

MP32 : Ondes: propagation et conditions aux limites.

Paco MAURER

2013/2014

Bibliographie indispensable :

- ★ Notice pédagogique du banc hyperfréquence. *Mon unique vraie référence, le jour J j'ai pris d'autres livres en cas de problème.*
- ★ GARING, Ondes électromagnétiques, Ellipses. *Explique le fonctionnement théorique du banc hyperfréquence et pourquoi on propage un mode TE et pas TEM. Câble coaxial*
- ★ QUARANTA, Dictionnaire De Physique Expérimentale - Tome 4 : électricité et applications, Pieron. *Bien pour le câble coaxial.*

Bibliographie annexe :

- ★ GARING, Ondes mécaniques et diffusion, Ellipses. *Corde de Melde en cas de trou de mémoire.*
- ★ QUARANTA, Dictionnaire de physique expérimentale - Tome 1 : la mécanique, Pieron. *Corde de Melde en cas de trou de mémoire.*

Remarque : Le plan exposé ici est celui présenté à l'oral de l'agrégation 2013. Il est long, trop long selon le jury mais il permet d'obtenir une excellente note si on réalise les expériences proposées dans le temps imparti. Contrairement à certains montages les incertitudes sont ici relativement élevées (ce n'est pas du tout un problème). **L'usage du banc hyperfréquence est quasi-obligatoire si on souhaite obtenir une bonne note (cf. Jury).** Son fonctionnement est à bien connaître notamment au niveau des polarisations des champs électromagnétiques et du mode de propagation TE_{01} . L'utilisation, si on a bien compris, est extrêmement simple. Je n'utilise pas l'ondemètre du banc dans le montage, je le trouve inutile (il n'apporte rien en terme de précision), mais je l'ai laissé volontairement, ça m'a valu des questions auxquelles je m'étais préparé. Une chose importante à éviter est de se tromper de courbe d'étalonnage. Ça arrive très vite sous stress, elles se ressemblent toutes. D'après le jury s'il faut enlever quelque chose, c'est la corde de Melde. Ils m'ont dit qu'ils l'ont trop vu. J'ai expédié ça en 3 min. Ils ont apprécié.

Table des matières

I	Importance des conditions limites	2
II	Propagation libre	4
III	Propagation guidée	6
III.1	Banc hyperfréquence	6
III.2	Le câble coaxial	7
IV	Impédance caractéristique et réflexion	8
IV.1	Câble coaxial, mesure direct	8
IV.2	Banc hyperfréquence, mesure via le ROS	8
V	Diagramme de rayonnement	9

Remarques du jury

[2012, 2011, 2010] « L'existence de conditions aux limites permet aussi l'apparition de phénomènes de réflexion, de réfraction, diffraction, interférence, propagation guidée... La notion d'impédance caractéristique n'est pas limitée au câble coaxial. »

[2009] « Il n'est pas interdit de penser à d'autres domaines que l'optique. »

[2008] « La notion d'impédance caractéristique n'est pas spécifique au câble coaxial. »

Introduction

Dans les cours de physique on a vu que de nombreux phénomènes de propagation pouvaient se mettre sous la forme d'une équation de d'Alembert :

$$\frac{\partial^2 a}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 a}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Pour résoudre cette équation différentielle il faut lui adjoindre des conditions limites, qui gouvernent l'onde qui se propage.

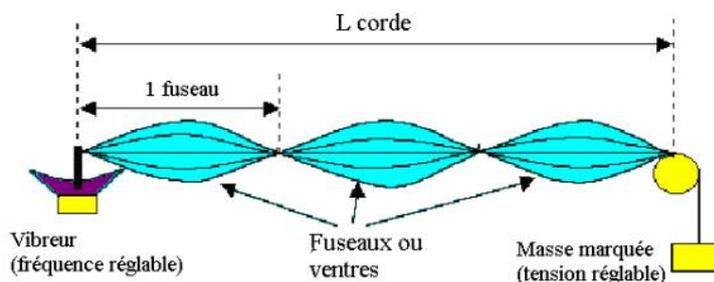
Expérience 1 : Propagation d'une onde dans une corde d'escalade attachée. La condition limite « corde attachée » permet de faire se réfléchir l'onde.



Ce montage s'attachera à en montrer le rôle des conditions limites au travers de 3 dispositifs expérimentaux : la corde de Melde avec la propagation d'une onde mécanique, le câble coaxial et la propagation d'ondes électromagnétiques d'une fréquence de l'ordre de la centaine de kilohertz et le banc hyperfréquence avec des ondes électromagnétiques centimétriques.

