



Rapport de laboratoire 6

Transmission des ondes électromagnétiques

présenté à

M. Dominique Grenier

| <i>matricule</i> | <i>nom</i> |
|------------------|------------------|
| 910 055 897 | Daniel Thibodeau |
| 910 097 879 | Francis Valois |

Université Laval
4 décembre 2012

Chapitre 1

Laboratoire 6

1.1 Projet 1 : Étalonnage de l'affaiblisseur réglable

Sachant que nous voulons tracer la courbe de son affaiblissement en fonction de la position de la bande longitudinale, il suffit dans un premier temps d'effectuer une mesure de référence pour régler le ROS-Mètre et par la suite effectuer différentes mesures en modifiant la position de la bande longitudinale. Ainsi, à l'aide des méthodes décrites dans le laboratoire #4, nous avons réglé le ROS-Mètre aux niveaux nécessaires pour obtenir des mesures fonctionnelles, c'est-à-dire une mesure entre -40 et -60 dB, en ajustant la largeur de bande minimale et les différents gains au niveau de la source de tension pour la diode de Gunn et de l'entrée du ROS-Mètre.

À l'aide du ROS-Mètre maintenant calibré, il est possible d'effectuer les mesures pour différentes positions de bande longitudinale entre 0 et 3 mm. Les valeurs obtenues sont affichées dans le tableau 1.1. Avec ces résultats, il est possible d'obtenir la courbe d'affaiblissement de l'affaiblisseur réglable. Cette courbe est présentée à la figure 1.1.

En comparant avec les valeurs usuelles fournies dans l'énoncé du laboratoire, nous avons des résultats au-dessus des étendues habituelles pour les distances en déca de 1mm. Toutefois, nous sommes dans les bons intervalles au-delà de ce point. Ceci peut-être dû à des erreurs de lectures lors des premières prises de mesures. Toutefois, les différences restent minimales, ce faisant, on considère leur impact comme faible sur les résultats obtenus.

1.2 Projet 2 : Mesure du SWR et de la longueur d'onde

Les résultats obtenus pour l'expérience sur la mesure des différents SWR demandés sont présentés dans les tableaux 1.2 et 1.3.

1.2.1 Calcul de la longueur d'onde et de la vitesse de propagation pour un court-circuit

Il est demandé d'identifier expérimentalement, au moyen du court-circuit, la longueur d'onde et la vitesse de propagation du signal dans le guide d'onde. Il est possible d'obtenir la longueur d'onde dans le guide à l'aide de deux méthodes : soit la distance entre deux minimums de l'onde ou la distance entre un maximum et un minimum. Tout dépendant des conditions du système, la précision de chacune des méthodes va varier. Mais en principe, comme les mesures que nous effectuons dépendent de la variation de $V(d)$ autour des points

| Position [mm] | Affaiblissement (Lecture ROS-Mètre) [dB] | Affaiblissement réel [dB] |
|---------------|--|---------------------------|
| Référence | -40,8 | 0 |
| 0 | -41,6 | -0,8 |
| 0,25 | -41,9 | -1,1 |
| 0,5 | -42,55 | -1,75 |
| 0,75 | -43,5 | -2,7 |
| 1 | -44,5 | -3,7 |
| 1,25 | -45,75 | -4,95 |
| 1,5 | -47 | -6,2 |
| 1,75 | -48,5 | -7,7 |
| 2 | -50,7 | -9,9 |
| 2,25 | -52,4 | -11,6 |
| 2,5 | -54 | -13,2 |
| 2,75 | -55,5 | -14,7 |
| 3 | -56,7 | -15,9 |

