II.1. Les lignes filaires :

Ce chapitre Detaille la détermination de les paramètres pour les lignes filaires (cable coaxiale et ligne Bifilaire, et la ligne microruban.

II.1. ligne Bifilaires

Les lignes Bifilaires sont de moins utilisés. On s'en servait principalement raccorder une antenne à une télévision.

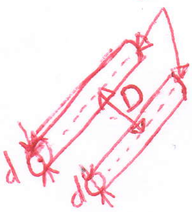


figure II.1. ligne Bifilaire

Soient d le diamètre des conducteurs de la ligne et D leur espacement d'axe à axe.

II.1.1 Paramètres primaires

Les valeurs par unité de longueur de la résistance, de l'inductance, de la conductance et de la capacité sont respectivement :

- $R_1 = \sqrt{\dfrac{\mu_0 f}{\pi \sigma}} \cdot \dfrac{1}{d\sqrt{1-\left(\frac{d}{D}\right)^2}} = 1{,}26 \cdot 10^{-3}\sqrt{\dfrac{f}{\sigma}} \cdot \dfrac{1}{d\sqrt{1-\left(\frac{d}{D}\right)^2}}$ (Ω/m)

- $L_1 = \dfrac{\mu_0}{\pi} \ln\left(\dfrac{2D}{d}\right) = 0{,}40 \cdot 10^{-6} \ln\left(\dfrac{2D}{d}\right)$ (H/m)

- $G_1 = 2\pi^2 \dfrac{\varepsilon f \operatorname{tg}\delta}{\ln\left(\frac{2D}{d}\right)} = 0{,}175 \cdot 10^{-9} \dfrac{\varepsilon_r f \operatorname{tg}\delta}{\ln \frac{2D}{d}}$ (S/m)

- $C_1 = \dfrac{\pi \varepsilon}{\ln\left(\frac{2D}{d}\right)} = 0{,}028 \cdot 10^{-9} \dfrac{\varepsilon_r}{\ln\left(\frac{2D}{d}\right)}$ (F/m)

σ : conductivité des conducteurs.

ε_r : constante diélectrique relative

$\operatorname{tg}\delta$: facteur de pertes du diélectrique.

II.1.2 Paramètres secondaires.

a) L'affaiblissement :

l'affaiblissement de la ligne Bifilaire est donnée par la formule

$$\alpha\,(Np/m) = \sqrt{\frac{\pi \varepsilon f}{\sigma}}\ \frac{\left[1-\left(\frac{d}{D}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}}}{d \ln\frac{2D}{d}} + \frac{\pi f \operatorname{tg}\delta}{v}$$

(1)

le premier terme représente les pertes α_c dans les conducteurs et que le second représente les pertes α_d dans diélectrique.

- $$\alpha_c\,(dB/m) = 45{,}8 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{\varepsilon_r f}{D}} \; \frac{\left[1-\left(\frac{d}{D}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}}}{d \ln \frac{2D}{d}}$$

$$\alpha_d\,(dB/m) = 91 \cdot 10^{-9} \sqrt{\varepsilon_r}\, f\, tg\,\delta$$

b) le paramètre de phase.

le paramètre de phase d'une ligne Bifilaire est donnée par la relation suivante:

$$\beta = \omega \sqrt{L_1 C_1} = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon} = \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon_r}$$

comme $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = 2\pi f \frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_0}\sqrt{\varepsilon_r}$.

donc : $\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}}$

c) Vitesse de phase:

$$V_P = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

d) Impédance caractéristique:

L'impédance caractéristique de la ligne Bifilaire est donne par la relation suivante (ligne avec perte).

