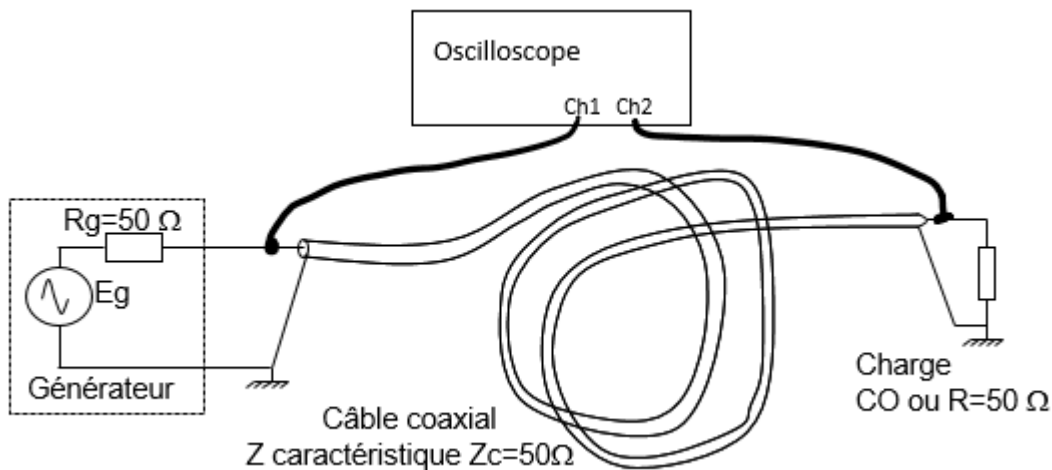


IMPEDANCE D'ENTREE HF D'UNE LIGNE

1 Observation et première conclusion

On applique un signal sinusoïdal à l'entrée d'un câble coaxial de longueur 13m et on visualise à l'oscilloscope la tension à l'entrée et à la sortie du câble.



Observer l'entrée et la sortie du câble en vérifiant que les 2 voies Ch1 et Ch2 de l'oscilloscope sont commutées sur Hi_Z.

Augmenter progressivement la fréquence du générateur à plusieurs MHz. Que constatez-vous sur l'évolution des tensions d'entrée et de sortie ?

Le câble a une longueur $l = 13.2$ m, il est du type RG223U avec une constante diélectrique $\epsilon_r = 2.3$.

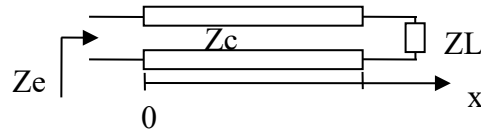
La longueur d'onde est donnée par $\lambda = \frac{v_p}{f}$ avec la vitesse de propagation $v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$.

Rechercher la fréquence pour laquelle la tension d'entrée s'annule. Pour cette fréquence, quelle est la relation entre la longueur du câble l et la longueur d'onde λ ?

Refaire l'analyse en sélectionnant 50 Ω pour l'entrée Ch2 de l'oscilloscope et conclure.

2 Eléments théoriques

On considère un câble ou une ligne de transmission de longueur $x = l$, chargée par une impédance Z_L .



On peut démontrer que la tension et le courant le long de cette ligne de transmission s'expriment comme suit en fonction de la distance x .

$$V(x) = A \cdot e^{-\gamma x} + B \cdot e^{+\gamma x}$$

$$I(x) = \frac{A}{Z_c} \cdot e^{-\gamma x} + \frac{B}{Z_c} \cdot e^{+\gamma x}$$

Où : $A \cdot e^{-\gamma x}$: Représente la tension incidente, $B \cdot e^{+\gamma x}$: la tension réfléchie,
 Z_c : Représente l'impédance caractéristique
 γ : Représente la constante de propagation

