

I. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats des équations obtenues dans le chapitre III. Ces équations concernent le calcul de la constante diélectrique effective et l'impédance caractéristique de la ligne coplanaire symétrique/asymétrique multicouche planaire/cylindrique. Une étude sera également réalisée pour connaître les effets des différents paramètres de la ligne tels que les caractéristiques dimensionnelles ($h_1, h_2, h_3, w, w_1, w_2, s$) et la permittivité diélectrique de chaque couche diélectrique ($\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, \epsilon_{r3}$) sur ϵ_{eff}, Z_0 . Nous présenterons aussi pour chacun des deux paramètres de la ligne l'apprentissage par un réseau de neurones artificiels ainsi qu'une validation de cette approximation. Ce chapitre est ainsi organisé en deux parties :

- Partie I : contient les résultats numériques de la transformée conforme. Dans cette partie, on présente les cas planaire/cylindrique symétrique/asymétrique multicouche. Des comparaisons avec les résultats de sont fait pour valider notre modèle, ensuite l'effet des paramètres de la structure sur ϵ_{eff}, Z_0 est étudiée.
- Partie II : Les résultats obtenus par la transformée conforme sont utilisés comme des entrées dans l'apprentissage des réseaux de neurone artificiels. Cela est réalisé en trois étapes le choix de la structure neuronale, deuxièmement l'apprentissage et finalement la validation.

II. Partie I : Comparaison et étude de l'effet des différents paramètres de la ligne

II. 1. Comparaison des résultats

Pour tester la faisabilité de la méthode utilisée dans cette étude, les dimensions diélectriques de la ligne coplanaire étudiée ont été augmentés pour $\epsilon_{r1}=12.9$ et $\epsilon_{r2}=\epsilon_{r3}=1$; c'est le cas d'une coplanaire monocouche. Nous définissons le rapport axial (Axial Ratio)

$$AR = \frac{\theta_1}{\theta_2} \text{ avec } (\theta_1, \theta_2) \text{ sont les angles d'ouverture des strips cylindriques.}$$

Les figures 18 et 20 représentent la constante diélectrique effective ϵ_{eff} et l'impédance caractéristique Z_0 d'une ligne coplanaire monocouche ayant $w_1 = w_2$, $s/(s+w_1) = 0.4$ et $w/(s+w_1) = 3, 12$ ($s=8$ cm, $w_1 = w_2=12$ cm pour $w= 60, 240$ cm).

La valeur absolue du pourcentage d'erreur max dans ε_{eff} entre nos résultats et ceux d'Akan [1] est de 4.5% comme le montre la figure 19, tandis que cette erreur dans Z_0 est de 5.2% comme le montre la figure 21. Par conséquent, nous constatons un très bon accord entre nos résultats calculés et ceux d'Akan [1].

Nous considérons aussi le cas d'une ligne coplanaire multicouche planaire ayant $\varepsilon_{r1}=12.9$ et $\varepsilon_{r2}=\varepsilon_{r3}=10$, $h_1/(s+w_1) = 4$, $h_3/(s+w_1) = 6.5$, et $(h_2-h_1)/(s+w_1)$ varie de 1 à 10. Les résultats correspondants sont montrés dans les figures 22 et 24. Nous constatons également pour le cas multicouche que nos résultats sont en un très bon accord avec ceux d'Akan [1] comme le montre les valeurs du pourcentage d'erreur données par les figures 23 et 25.

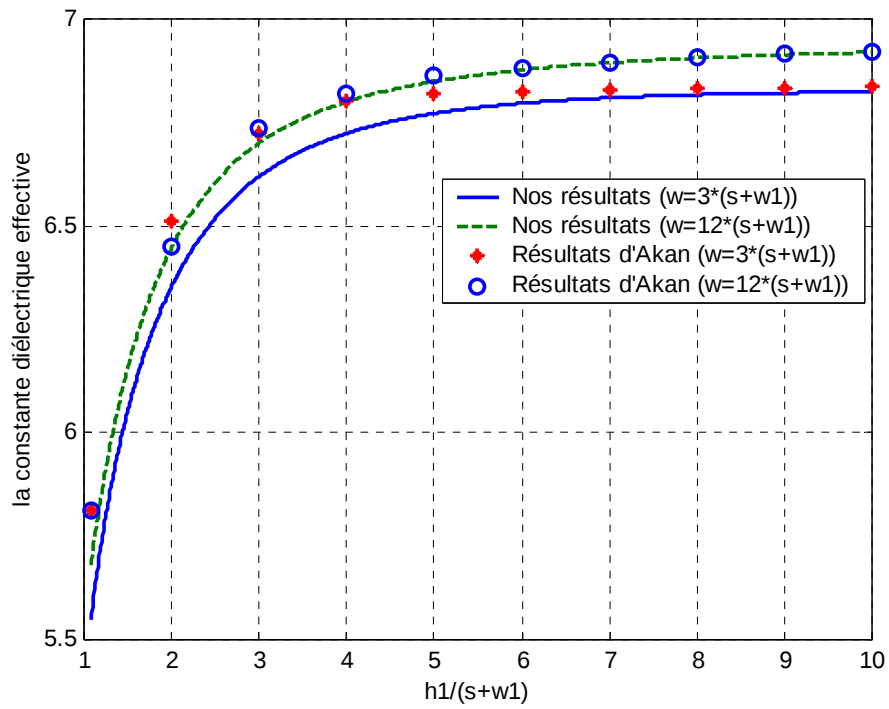


Figure 18. Constante diélectrique effective d'une ligne coplanaire monocouche de géométrie planaire en fonction de $h_1/(s + w_1)$ pour $\varepsilon_{r1} = 12.9$ et $\varepsilon_{r2} = \varepsilon_{r3} = 1$

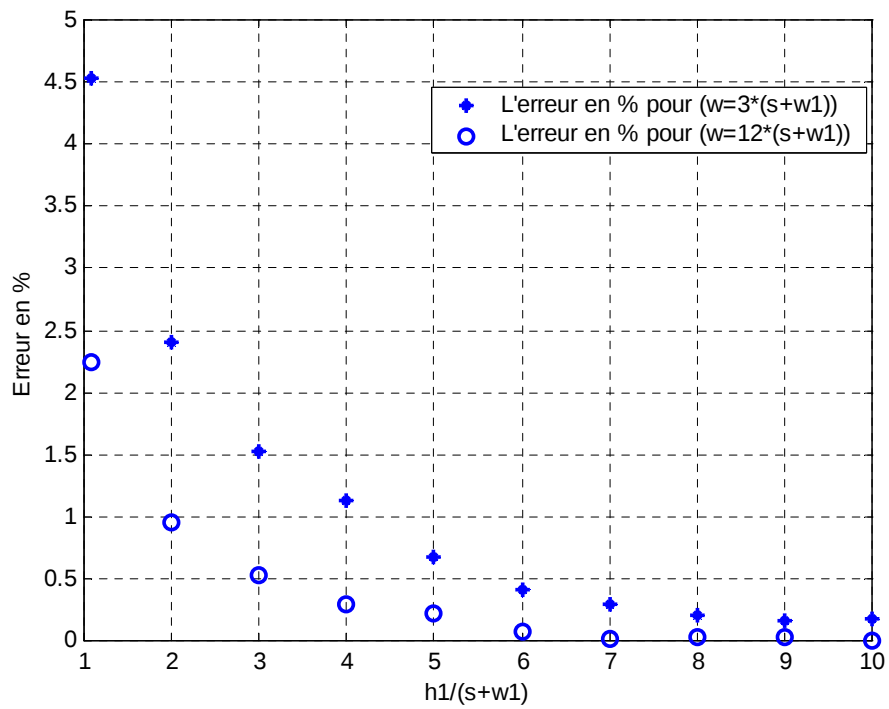


Figure 19. Pourcentage d'erreur (erreur relative) dans ε_{eff} correspondant à la ligne coplanaire de la figure 18

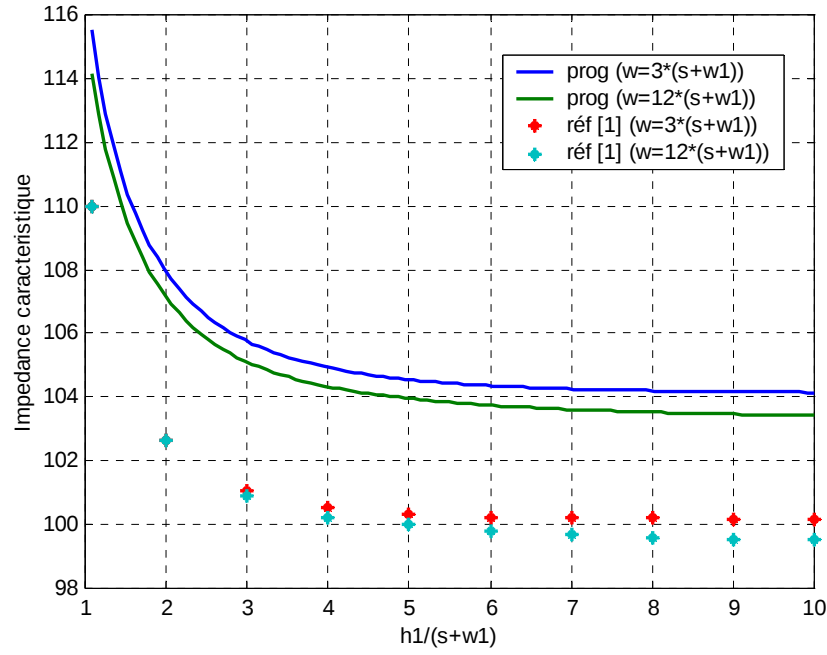


Figure 20. Impédance caractéristique d'une ligne coplanaire monocouche de géométrie plane en fonction de $h_1/(s+w_1)$ pour $\varepsilon_{r1} = 12.9$ et $\varepsilon_{r2} = \varepsilon_{r3} = 1$

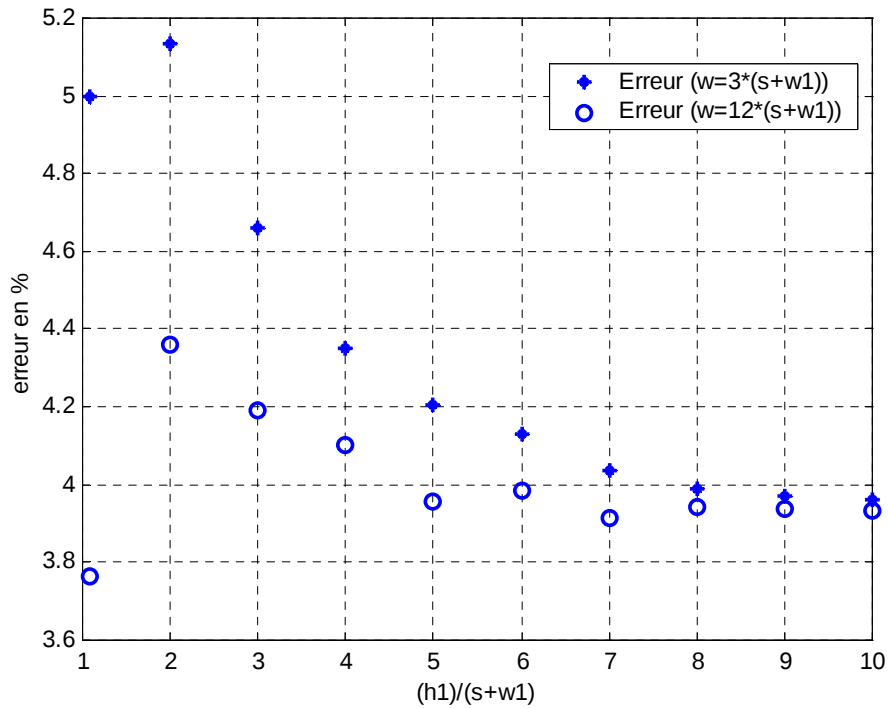


Figure 21. Pourcentage d'erreur (erreur relative) dans Z_0 correspondant à la ligne coplanaire de la figure 20