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\pi} \cdot \frac{1}{\pi \varepsilon} \ln^2 \frac{2D}{d}} = \frac{120}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln \frac{2D}{d}$$

$$= \frac{276}{\sqrt{\varepsilon_r}} \log \frac{2D}{d} \;(\Omega).$$

II . 2 . ligne coaxiales :

II . 2 . 1 . Les paramètres Primaire

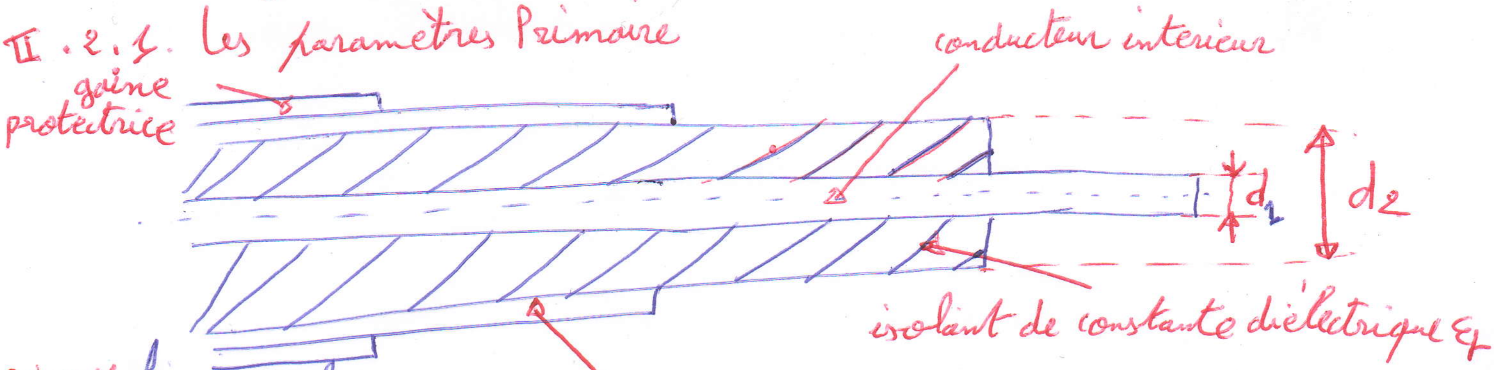


figure : 1 ligne coaxiale : géométrie et éléments constitutifs.

Soient d_1 le diamètre du conducteur intérieur de conductivité σ_1, d_2 le diamètre intérieur du conducteur extérieur de conductivité σ_2, ε_r le constante diélectrique relative et $tg\delta$ le facteur de pertes du diélectrique.

- les valeur par unité de longueur de la résistance, de l'inductance, de la conductance et de la capacité sont respectivement :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$
$$\varepsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$$
$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m .$$
$$V = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$$
$$C = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

- $$R_1 = \sqrt{\frac{\mu_0 f}{\pi}} \left(\frac{1}{d_1\sqrt{\sigma_1}} + \frac{1}{d_2\sqrt{\sigma_2}} \right) .$$
$$= 0,632\ 10^{-3}\sqrt{f} \left(\frac{1}{d_1\sqrt{\sigma_1}} + \frac{1}{d_2\sqrt{\sigma_2}} \right) \cdot (\Omega/m)$$

- $$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = 0,2 \cdot 10^{-6} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \quad (H/m) .$$

- $$G_1 = \frac{4\pi^2 \varepsilon f tg\delta}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} = 0,349\ 10^{-9} \frac{\varepsilon_r f tg\delta}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (S/m) .$$

- $$C_1 = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} = 0,055 \cdot 10^{-9} \frac{\varepsilon_r}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (F/m) .$$

II . 2 . 2 . Les paramètre secondaires.

- **Affaiblissement** : l'affaiblissement de la ligne est donnée par cette équation.

$$\alpha\,(Np/m) = \sqrt{\varepsilon f \pi} \left(\frac{1}{d_1\sqrt{\sigma_1}} + \frac{1}{d_2\sqrt{\sigma_2}} \right) \left(\frac{1}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \right) + \frac{\pi f tg\delta}{V}$$

le premier terme représente les pertes α_c dans les conducteurs et que le seconde represente les pertes α_d dans le diélectrique.

