

I. LIGNE DE TRANSMISSION COPLANAIRE

La ligne coplanaire est une ligne de transmission planaire offrant une flexibilité dans la conception de la ligne planaire et les circuits fonctionnant aux ondes millimétriques. En particulier, on peut monter des composants discrets en série ou en shunt sans avoir besoin d'effectuer des perforations dans la ligne. La réalisation physique d'une ligne coplanaire est montrée dans la figure 1. Elle est réalisée en plaçant deux bandes conductrices de largeur w_1 et w_2 juste au dessus d'un diélectrique d'épaisseur h qui sert de support pour la structure. Noter que de l'autre côté du diélectrique il n'y a aucun plan de masse.

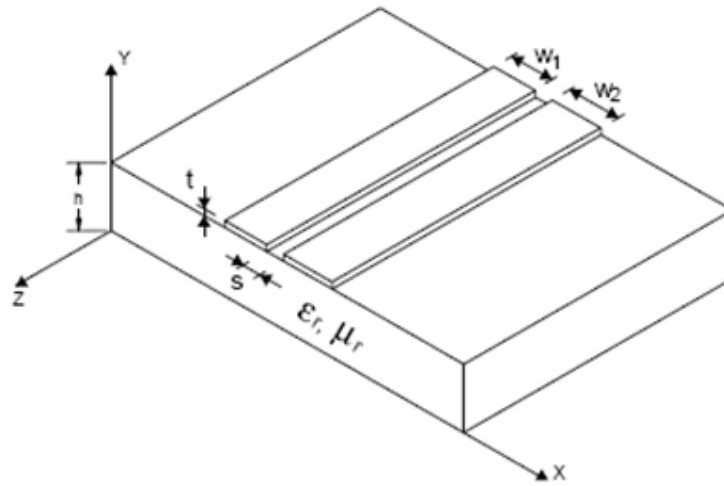


Figure 1. Ligne coplanaire (vue en perspective)

- Si $w_1 \neq w_2$ la structure est une CPS asymétrique ou ACPS.
- Sinon (si $w_1 = w_2$), c'est le cas symétrique dit CPS [2].

II. LIGNES DE CHAMP ELECTRIQUE ET MAGNETIQUE

Quelques lignes du champ électrique $\mathbf{E}$ et magnétique $\mathbf{H}$ pour le mode fondamental quasi-TEM d'une ligne coplanaire sont représentées dans la figure 2, dans une section transversale définie et un temps donné. En mode fondamental, les deux conducteurs sont équipotentiels. Cette ligne de transmission est naturellement équilibrée. Ainsi, l'alimentation et le chargement de cette ligne de transmission doivent être équilibrés, comme le montre la figure 2 [3].

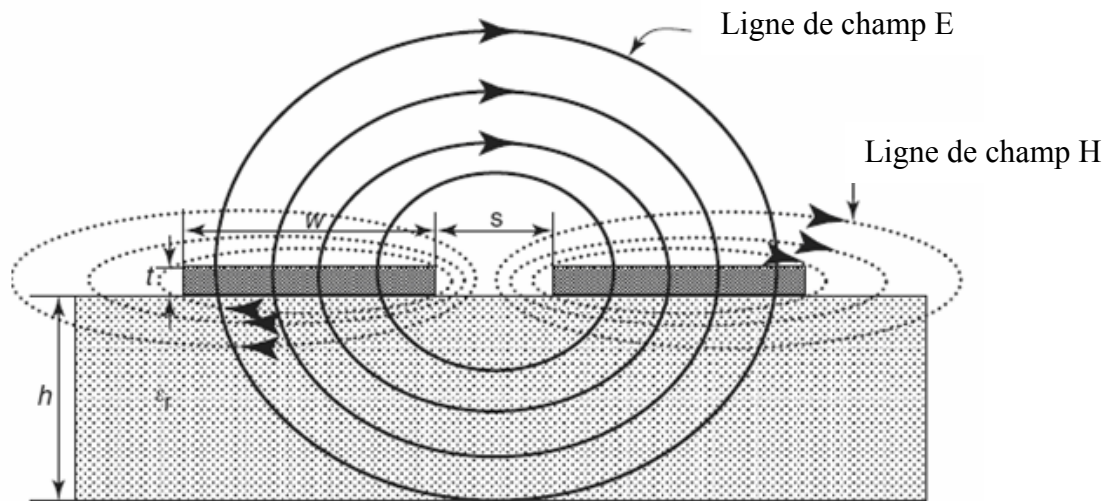
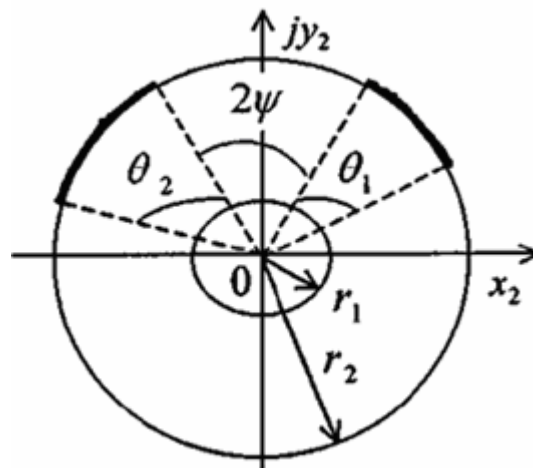


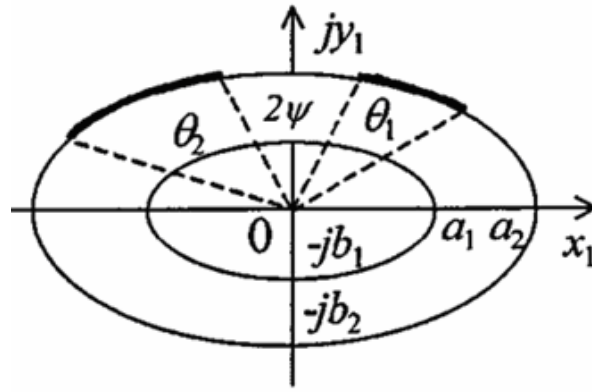
Figure 2. Lignes de champ électrique **E** et magnétique **H**.