I Importance des conditions limites

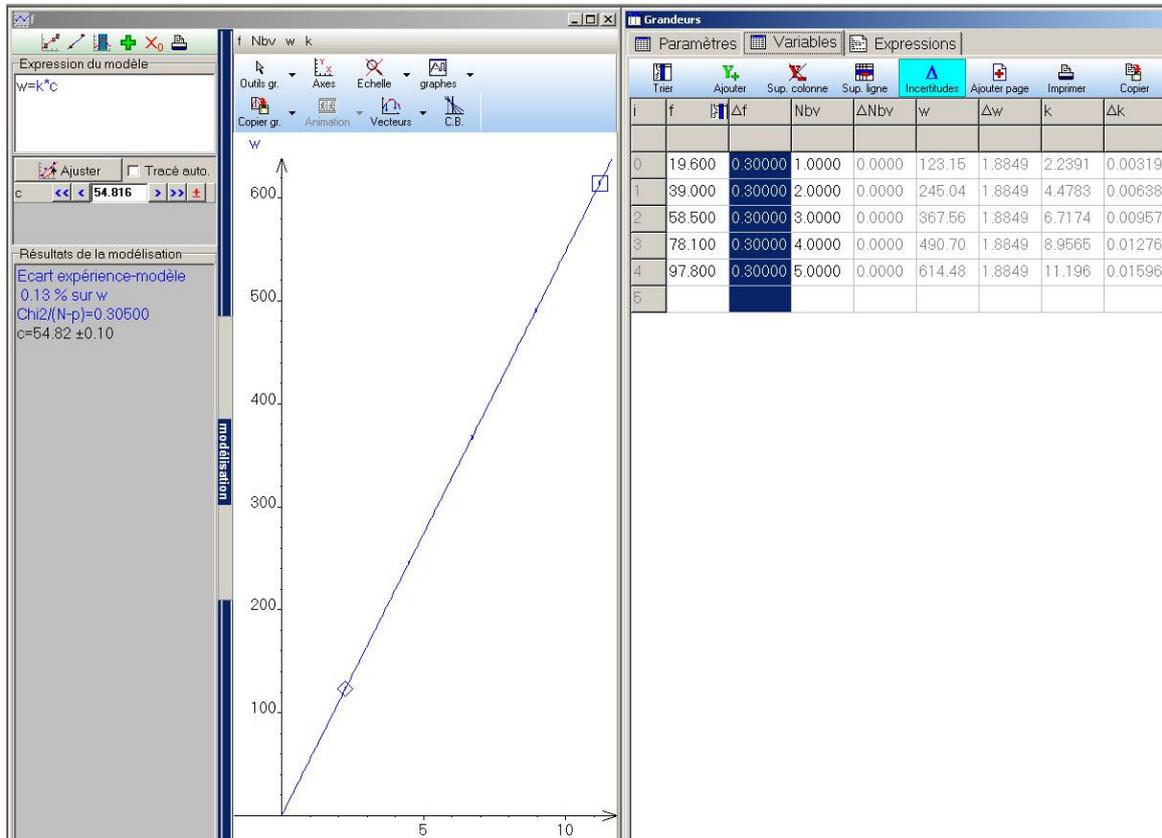
La corde de Melde est un exemple de système où les conditions limites permettent l'apparition de résonances aux fréquences propres.



Expérience 2 : Corde de Melde. Visualisation des fréquences de résonance à l'aide d'un stroboscope. Mesure de la pulsation ω de résonance en fonction du nombre de nœuds n .

La représentation graphique de la pulsation en fonction du nombre d'onde $k = 2\pi \frac{n}{2L}$ est une droite :

$$\omega = kc_{exp} \quad (2)$$



On trouve :

$$c_{exp} = 54.8 \pm 0.1 \text{ m.s}^{-1} \quad (3)$$

On peut comparer la valeur de la célérité expérimentale à celle théorique :

$$c_{theo} = \sqrt{\frac{mg}{\mu}} \quad (4)$$

Où m est la masse du poids accroché à la corde, g l'accélération de la pesanteur et $\mu = \frac{m_{corde}}{L_{corde}}$ la masse linéique de la corde. Ici L_{corde} est différent de L . La principale cause d'incertitude ici est liée à la longueur exacte de la corde (il est difficile de prendre en compte la longueur des nœuds), ainsi :

$$\Delta c_{theo} = c_{theo} \frac{\partial c_{theo}}{\partial L_{corde}} \Delta L_{corde} \quad (5)$$

$$= \frac{1}{2} c_{theo} \frac{\Delta L_{corde}}{L_{corde}} \quad (6)$$

Avec les valeurs $L_{corde} = 165 \pm 2$ cm, $m_{corde} = 0.567$ g et $m = 100.00$ g, on trouve :