$$\alpha_c\,(dB/m) = 45,8\ 10^{-6} \sqrt{\varepsilon_r f} \left(\frac{1}{d_1\sqrt{\sigma_1}} + \frac{1}{d_2\sqrt{\sigma_2}} \right) \left(\frac{1}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \right)$$

$$\alpha_d\,(dB/m) = 91 \cdot 10^{-9} \sqrt{\varepsilon_r}\ f\ tg\delta .$$

- Paramètre de phase

le paramètre de phase d'une ligne avec perte est donné par la relation suivante:

$$\beta = \omega \sqrt{L_1 C_1}$$

$$\beta = 2\pi \frac{c}{\lambda_0}\sqrt{\varepsilon \mu_0} = 2\pi \frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{\lambda_0}.$$

comme par définition, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$, il en résulte que la longueur d'onde sur la ligne $\left(\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}}\right)$

- Vitesse de phase:

$$V_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

- Impédance caractéristique:

l'impédance caractéristique est donnée par la formule suivante

$$Z_c = \sqrt{L_1/C_1} \quad (\text{lignes avec perte}).$$

donc: $$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon_r}} \log \frac{d_2}{d_1} \quad (\Omega)$$

II. 3. Les lignes à bandes et à fentes

Il y a une grande variété de lignes à structure bidimensionnelle, appelées parfois lignes planaires, qui on fait l'objet d'application pour la réalisation des circuits passif et des circuits actifs hyperfréquences. On peut les classifiées en deux catégories : les lignes à bande et les lignes à fente.

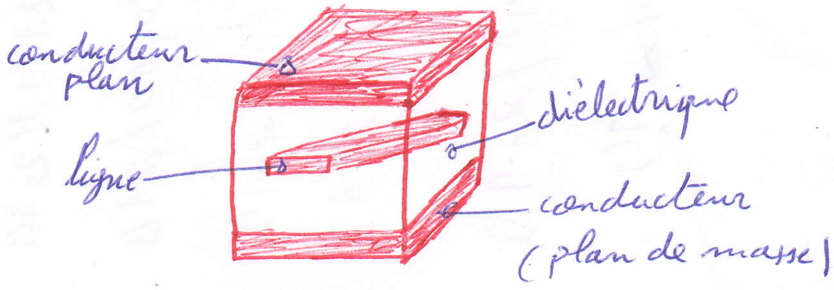
~~II.3.1~~ :

① La ligne microbande (en Anglais microstrip).

Elle comporte un substrat en diélectrique, complètement métallisé sur l'une de ses faces et couvert d'une bande métallique sur l'autre

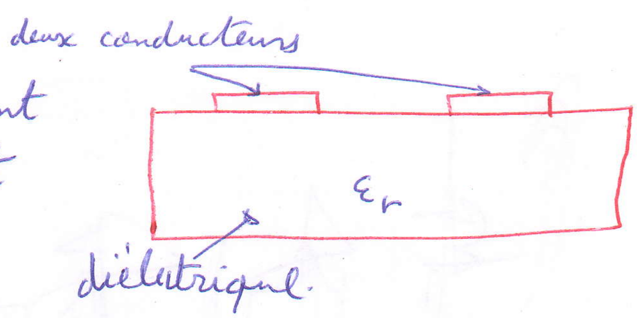
② La ligne triplaque (stripline).

Elle est constituée par deux plaques métallique séparées par un substrat de diélectrique au sein duquel se trouve une bande métallique.



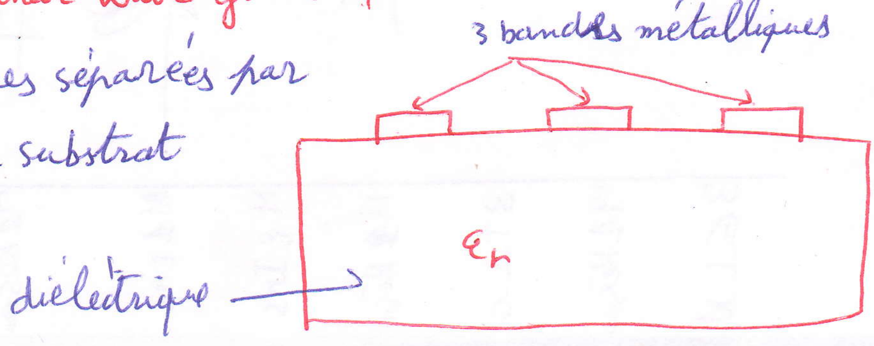
③ La ligne à fente (slot line)

