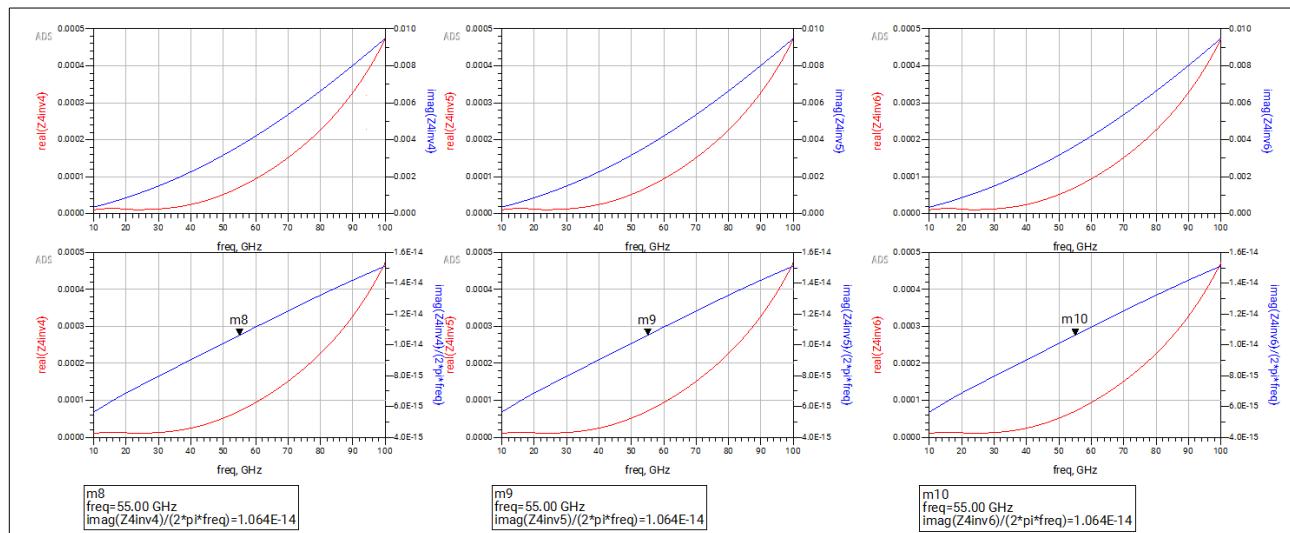


Figure 12: résultats de Z_{23} , Z_{31} , Z_{32} .

$$\begin{array}{ll} \text{EqnZ4inv1=1/Z(2,1)} & \text{EqnZ4inv4=1/Z(2,3)} \\ \text{EqnZ4inv2=1/Z(1,2)} & \text{EqnZ4inv5=1/Z(3,1)} \\ \text{EqnZ4inv3=1/Z(1,3)} & \text{EqnZ4inv6=1/Z(3,2)} \end{array}$$

Figure 13: Equations utilisées pour calculer Y_{12} , Y_{21} , Y_{13} , Y_{23} , Y_{31} et Y_{32} .

Cela valide la modélisation du té par le schéma équivalent proposé.

4 Simulation électrique du schéma équivalent

4.1 Schéma équivalent du Té déterminée

Une fois, les éléments du schéma équivalent déterminés et calculés dans la section précédente, nous pouvons réaliser le schéma électrique équivalent.