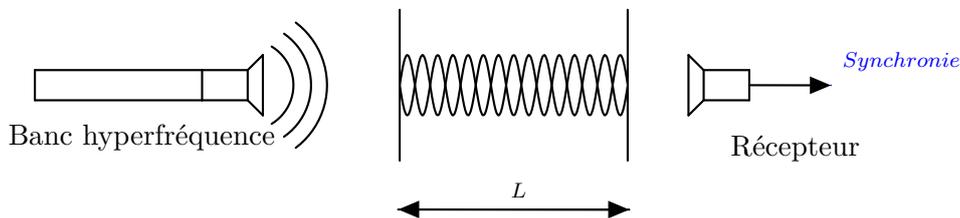
$$c_{theo} = 53.4 \pm 0.3 \text{ m.s}^{-1} \quad (7)$$



On a pu voir jusqu'à présent que les conditions limites dans un milieu non dispersif permettent de « favoriser » des fréquences particulières liées à des modes résonants. On va maintenant s'intéresser à l'utilisation d'une cavité Fabry-Pérot pour l'étude de la propagation des ondes électromagnétiques dans l'air et mettre en évidence l'influence de deux types de conditions limites.

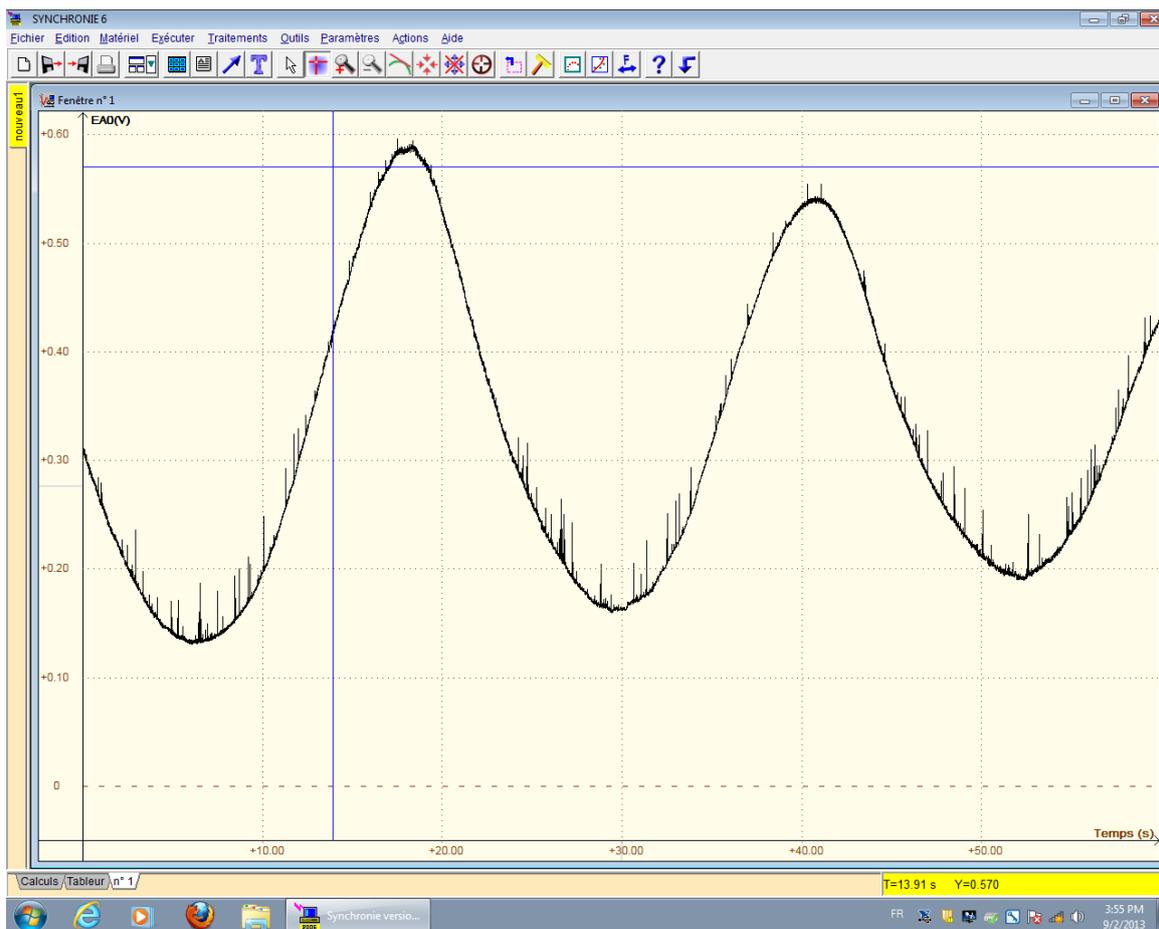
II Propagation libre

On étudie ici la relation de dispersion des ondes électromagnétiques dans l'air grâce au système suivant :