III. GEOMETRIE D'UNE CPS

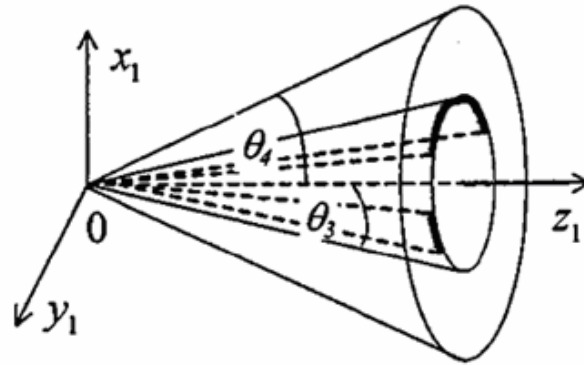
On distingue quatre types de CPS selon la géométrie : asymétrique (ACPS), cylindrique (CCPS), elliptique (ECPS), elliptique conique (ECCPS) qui sont représentées respectivement dans les Figures 1, 3.a, b et c, ci-dessous [4].



(a)



(b)



(c)

Figure 3. Lignes de transmission coplanaires (non planaires).

a) cylindrique, b) elliptique et c) elliptique conique.

On s'intéresse dans cette étude aux lignes coplanaires symétriques et asymétriques de géométrie planaires et cylindriques.

IV. CPS PLANAIRE ET CYLINDRIQUE

La vue en coupe d'une ligne ACPS multicouche est présentée dans la figure 4.a. Comme le montre cette figure, la ligne ACPS est implantée au-dessus des deux substrats diélectriques superposés ayant les constantes diélectriques ϵ_{r1} et ϵ_{r2} respectivement. Il y a aussi une autre couche diélectrique de permittivité relative ϵ_{r3} couvrant les deux strips. La largeur totale de la configuration est $2w$ et les largeurs des strips métalliques sont w_1 et w_2 . Les interfaces séparant les couches diélectriques sont situées à h_2 , h_1 et h_3 (selon la direction positive de $\text{Im}(z)$). Cette structure est entourée sur ses quatre facettes par l'air. La structure est supposée ayant une extension infinie selon la direction longitudinale (perpendiculaire au plan de la figure).

La ligne coplanaire cylindrique CCPS ayant le même nombre et la même disposition des couches diélectriques et des strips conducteurs que la ligne planaire asymétrique est représentée en coupe transversale dans la figure 4.b avec le système de coordonnées cylindriques (r, θ, z) . Les interfaces séparant les couches diélectriques concentriques cylindriques sont situées aux rayons r_1, r_2, r_3 et r_4 . Pour les dimensions des strips conducteurs on introduit les angles d'ouverture θ_1 et θ_2 . Les régions de l'espace définies par $(r < r_1$ ou $r \geq r_4)$ sont constituées par l'air. La structure est supposée avec une extension infinie selon la direction longitudinal z [2].