Les deux conducteurs formant la ligne sont déposés sur le même face du sustrat diélectrique



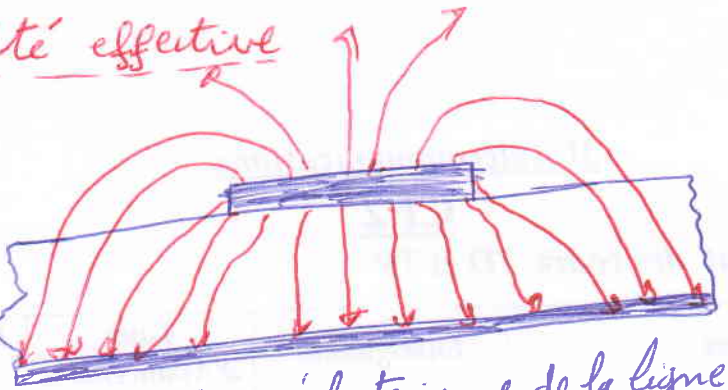
④ Le guide coplanaire (coplanar wave guide)

Il présente 3 bandes métaliques séparées par deux fentes d'une même côté du substrat

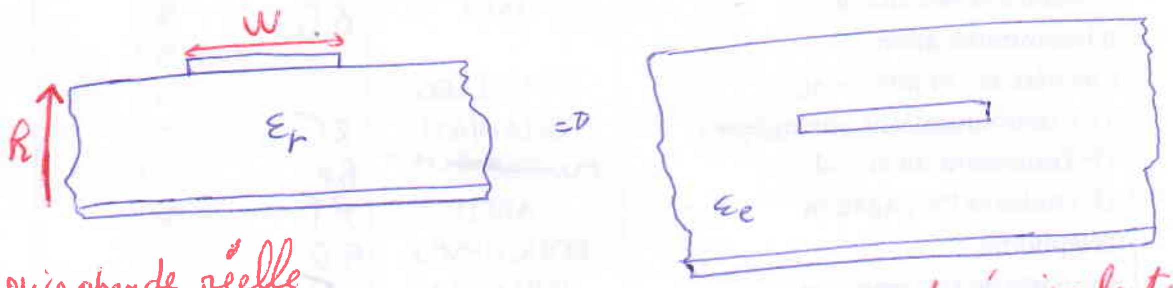


II.3.4 : caractéristique des ligne micro-Bande (ligne à Bande).

A. Permitivité effective



lignes de champ électrique de la ligne microbande



Microbande réelle

Microbande équivalente.

✓ une formule ~~explicite~~ explicite de ε_e a été donne par Hammerstad :

• Pour une bandes telles que $\frac{W}{h} \geq 1$:

$$\varepsilon_e = \frac{1}{2}(\varepsilon_r + 1) + \frac{1}{2}(\varepsilon_r - 1)\left(1 + 12\frac{h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}}.$$

• pour les bandes telles que $\frac{W}{h} \leq 1$:

$$\varepsilon_e = \frac{1}{2}(\varepsilon_r + 1) + \frac{1}{2}(\varepsilon_r - 1)\left[\left(1 + 12\frac{h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}} + 0{,}04\left(1 - \frac{W}{h}\right)^2\right]$$

✓ Notons que, de cette permitivité effective, l'on déduit :

• la longueur d'onde λ_m sur la ligne microbande, d'après

$$\lambda_m = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_e}} \quad \text{avec : } \lambda_0 = \frac{c}{f}.$$

• le paramètre de phase β, d'après : $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_m} = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon_e}}{\lambda_0}$

• la vitesse de propagation, d'après : $V_p = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_e}} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\cancel{2\pi} c}{\lambda_0} \cdot \frac{\lambda_m}{\cancel{2\pi}}$

$$= \frac{c}{\cancel{\lambda_0}} \cdot \frac{\cancel{\lambda_0}}{\sqrt{\varepsilon_e}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_e}}$$