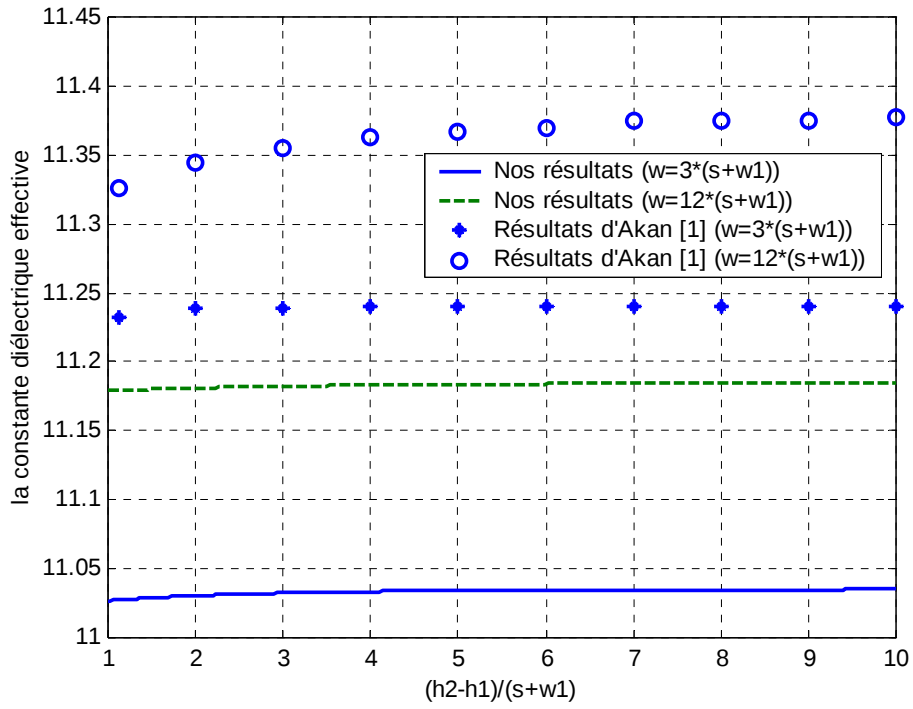


Figure 22. Constante diélectrique effective d'une ligne coplanaire multicouche planaire en fonction de $(h_2 - h_1)/(s + w_1)$ pour $\varepsilon_{r1} = 12.9$ et $\varepsilon_{r2} = \varepsilon_{r3} = 10$

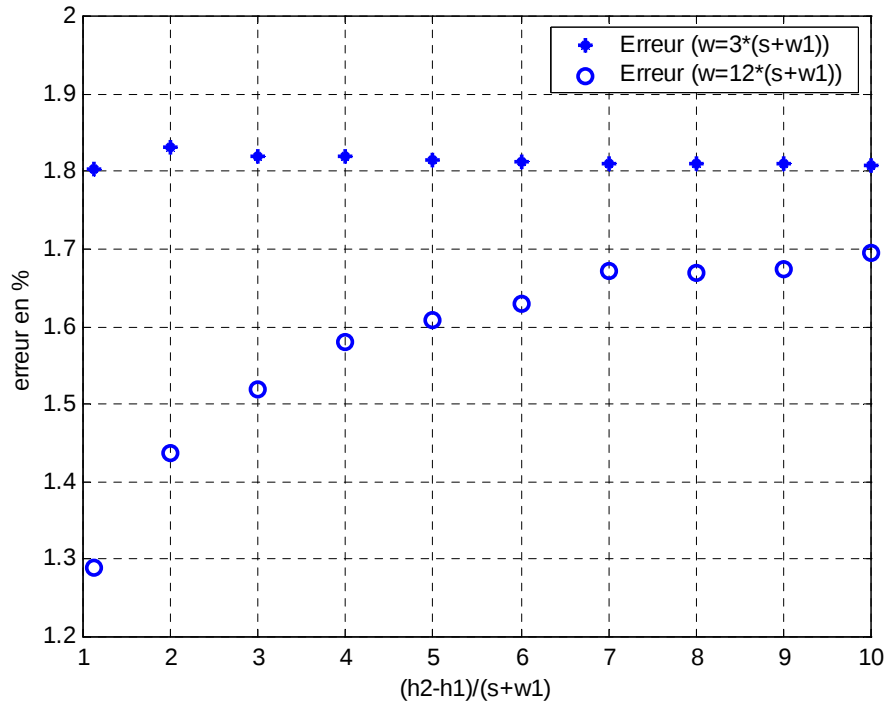


Figure 23: Pourcentage d'erreur (erreur relative) dans Z_0 correspondant à la ligne coplanaire de la figure 22

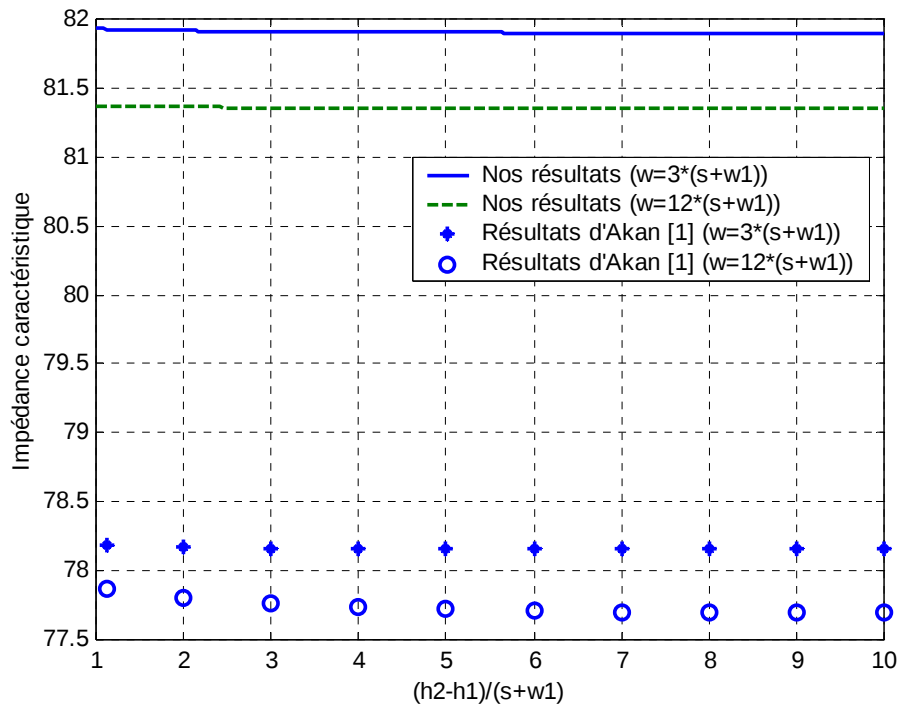


Figure 24. Impédance caractéristique d'une ligne coplanaire multicouche plane en fonction de $(h_2 - h_1)/(s + w_1)$ pour $\varepsilon_{r1} = 12.9$ et $\varepsilon_{r2} = \varepsilon_{r3} = 10$

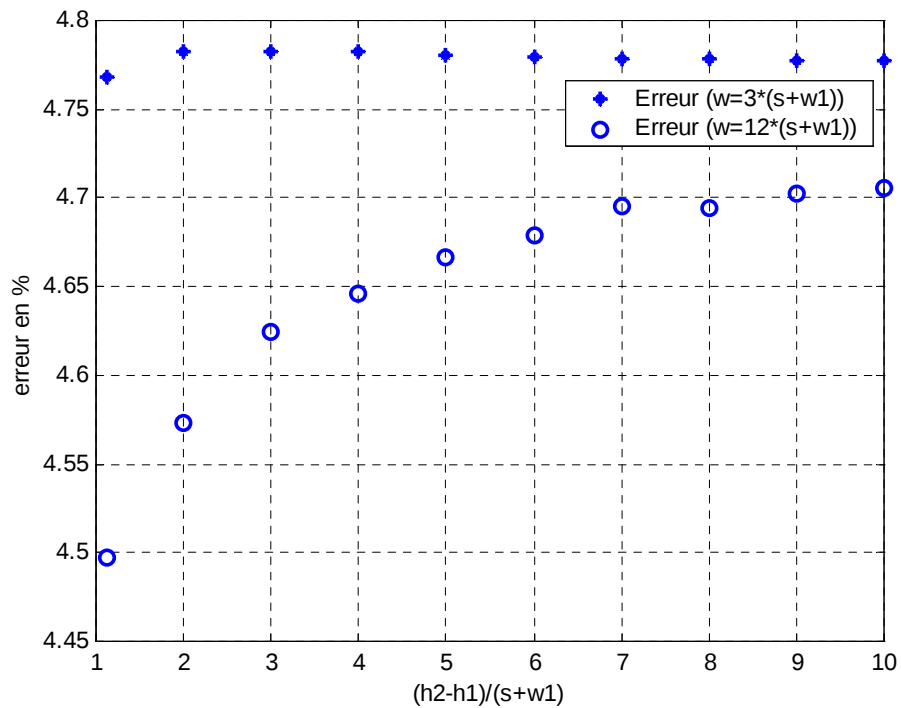


Figure 25. Pourcentage d'erreur (erreur relative) dans Z_0 correspondant à la ligne coplanaire de la figure 24

Nous comparons, à présent, les résultats de la structure cylindrique. Les figures 26 et 28 donnent ε_{eff} et Z_0 d'une ligne coplanaire multicouche cylindrique ayant $\varepsilon_{r1} = 12.9$, $\varepsilon_{r2} = 3.78$, $\varepsilon_{r3} = 1$, $G = (2\phi + \theta_1 + \theta_2) = 40^\circ$, $r_1 = 0.1$ mm, $r_2 = 0.3$ mm, $r_3 = 1$ mm, $r_4 = 5$ mm en fonction de $2\phi/(2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ qui varie entre 0.1 et 0.9 pour différentes valeurs de AR (AR=1,05,0.25,0.1). L'angle 2ϕ étant l'ouverture de l'espacement interstrip.

Le pourcentage d'erreur max dans ε_{eff} entre nos résultats et ceux d'Akan est de 2.5% comme le montre la figure 27, tandis que cette erreur dans Z_0 est de 12% comme le montre la figure 29. Par conséquent, nous constatons un bon accord entre nos résultats calculés et ceux d'Akan.