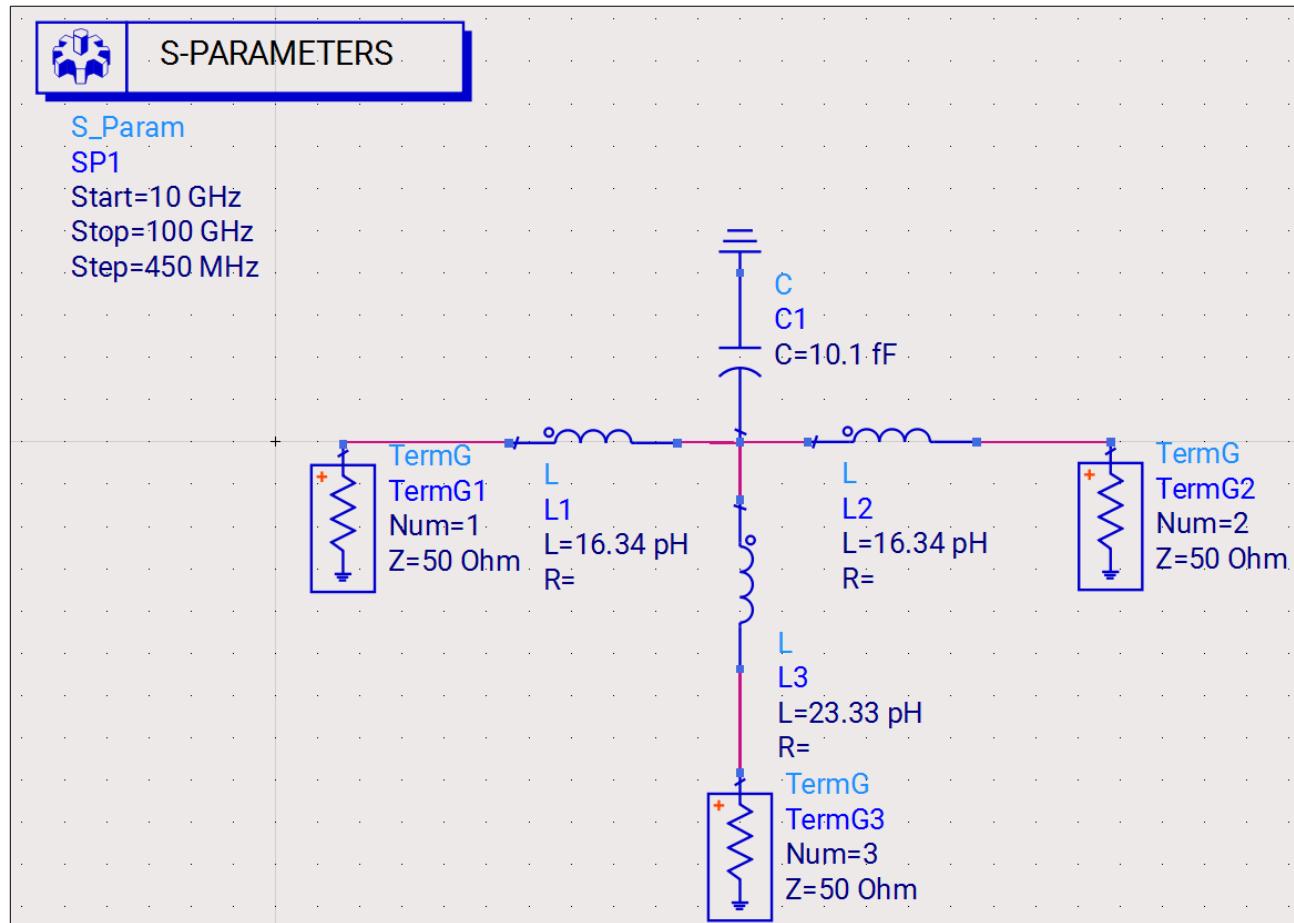


Figure 14: Schéma équivalent électrique du té.

