

# MP29 - ONDES : PROPAGATION ET CONDITIONS AUX LIMITES

4 juin 2021

Deleuze Julie & Jocteur Tristan

## Niveau : Classes préparatoires

### Bibliographie

- ✦ *Fascicule de TP Electromagnétisme, Partie Matériaux, Quelqu'un-e*
- ✦ *Fascicule de TP Optique, Partie Photorécepteurs, Quelqu'un-e*

### Table des matières

<b>1</b>	<b>Propagation libre</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Propagation guidée</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Notion d'impédance</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Ondes gravito-capillaires</b>	<b>5</b>

## Remarques sur les montages précédents

- **2015, 2016, 2017** : Ce montage est riche, car l'existence de conditions aux limites permet l'apparition de phénomènes aussi variés que la réflexion, la réfraction, la diffraction, les interférences. . . Dans ce contexte, on veillera à bien distinguer ondes stationnaires et ondes stationnaires résonantes. Notons enfin que la notion d'impédance caractéristique n'est pas limitée au câble coaxial. Enfin, la détermination de la fréquence de résonance de la corde de Melde à l'aide d'un stroboscope n'a pas de sens quand la corde est utilisée avec un générateur basse fréquence muni d'un fréquencemètre avec cinq digits.

Le montage est large donc ya plein de possibilités, mais le problème c'est que le combo mesure de la vitesse dans l'air-cuve à onde-corde de Melde ça vole pas très haut, ça avait été reproché à Sylvio. Je pense que ça peut vraiment être rentable d'utiliser le banc hyper-fréquence parce qu'une fois qu'il est monté tu peux faire propagation libre et dispersive dessus. Pour la propagation libre la manip a pas l'air compliquée même si globalement va falloir être calés sur le banc hyperfréquence. Il faut faire une mesure d'impédance donc go câble coax on va pas s'emmerder. Pour le banc hyperfreq cf montage 2009, pour l'impédance cf Pacary. Après je trouve ça bien de faire la cuve à onde pour finir et montrer un autre domaine que l'EM, c'est aussi un autre type de conditions limites c cool.

## Introduction

### 1 Propagation libre

#### 2.5 Cavité Fabry-Pérot dans le domaine hyperfréquence (en seconde lecture)

Cette expérience consiste à réaliser un interféromètre de Fabry-Pérot dans le domaine hyperfréquence. Pour cela, on va utiliser le banc moteur P89.16. L'idée est de mettre en regard deux plaques de plexiglas parallèles, et d'envoyer une onde hyperfréquence sur ce dispositif. L'une des plaques est alors mise en mouvement par le banc moteur tandis que l'autre reste fixe. En sortie de l'interféromètre, un détecteur enregistre sur Latis-Pro le signal. On obtient une alternance de maxima et de minima (la finesse est très mauvaise). La distance entre deux maxima permet de remonter à la longueur d'onde puis à la célérité de la lumière dans le vide grâce à la fréquence de l'onde.

Fixer un cornet au bout du banc hyperfréquence. Mesurer préalablement la fréquence de l'onde à l'aide du fréquencemètre. En sortie du banc, placer une plaque de plexiglas P88 le plus orthogonalement possible à l'axe du banc (  une dizaine de centimètres de la sortie), par exemple en utilisant une potence, des pinces et des noix. Fixer ensuite une deuxième plaque P88 sur le banc moteur (la placer pour cela sur un bras P89.16), le plus parallèlement possible à la première plaque. Placer le détecteur P90.19 après la fin de course du banc moteur, le connecter à Latis Pro. Démarrer le banc moteur dans le bon sens puis démarrer une acquisition. La distance entre deux maxima (obtenue par conversion avec la vitesse du banc moteur, notée dessus) est  $\lambda/2$ . Ici on peut raisonnablement mesurer la distance entre 4 ou 5 maxima pour améliorer la précision de la mesure.

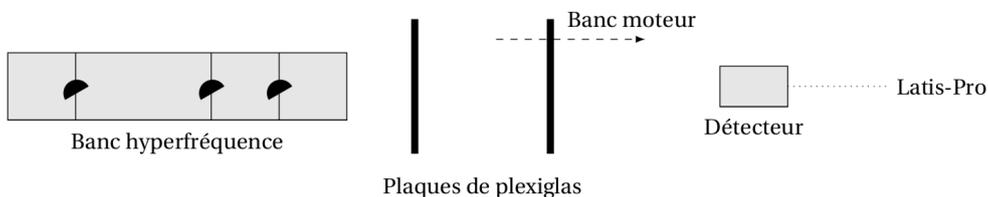


FIGURE 6.4 – Schéma pour la cavité Fabry-Pérot, vue de côté.