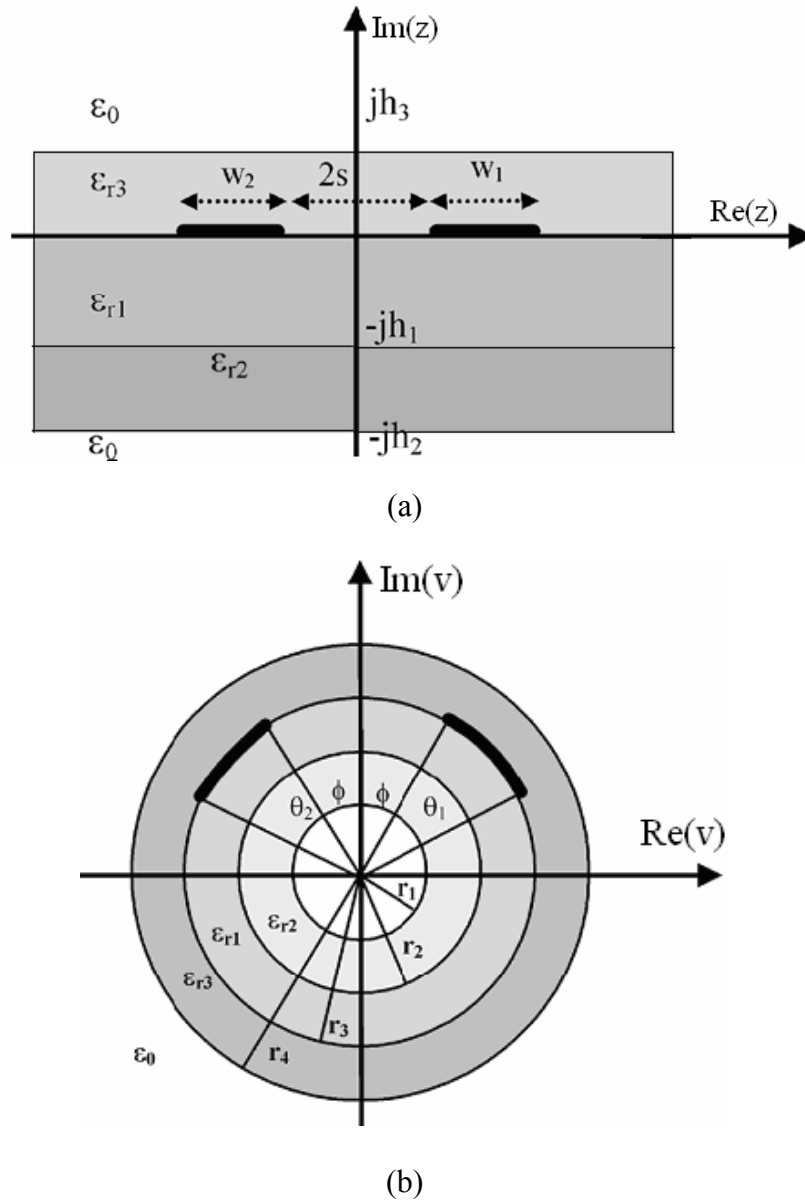


Figure 4. Sections transversales de lignes coplanaires

a) ACPS et b) CCPS.

V. UTILISATION D'UNE CPS

Il n'y a pas d'application propre à un CPS qui ne peut pas être réalisée avec d'autres lignes de transmission. Parmi les applications utiles les circuits mélangeurs en conjonction avec d'autres lignes de transmission planaires, les amplificateurs, les switches et les circuits d'adaptation [1]. Il existe également d'autres applications de la CPS comme : les résonateurs et les filtres [3].

La CPS est utilisée aussi comme une structure guidante des signaux équilibrés. Ceux-ci ont des sorties complémentaires qui peuvent être transmises et reçues d'une manière équilibrée. Les CPS sont également utilisées en MIC et en MMIC [2].

V. a. Circuits intégrés micro-ondes (Microwave Integrated Circuits MIC) MIC[5] ET MMIC[3]

La géométrie d'un Circuit intégré micro-onde est représentés sur la figure 5. Un substrat en céramique, habituellement ayant un épaisseur dans la gamme de 0.25-0.65 millimètre, et un métal réfracteur vide a l'intérieur

En utilisant une combinaison de plat vers le haut et graver à l'eau forte vers le bas les opérations manquante, un modèle de circuit est défini. La métallisation inclura habituellement une couche ayant une résistance de feuille prescrite, typiquement autour de $50\Omega/\text{square}$, permettant les résistances extérieures ayant la capacité parasite très basse à former avec le modèle de circuit en métal. Des via de **Plated through** peuvent également être employés pour l'au sol. Les composants de morceau eux-mêmes sont directement matrice attachée au substrat, employant habituellement de petites préformes d'un alliage telles que Gold/Tin (AuSn). L'attachement doit être effectué dans une atmosphère inerte à une température à proximité 300 du ° C. Traditional, cette opération d'attache de matrice a été effectuée à la main et a exigé la compétence considérable. [4]

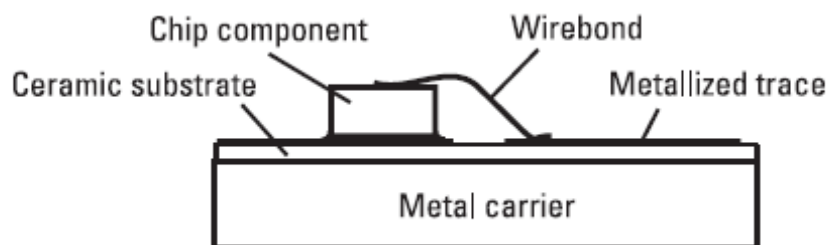


Figure 5 : Circuits intégrés micro-ondes

V.b. Circuits Intégrés Monolithiques (Monolithic Microwave Integrated Circuits MMIC)

L'utilisation des circuits intégrés monolithiques (MMIC) dans les systèmes micro ondes est devenue de plus en plus importante. Ils couvrent les fréquences de 1 à 100 GHz. Ils sont de ce fait utilisés dans les systèmes de communication. Il est donc nécessaire de concevoir et fabriquer des circuits avec ce procédé. La technologie MMIC est une technologie dans laquelle tous les composants passifs et actifs sont fabriqués sur le même substrat et élimine donc le besoin de faire des connections pour les composants discrets [5].

En fabriquant un MMIC, tous les éléments des circuits actifs et passifs et les interconnexions sont formés ensemble sur la surface d'un substrat semi isolant (habituellement arséniure de gallium GaAs). Les condensateurs micro en métal de isolateur de bande et en métal –de l'utilisation –en général MMIC pour les réseaux assortis, tandis qu'à de basses fréquences micro-ondes. [3]

b. 1. Avantages de MMIC

Les avantages des MMICs incluent le faible coût, la petite taille, le faible poids, la flexibilité de conception de circuit, l'opération à bande large, l'élimination de tordre de circuit, les possibilités de fabrication de highvolume, la simplification de paquet, la reproductibilité améliorée, la dureté de rayonnement, la fiabilité améliorée, et l'exécution multifunction sur un morceau simple [3].

b. 2. Application

Le succès du MIC est du au fait que les circuits fabriquées sont fonctionnels en grand volume et à un pris bas. Il existe deux grandes applications pour les MMICs, des applications dans le domaine militaire, et dans le domaine commercial.