4.2 Résultats de la simulation électrique et comparaison des résultats électrique et électromagnétique

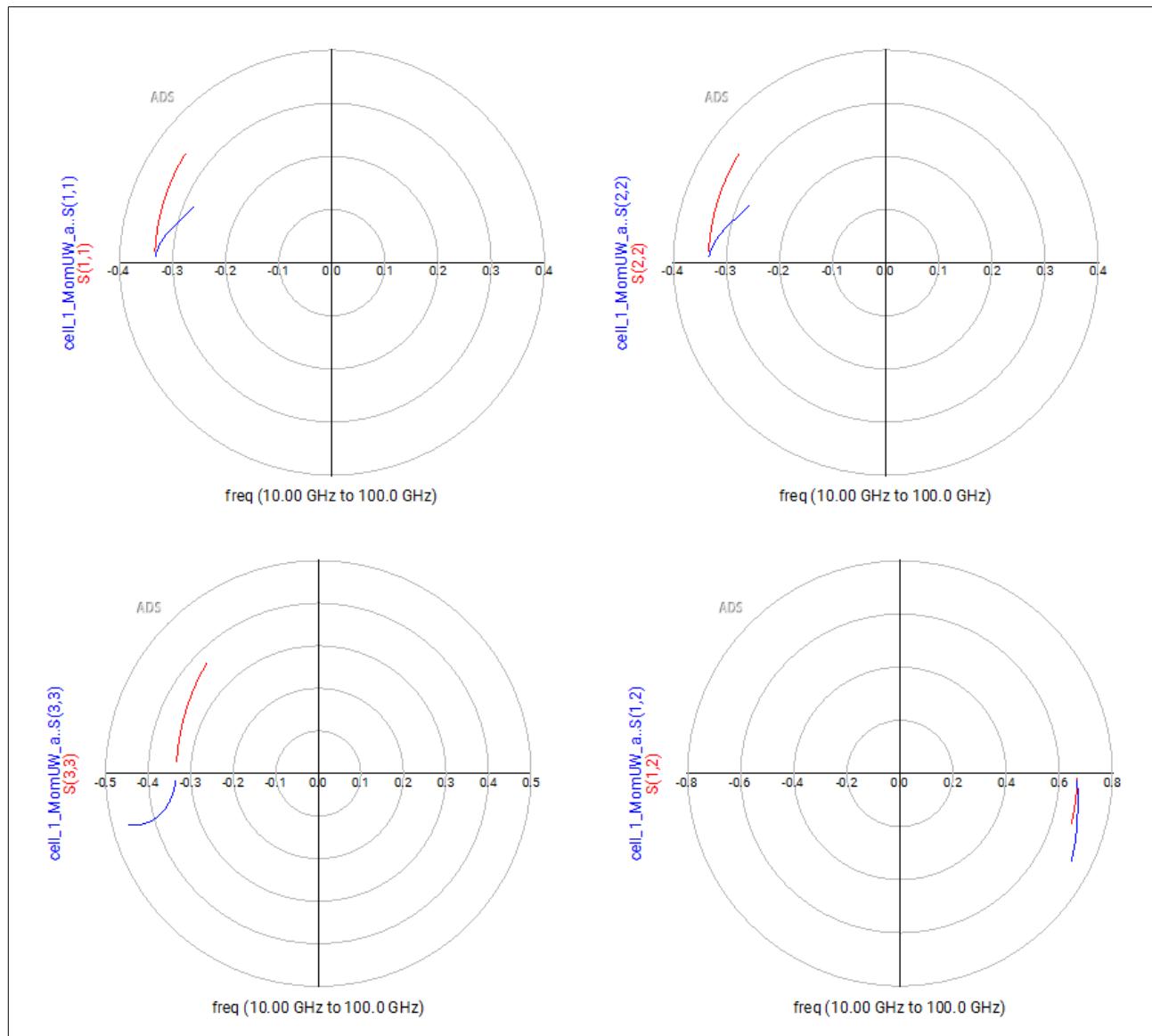


Figure 15: Comparaison des paramètres S_{11} simulés et calculés.

Nous observons une différence notable entre les résultats de la simulation électrique et ceux de la simulation électromagnétique. Cette divergence suggère que le modèle électrique initial ne capture pas entièrement les interactions présentes dans le modèle électromagnétique.

4.3 Optimisation des éléments du schéma équivalent électrique

Pour optimiser le schéma électrique équivalent, nous introduisons des inductances mutuelles entre la branche verticale et chacune des branches horizontales (L_1/L_3 et L_2/L_3). Ces mutuelles modifient certains termes de la matrice d'impédance équivalente et reproduisent plus fidèlement les effets de couplage observés dans la simulation EM.

Par conséquent, la matrice d'impédance Z est modifiée : les éléments Z_{13} , Z_{23} , Z_{31} et Z_{32} comportent désormais une contribution due aux inductances mutuelles, de la forme $j\omega M$ (ou $j\omega M_{ij}$ si les mutuelles diffèrent).