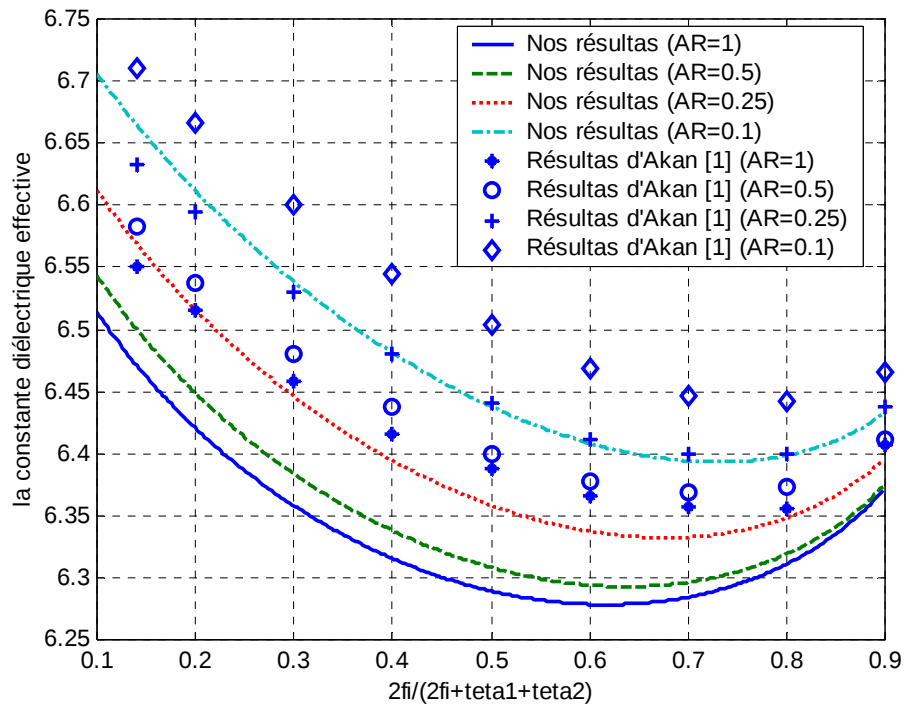


Figure 26. Constante diélectrique effective d'une ligne coplanaire multicouche cylindrique en fonction de $2 \phi / (2 \phi + \theta_1 + \theta_2)$

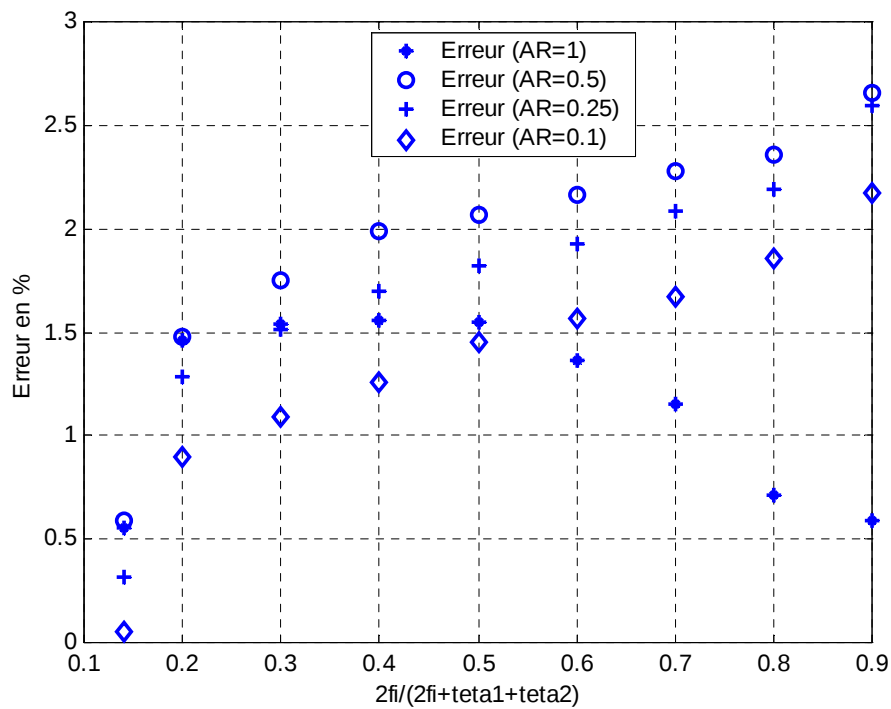


Figure 27. Pourcentage d'erreur (erreur relative) dans ϵ_{eff} correspondant à la ligne coplanaire de la figure 26

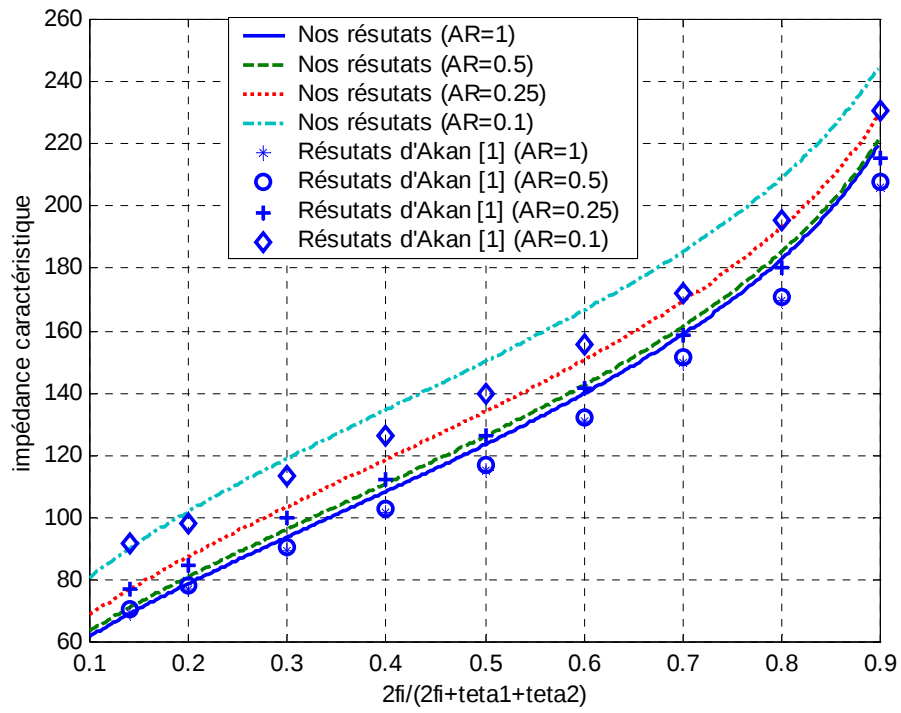


Figure 28. Impédance caractéristique d'une ligne coplanaire multicouche cylindrique en fonction de $2\phi/(2\phi + \theta_1 + \theta_2)$

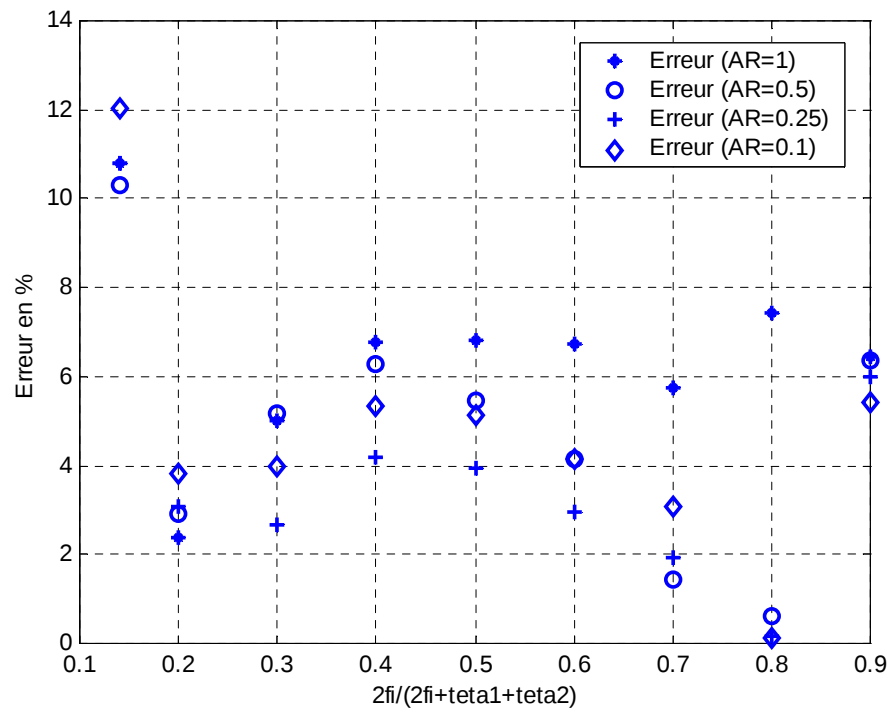


Figure 29. Pourcentage d'erreur dans Z_0 correspondant à la ligne coplanaire de la figure 28.

II. 2. Effet des différents paramètres de la ligne

Nous étudions maintenant l'effet des paramètres de la ligne sur ses caractéristiques ε_{eff} et Z_0 . Nous résumons les différentes constatations comme suit:

- Pour la coplanaire planaire (monocouche ou multicouche), l'augmentation de ses dimensions $h_1/(s + w_1)$ et/ou $h_2/(s + w_1)$, résulte une augmentation de la constante diélectrique effective jusqu'à $(\varepsilon_{r1} + 1)/2$ et une diminution de l'impédance caractéristique (voir les figures 18, 20, 22, 24).
- A partir de la figure 22, on remarque que ε_{eff} et Z_0 sont quasiment constantes avec l'augmentation de h_2 . Cela est expliqué ainsi: les épaisseurs du substrat h_1 et celui du superstrat h_3 sont pris très grands tq. $h_1 = 80$ cm et $h_3 = 130$ cm de sorte que ces deux couches sont considérées s'étendant vers l'infini. L'espace est donc divisé en deux demi espaces; le supérieur de permittivité ε_{r3} ; l'inférieur de permittivité ε_{r1} donc la permittivité effective globale tend vers leur moyenne valant 11.5.
- Pour le cas cylindrique multicouche (MCCPS), on remarque:
 - Une diminution de la constante diélectrique effective et une augmentation de l'impédance caractéristique avec l'augmentation de $2\phi/(2\phi + \theta_1 + \theta_2)$.
 - Une augmentation de la constante diélectrique effective et l'impédance caractéristique avec la diminution de terme $AR = \theta_1/\theta_2$.

Après avoir tester la faisabilité du modèle proposé pour l'étude de la ligne coplanaire cylindrique et vu la complexité des calculs; nous proposons d'effectuer une approximation de ce modèle fortement non linéaire. Pour cela nous allons effectuer un apprentissage par les réseaux de neurones artificiels. Le paragraphe suivant discute les résultats obtenus par cette approche.