Différentes applications militaires sont utilisent les MMICs pour des fréquences élevées. Les circuits ont besoin d'être faibles pour être utilisées dans les conditions climatiques les plus drastiques. Les MMICs sont utilisées dans la conception des radars. La largeur de bande, la rapidité de détection de plusieurs objets, la protection dans différents environnements électromagnétiques et la fiabilité sont requises pour les radars.

La technologie MMIC est utilisée dans les armes intelligentes. Elle permet d'améliorer les performances pour les composants utilisés dans les systèmes de communications, les équipements de télécommunications, dans les liaisons optiques etc.

Le secteur commercial utilise de plus les MMICs. Les systèmes de communication de voix, de données et de vidéo en sont de grands utilisateurs. D'autres marchés importants sont l'automobile (radars anticollision) et l'instrumentation.

Le marché des télécommunications sans fil est aussi en plein essor et utilise en abondance les MMICs dans les amplificateurs, des commutateurs, des mélangeurs.

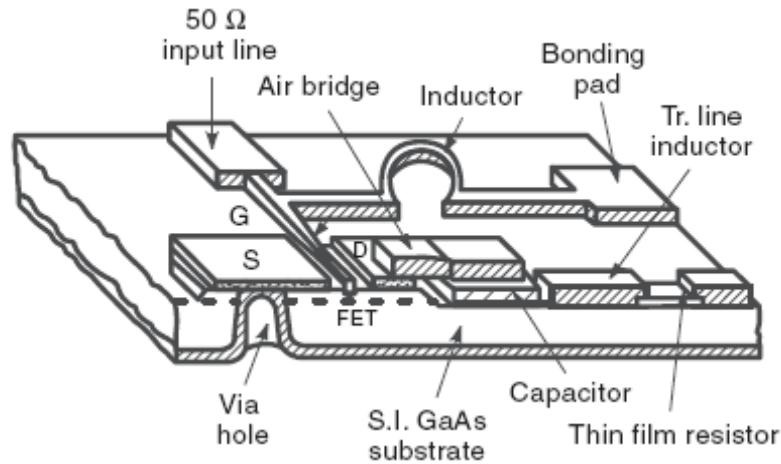


Figure 6. Circuits intégrés monolythic.

Nous allons introduire à présent les méthodes d'analyse des lignes coplanaires.

Comme toute autre structure de ligne de transmission microstrip, les méthodes d'analyse pour une ligne coplanaire ont pour objectif de déterminer l'impédance caractéristique et la constante de propagation (vitesse de phase et coefficient d'atténuation).

Les diverses méthodes d'analyse de microstrip peuvent être divisées en deux groupes principaux comme représenté dans la figure 7.

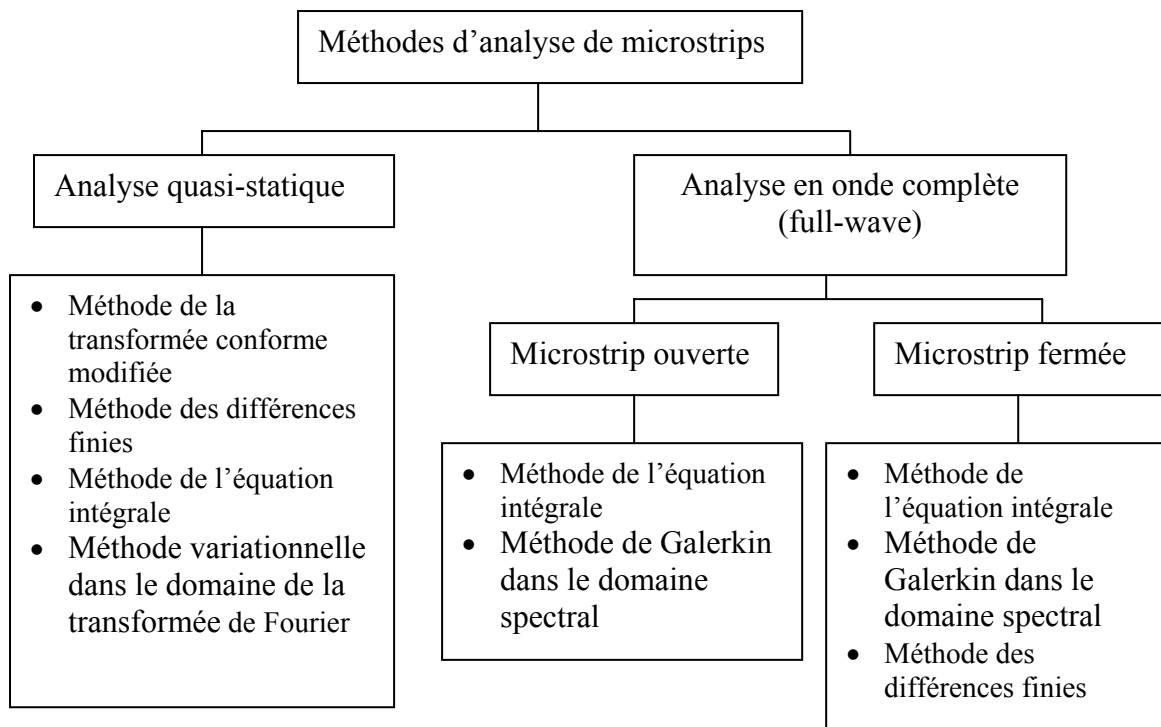


Figure 7. Différentes méthodes d'analyse de microstrips.