On recalcule les équations la matrice Z , les paramètres restent inchangés sauf :

$$Z_{1,3} = Z_4 + j\omega M_{13}, \quad Z_{2,3} = Z_4 + j\omega M_{23}, \quad Z_{3,1} = Z_4 + j\omega M_{31}, \quad Z_{3,2} = Z_4 + j\omega M_{32}.$$

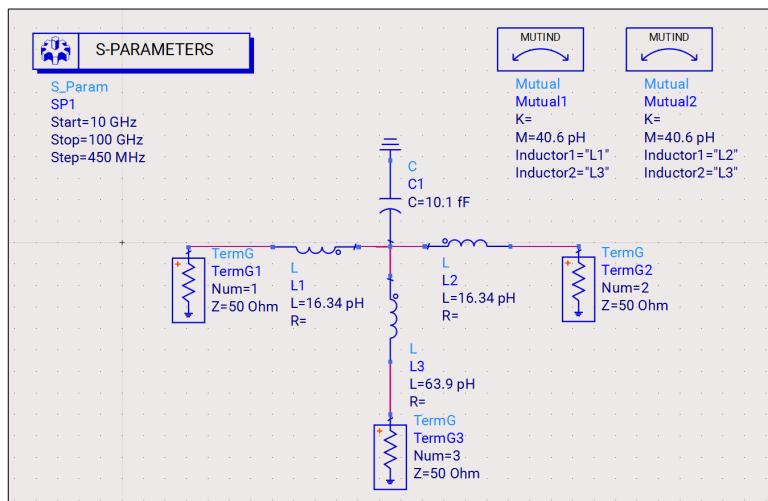


Figure 16: Schéma équivalent électrique du té optimisée (ajout des inductances mutuelles).

Attention : Lors de la première extraction, la valeur de L_3 avait été déterminée à partir de l'expression :

$$Z_3 = Z_{33} - Z_{31}.$$

Or, Z_{31} contenant désormais la contribution de l'inductance mutuelle, cette relation n'est plus valable, ce qui explique la différence observée entre les résultats des modèles électrique et électromagnétique. Pour corriger cette incohérence, nous utilisons la relation :

$$Z_3 = Z_{33} - Z_{21},$$

qui permet d'obtenir une valeur révisée de l'inductance verticale :

$$L_3 = 63.9 \text{ nH}.$$

Attention : Enfin, il est important de veiller à orienter toutes les inductances dans le même sens (tous les points vers l'intérieur ou tous vers l'extérieur) afin que les effets de couplage soient correctement pris en compte dans la simulation.

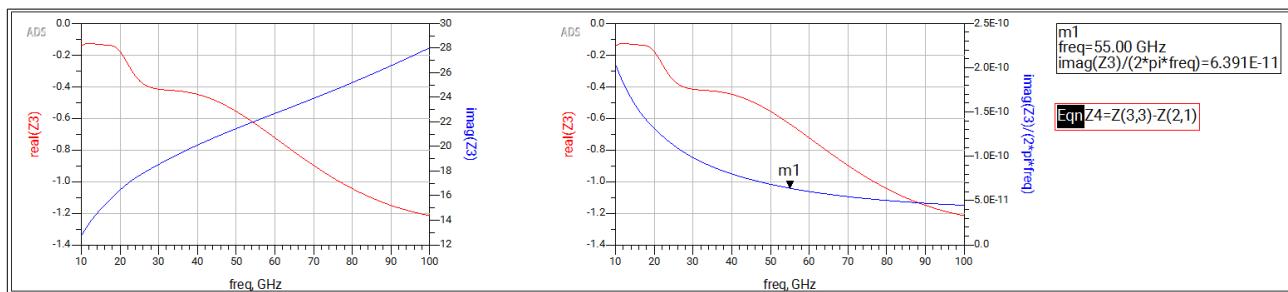


Figure 17: Nouvelle valeur de L_3 après correction.