III. Partie II : Apprentissage par les réseaux de neurones

Tous les résultats présentés ci-après concernent la ligne coplanaire monocouche/multicouche cylindrique. Selon Christodoulos [12], la méthode neuronale consiste en trois étapes. Nous allons l'appliquer pour approximer ε_{eff} et Z_0 de cette ligne.

III. 1. Choix de la structure neuronale

Le modèle neuronal utilisé dans notre étude est un réseau de type non récurrent (voir figure 14) ayant:

- Une couche d'entrée avec dix neurones dont les entrées sont constituées des paramètres dimensionnels et diélectriques de la ligne coplanaire. Les intervalles de variations de ces variables sont:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \leq \varepsilon_{r1} \leq 50 \\ 1 \leq \varepsilon_{r2} \leq 50 \\ 1 \leq \varepsilon_{r3} \leq 50 \\ 0.2 \leq \phi \leq 1.8^\circ \\ 0.2 \leq \theta_1 \leq 1.8^\circ \\ 0.2 \leq \theta_2 \leq 1.8^\circ \\ 0.1 \leq r_1 \leq 5 \text{ mm} \\ 5 \leq r_2 \leq 10 \text{ mm} \\ 10 \leq r_3 \leq 15 \text{ mm} \\ 15 \leq r_4 \leq 20 \text{ mm} \end{array} \right.$$

La fonction d'activation de la couche d'entrée est du type sigmoïde.

- Une couche cachée de 30 neurones pour l'apprentissage de ε_{eff} et 35 neurones pour l'apprentissage de Z_0 avec une fonction d'activation linéaire.
- Une couche de sortie avec un seul neurone représentant la cible à approximer (ε_{eff} ou Z_0).

L'instruction Matlab[®] correspondante à cette étape est

```
newff (PR, [S1 S2 ... SN1], {TF1 TF2 ... TFN1}, BTF, BLF, PF)
```

PR - dimension Rx2 : la matrice des valeurs max et min de chaque entrée.

Si - Nombre de neurones de la couche cachée numéro i .

TF i - la fonction d'activation de la couche numéro i par défaut « tansig ».

BTF - l'algo d'apprentissage dans la méthode de rétro-propagation. Par défaut c'est l'algorithme de Levenberg-Marquardt 'trainlm'.

BLF - la fonction de back propagation des poids/biais par défaut = 'learnngdm'.

PF - la fonction Performance, par défaut c'est la moindre carré 'mse'.

III. 2. Apprentissage

Deux tests d'arrêt sont appliqués dans l'algorithme d'apprentissage

- L'erreur = $1.e-10$. Lorsque la distance (au sens d'une norme donnée) est inférieure à l'erreur spécifiée.
- Le nombre maximum d'itération = 10000.

III. 3. Validation

Cette étape permet de vérifier que le réseau neuronal après apprentissage est effectivement capable de prédire la sortie désirée pour des valeurs des données à l'entrée qui ne sont pas utilisées lors de l'apprentissage. Nous devons toujours comparer la vraie sortie du réseau avec le modèle de la transformée conforme qui demeure toujours notre référence pour toute comparaison. Pour cela on étudie cinq cas : quatre cas extrêmes et un cas général.

- Les permittivités $(\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \varepsilon_{r3})$ sont constantes et $(\theta_1, \theta_2, \phi, r_1, r_2, r_3, r_4)$ varient.
- Les permittivités $(\varepsilon_{r2}, \varepsilon_{r3})$ et les paramètres $(\theta_1, \theta_2, \phi, r_1, r_2, r_3, r_4)$ sont constantes et ε_{r1} varie.
- Les permittivités $(\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r3})$ et les paramètres $(\theta_1, \theta_2, \phi, r_1, r_2, r_3, r_4)$ sont constantes et ε_{r2} varie.
- Les permittivités $(\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2})$ et les paramètres $(\theta_1, \theta_2, \phi, r_1, r_2, r_3, r_4)$ sont des constantes où ε_{r3} varie.
- Un cas général où toutes les entrées varient.

Cas 1 : les permittivités $(\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \varepsilon_{r3})$ sont constantes et $(\theta_1, \theta_2, \phi, r_1, r_2, r_3, r_4)$ varient

Une ligne coplanaire symétrique cylindrique constituée de deux couches diélectriques de permittivités $(\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r3}) = (12.9, 3.78)$ et $\varepsilon_{r2} = 1$. $(\theta_1, \theta_2, \phi, r_1, r_2, r_3, r_4)$ varient dans leurs intervalles données ci-dessus. La permittivité effective et l'impédance caractéristique sont représentées dans les figures 30 et 32, respectivement. Les pourcentages d'erreurs entre les sorties désirées calculées par le modèle de la transformée conforme et les sorties des réseaux neuronaux sont représentées dans les figures 31 et 33. La valeur absolue du pourcentage

d'erreur dans ε_{eff} est inférieure à 0.6 %, tandis que cette erreur dans Z_0 est inférieure à 1.2%. Ainsi, un très bon accord est obtenu entre le modèle conforme et la technique neuronale.

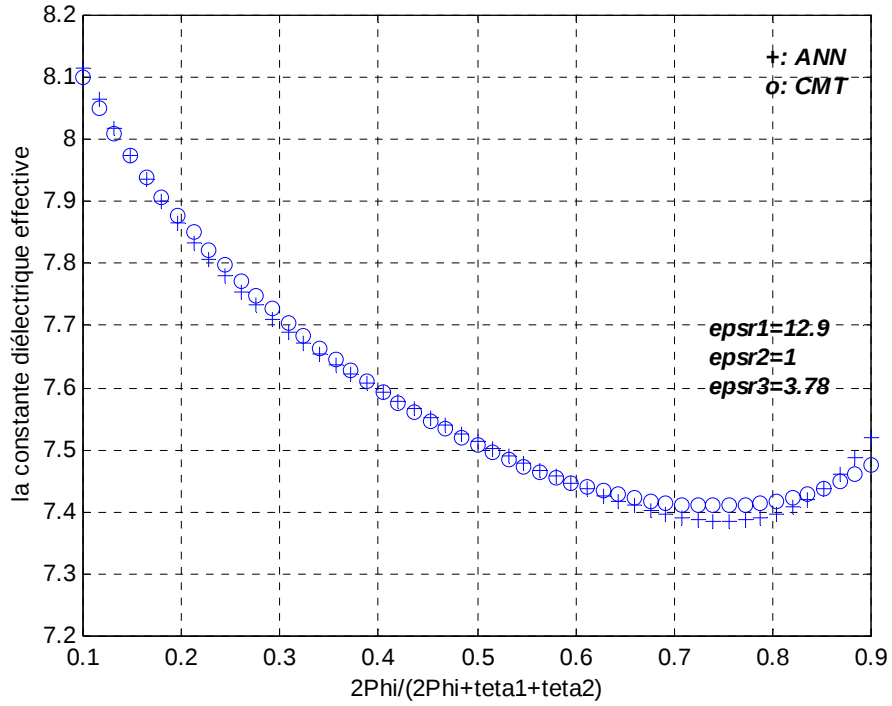


Figure 30. Constante diélectrique effective d'une ligne coplanaire de géométrie cylindrique multicouche en fonction de $2\phi/(2\phi + \theta_1 + \theta_2)$

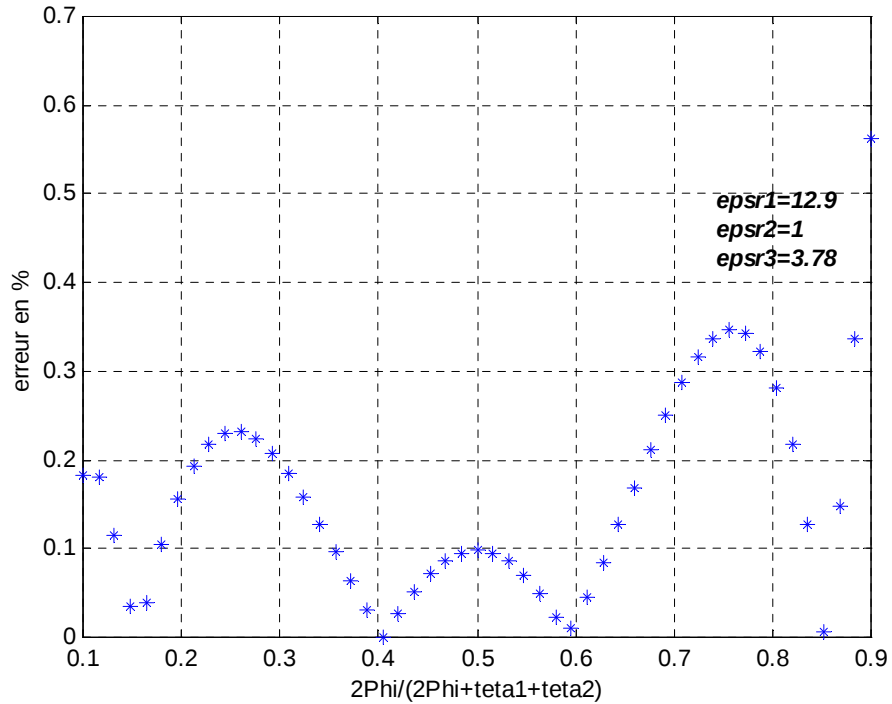


Figure 31. Pourcentage d'erreur dans ε_{eff} correspondant à la ligne coplanaire de la figure 30.

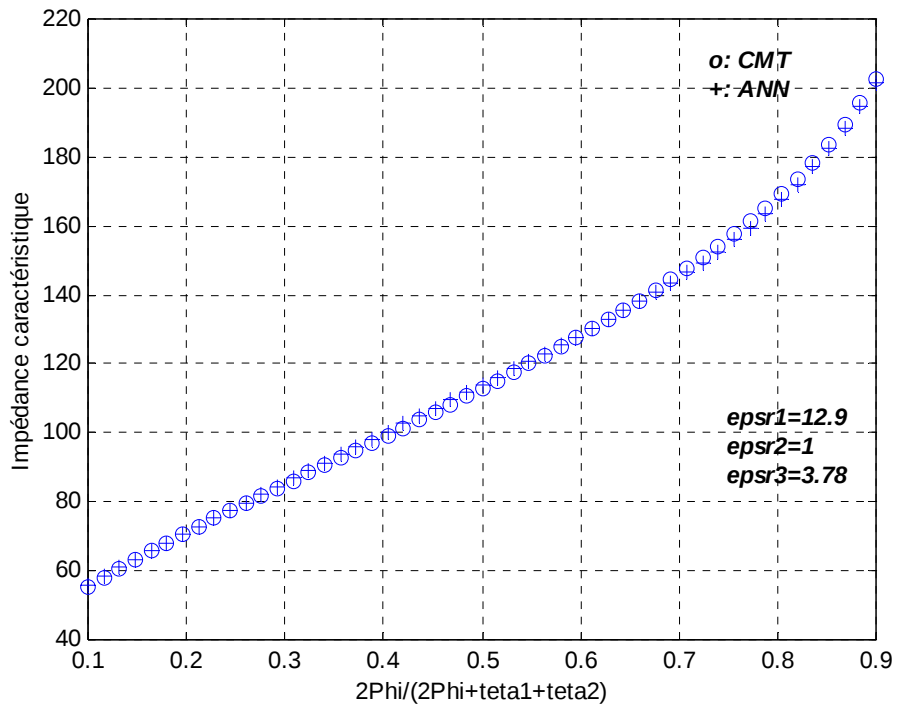


Figure 32. Impédance caractéristique d'une ligne coplanaire multicouche cylindrique en fonction de $2\phi/(2\phi + \theta_1 + \theta_2)$