Dans le premier groupe, qui comporte des méthodes quasi-statiques, la nature du mode de propagation est considérée comme TEM pur et les caractéristiques du microstrip sont calculées à partir de la capacité électrostatique de la structure.

On a trouvé que cette analyse convient pour la conception des circuits en fréquences basses (au-dessus de la bande X) où la largeur du strip et l'épaisseur du substrat sont beaucoup plus petites que la longueur d'onde dans le matériau diélectrique.

Les méthodes du deuxième groupe tiennent compte de la nature hybride du mode de propagation. Les techniques suivies, pour l'analyse en onde complète (full-wave), sont plus rigoureuses et analytiquement complexes. Les résultats importants de l'analyse en onde complète révèlent la nature dispersive de la ligne microstrip. Ceci inclut la variation de l'impédance caractéristique Z_0 et la vitesse de phase (ou la constante diélectrique effective ϵ_{eff}) avec la fréquence. Tandis qu'une analyse, en onde complète, devienne assez compliquée, plusieurs méthodes quasi-empiriques connues sous le nom de "modèles de dispersion" ont été développées pour déterminer les variations de Z_0 et de ϵ_{eff} avec la fréquence [6].

Puisque la ligne coplanaire fonctionne en mode quasi-statique, nous allons discuter quelques méthodes du groupe de méthodes quasi-statiques.

a. Méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)

La méthode de la différence finie dans le domaine temporel la (FDTD) est l'une des méthodes numériques la plus fréquemment utilisée par la communauté EM.

L'approche de la FDTD a été présentée par Yee en 1966. Depuis cette époque, elle a éprouvé le grand succès, fondamentalement dû à sa simplicité et polyvalence [8].

a. 1. Principe de la méthode

La méthode des différences finies permet d'étudier les champs qui varient dans le temps, en résolvant les équations de Maxwell [3].

Les équations du type rotationnel de Maxwell fournissent six équations scalaires comportant les six composantes du champ électrique et magnétique en coordonnées cartésiennes [8].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial B_x}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \\ \frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial D_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \\ \frac{\partial D_y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \\ \frac{\partial D_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \end{array} \right. \quad (2)$$

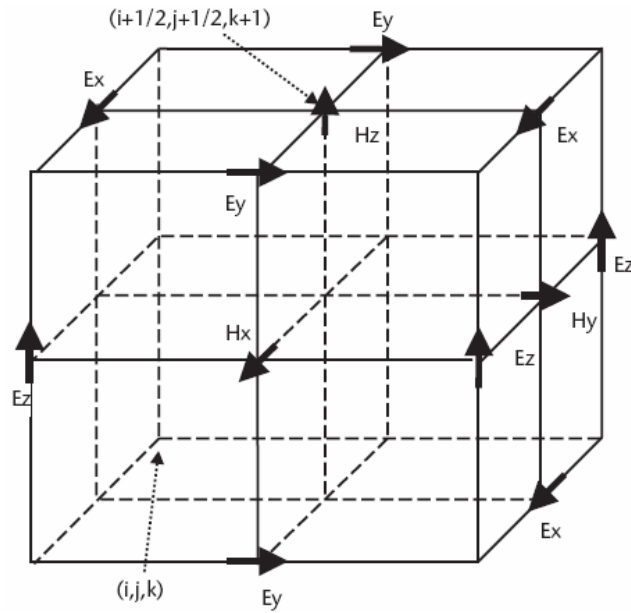


Figure 8. Cube introduit par Yee.

La méthode FDTD considère par conséquent une discrétisation en carré ou en cube. L'espace est découpé en cubes introduits par Yee comme ceux présentés dans la figure 8. Yee a divisé l'espace en des cellules élémentaires supposées, par exemple, rectangulaires (différents systèmes peuvent être adoptés selon la géométrie de la ligne). La coordonnée peut être discrétisée avec des pas Δx , Δy , Δz . Le pas de temps est habituellement désigné avec Δt . Le point P de l'espace peut être identifié avec la notation $(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$, ou, plus synthétiquement (i, j, k) . Ainsi toute fonction $\mathbf{F}$ de l'espace et de temps est notée $F|_{i,j,k}^n$ c.à.d $\mathbf{F}$ est calculée au temps $n\Delta t$ et au point $(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$ [8].

a. 2. Stabilité de l'algorithme

Quand une approche numérique basée sur un maillage spatial et une discrétisation temporelle est employée, une analyse de stabilité est nécessaire, et la méthode FDTD ne fait pas exception. Des études sur cette question si fondamentale ont été réalisées par Taflové en 1975. La stratégie était l'approche classique de Von Neumann, ayant pour résultat un état très compact de stabilité, appelé l'état de Courant. Selon une telle condition, le pas Δt de temps doit être choisis de sorte que:

$$C \cdot \Delta t \leq \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Où C est la vitesse de la lumière dans le vide.

a. 3. Avantage de la FDTD

Le traitement d'un problème d'électromagnétisme dans le domaine temporel, utilisant la FDTD, fournit des résultats qui décrivent directement l'évolution temporelle du système étudié et permet de voir comment les champs se répartissent et se propagent [3]. La méthode s'adapte également à toutes les géométries y compris celles non régulières.

a. 4. Limitation de la FDTD

A l'origine, la FDTD a été développée pour des structures pouvant être discrétisées par des cubes, et elle fonctionne particulièrement bien pour de telles structures. Il est maintenant possible de s'affranchir de cette contrainte, au moins en principe, car les extensions à des systèmes curvilignes impliquent une augmentation dans la complexité de sa mise en œuvre mathématique.