Tableau 1.1 – Résultats obtenus lors de l'étalonnage de l'affaiblisseur réglable

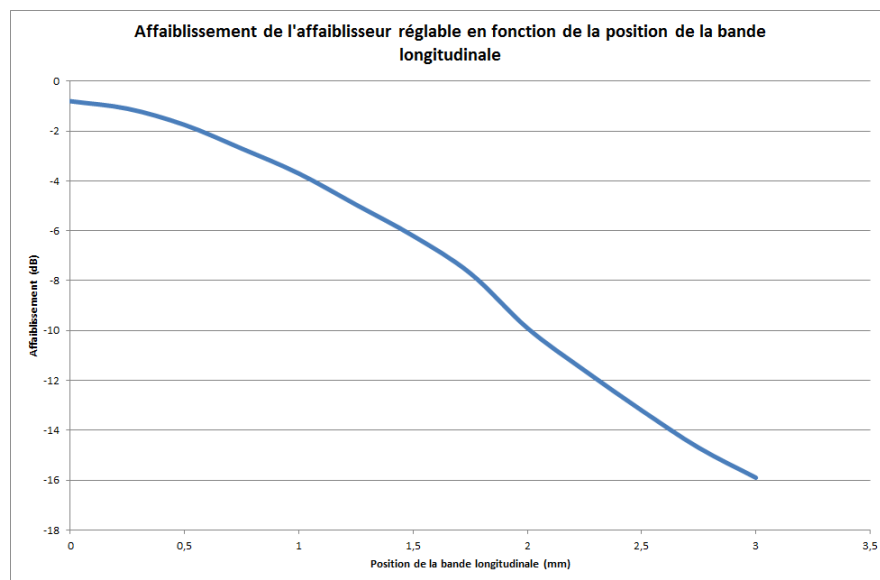


Figure 1.1 – Figure présentant l'affaiblissement de l'affaiblisseur réglable en fonction de la position de la bande longitudinale

d_{min} et d_{max} et que cette variation est plus importante autour de d_{min} , il est plus simple de prendre des mesures précises. C'est pourquoi nous avons utilisé la méthode des minimas.

On sait premièrement que la longueur d'onde est donnée par l'équation suivante :

$$\lambda_f = 2(d_{min_1} - d_{min_2}) \quad (1.1)$$

On sait aussi que la vitesse de propagation dans le guide est donnée par :

$$v_{pz} = f_o \lambda_f \quad (1.2)$$

Où f_o est la fréquence d'opération de l'onde dans le guide qui est dans notre cas située autour de $10.7GHz$.

| d_{min} [mm] | Longueur d'onde λ_f [m] | Vitesse de propagation [m/s] |
|----------------|---------------------------------|------------------------------|
| 36 | | |
| 46 | 0.02 | $2.14 \cdot 10^8$ |
| 56 | 0.02 | $2.14 \cdot 10^8$ |
| 66 | 0.02 | $2.14 \cdot 10^8$ |
| 76 | 0.02 | $2.14 \cdot 10^8$ |
| 87 | 0.022 | $2.354 \cdot 10^8$ |
| 97.5 | 0.021 | $2.247 \cdot 10^8$ |
| 107.8 | 0.0206 | $2.2042 \cdot 10^8$ |

Tableau 1.2 – Résultats obtenus lors des différentes prises de mesures de minimas à l'aide d'une charge en court-circuit

Selon le tableau 1.2, on a une longueur d'onde oscillant entre $20cm$ et $22cm$ tout dépendant de quel minimum nous utilisons. Pour obtenir une meilleure précision, utiliser la moyenne de toutes les longueurs d'onde obtenues est un choix judicieux et ceci donne une longueur d'onde moyenne de $20.51cm$. Par la suite, en utilisant l'équation 1.2 avec cette valeur, il est possible de trouver une vitesse de propagation moyenne de $2.195 \cdot 10^8 m/s$.

1.2.2 Calcul du SWR pour une charge inconnue

Afin de déterminer le SWR, on applique le développement suivant :

$$SWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (1.3)$$

Pour obtenir une bonne précision, nous effectuons le calcul du SWR pour les 3 différents cas de minimums et maximums et ensuite nous utilisons la moyenne de ceux-ci pour obtenir le SWR pour cette charge. Dans notre cas, à l'aide des 3 valeurs, nous trouvons un SWR moyen de 1.33.

| Cas | | Position [mm] | Tension [dB] | SWR |
|-----|---------|---------------|--------------|------|
| 1 | Maximum | 39 | -53.5 | 0.9 |
| | Minimum | 44 | -54.4 | |
| 2 | Maximum | 48.2 | -53 | -0.1 |
| | Minimum | 54 | -52.9 | |
| 3 | Maximum | 60 | -52.9 | 2.6 |
| | Minimum | 65.7 | -55.5 | |

Tableau 1.3 – Résultats obtenus lors des différentes prises de mesures de minimas et maximas à l'aide d'une charge inconnue

1.3 Projet 3 : Impédance d'un affaiblisseur court-circuité

Les données sont présentées au tableau 1.4 pour la méthode des SWR et au tableau 1.5 pour la méthode de ligne à pertes.