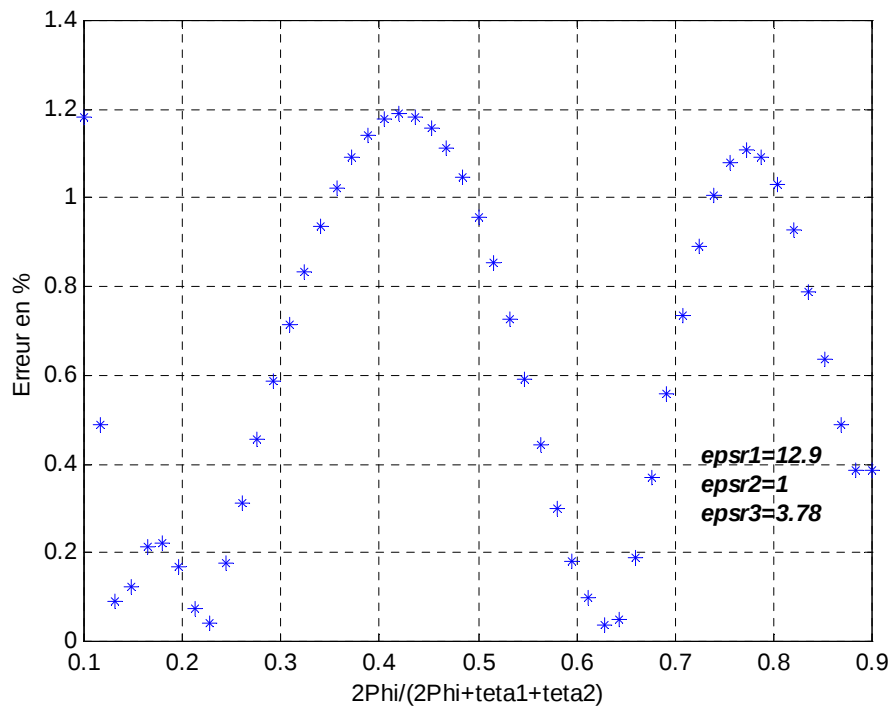


Figure 33. Pourcentage d'erreur dans Z_0 correspondant à la ligne coplanaire de la figure 32.

Cas 2 : les permittivités $(\varepsilon_{r2}, \varepsilon_{r3})$ et $(\theta_1, \theta_2, \phi, r_1, r_2, r_3, r_4)$ sont constantes et ε_{r1} varie

Une ligne coplanaire symétrique cylindrique constituée de trois couches diélectriques de permittivités $(\varepsilon_{r2}, \varepsilon_{r3}) = (50, 10.55)$. Les autres paramètres sont fixées comme suit $(\theta_1, \theta_2, \phi, r_1, r_2, r_3, r_4) = (1.8^\circ, 1.8^\circ, 0.2^\circ, 10^{-4}, 5 \cdot 10^{-3}, 10^{-2}, 1.5 \cdot 10^{-2})$ et ε_{r1} varie de 1 à 50. La permittivité effective et l'impédance caractéristique sont représentées dans les figures 34 et 36, respectivement. Les pourcentages d'erreurs entre les sorties désirées calculées par le modèle de la transformée conforme et les sorties des réseaux neuronaux sont représentées dans les figures 35 et 37. La valeur absolue du pourcentage d'erreur dans ε_{eff} est inférieure à 0.5 %, tandis que cette erreur dans Z_0 est inférieure à 1.4 %. Ainsi, un très bon accord est obtenu entre le modèle conforme et la technique neuronale.

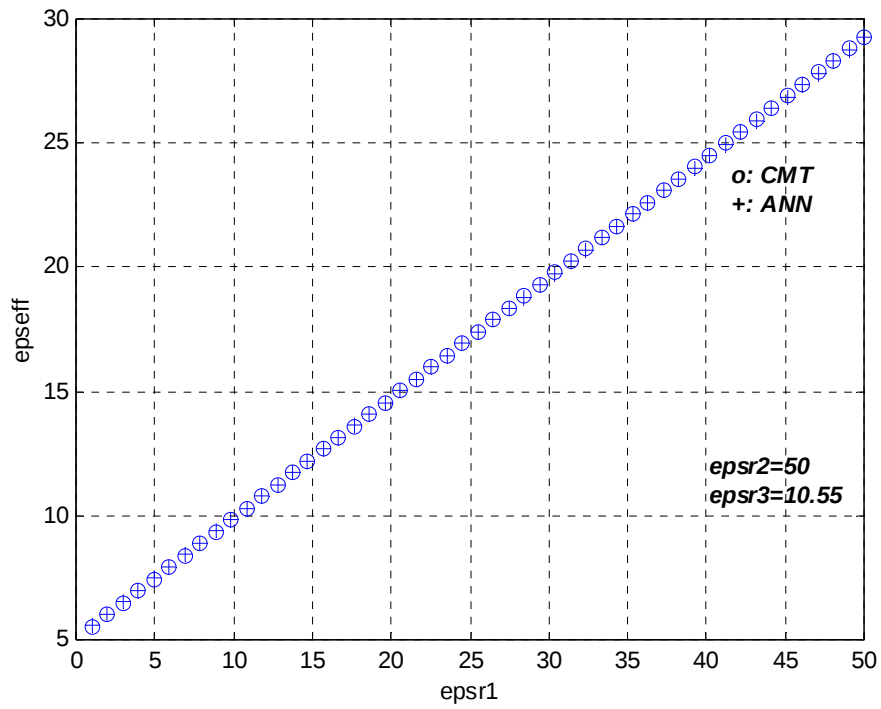


Figure 34. Constante diélectrique effective en fonction de ϵ_{r1}

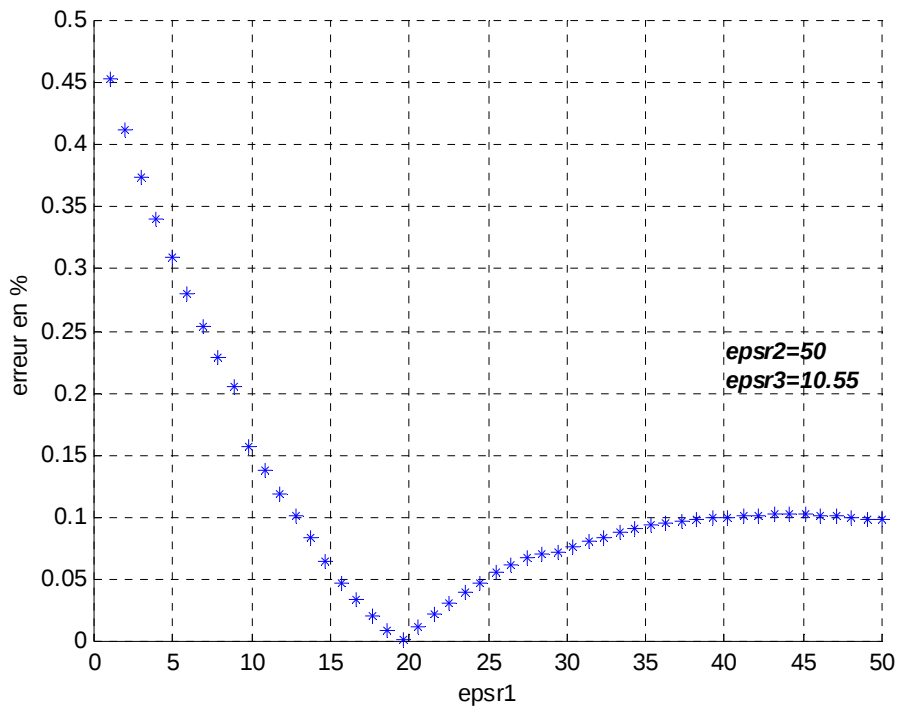


Figure 35. Pourcentage d'erreur dans ϵ_{eff} correspondant à la ligne coplanaire de la figure 34.

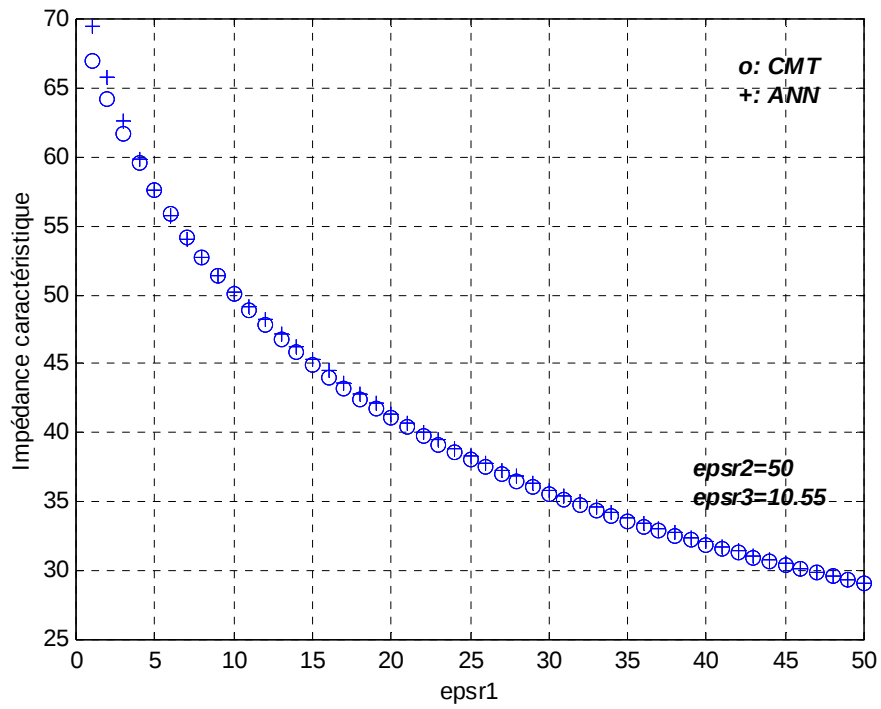


Figure 36. Impédance caractéristique en fonction de ϵ_{r1}

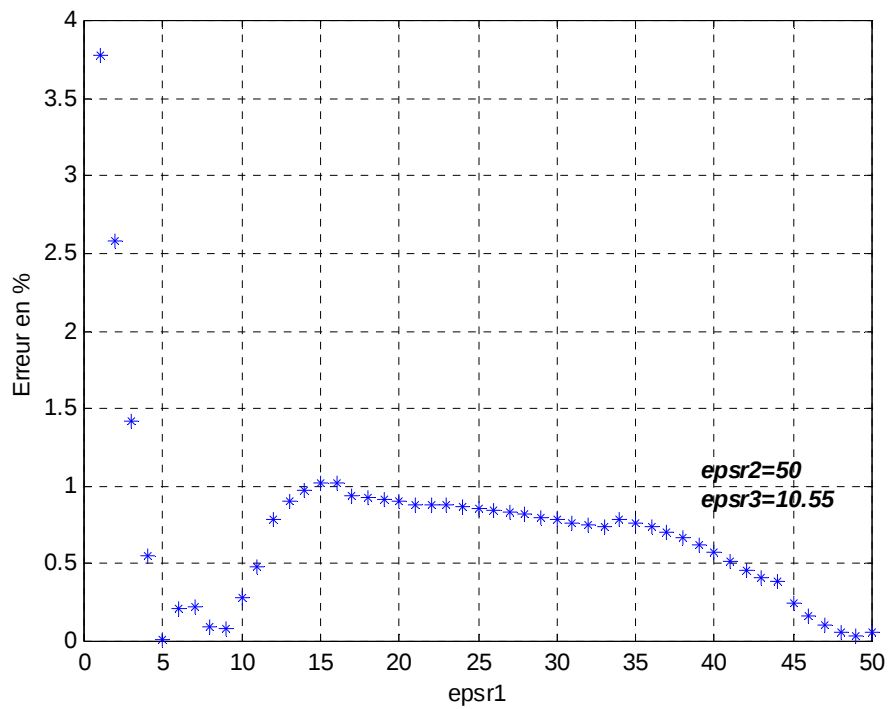


Figure 37. Pourcentage d'erreur dans Z_0 correspondant à la ligne coplanaire de la figure 36.