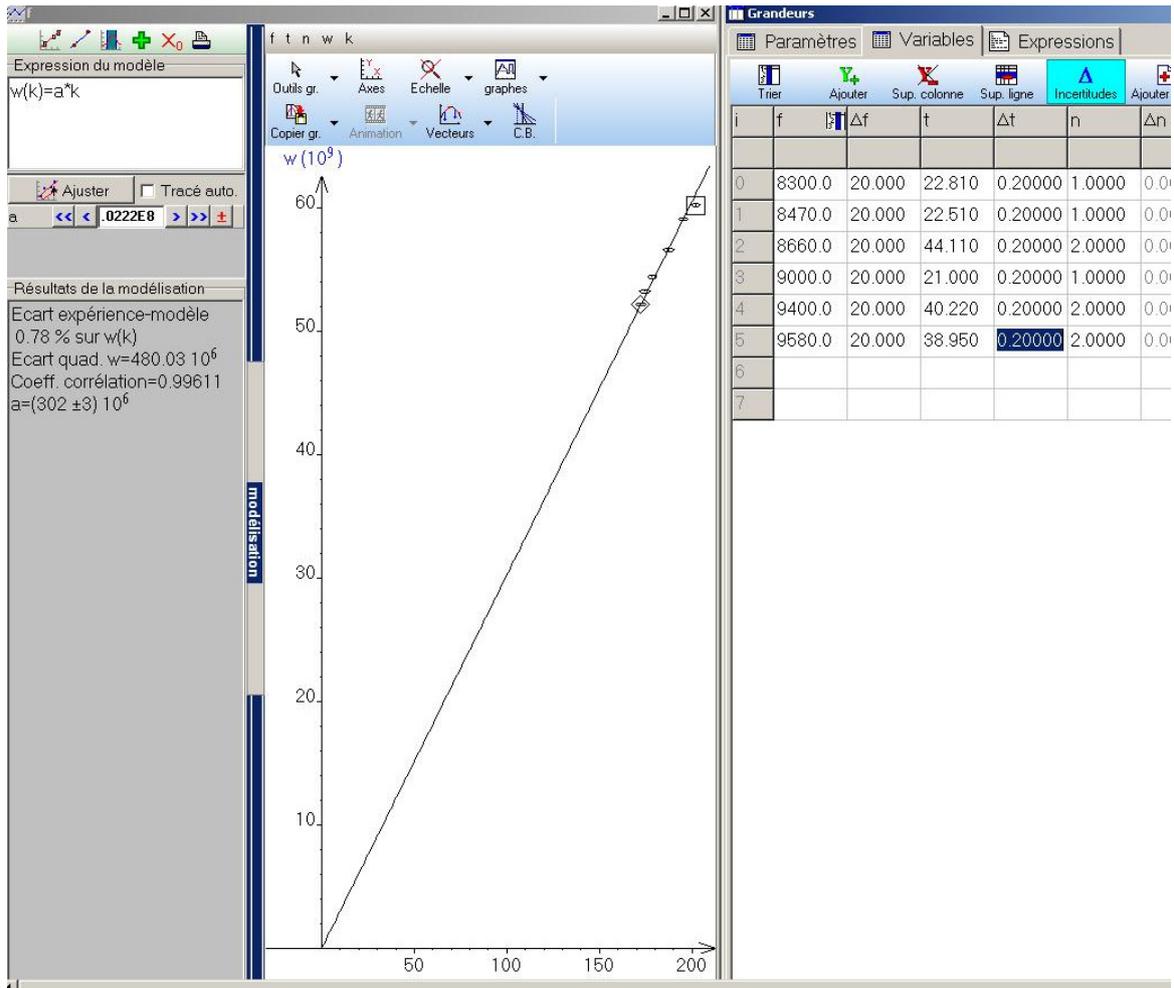


Expérience 3 : Propagation libres des ondes centimétriques. Le banc hyperfréquence sert ici uniquement à générer des ondes électromagnétiques. On peut lire directement sur la documentation la conversion vernier/fréquence. La largeur L de la cavité Fabry-Pérot ainsi formée peut évoluer de façon continue grâce à un moteur. On envoie le signal du récepteur sur synchronie en faisant varier la largeur de la cavité, on visualise une évolution périodique de l'intensité. Les maxima correspondent à une largeur de cavité de résonance. L'écart entre deux maxima correspond alors à une demie longueur d'onde.

On obtient sur synchronie la courbe ci-dessous et on relève l'écart entre deux maxima :