Pour trouver les deux positions de la bande longitudinale nécessaire pour l'obtention d'une atténuation de 1.5 et 5 dB, nous avons utilisé une extrapolation polynomiale d'ordre 3 de la courbe obtenue à la première section. Cette extrapolation donne respectivement une distance de 0.444 mm et 1.256 mm pour les cas 1.5 et 5 dB. Pour information, l'extrapolation obtenue est représentée par l'équation 1.4.

$$y = 0.5259 \cdot x^3 - 3.2643 \cdot x^2 + 0.0096 \cdot x - 0.9049 \quad (1.4)$$

1.3.1 Méthode du SWR

| Cas | | Position [mm] | Tension [dB] | SWR | $\bar{\Gamma}_c$ | Déphasage [°] |
|--------|---------|---------------|--------------|------|------------------|---------------|
| 1.5 dB | Minimum | 59 | -57.2 | 6.1 | 0.7183 | -74.708 |
| | Maximum | 66.1 | -51.1 | | | |
| 5 dB | Minimum | 38 | -56 | 2.75 | 0.4667 | -109.805 |
| | Maximum | 56 | -53.25 | | | |

Tableau 1.4 – Résultats obtenus lors des différentes prises de mesures de minimas et maximas pour un court-circuit avec un atténuateur variable

Pour obtenir $\bar{\Gamma}_c$, il suffit de trouver le SWR à l'aide de l'équation 1.4 obtenue dans la partie précédente et par la suite utiliser l'équation suivante :

$$\bar{\Gamma}_c = \frac{SWR - 1}{SWR + 1} \quad (1.5)$$

Pour obtenir le déphasage de $\bar{\Gamma}_c$, deux méthodes sont possibles. La première méthode consiste à choisir un minimum obtenu à la section précédente, de placer la ligne fendue à

cette position et s'éloigner de la charge jusqu'à retrouver un nouveau minimum. Par la suite, en utilisant l'équation suivante, il est possible de déduire le d_{min} réel :

$$d_{min_{reel}} = d_{min_{mes}} - d_{min\#2} \quad (1.6)$$

La deuxième méthode est tout simplement l'inverse de la précédente. Lorsque que la ligne fendue est positionnée sur un minimum obtenu dans la section précédente, il suffit de se rapprocher de la charge jusqu'à trouver un nouveau minimum et utiliser l'équation suivante pour obtenir le d_{min} réel :

$$d_{min_{reel}} = \frac{\lambda_f}{2} - (d_{min\#2} - d_{min_{mes}}) \quad (1.7)$$

Pour les deux cas demandés, nous avons choisi la première méthode qui simplifie les calculs et permet d'éviter les erreurs qui pourraient se glisser lors du calcul à l'aide de la longueur d'onde. Ainsi, dans le cas 1.5 dB, nous avons choisi comme $d_{min\#2}$, une position initiale de 56mm et dans le second cas, une position initiale de 36mm. À l'aide de ces valeurs et de celle obtenue lors de la manipulation, nous trouvons les $d_{min_{reel}}$ suivants : 3mm et 2mm.

Par la suite, lorsque la distance réelle entre deux minimas est connue, il suffit d'utiliser l'équation suivante pour obtenir le déphasage en degré :

$$\xi_c = \frac{720d_{min}}{\lambda_f} - 180 \quad (1.8)$$

À l'aide de la longueur d'onde moyenne calculée plus tôt, soit 20.51cm, il est possible de trouver les déphasages suivants : -74.708° et -109.805°

Finalement, pour trouver l'impédance de charge vu à l'entrée de l'atténuateur, il suffit d'utiliser l'équation suivante :

$$\bar{Z}_c = \frac{1 + \bar{\Gamma}_c e^{\xi_c}}{1 - \bar{\Gamma}_c e^{\xi_c}} \quad (1.9)$$

Ainsi, en utilisant les valeurs précédemment trouvées, on obtient une impédance de charge de 1.2909∠ - 70.75° pour l'atténuation de 1.5 dB et l'impédance 0.7666∠ - 48.31° pour l'atténuation de 5 dB.

1.3.2 Méthode de la ligne à pertes

Le coefficient de réflexion dans le cas de la ligne à perte est donné par l'équation suivante :

$$\bar{\Gamma}_c(l) = (\bar{\Gamma}_c e^{-2Att_{np}}) \angle (\xi_c - 720l_e) \quad (1.10)$$

Où :

- $\bar{\Gamma}_c$ est le coefficient de réflexion du court-circuit, dans notre cas -1 ;
- Att_{np} est l'atténuation de la ligne en népers ;
- l_e est la longueur électrique de la ligne ;
- ξ_c est le déphasage causé par la charge, dans notre cas 180°.

Pour obtenir l'atténuation en népers à partir de l'atténuation en décibel, il suffit d'utiliser la règle de trois suivante :

$$Att_{np} = \frac{Att_{db}}{8.686} \quad (1.11)$$

Pour une atténuation de 1.5 et 5 dB, nous avons respectivement en népers : 0.173 et 0.576.