Cas 3 : les permittivités $(\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r3})$ et $(\theta_1, \theta_2, \phi, r_1, r_2, r_3, r_4)$ sont constantes et ε_{r2} varie

Une ligne coplanaire symétrique cylindrique constituée de trois couches diélectriques de permittivités $(\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r3}) = (20.94, 10.55)$. Les autres paramètres sont fixés comme suit $(\theta_1, \theta_2, \phi, r_1, r_2, r_3, r_4) = (1.8^\circ, 1.8^\circ, 0.2^\circ, 10^{-4}, 5 \cdot 10^{-3}, 10^{-2}, 1.5 \cdot 10^{-2})$ et ε_{r2} varie de 1 à 50. La permittivité effective et l'impédance caractéristique sont représentées dans les figures 38 et 40, respectivement. Les pourcentages d'erreurs entre les sorties désirées calculées par le modèle de la transformée conforme et les sorties des réseaux neuronaux sont représentées dans les figures 39 et 41. La valeur absolue du pourcentage d'erreur dans ε_{eff} est inférieure à 0.03 %, tandis que cette erreur dans Z_0 est inférieure à 0.35 %. Ainsi, un très bon accord est obtenu entre le modèle conforme et la technique neuronale.

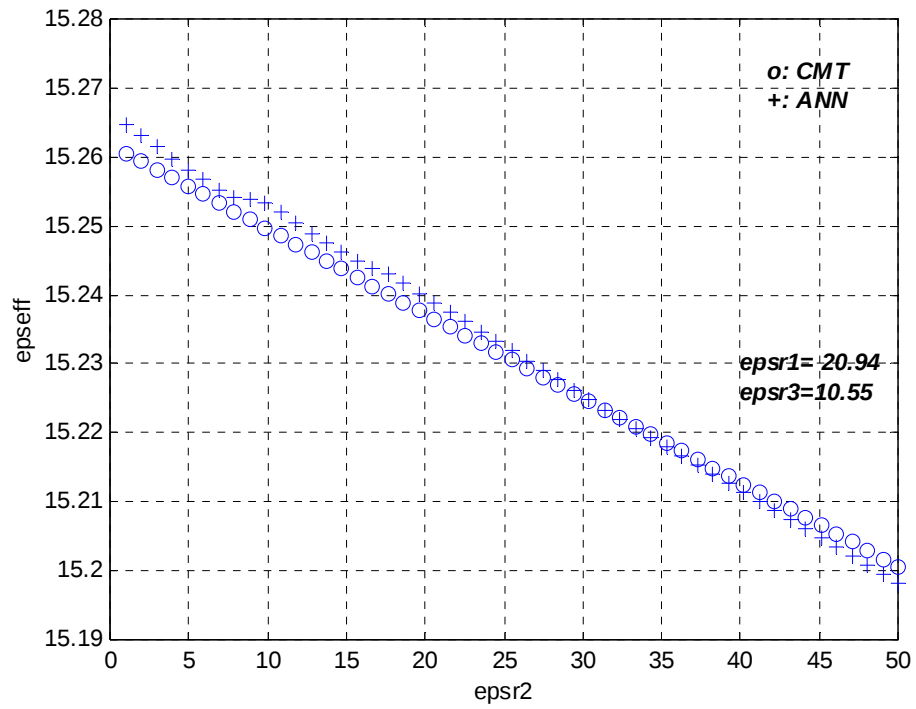


Figure 38. Constante diélectrique effective en fonction de ϵ_{r2}

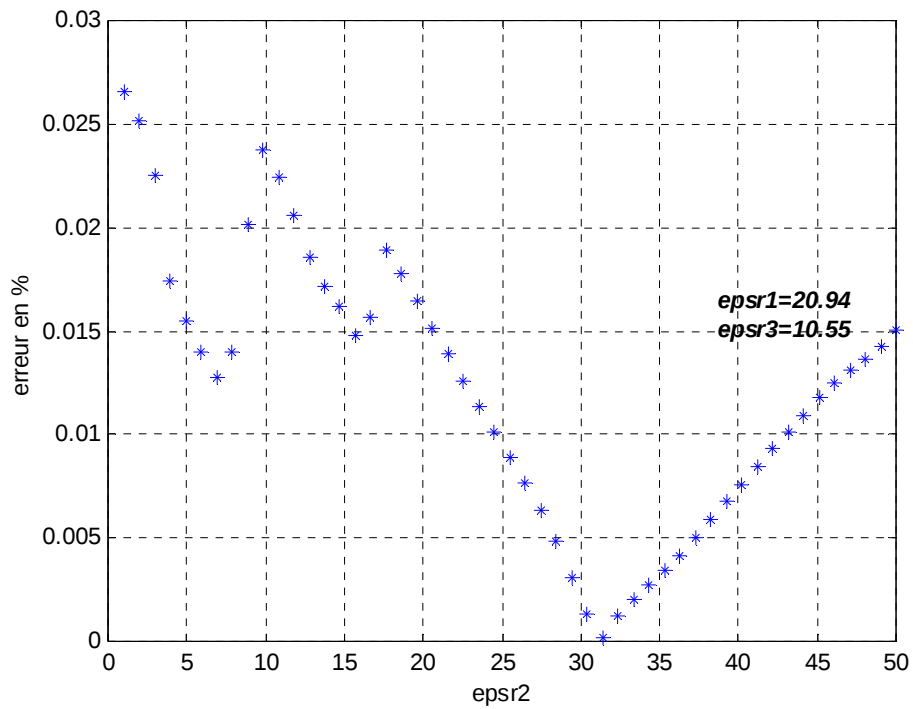


Figure 39. Pourcentage d'erreur dans ϵ_{eff} correspondant à la ligne coplanaire de la figure 38.

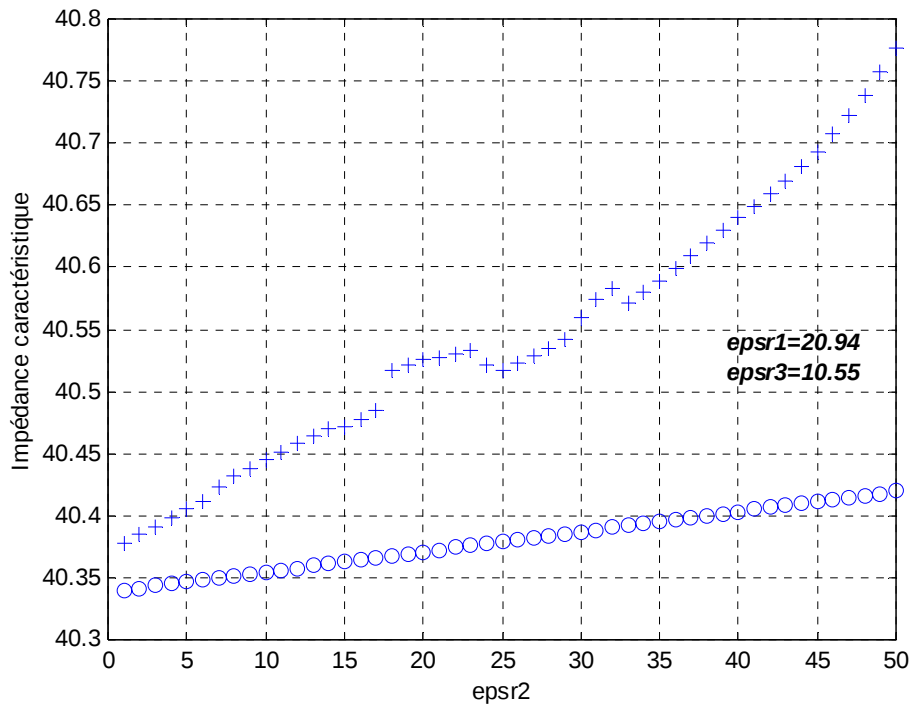


Figure 40. Impédance caractéristique en fonction de ϵ_{r2}

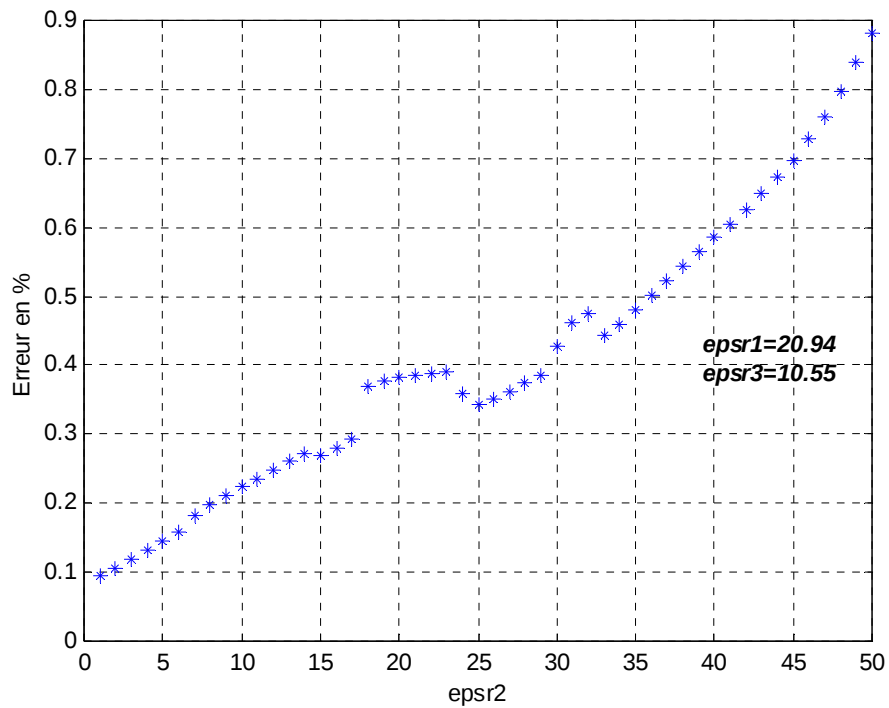


Figure 41. Pourcentage d'erreur dans Z_0 correspondant à la ligne coplanaire de la figure 40.