On trouve une valeur expérimentale de la célérité de la lumière, que l'on peut comparer à la célérité de la lumière :



$$c_{exp} = (3.02 \pm 0.03) 10^8 \text{ m.s}^{-1} \quad (8)$$

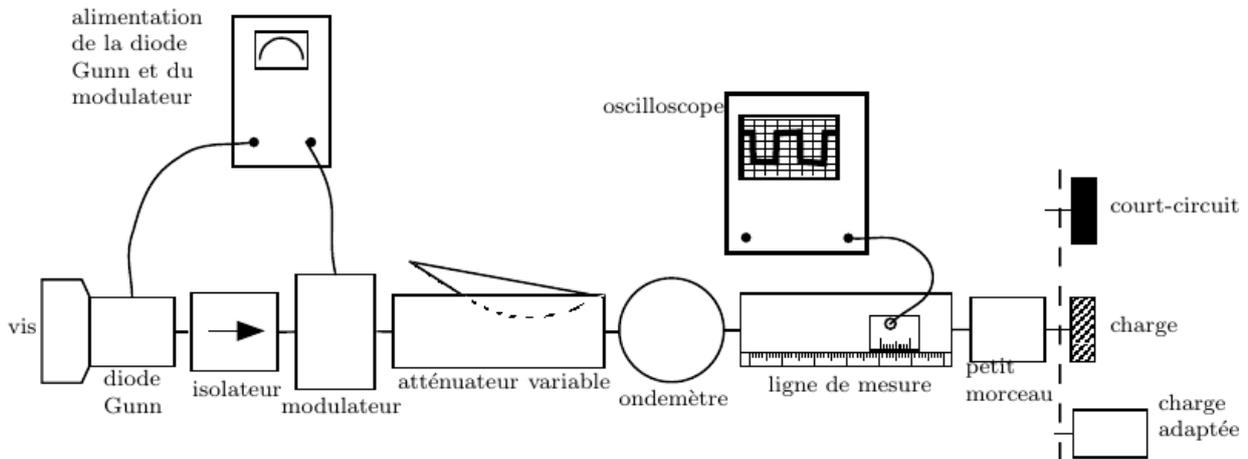
$$c = 299792458 \text{ m.s}^{-1} \quad (9)$$



On a pu constater que le milieu n'est pas dispersif. On peut ainsi envoyer un signal sous forme d'ondes électromagnétiques sans que celui-ci ne soit perturbé. Cependant cette onde, en se propageant dans l'espace, tend à s'atténuer et va dans toutes les directions. Pour transmettre un signal on souhaite souvent avoir une certaine directivité, pour cela, on peut propager l'onde dans un conduit métallique, appelé guide d'onde.