De plus, pour obtenir la longueur électrique l_e , il suffit d'utiliser l'équation suivante :

$$l_e = \frac{l}{\lambda_f} \quad (1.12)$$

Ainsi, pour une longueur physique de 0.150 m et une longueur d'onde de 0.0205m, nous obtenons une longueur électrique de 7.317λ

En remplaçant dans l'équation 1.10, nous trouvons les deux coefficients suivants pour les deux différents cas :

$$\bar{\Gamma}_c(l)_{1.5dB} = e^{-2 \cdot 0.173} \angle (180 - 720 \cdot 7.317) = 0.70751 \angle - 48.24 \quad (1.13)$$

$$\bar{\Gamma}_c(l)_{5dB} = e^{-2 \cdot 0.576} \angle (180 - 720 \cdot 7.317) = 0.316 \angle - 48.24 \quad (1.14)$$

En utilisant l'équation suivante, qui est la même que tout-à-l'heure mais avec des paramètres modifiés, il est possible de trouver les impédances recherchées :

$$\bar{Z}_c = \frac{1 + \bar{\Gamma}_c e^{\angle \bar{\Gamma}_c}}{1 - \bar{\Gamma}_c e^{\angle \bar{\Gamma}_c}} \quad (1.15)$$

Ainsi, en utilisant les valeurs précédemment trouvées, on obtient une impédance de charge de $2.0921 \angle - 64.68^\circ$ pour l'atténuation de 1.5 dB et l'impédance $1.4966 \angle - 27.64^\circ$ pour l'atténuation de 5 dB.

1.3.3 Comparaison des deux méthodes

Le tableau 1.5 reporte les différentes impédances obtenues dans cette section. Comme nous pouvons le remarquer, les deux méthodes possèdent un grand écart entre leurs valeurs à la même atténuation. Dans un premier temps, pour expliquer cette différence, il faut expliquer la différence fondamentale entre les deux méthodes. La première méthode est basée sur un test physique qui permet de mesurer le SWR et la longueur d'onde directement au point voulu en tenant compte de tous les paramètres ignorés dans la théorie. La deuxième méthode se base sur plusieurs données théoriques comme l'angle de réflexion et le coefficient du court-circuit parfait et néglige complètement la modification de la vitesse phase du système par l'atténuateur (plus l'atténuation augmente, plus la vitesse de phase devient complexe et apporte de plus en plus d'erreurs) et les autres imperfection du guide d'onde utilisé. C'est pourquoi il est tout simplement impossible d'obtenir les mêmes résultats avec les deux méthodes. La première méthode est intéressante si un bon degré de précision est nécessaire et si le montage peut-être testé. La seconde méthode peut-être utilisée pour accélérer les calculs, car nous avons besoin seulement de la longueur physique et des fréquences d'utilisations pour obtenir un résultat.

| Atténuation | Méthode du SWR | Méthode par ligne à pertes |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1.5 dB | $1.2909\angle -70.75^\circ$ | $2.0921\angle -64.68^\circ$ |
| 5 dB | $0.7666\angle -48.31^\circ$ | $1.4966\angle -27.64^\circ$ |

Tableau 1.5 – Impédances de charges selon les deux méthodes pour deux différents cas

1.4 Projet 4 : Impédance d'un iris

Les spécifications comme le SWR, la longueur d'onde et l'angle du coefficient de transmission ont été obtenus de la même manière qu'à la section 2. Pour le SWR, nous pouvons nous servir de l'équation 1.3, pour la longueur d'onde, nous pouvons nous servir de l'équation ??, tandis que pour l'angle du coefficient, nous pouvons nous servir de l'équation ??. Ainsi, en obtenant la moyenne du SWR et de la longueur d'onde pour les 4 cas présentés au tableau ??, il est possible de trouver la charge au bout de la ligne à l'aide de l'abaque de Smith. Dans notre cas, le SWR moyen est de 2.9125, la longueur d'onde moyenne est de 0.02167 m et l'angle moyen est de -115.65.

En reportant tout cela sur l'abaque de Smith, nous trouvons une admittance de $0.92 + 1.09j$. Comme les admittances sont additionnées lorsque placées en parallèle, nous trouvons que l'iris inductif possède une admittance de $-0.08 + 1.09j$.

| Cas | | Position [mm] | Tension [dB] | SWR | Longueur d'onde | Déphasage |
|-----|-----|---------------|--------------|------|-----------------|-----------|
| 1 | min | 36 | -56 | 2.4 | | |
| | max | 44 | -53.6 | | | |
| 2 | min | 47 | -57 | 4 | 0.022 | -144.90 |
| | max | 55 | -53 | | | |
| 3 | min | 58 | -56 | 2.75 | 0.022 | -109.80 |
| | max | 64.5 | -53.25 | | | |
| 4 | min | 68.5 | -56 | 2.5 | 0.021 | -92.25 |
| | max | 76 | -53.5 | | | |

Tableau 1.6 – Résultats obtenus lors des différentes prises de mesures de minimas et maximas à l'aide d'un iris inductif et d'une charge normalisée