Cas 4: les permittivités $(\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2})$ et $(\theta_1, \theta_2, \phi, r_1, r_2, r_3, r_4)$ sont constantes et ε_{r3} varie

Une ligne coplanaire symétrique cylindrique constituée de trois couches diélectriques de permittivités $(\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r3}) = (20.94, 39.85)$. Les autres paramètres sont fixés comme suit $(\theta_1, \theta_2, \phi, r_1, r_2, r_3, r_4) = (0.2^\circ, 0.2^\circ, 1.8^\circ, 5 \cdot 10^{-3}, 10^{-2}, 1.5 \cdot 10^{-2}, 2 \cdot 10^{-2})$ et ε_{r3} varie de 1 à 50. La permittivité effective et l'impédance caractéristique sont représentées dans les figures 42 et 44, respectivement. Les pourcentages d'erreur entre les sorties désirées calculées par le modèle de la transformée conforme et les sorties des réseaux neuronaux sont représentées dans les figures 43 et 45. La valeur absolue du pourcentage d'erreur dans ε_{eff} est inférieure à 0.06 %, tandis que cette erreur dans Z_0 est inférieure à 0.35 %. Ainsi, un très bon accord est obtenu entre le modèle conforme et la technique neuronale.

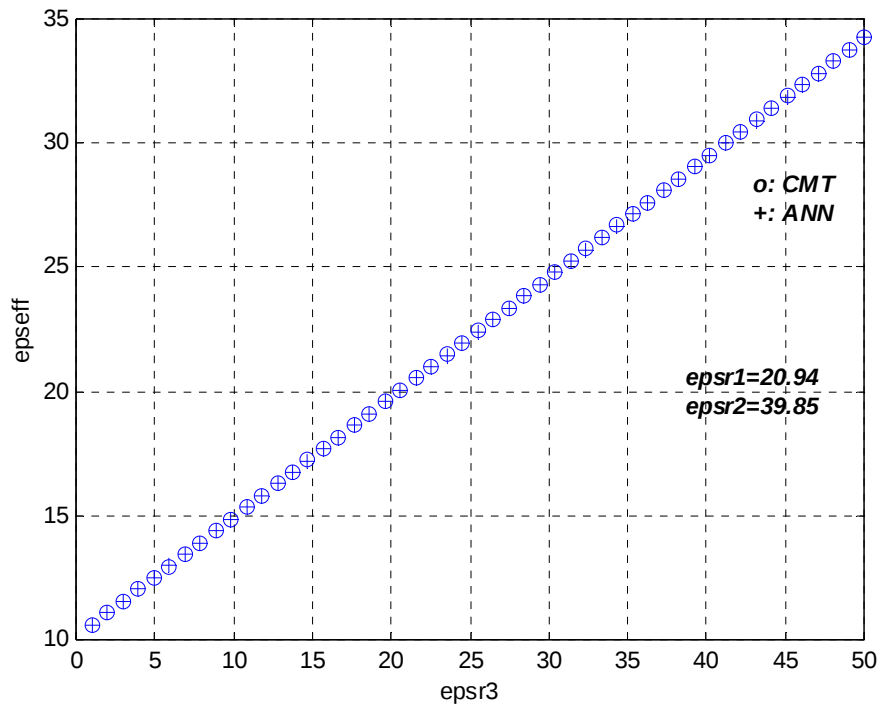


Figure 42. Constante diélectrique effective en fonction de ϵ_{r3} .

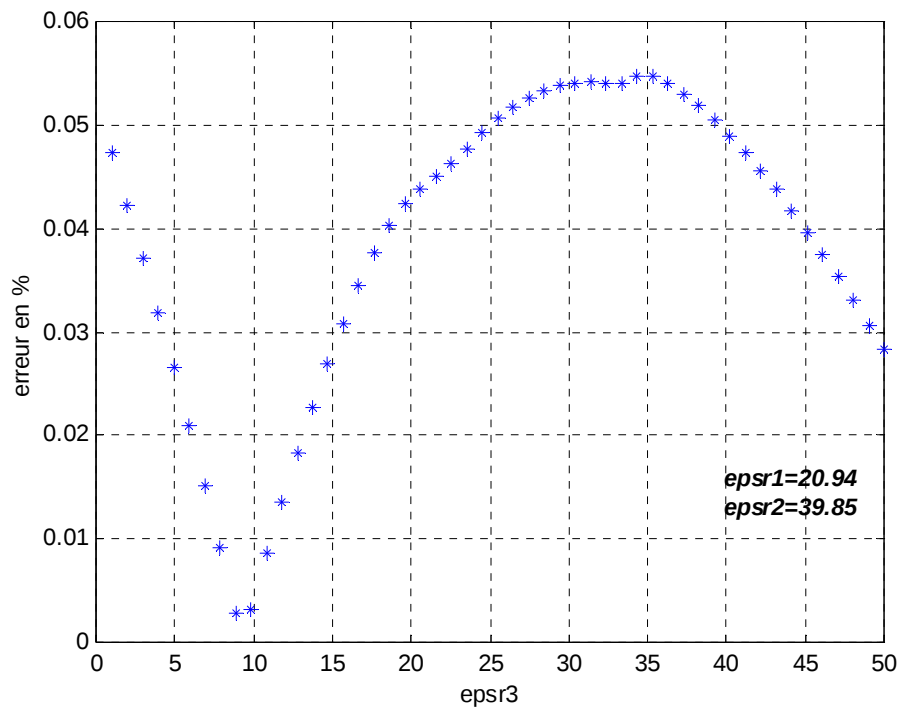


Figure 43. Pourcentage d'erreur dans ϵ_{eff} correspondant à la ligne coplanaire de la figure 42.

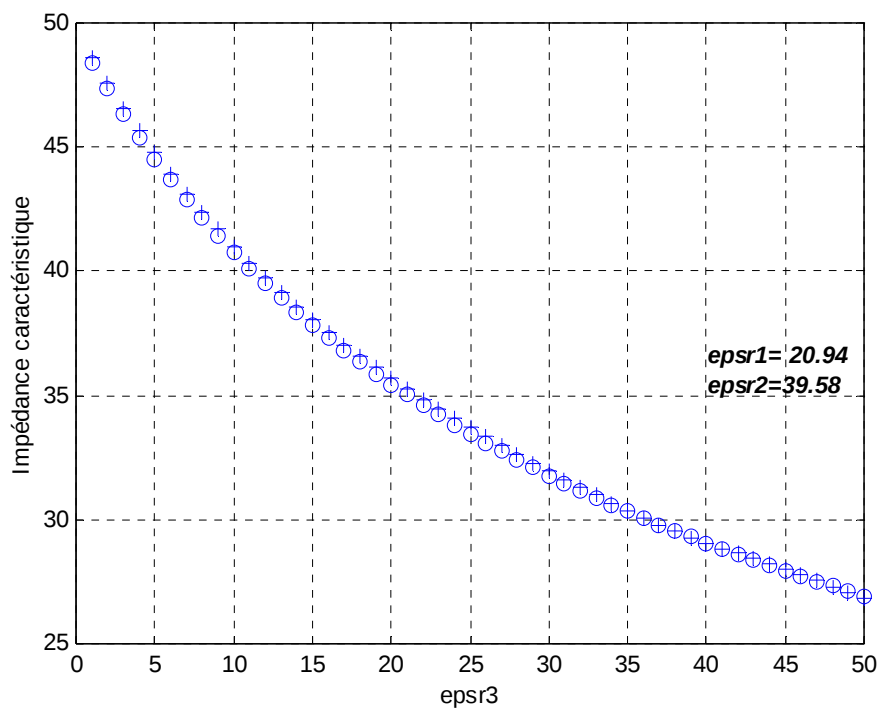


Figure 44. Impédance caractéristique en fonction de ϵ_{r3}

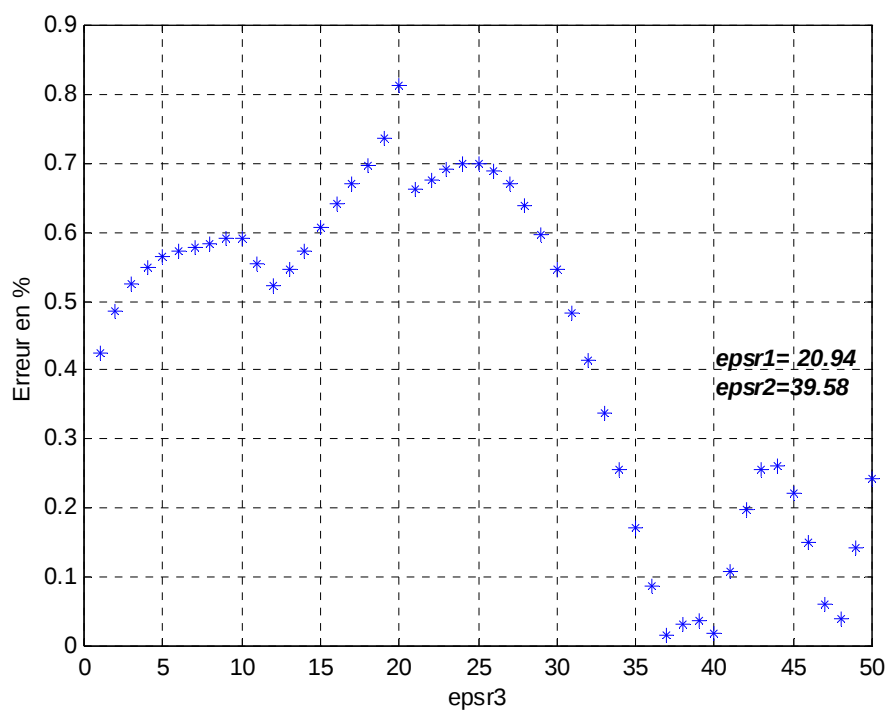


Figure 45. Pourcentage d'erreur dans Z_0 correspondant à la ligne coplanaire de la figure 44.

Cas 5 : tous les paramètres de la ligne varient

Dans ce cas tous les paramètres de la ligne sont autorisés à varier en même temps. La sortie désirée est estimée par la méthode de la transformée conforme afin de comparer avec la sortie réelle du réseau neuronal après apprentissage. Un exemple de cette variation est donné dans les figures 46 et 48. Pour cet exemple, nous avons pris 5 ensembles de points pour lesquelles $(\theta_1, \theta_2, \phi, r_1, r_2, r_3, r_4)$ varient dans leurs intervalles correspondant et les permittivités diélectriques varient comme suit:

Ensemble #1: $(\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \varepsilon_{r3}) = (25, 5, 20)$.

Ensemble #2: $\varepsilon_{r1} = 5, \quad \varepsilon_{r2} = 50:-1:47, \quad \varepsilon_{r3} = 5$.