B Impédance caractéristique. (Analyse microbande)

a- formule de ~~Wheeler~~ Hammerstad

pour les bandes telles que $\frac{W}{h} > 1$

$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}\left[\frac{W}{h} + 1{,}393 + 0{,}667\ln\left(\frac{W}{h} + 1{,}444\right)\right]^{-1} \quad (\Omega)$$

pour les bandes telles que $\frac{W}{h} < 1$

$$Z_c = \frac{Z_0}{2\pi\sqrt{\varepsilon_{eff}}}\ln\left|\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h}\right| \quad (\Omega).$$

ces relations permettent d'effectuer l'analyse d'une ligne microbande, c'est-à-dire de déterminer ε_{eff} et Z_c en fonction de la ligne et de la permitivité du susbstrat.

b- formule de ~~Hammerstad~~ Wheeler

pour les bandes telles que : $\frac{W}{h} > 2$

$$Z_c = \frac{Z_0}{\sqrt{\varepsilon_r}}\cdot\left[\frac{W}{h} + 0{,}883 + \frac{\varepsilon_r+1}{\pi\varepsilon_r}\left(\ln\left(\frac{W}{2h} + 0{,}94\right) + 1{,}451\right) + 0{,}165\,\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r^2}\right]^{-1}$$

pour les bandes telles que : $\frac{W}{h} < 2$

$$Z_c = \frac{60\sqrt{2}}{\sqrt{\varepsilon_r + 1}}\left[\ln\left(\frac{8h}{W}\right) + \frac{1}{8}\left(\frac{W}{2h}\right)^2 - \frac{\varepsilon_r - 1}{2(\varepsilon_r + 1)}\left(\ln\frac{\pi}{2} + \frac{1}{\varepsilon_r}\ln\frac{4}{\pi}\right)\right]$$

C: Synthèse microbande :

pour effectuer l'opération inverse d'analyse, c'est-à-dire trouver le quotient $\frac{W}{h}$ donnant une impédance caractéristique Z_c demandée, On dispose également de relation approchées

si $\frac{W}{h} \leq 2$: $\frac{W}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} = 4\left[\frac{1}{2}e^A - e^{-A}\right]^{-1}$

si $\frac{W}{h} \geq 2$: $\frac{W}{h} = \frac{\varepsilon_r - 1}{\pi\varepsilon_r}\left(\ln(B-1) + 0{,}39 - \frac{0{,}61}{\varepsilon_r}\right) + \frac{2}{\pi}\left(B - 1 - \ln(2B-1)\right)$

$A = \pi\sqrt{2(\varepsilon_r + 1)}\cdot\frac{Z_c}{Z_0} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1}\left(0{,}23 + \frac{0{,}11}{\varepsilon_r}\right)$ $\qquad Z_0 = 120\pi$

$B = \frac{\pi}{2\sqrt{\varepsilon_r}}\cdot\frac{Z_0}{Z_c}$

D : Affaiblissement d'une ligne microbande :

pertes dans les conducteurs

- En pratique la limite supérieure des pertes dans le conducteur sont calculées par la formule approchée suivante.

$$\alpha_c\,(dB/m) = 8{,}686\,\frac{R_s}{W Z_c}$$

$R_s = \sqrt{\pi \mu \rho f}$ où ρ est la résistivité du conducteur.

f : la fréquence.

Z_c : impédance caractéristique de la microbande.

pertes dans le diélectrique

- Les pertes diélectrique dépendent principalement des caractéristique du substrat tellesque l'angle de pertes ($tang\,\delta$) et la permitivité relative (ε_r)

$$\alpha_d\,(dB/m) = 4{,}34\,\frac{Z_0}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}\cdot\frac{\varepsilon_{eff}-1}{\varepsilon_r-1}\,\sigma_d$$

ou $\alpha_d = 27{,}3\,\dfrac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r-1}\cdot\dfrac{\varepsilon_{eff}-1}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}\cdot\dfrac{tang\,\delta}{\lambda_0}$

$\sigma_d = w\varepsilon_0\varepsilon_r\,tang\,\delta$ est la conductivité du diélectrique

- pertes par rayonnement

D'après Hammerstad ces pertes sont proportionnelles à $(hf)^2/\sqrt{\varepsilon_r}$ pour une ligne $Z_c = 50\,\Omega$.