2.1 Calcul de l'impédance d'entrée :

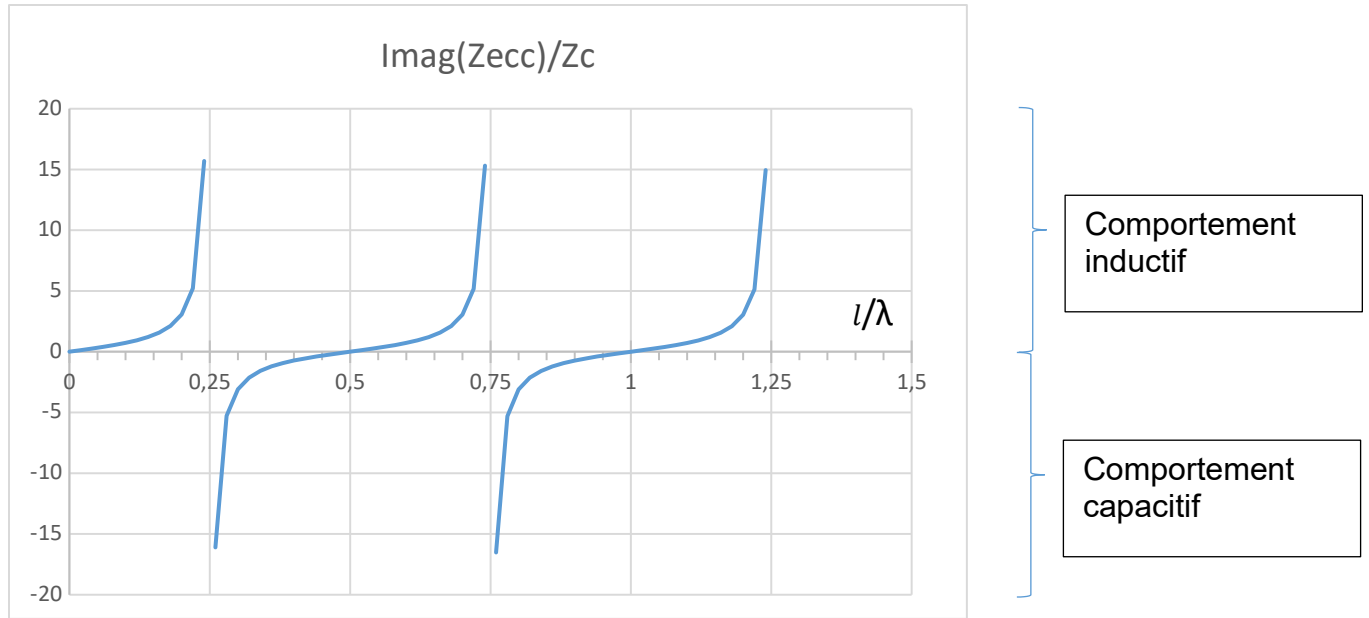
Dans ces conditions, l'expression de l'impédance d'entrée est la suivante :

$$Z_e = Z_c \frac{Z_L + j \cdot Z_c \cdot \operatorname{tg}(\beta \cdot l)}{Z_c + j \cdot Z_L \cdot \operatorname{tg}(\beta \cdot l)}$$