Ensemble #3: $\varepsilon_{r1} = 20:-1:15, \quad \varepsilon_{r2} = 20, \quad \varepsilon_{r3} = 50$.

Ensemble #4: $\varepsilon_{r1} = 34:1:48, \quad \varepsilon_{r2} = 35:1:49, \quad \varepsilon_{r3} = 34$.

Ensemble #5: $\varepsilon_{r1} = 1:1:4.5, \quad \varepsilon_{r2} = 34:1:41, \quad \varepsilon_{r3} = 35:1:42$.

La permittivité effective et l'impédance caractéristique sont représentées dans les figures 46 et 48, respectivement. Les pourcentages d'erreurs entre les sorties désirées calculées par le modèle de la transformée conforme et les sorties des réseaux neuronaux sont représentées dans les figures 47 et 49. La valeur absolue du pourcentage d'erreur dans ε_{eff} est inférieure à 0.45 %, tandis que cette erreur dans Z_0 est inférieure à 1.6 %. Ainsi, un très bon accord est obtenu entre le modèle conforme et la technique neuronale.

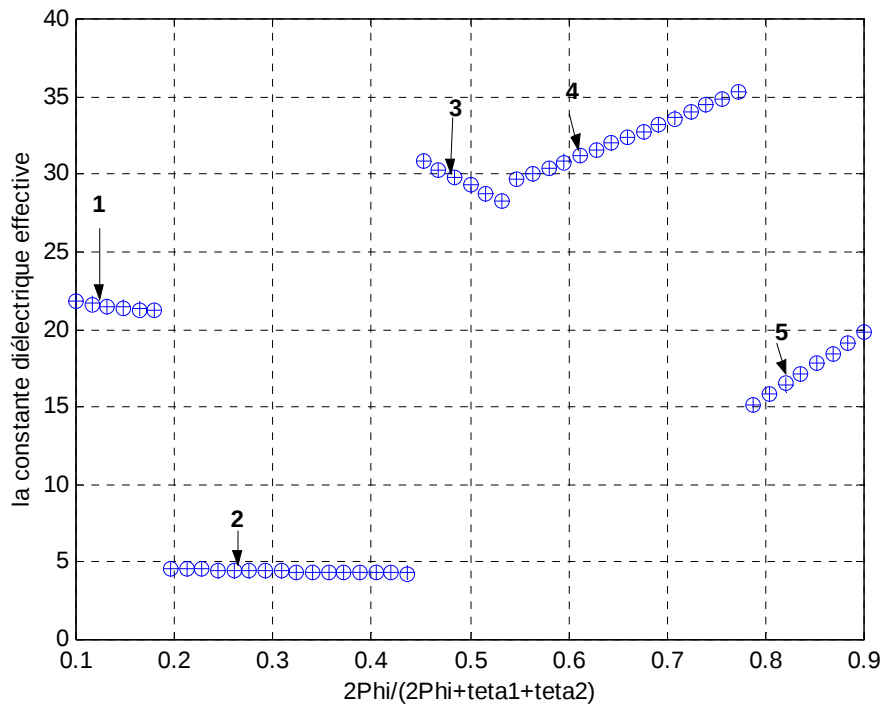


Figure 46. Constante diélectrique effective où tous les paramètres varient.

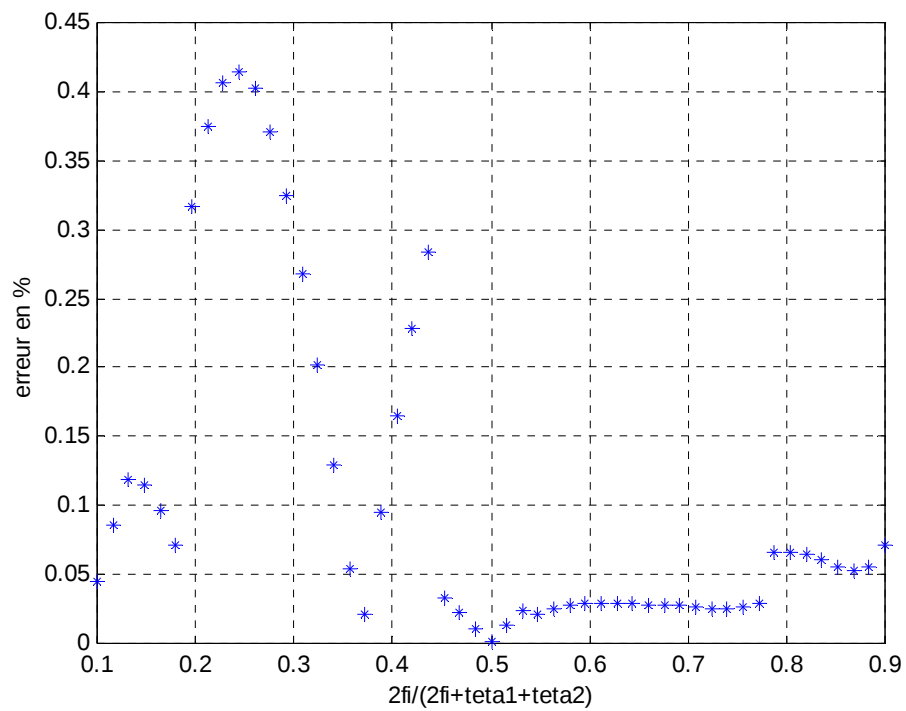


Figure 47. Pourcentage d'erreur dans ε_{eff} correspondant à la ligne coplanaire de la figure 46.

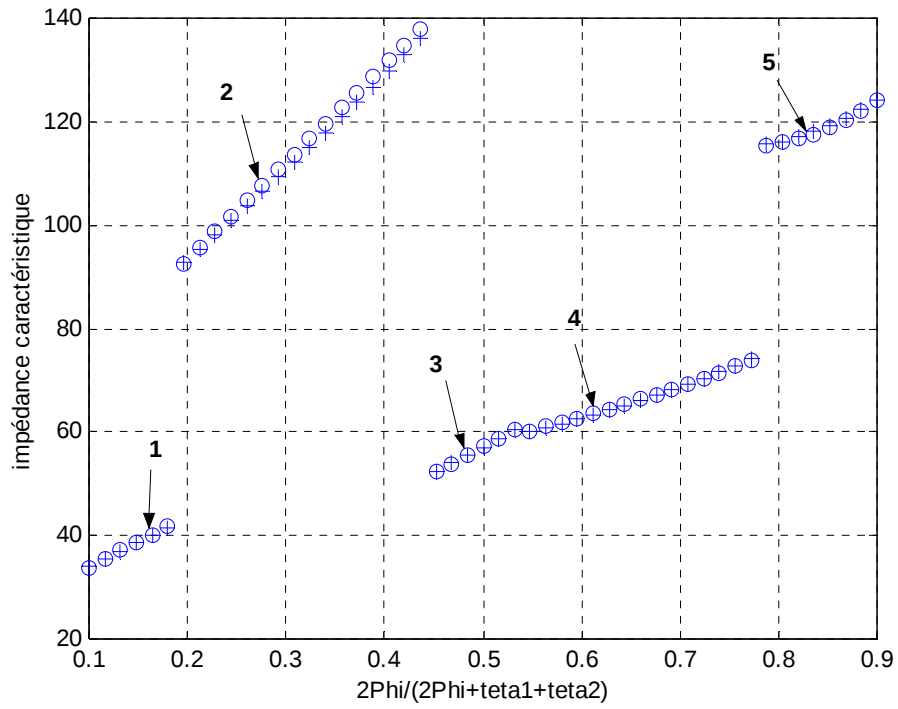


Figure 48. Impédance caractéristique où tous les paramètres varient.

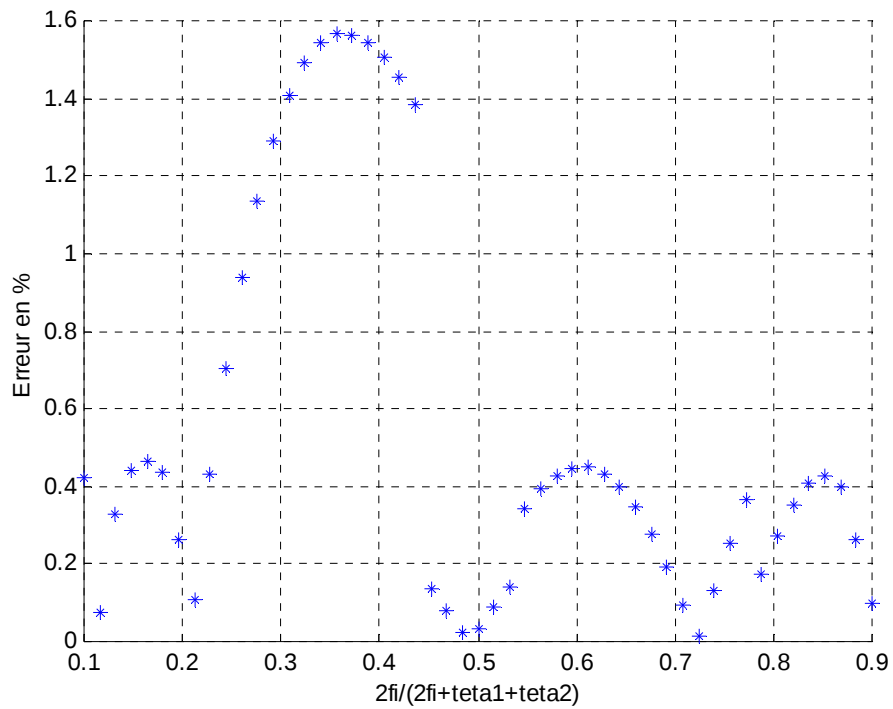


Figure 49. Pourcentage d'erreur dans Z_0 correspondant à la ligne coplanaire de la figure 48.

A prés avoir réalisé les simulations numériques de ce chapitre, nous discutons le faits suivants:

- La formulation par le modèle de la transformée conforme est assez complexe faisant appel à deux types de fonctions spéciales; les fonctions elliptiques de Jacobi et les intégrales elliptiques complètes. Pour remédier, nous avons opté pour un apprentissage par réseaux de neurones artificiels qui montre une très bon convergence au résultats du modèle conforme.
- L'handicap majeur des réseaux de neurones appliqués dans cette étude est les temps d'exécution prohibitifs notamment pour les structures guidantes complexes ayant plusieurs couches et/ou plusieurs conducteurs. Pour remédier, il faut disposer de ressources de calcul plus convenables tq. Machine multiprocesseur ou opter pour une stratégie de calcul parallèle sur des clusters.

Conclusion

Nous avons présenté des résultats numériques concernant les paramètres caractéristique d'une ligne coplanaire monocouche/multicouche planaire/cylindrique. Nous avons étudié l'effet des différents paramètres de la ligne sur ses caractéristiques. Un apprentissage par les réseaux de neurones est effectué afin de remédier aux complexités du modèle de la transformée conforme. Des comparaisons avec la littérature ainsi que des tests de validation ont été faits afin d'établir confiance en notre modèle. Le nombre élevé de variables d'entrée de la structure neuronale est montrée comme étant un handicap majeur dans les applications des structures guidantes complexes notamment les multicouches multiconducteurs.