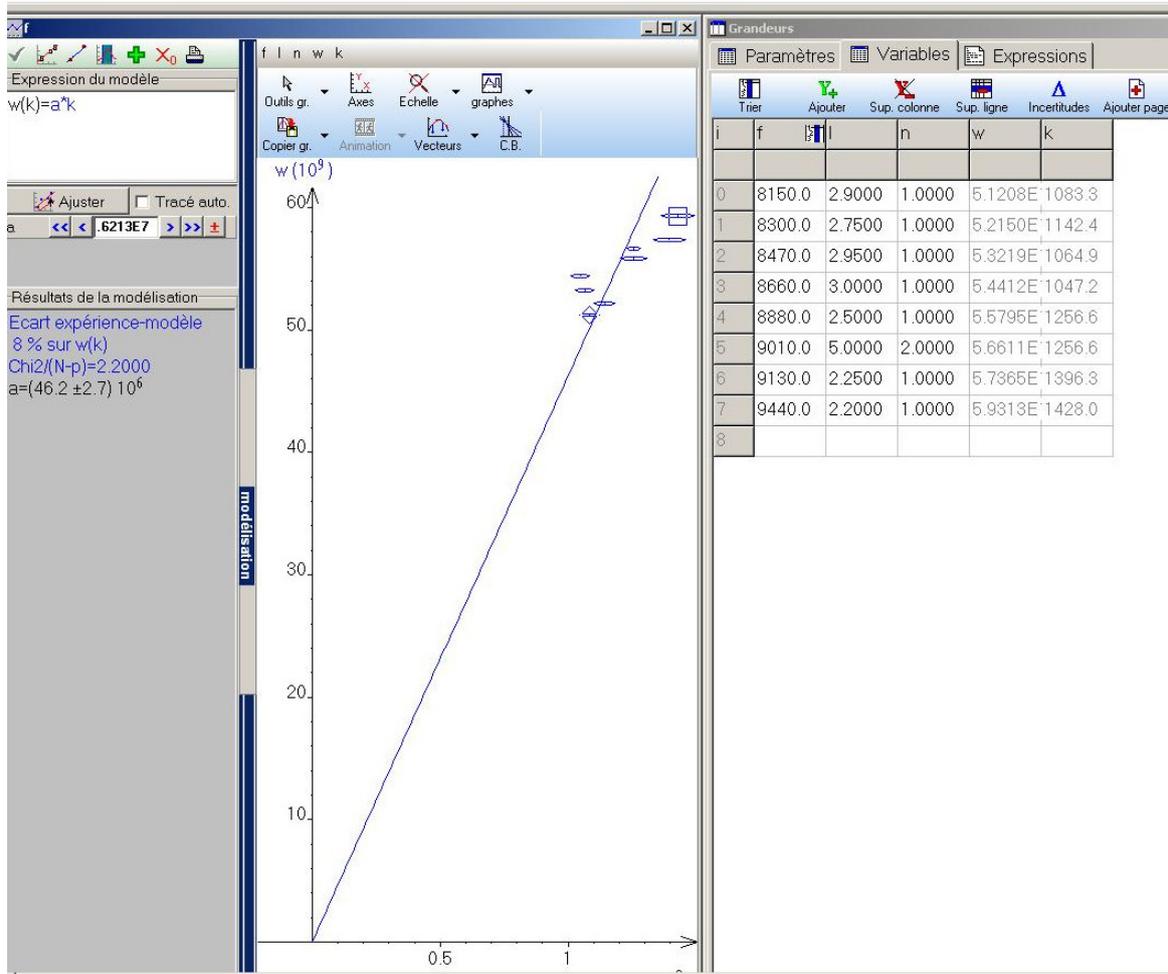
III Propagation guidée

III.1 Banc hyperfréquence



Expérience 4 : Propagation guidée des ondes centimétriques. Pour réfléchir l'onde au mieux, on enlève le cône d'émission et on le remplace par une plaque de métal. L'onde se réfléchit alors totalement sur cette plaque (nous reviendrons plus en détail sur le rôle joué par la charge en bout de banc). L'onde incidente et l'onde réfléchie forment une onde stationnaire. Avec la ligne de mesure, on peut visualiser l'évolution de l'intensité dans le banc. On place l'oscilloscope en mode *roll*, on visualise un maximum. On sort l'antenne jusqu'au seuil de détection (on évite ainsi de trop perturber l'onde qui se propage à l'intérieur de la cavité). On relève la position du maximum et du minimum et on obtient ainsi la valeur d'une demi-longueur d'onde.

De même que précédemment, on visualise la relation entre pulsation et nombre d'onde. Ce coup-ci la relation n'est pas linéaire :



⚠ C'est donc les conditions limites et non pas le milieu qui sont responsables de la dispersion. On peut d'ailleurs calculer cette relation de dispersion en connaissant les dimensions du guide d'onde¹.

III.2 Le câble coaxial

La dispersion dans un milieu fini se retrouve aussi dans le câble coaxial. Dans ce système l'onde électromagnétique est guidée entre l'âme et la gaine.

Expérience 5 : Déformation d'un pulse dans un câble coaxial. On visualise la déformation d'un pulse d'environ 20ns après un aller-retour dans un câble coaxial grâce à un oscilloscope.