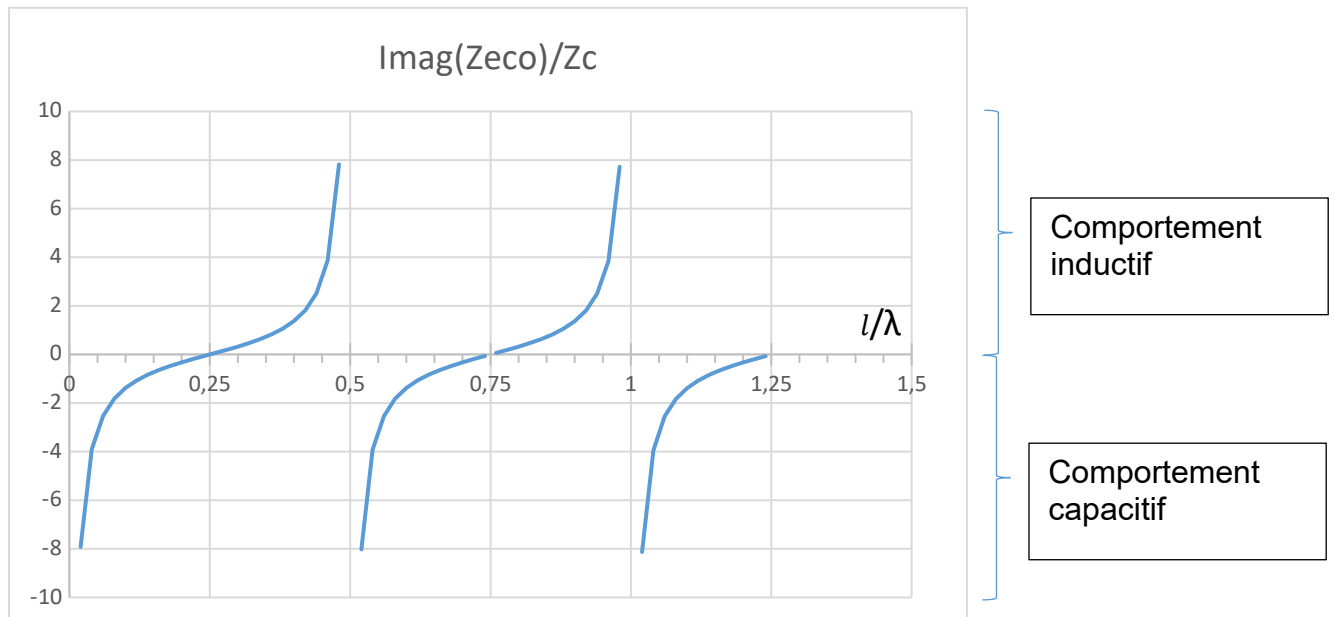
Cas particuliers

- 1) La ligne est fermée par son impédance caractéristique : $Z_L = Z_c \rightarrow Z_e = Z_c$ quelle que soit la longueur l de la ligne. **On dit que la ligne est adaptée**
- 2) Ligne demi onde soit longueur $l = k \cdot (\lambda/2)$, d'où $\beta l = 0 + k \cdot \pi$ et $\operatorname{tg}(\beta l) = 0$ alors $Z_e = Z_L$
- 3) Ligne quart d'onde soit longueur $l = (2 \cdot k + 1) \cdot (\lambda/4)$, d'où $\beta l = \frac{\pi}{2} + k \cdot \pi$ et $\operatorname{tg}(\beta l) \rightarrow \infty$,
alors $Z_e = \frac{Z_c^2}{Z_L}$
- 4) La ligne est fermée par un court-circuit : $Z_L = 0$, soit $Z_{ecc} = j Z_c \cdot \operatorname{tg}(\beta \cdot l)$

L'impédance est alors purement imaginaire et varie en fonction de $\beta \cdot l$. On obtient alors des valeurs nulles (idem court circuit) pour des longueurs $l = k \cdot (\lambda/2)$, ou infinies (circuit ouvert) pour $l = (2 \cdot k + 1) \cdot (\lambda/4)$, comme illustré ci-dessous.



5) La ligne est fermée par un circuit ouvert : $Z_L \rightarrow \infty$, soit $Z_{eco} = -jZ_c \cdot \cotg(\beta \cdot l)$



2.2 Coefficient de réflexion

Nous savons que quelle que soit la longueur l :

$$V(x) = A \cdot e^{-\gamma x} + B \cdot e^{+\gamma x} = V^+_{\hat{c}}(x) + V^-_{\hat{c}}(x)$$

$$I(x) = \frac{A}{Z_c} \cdot e^{-\gamma x} + \frac{B}{Z_c} \cdot e^{+\gamma x} = I^+_{\hat{c}}(x) + I^-_{\hat{c}}(x)$$

$V^+_{\hat{c}}(x)$ et $V^-_{\hat{c}}(x)$ sont respectivement les tensions incidentes et réfléchies en un point x .