la fréquence limite est donnée par l'équation suivante

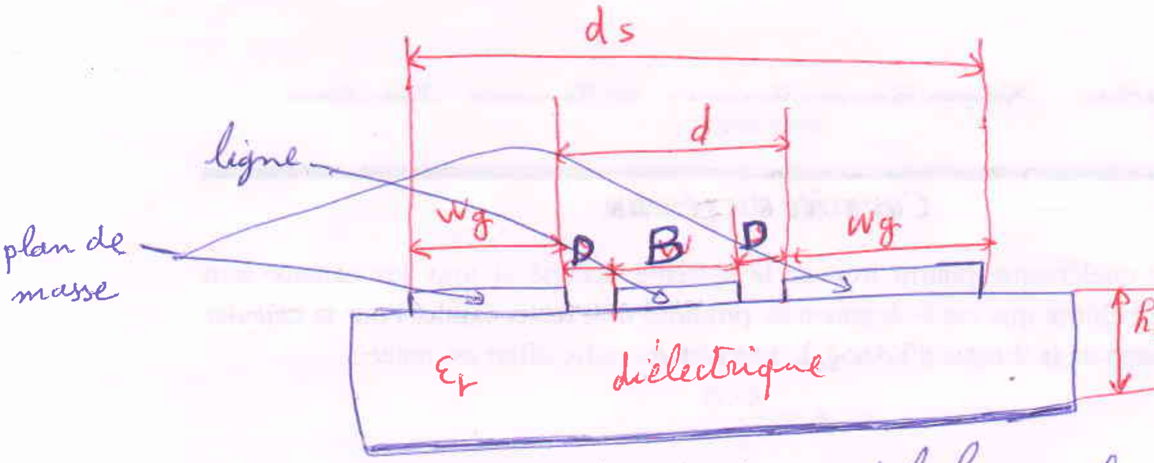
$$f_M\,(GHz) = 2{,}14\,\frac{(\varepsilon_r)^{\frac{1}{4}}}{h(mm)}$$

Par exemple, pour un substrat de $h = 1\,mm$, $\varepsilon_r = 2{,}5 \Rightarrow f_M = 3\,GHz$.

et $h = 1\,mm$, $\varepsilon_r = 10 \Rightarrow f_M = 4\,GHz$.

Affaiblissement d'une ligne microbande $\longrightarrow$
- pertes dans les conducteurs
- pertes dans le diélectrique
- pertes de rayonnement (fréquence limite)

II.3.2 caractéristique de ligne coplanaire (ligne à fente)



paramètre géométrique de la ligne coplanaire

- La ligne coplanaire est constituée par un ruban de largeur B, séparé du plan de masse par deux fentes de largeur D. Elle n'occupe qu'un seul coté du substrat, c'est une ligne inhomogène, mais comme la ligne micro-ruban elle supporte un mode quasi-TEM.

- l'impédance caractéristique équivalente de la ligne coplanaire s'écrit grâce à modèle de Wen.

$$Z_c = \frac{30\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \cdot \frac{K'(k)}{K(k)} \quad \text{avec} \quad k = \frac{B}{B+2 \cdot D}$$

$$\text{et : } \varepsilon_{eff} = 1 + \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{2}\right)\left(\frac{K'(k) \cdot K(k_1)}{K(k) \cdot K'(k_1)}\right) \quad \text{avec} \quad k_1 = \frac{Sh\left(\frac{\pi \cdot B}{4h}\right)}{Sh\left(\frac{\pi(B+2 \cdot D)}{2h}\right)}$$

la fonction $K(k)$ represente l'intégrale elliptique complete de premier espèce. $K'(k) = K(k')$ avec $k' = \sqrt{1-k^2}$

- l'approximation du rapport $\frac{K(k)}{K'(k)}$

pour : $0 \ll k \ll \frac{1}{\sqrt{2}}$ $$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\pi}{\ln\left(2\frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}}\right)}$$

$\frac{1}{\sqrt{2}} \ll k \ll 1$ $$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{1}{\pi} \ln\left(2\frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}}\right)$$