⚠ Guider une onde permet de l'envoyer là où on veut, le système devient alors dispersif. On peut cependant s'interroger sur le rôle de la condition limite en sortie. Qu'est ce que cela change de mettre un pavillon ou une sortie libre sur le banc hyperfréquence ou de mettre une charge en sortie du câble coaxial? Comment peut-on transmettre une onde d'un milieu à l'autre?

1. Garing

IV Impédance caractéristique et réflexion

IV.1 Câble coaxial, mesure direct

Expérience 6 : Mesure de l'impédance caractéristique d'un câble coaxial. Lorsque l'on fait varier la résistance, on voit que l'onde est plus ou moins réfléchi. Lorsque l'onde n'est plus réfléchi, elle passe totalement dans la résistance. On fait alors une adaptation d'impédance.

On mesure directement à l'ohmmètre la valeur de la résistance. On trouve :

$$R = 80\Omega \quad (10)$$

On peut comparer cette grandeur à celle trouvée sur la bobine de câble. Pour information, on peut obtenir l'impédance caractéristique de 3 façons :

- La méthode de mesure directe à l'ohmmètre.
- Une méthode consistant à mesurer le temps de propagation et la déformation (Quaranta ou Garing je crois)
- Une méthode qui repose sur la mesure des grandeurs géométriques de la gaine (Garing). J'ai voulu comparer les deux méthodes et voir si ça concordait, je ne l'ai pas fait par manque de temps et parce que les grandeurs du câble n'étaient pas données sur celui que j'ai utilisé. De toute façon ça sort du cadre du montage.



L'impédance du milieu² vers lequel on transmet une onde joue un rôle particulier. Une adaptation d'impédance permet de limiter le retour de l'onde. Pour les ondes centimétriques on est confronté au même problème, une fois guidées on souhaite souvent transmettre ces ondes d'un milieu à un autre.

IV.2 Banc hyperfréquence, mesure via le ROS

En ce qui concerne le banc hyperfréquence, on a vu que lorsque l'on mettait la plaque métallique en bout de ligne (court-circuit), l'onde était totalement réfléchi. On a alors uniquement une onde stationnaire. Lorsque l'on ouvre le banc, une partie des ondes doit être réfléchi et une partie doit être transmise. Pour mesurer ce facteur de transmission on va utiliser le rapport d'onde stationnaire (ROS).

Lorsque l'on déplace l'antenne le long de la ligne de mesure, l'intensité mesurée varie de façon périodique entre un minimum et un maximum. En cas de réflexion totale, l'onde est purement stationnaire et les minima sont nuls. Dans le cas d'une transmission totale, l'intensité mesurée doit être constante. On définit alors le rapport d'onde stationnaire comme :

$$S = \frac{I_{max}}{I_{min}} \quad (11)$$

Où I est proportionnel au module au carré de l'amplitude de l'onde (attention ce n'est pas proportionnel à la tension mesurée, voir plus bas). On peut alors passer directement au facteur de réflexion :

$$\Gamma = \frac{S - 1}{S + 1} \quad (12)$$

Qualitativement on retrouve bien que pour la plaque métallique, $S = +\infty$ et $\Gamma = 1$. À l'inverse pour une onde qui serait transmise parfaitement : $S = 1$ et $\Gamma = 0$.

2. On peut définir l'impédance de façon générale comme le rapport des grandeurs couplées qui créent l'onde.

Expérience 7 : Mesure du rapport d'onde stationnaire par la méthode de l'atténuateur calibré. La réponse de l'antenne à l'amplitude du champ électromagnétique n'est pas linéaire (ni quadratique d'ailleurs) on ne peut donc pas faire de conversion simple entre la valeur affichée à l'oscilloscope et l'intensité du champ électromagnétique régnant dans le banc. Pour pallier à ce problème, on utilise la méthode de l'atténuateur calibré. Tout d'abord on choisit une fréquence de travail correspondant à une des trois pour lesquelles l'atténuateur est calibré. On se place sur un minimum (avec l'antenne de la ligne de mesure) avec l'atténuateur en butée (visualisation avec un voltmètre ou l'oscilloscope en mode *roll*), on relève la tension, puis on se place sur un maximum et on joue sur l'atténuateur jusqu'à faire diminuer la valeur du maximum à la valeur du minimum. Il ne reste plus qu'à lire la valeur sur le vernier et la convertir en atténuation grâce à la table. La technique étant grossière, on ne s'encombrera pas des incertitudes.