Dans ces conditions, on peut définir :

Le coefficient de réflexion au point z : $\Gamma(x) = \frac{V^{-}(x)}{V^{+}(x)}$

L'impédance ramenée en ce point z : $Z(x) = \frac{V(x)}{I(x)}$

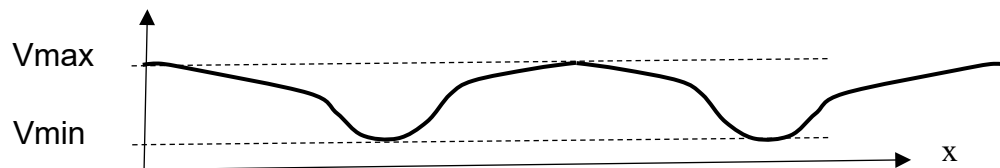
D'où : $Z(x) = Z_c \cdot \frac{1+\Gamma(x)}{1-\Gamma(x)}$ ce qui permet d'exprimer également le coefficient de réflexion :

$$\Gamma(x) = \frac{Z(x) - Z_c}{Z(x) + Z_c}$$

On vérifie que si $Z_L = Z_c$ alors $\Gamma = 0$, il n'y a pas d'onde réfléchie, la ligne est adaptée.

2.3 Rapport d'onde stationnaire : ROS

Tout au long de la ligne, l'amplitude de la tension varie. On définit le TOS (Taux d'Onde Stationnaire) comme étant le rapport entre la valeur de la tension maximale et la valeur de la tension minimale.



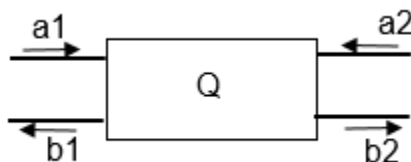
$$ROS = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}$$

2.4 Paramètres « S »

Les grandeurs V et I le long de la ligne peuvent être définies par la notion d'ondes directe $a = V^{+} = I^{+} Z_c$ et inverse : $b = V^{-} = -I^{-} Z_c$ telles que :

$$\begin{aligned} V^{+} &= \frac{V(x)^{+}}{\sqrt{Z_c}} = \sqrt{Z_c} \cdot \frac{I(x)^{+}}{\sqrt{Z_c}} = \sqrt{Z_c} \cdot I(x)^{+} \\ V^{-} &= \frac{V(x)^{-}}{\sqrt{Z_c}} = -\sqrt{Z_c} \cdot \frac{I(x)^{-}}{\sqrt{Z_c}} = -\sqrt{Z_c} \cdot I(x)^{-} \end{aligned}$$

En utilisant cette notation, on définit les paramètres « S » d'un quadripôle « Q »



avec :

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11} a_1 + S_{12} a_2 \\ b_2 &= S_{21} a_1 + S_{22} a_2 \end{aligned}$$

Soit, l'écriture matricielle $(b) = (S) \cdot (a)$

où (S) est la matrice de répartition : $(S) = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}$

Les paramètres « Sij » caractérisent le quadripôle « Q » avec Zc, l'impédance de référence.

- Sii : coefficient de réflexion à l'accès i ;
- Sij : coefficient de transmission de l'accès j vers l'accès i.

Le paramètre S11 donne le coefficient de réflexion en entrée et permet de caractériser l'adaptation par rapport à Zc considérée égale à 50 ohm.

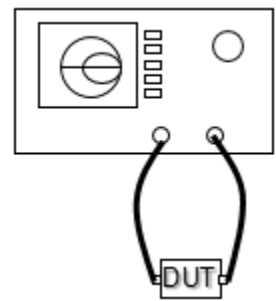
$$\Gamma = S_{11} = \frac{V_{\text{réfléchiée}}}{V_{\text{incidente}}} = \frac{Z - Z_c}{Z + Z_c}$$

Ou en puissance : $|S_{11}|^2 = \frac{P_{\text{réfléchiée}}}{P_{\text{incidente}}}$

3 Utilisation de l'Analyseur de Réseau Vectoriel

L'appareil permettant de mesurer les grandeurs HF est un analyseur de réseau vectoriel. Nous utiliserons ici un Agilent E5061A qui couvre la bande 300kHz-1.5GHz.