Par ailleurs, la méthode FDTD a principalement considéré des structures sans pertes. Ici également, il est en principe possible de s'affranchir de cette limitation, et d'utiliser la méthode FDTD pour considérer des structures comportant des pertes. Cela implique également une augmentation importante dans la complexité de la méthode.

On doit toujours se rappeler qu'il n'existe pas de méthode idéale, qui permettrait de résoudre de façon efficace tous les problèmes qu'on rencontre en électromagnétisme.

L'extension d'une méthode au-delà de sa zone d'excellence peut présenter des effets négatifs [3]. Par exemple si on considère un maillage cartésien pour une structure contenant des formes circulaires et/ou elliptiques. Aussi si on étudie des structures ouvertes (sur l'air) on doit intervenir des conditions aux bords absorbantes (Absorbing Boundary Conditions; ABC) ce qui ajoute une autre étape dans la complexité de la méthode.

b. Méthode spectrale (Spectral Domain Approach; SDA)

La méthode d'analyse spectrale (SDA) est la méthode la plus populaire parmi les méthodes numériques. Elle est développée en 1974. La SDA est fondamentalement une version transformée par Fourier de la méthode d'équation intégrale [9]-[10].

b. 1. Principe de la méthode

Considérant une structure planaire ayant des métallisations d'épaisseurs négligeables (technique de circuit imprimée). Cette méthode exploite le fait que la structure est uniforme sur les directions perpendiculaires à la direction “ z ”. Cela suggère d'exprimer le champ comme superposition d'ondes planes [10].

Les modes de la structure sont déterminés en résolvant des équations intégrales formulées en imposant les conditions de frontière appropriées aux conducteurs.

La première étape consiste à obtenir le lien entre le champ électromagnétique dans la structure stratifiée et les courants sur les conducteurs.

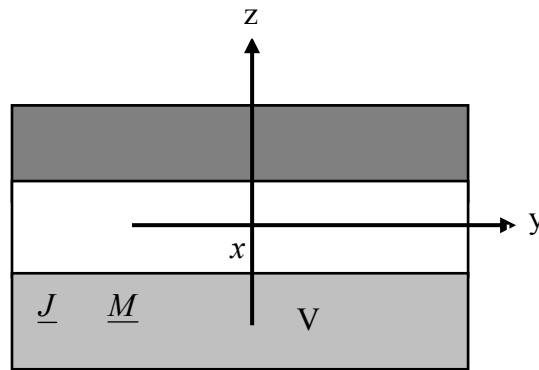


Figure9. Structure planaire.

Considérons la structure de la figure 9 avec $\underline{J}$, $\underline{M}$: l'intensité des courants électrique et magnétique, respectivement. V étant le volume étudié.

Donc le champ électrique et le champ magnétique sont exprimés comme suit :

$$\underline{E}(\underline{r}) = \int_V \underline{\underline{G}}_{ee}(\underline{r}, \underline{r}') \cdot \underline{J}(\underline{r}') dV + \int_V \underline{\underline{G}}_{eh}(\underline{r}, \underline{r}') \cdot \underline{M}(\underline{r}') dV \quad (4)$$

$$\underline{H}(\underline{r}) = \int_V \underline{\underline{G}}_{he}(\underline{r}, \underline{r}') \cdot \underline{J}(\underline{r}') dV + \int_V \underline{\underline{G}}_{hh}(\underline{r}, \underline{r}') \cdot \underline{M}(\underline{r}') dV \quad (5)$$

Avec $\underline{\underline{G}}_{ee}$, $\underline{\underline{G}}_{eh}$, $\underline{\underline{G}}_{he}$, $\underline{\underline{G}}_{hh}$ les fonctions dyadiques de Green [10].

La résolution des équations intégrales 4 et 5 est faite par la méthode des moments qui mène à un système d'équations linéaires [10].

b. 3. Avantages de la méthode

La méthode spectrale a plusieurs avantages parmi ces derniers :

- Sa formulation a comme conséquence un système des équations algébriques au lieu des équations intégrales.
- Des expressions de formes analytiques peuvent facilement être obtenues pour les fonctions de Green.
- Les solutions obtenues utilisant cette méthode sont stationnaires [10].

c. Transformée conforme

La transformée conforme est une analyse mathématique utile pour résoudre beaucoup de problèmes de frontière. Les outils les plus élégants de la transformée conforme sont sa simplicité et sa capacité de produire des formules de forme analytiques. La transformée conforme peut être utilisée pour obtenir des solutions pour beaucoup de problèmes électromagnétiques en régime statique (TEM) et dynamique (full-wave) [9].

c. 1. Principe de la transformée conforme

C'est une technique géométrique élémentaire. Dans beaucoup de problèmes mathématiques, nous avons rencontré une fonction f qui décrit la relation entre deux variables complexes $z = x + jy$ et $w = u + jv$ en tant que $w = f(z)$. Géométriquement, ces variables complexes sont représentées par les points $z(x, y)$ et $w(u, v)$, respectivement [9].