Connaissant  $\lambda$ , et puisque l'onde se propage dans l'air avec la relation de dispersion  $\lambda = c/f$ , on peut remonter à  $c$  et comparer à la célérité de la lumière dans le vide.

on montre que le milieu n'est pas dispersif

## 2 Propagation guidée

### 1.1 Montage du banc hyperfréquence

Plusieurs groupes d'éléments composent le banc hyperfréquence :

- ▶ la source de champ électromagnétique : la diode Gunn et l'isolateur;
- ▶ la ligne de propagation et les instruments de mesure : principalement l'atténuateur, le fréquencemètre<sup>1</sup> et la ligne de mesure;
- ▶ la terminaison du banc, c'est-à-dire les charges.

D'autres éléments sont disponibles mais ne seront pas utilisés dans ce TP.

Les différents éléments s'accrochent facilement grâce aux fixations rapides. Construire le banc P89.24 comme présenté en figure 6.2, avec les supports Oritel SUP 100. Les éléments sont dans l'ordre : diode Gunn Oritel OSG 100, isolateur Oritel ISO 100, atténuateur Oritel ATM 100, fréquencemètre Oritel OND 100, ligne de mesure Oritel LAF 100, et pour charge une pièce de métal Oritel CC 100 Short, qui assure une réflexion quasi-totale et ainsi un bon confinement longitudinal. Pour fixer la charge, il faut utiliser un adaptateur pour passer du système de fixation rapide à un système vis/écrou.

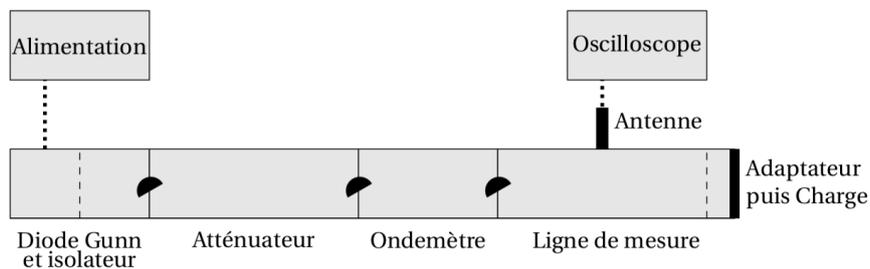


FIGURE 6.2 – Schéma pour le montage du banc hyperfréquence, vue de côté.

La source de l'onde à proprement parler est la diode Gunn. Elle dispose d'une alimentation spécifique. La liaison entre les deux se fait par un câble coaxial. Le seul rôle de l'isolateur est de protéger la diode des ondes en retour : il est indispensable de le placer juste après la diode.

Brancher la diode Gunn à son alimentation P89.22, sortie « Osc. Gunn Output ». Appliquer 10 V.

REMARQUE : En réalité, l'appellation « diode » Gunn est malheureuse puisqu'il ne s'agit pas d'une jonction de semiconducteurs P et N, ce n'est donc pas une diode. On pourra consulter la notice des émetteurs/récepteurs Nova WEC910 P89.25 pour plus de détails, ou aussi [Taillet Dico] pour la description de l'effet Gunn (à « diode gunn »).

La ligne de mesure est un bout de guide fendu en son milieu (le mode  $TE_{10}$  y a son maximum). Une antenne peut alors y être placée. Le champ électrique étant homogène dans la direction verticale, sa position a peu d'importance : la placer en butée convient.

Brancher un câble coaxial entre l'antenne de la ligne de mesure et l'oscilloscope, puis observer le signal en mode Défilement (qui a la forme d'un signal continu). À cause du confinement longitudinal par la charge terminale, on doit observer une onde stationnaire, donc une alternance de ventres et de noeuds lorsqu'on déplace l'antenne le long de l'axe du banc.