Avant de réaliser les mesures, il est nécessaire d'effectuer la calibration qui sert à mettre en mémoire tout l'environnement utile à la caractérisation d'un système. Cette calibration permet de s'affranchir de cet environnement et de ne mesurer que le système à tester nommé DUT (Device Under Test).



3.1 Détermination de l'impédance d'entrée d'une ligne Ze à coulisse :

3.1.1 Calibration

Suivre les instructions données pour réaliser une calibration pour mesurer S11-1port dans la bande 480-520MHz

3.1.2 Mesures

1°) Vérification de la calibration : en utilisant la voie 1 (CH1), mesurer S11 (MEAS:S11) et localiser sur l'abaque de SMITH (FORMAT: SMITH CHART) les points correspondants aux charges suivantes : Court Circuit CC, Circuit Ouvert CO et 50 Ω.

2°) Relier le câble de mesure à la ligne à coulisser chargée sur $50\ \Omega$. Mesurer l'impédance d'entrée Z_e (affichage de $R+jX$: MKR--MARKER MODE MENU -- SMITH MKR MENU -- $R+jX$) de la ligne. Cette impédance est-elle indépendante de la longueur de la ligne et en déduire en justifiant votre réponse l'impédance caractéristique Z_c .

3°) La ligne à coulisser est maintenant laissée en Circuit Ouvert. On notera la longueur de la ligne : $l = l_i + x$, avec l_i : longueur initiale et x : longueur variable. Pour une fréquence de 500MHz, tracer la partie réelle R et la partie imaginaire X de Z_e en fonction de la variation de longueur x de la ligne. Comparer avec la théorie.

4°) Préciser pour quelles valeurs de x , notées x_{cc} , l'impédance ramenée à l'entrée est un CC et pour quelles valeurs, notées x_{co} , l'impédance ramenée est un CO. Donner l'écart dx_{cc-cc} entre 2 CC et dx_{cc-co} entre en CO et un CC. Vérifier que dx_{cc-cc} est égal à $\lambda/2$ et que dx_{cc-co} est égal à $\lambda/4$.

3.2 Détermination de l'impédance caractéristique Z_c d'une ligne microruban

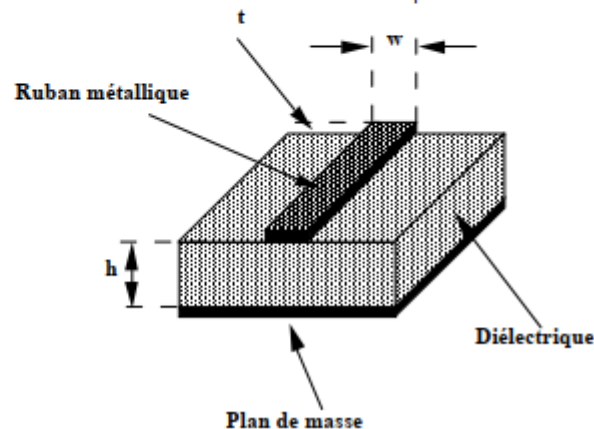
3.2.1 Ligne micro-ruban ou microstrip

Ses caractéristiques sont :

- La vitesse de propagation le long de la ligne v_p .
- L'impédance caractéristique Z_c de la ligne de transmission.

Elles dépendent notamment des paramètres suivants:

- La largeur du ruban W
- L'épaisseur du substrat h
- La permittivité relative du substrat ϵ_r



3.2.2 Calibration

Réaliser une calibration pour mesurer S11-1port dans la bande 300-900MHz

3.2.3 Mesures

On utilise trois lignes micro-ruban de largeur X variable, chacune étant fermée sur une résistance de 50 Ω .