Pour cette nouvelle valeur de L_3 , cela donne :

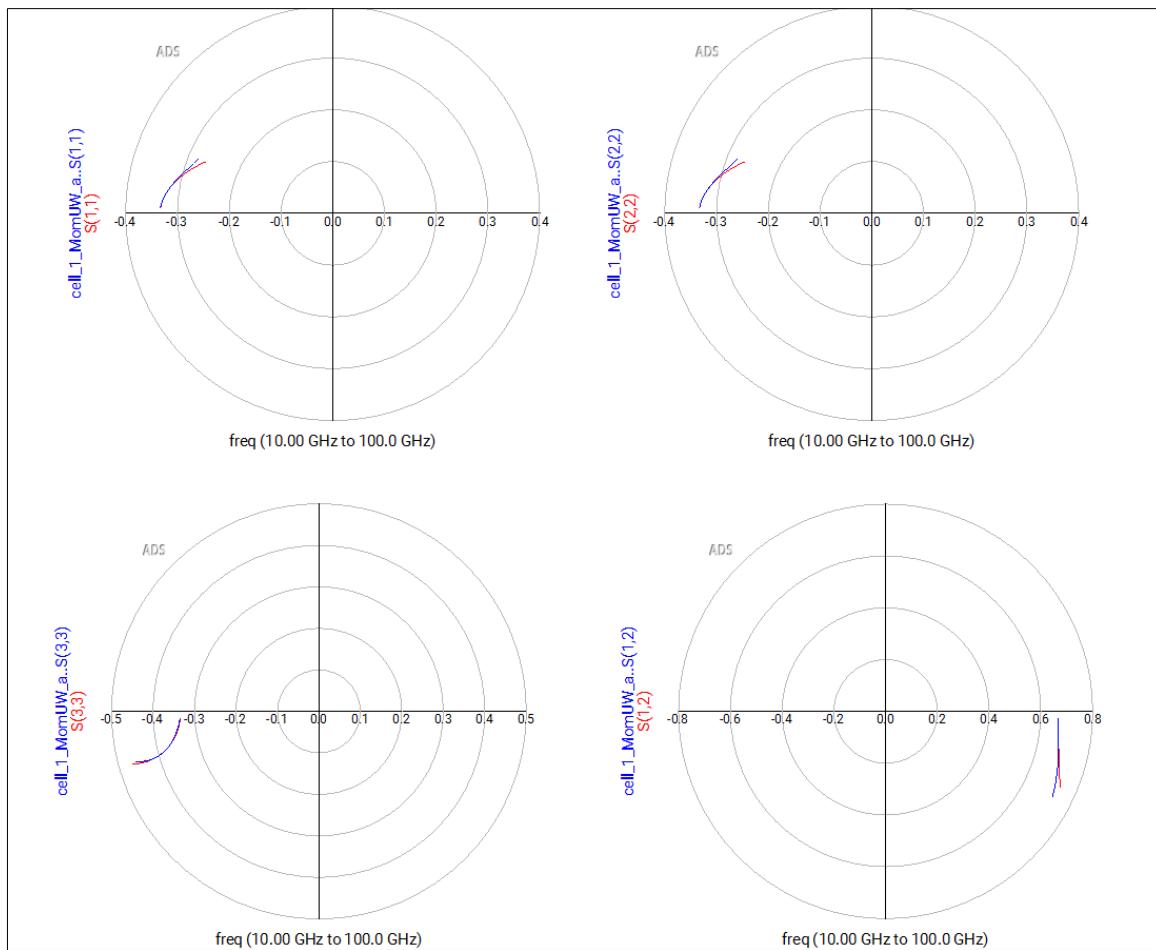


Figure 18: Comparaison des paramètres S_{11} simulés et calculés après optimisation.

Cette fois ci, les résultats du modèle électrique optimisé sont en très bonne adéquation avec ceux de la simulation électromagnétique, validant ainsi l'approche d'ajout des inductances mutuelles pour capturer les effets de couplage dans le schéma équivalent du té.

4.4 Comparaison du modèle constructeur vs. modèle théorique

En complément, nous avons comparé les performances du modèle théorique obtenu précédemment avec celles du modèle constructeur proposé dans ADS (bloc MTEE). Ce modèle intègre de manière native les effets de couplage et les paramètres géométriques associés aux transitions en T.