Nous considérons une transformation $w = f(z)$ qui transforme le point $z(x, y)$ au $w(u, v)$. Si la fonction f est analytique au point z et $f' = \frac{df}{dz} \neq 0$ alors le tracé serait isogone (conforme). Un tracé ou une transformation isogone utilise une fonction analytique dont le dérivé est toujours non nulle dans le plan z où la fonction est définie. Comme sera vu, ce genre de tracé est particulièrement utile pour analyser les lignes de transmission planaires. Une fonction f est analytique au point z si sa dérivée existe et est unique en ce point.

Une condition nécessaire, mais pas suffisante, pour que f soit analytique est que les dérivées partielles du premier ordre de sa partie réelle u et sa partie imaginaire v en ce qui concerne x et y doivent satisfaire les équations de Cauchy Riemann [9].

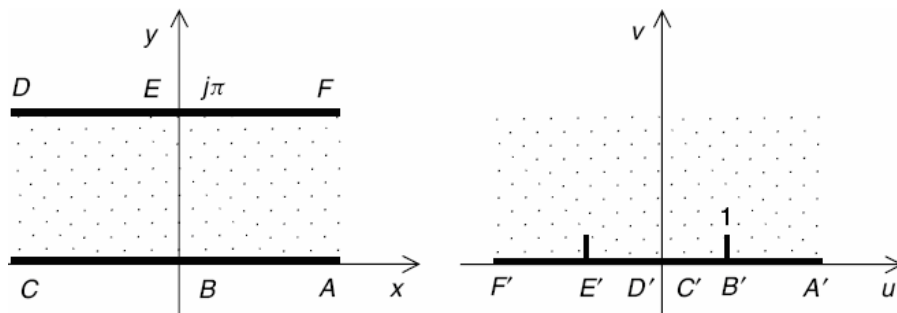
$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x} \end{cases} \quad (6)$$

Deux fonctions quelconques qui satisfont les équations de Cauchy -Riemann s'appellent “fonctions conjuguées harmoniques” ou simplement des “fonctions conjuguées”. Une condition suffisante pour l'existence de l'analyticité est que les dérivées partielles du premier ordre de u et v doivent exister dans le voisinage de z où f est définie, continue et satisfait les équations –de Cauchy Riemann [9].

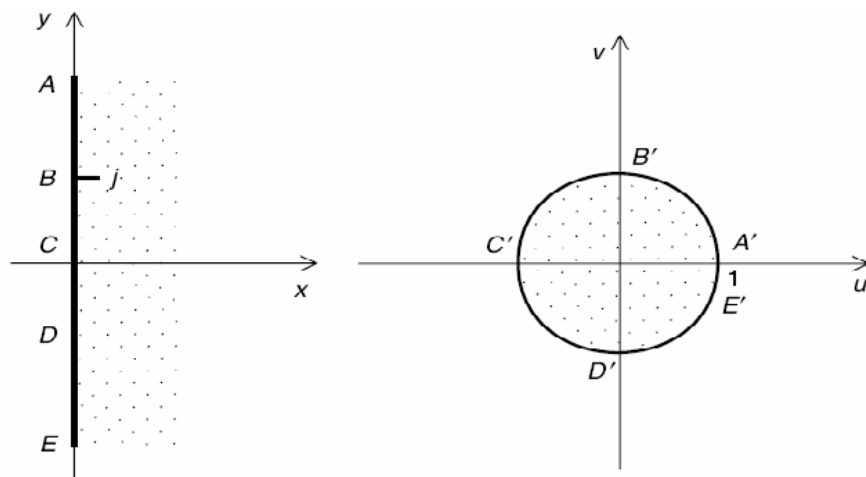
$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

c. 2. Exemples de transformées conformes usuelles

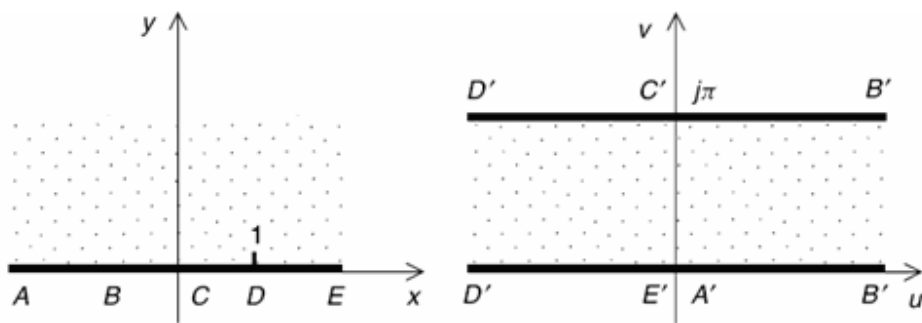
Nous présentons ici quelques exemples de transformées conformes qui sont utiles pour notre étude de ligne coplanaire cylindrique. Leur intérêt provient essentiellement du principe qu'on doit ramener par une transformation de la structure cylindrique vers une structure plane dont les équations donnant ces paramètres caractéristiques sont établies et connues.