1°) Pour la ligne 1, utiliser la mesure de S11 sur l'abaque de SMITH afin de déterminer rapidement les points pour lesquels Z_e est purement réelle. Mesurer Z_e et les fréquences correspondantes.

2°) A partir de la théorie, expliquer à quoi correspondent les 2 valeurs réelles obtenus. En déduire l'impédance caractéristique de la ligne.

3°) Pour quelle relation entre la longueur de la ligne et la longueur d'onde ces valeurs sont obtenues ?

4°) mesurer la longueur de la ligne et comparer à $\lambda/2$ ou à $\lambda/4$. La vitesse de propagation peut être considérée égale à $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$

5°) Pour ces deux valeurs d'impédance purement réelle, mesurer le coefficient de réflexion Γ (MEAS:S11, FORMAT: LIN MAG) et le TOS (MEAS:S11, FORMAT: SWR) à l'entrée de la ligne. Comparer ces valeurs aux valeurs calculées théoriquement.

6°) Refaire la mesure des Z_e réelles pour les autres lignes et en déduire leur impédance caractéristique.

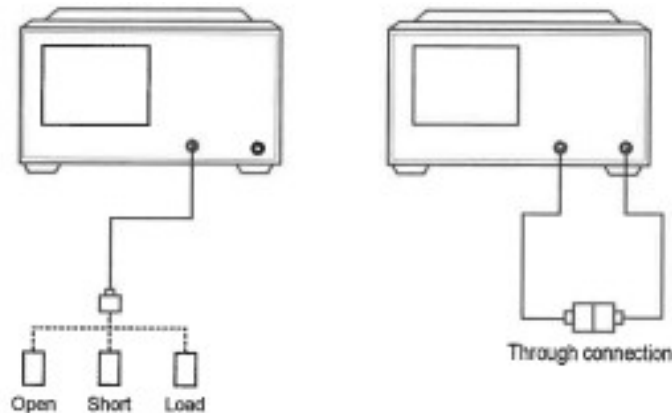
7°) Mesurer les différentes largeurs de lignes W et calculer ensuite les valeurs de Z_c correspondantes à l'aide de l'expression suivante :

$$Z_c = \frac{377}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{h}{w} \cdot \frac{1}{1 + 1.735 \cdot \epsilon_r^{-0.0724} \left(\frac{w}{h} \right)^{-0.836}}$$

Pour l'époxy, on donne $h = 1600 \mu\text{m}$ et $\epsilon_r = 4.9$

CONCLUSION GENERALE : pourquoi est-il important de connaître l'impédance caractéristique d'une ligne ou d'un câble ?

Méthode à suivre pour réaliser la calibration



- Sur l'Analyseur Vectoriel connecter les câbles qui seront utilisés lors des mesures.
- Préciser la **bande de fréquence utile (STIMULUS – Start – Stop)**
- Sélectionner **CAL** puis :
 - **Correction 'on'**
 - **Cal Kit : « tp geii angouleme »**
 - **Calibrate**

Calibration pour la mesure de S11 1-PORT

- Valider l'option **1-PORT Cal**
 - Connecter un Court Circuit CC sur la voie 1 et presser la touche **SHORT**, attendre que les mesures soient effectuées.
 - Remplacer le CC par le Circuit Ouvert à voie 1 et presser la touche **OPEN**.
 - Connecter la charge 50 Ω sur la voie 1 et presser la touche **LOAD**.
- Une fois la procédure terminée presser la touche **DONE**.

La calibration est maintenant terminée.

Calibration pour la mesure de l'ensemble des paramètres S: 2-PORT

Dans le répertoire **CAL**, sélectionner le menu **Calibrate** puis **Enhanced Response**

- Suivre la même procédure que ci-dessus en connectant successivement un Court Circuit puis un Circuit Ouvert et une charge sur la voie 1
- Connecter les voies 1 et 2 ensembles et presser **THRU**
- Une fois la procédure terminée, presser la touche **Done**

La calibration est maintenant terminée.