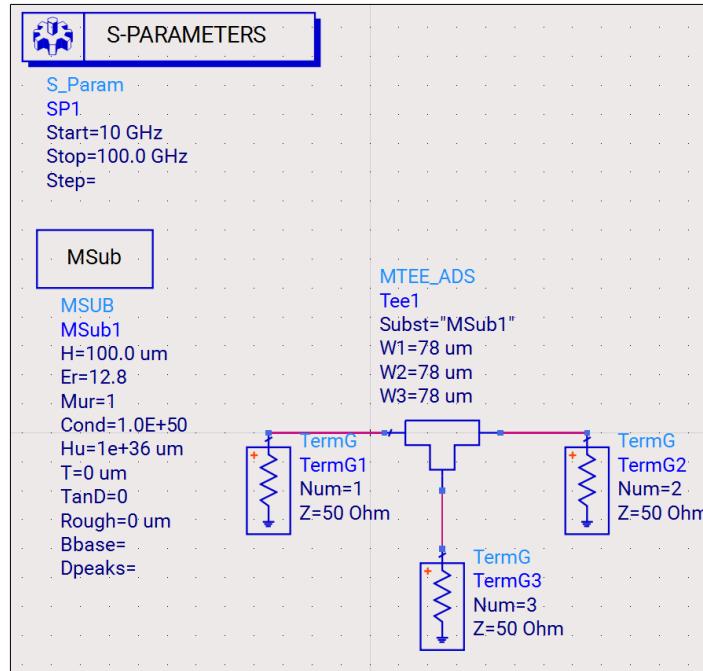


Figure 19: Schéma équivalent constructeur via MTEE

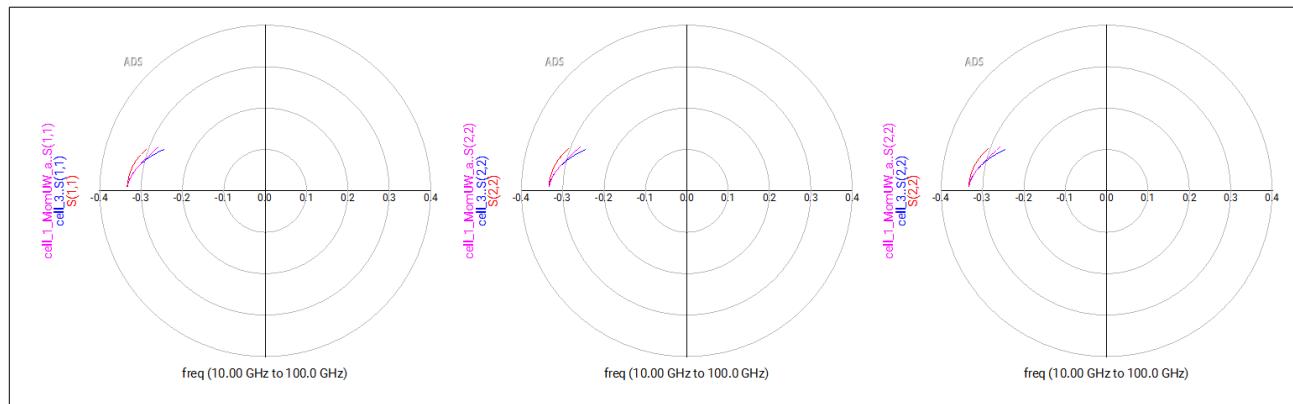


Figure 20: Comparaison des paramètres S_{11} du modèle constructeur et du modèle théorique.

La comparaison des paramètres S_{11} montre une allure très similaire entre le modèle optimisé et le modèle constructeur, ce dernier offrant toutefois une légère amélioration. Cela s'explique par le fait que le MTEE prend en compte la largeur des lignes de manière paramétrée, alors que notre modèle théorique repose sur une largeur fixe. Toute modification de cette largeur nécessiterait de recalculer l'ensemble des éléments du schéma équivalent.

Cette comparaison confirme la validité du modèle théorique développé, ainsi que l'intérêt de l'introduction des inductances mutuelles pour représenter correctement les interactions électromagnétiques au niveau du té.