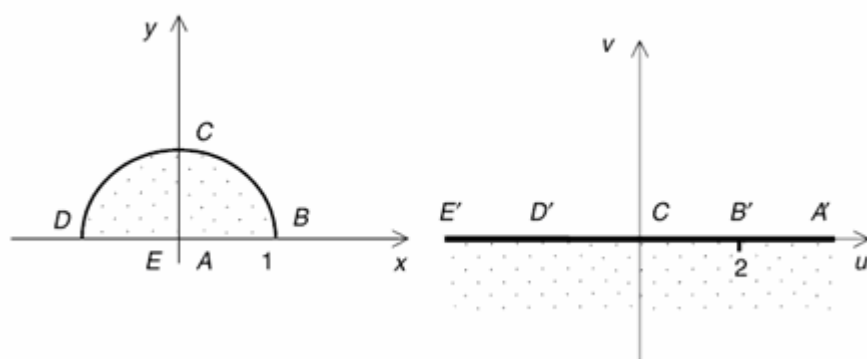
(a): $w = e^z$



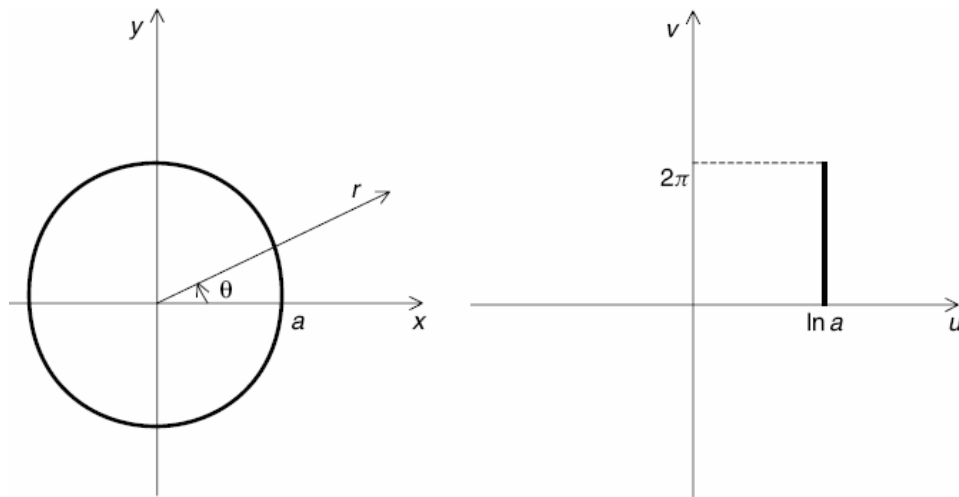
(b): $w = \frac{z-1}{z+1}$



(c): $w = \ln\left(\frac{z-1}{z+1}\right)$



(d): $w = z + \frac{1}{z}$



$$w = \ln z = u + jv \text{ avec } z = r e^{j\theta}$$

Figure 10. Exemples de transformées conformes usuelles

c. 4. Transformée de Schwarz-Christoffel

La transformation de Schwarz-Christoffel est un outil puissant pour étudier les problèmes électrostatiques dont la géométrie peut être considérée comme un polygone. Cette transformation suppose également que le polygone peut être ouvert sur un certain côté. La région interne de la structure originale est transformée en le demi plan complexe supérieur w , alors que le périmètre de bondissement est transformé en l'axe réel du plan w . Cette situation est représentée dans la figure 11. La fonction qui permet la transformation entre les deux plans est [2]:

$$z = A \int_{w_1}^w (w - w_1)^{\frac{-\alpha_1}{\pi}} (w - w_2)^{\frac{-\alpha_2}{\pi}} \dots (w - w_n)^{\frac{-\alpha_n}{\pi}} dw + c \quad (8)$$

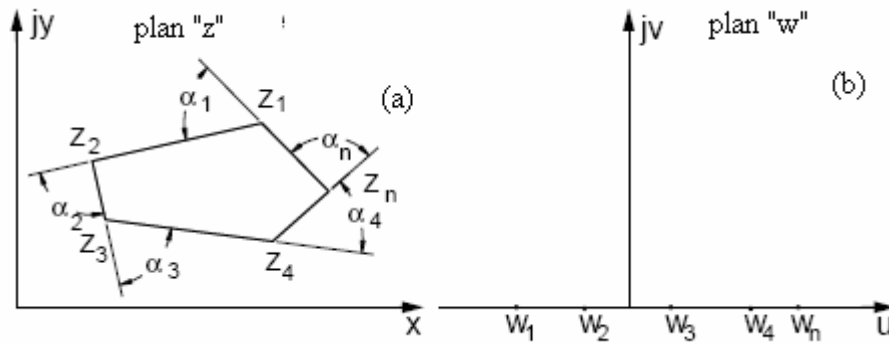


Figure 11: Représentation graphique de la transformée de Schwarz-Christoffel

Ou “A” et “c” sont deux constantes complexes. La première proportionnelle à la dimension du polygone et à son orientation dans le plan “z”, la deuxième proportionnelle à la position d'un tel polygone. Les points “ w_i ” peuvent théoriquement être arbitrairement choisis pour se trouver sur l'axe “u”; un choix approprié de leur position peut simplifier la solution du problème.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la ligne coplanaire dans ses différentes géométries symétrique/asymétrique; planaire/cylindrique et ses applications. Nous avons également discuté les méthodes d'analyse des lignes microstrips coplanaires à savoir la FDTD, la SDA et la transformée conforme. Nous avons détaillé la transformée conforme comme elle constitue notre méthode de choix afin d'estimer les paramètres caractéristiques de la ligne. Nous avons mis en évidence la complexité de ce modèle basé sur la transformation conforme et la transformation de Schwarz-Christoffel. Dans le chapitre suivant, nous formulons le problème de la ligne coplanaire cylindrique par la méthode de la transformée conforme et l'apprentissage par réseaux de neurones artificiels afin d'estimer efficacement les paramètres caractéristiques de cette ligne.