On convertit l'atténuation en rapport d'onde stationnaire selon :

$$S = 10^{\frac{G_{max} - G_{min}}{20}} \quad (13)$$

On récapitule les résultats :

	Court-circuit	Ouverture abrupte	Cornet
G_{max}	$+\infty$	10	3.5
G_{min}	1	1	1
S	$+\infty$	2.81	1.33
Γ	1	0.47	0.14

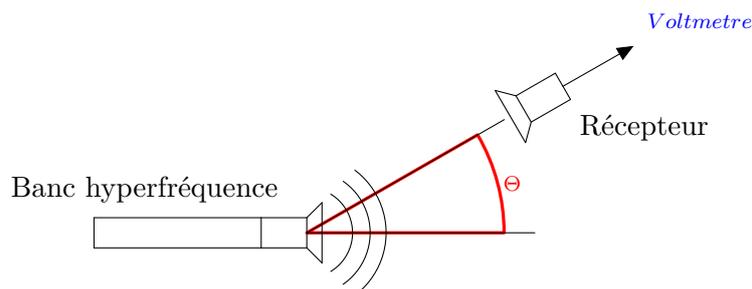
Le pavillon possède un coefficient de réflexion plus faible qu'une sortie abrupte. Il adapte de façon continue les grandeurs géométriques du banc à celle de l'espace infini. On remarque que la longueur du pavillon n'est pas anodine, elle de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde utilisée ici.



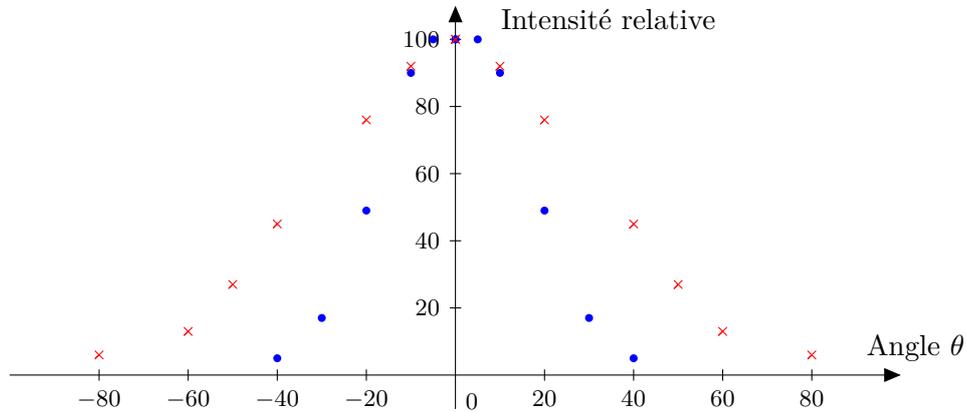
Le pavillon est donc important pour transmettre efficacement une onde, c'est pour ça qu'il est utilisé sur les gramophones par exemple. Cependant lorsque l'on cherche à transmettre une information, on souhaite que le signal soit non seulement intense mais également le plus directif possible. Pour finir on va voir que les conditions limites jouent aussi sur la directivité de l'onde.

V Diagramme de rayonnement

Expérience 8 : Comparaison de la directivité d'une onde électromagnétique en sortie du banc pour deux ouvertures différentes. Ouverture abrupte et pavillon. Pour comparer la directivité de l'onde, on va s'intéresser à la dépendance angulaire de la tension relevée sur un voltmètre en sortie du récepteur. Comme on sait déjà que le pavillon émet une onde plus intense, on normalisera les mesures pour pouvoir les comparer.



Ci-dessous deux séries de mesures. Les ronds bleus représentent l'intensité normalisée pour une émission avec un pavillon et les croix rouges représentent l'intensité normalisée pour une ouverture abrupte.



Enfinement le rôle du pavillon de sortie est double. Non seulement il permet d'adapter l'impédance et de transmettre plus de puissance à l'extérieur du banc hyperfréquence, mais il permet également d'obtenir une bien meilleure directivité, la puissance est concentrée.

Conclusion

Dans ce montage on a montré que les conditions limites pouvaient posséder plusieurs rôles et qu'elles ont une importance prépondérante sur la propagation d'une onde. On a vu que canaliser une onde rend la propagation dispersive même si le milieu ne l'est pas. On a ensuite étudié le rôle de l'impédance et l'importance de son adaptation pour transmettre une onde. Ainsi le pavillon de sortie, non seulement assure une transmission maximale au second milieu mais permet d'augmenter la directivité de la propagation.