Le fréquencemètre est une cavité cylindrique de taille réglable par la vis micrométrique associée. Lorsque la résonance de la cavité (dépendant de sa taille) correspond à la fréquence de l'onde, seule une partie de l'onde est transmise au reste du guide, en particulier à la ligne de mesure. On y détecte donc une baisse du signal. La courbe d'étalonnage permet alors de remonter à la fréquence de l'onde connaissant la profondeur de la cavité.

## 1.2 Réglage et mesure de la fréquence

⚡ Courbes d'étalonnage de l'oscillateur Gunn et du fréquencemètre

Le réglage de la fréquence se fait au moyen de la vis micrométrique de l'oscillateur Gunn. La courbe imprimée sur le banc est indicative mais ne constitue pas une mesure. La mesure de la fréquence se fait à l'aide du fréquencemètre. En pratique, on place l'antenne de la ligne de mesure sur un ventre de l'onde hyperfréquence afin d'avoir un maximum de signal. On tourne ensuite la vis micrométrique du fréquencemètre jusqu'à observer une diminution du signal sur ce ventre. Le fréquencemètre est alors accordé avec l'onde : il suffit de lire la vis micrométrique et de convertir la valeur lue en GHz grâce à la courbe d'étalonnage du fréquencemètre.

Régler l'oscillateur Gunn sur 9 GHz à l'aide de la vis micrométrique. Vérifier à l'aide du fréquencemètre que c'est effectivement la fréquence de l'onde en suivant le protocole ci-dessus. Les courbes d'étalonnage de l'oscillateur Gunn et du fréquencemètre sont disponibles en format A4 avec la notice du banc, il est préférable de s'y référer plutôt que d'utiliser les petites figures sur le banc. Une fois la mesure faite, penser à désaccorder l'ondemètre en tournant la vis micrométrique d'un ou deux tours.

## 1.3 Mesure de la longueur d'onde

La longueur d'onde se mesure grâce à la ligne de mesure. La pièce de métal en bout de guide confine l'onde dans la longueur, donnant naissance à une onde stationnaire. On peut alors obtenir la longueur d'onde à partir de la distance entre deux noeuds (ou ventres) consécutifs.

Sur la ligne de mesure, repérer deux noeuds (ou deux ventres) successifs. La distance entre les deux correspond à la moitié de la longueur d'onde. On attend une longueur d'onde autour de 5 cm. Comparer cette longueur d'onde à celle prédite par la relation de dispersion :

$$\lambda = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\pi^2}{a^2}}}$$

REMARQUE : Pour améliorer la précision de la mesure, on peut chercher à voir trois ou quatre noeuds consécutifs. En pratique cependant, la ligne de mesure est petite et l'onde n'est pas vraiment sinusoïdale, ce qui rend l'observation de plusieurs noeuds difficile.

## 1.4 Mesure de l'amplitude du champ

⚡ Courbes d'étalonnage de l'atténuateur

L'amplitude du champ ne s'obtient pas facilement car on ne connaît pas la réponse de l'antenne en fonction du champ. On se contentera (et c'est suffisant dans toute la suite du TP) de mesurer un rapport d'amplitude, c'est-à-dire l'amplitude d'un champ par rapport à une amplitude quelconque choisie arbitrairement comme référence. Pour cela, il faut utiliser un autre élément du banc : l'atténuateur. Celui-ci dispose d'une vis micrométrique et d'une courbe d'étalonnage.

Sur la ligne de mesure, placer l'antenne sur un noeud. Régler la vis micrométrique de l'atténuateur sur une valeur d'atténuation faible, par exemple 3,5 mm. On note cette valeur  $A_1$ . Elle vaut 0,5 dB d'après la courbe d'étalonnage. Noter la valeur de la tension de l'antenne lue sur l'oscilloscope, cela constitue la tension de référence. Déplacer alors l'antenne, par exemple sur un ventre. Tourner la vis micrométrique de l'atténuateur jusqu'à obtenir à l'oscilloscope la même tension que la tension de référence. Relever la nouvelle indication de l'atténuateur et en déduire l'atténuation en décibels  $A_2$ .

Le champ au ventre est alors  $10^{(A_2 - A_1)/20}$  fois le champ au noeud, par définition d'une atténuation en décibels.

## 2.1 Vérification de la relation de dispersion

La relation de dispersion pour le seul mode excité  $TE_{10}$  est

$$\frac{\omega^2}{c^2} = k^2 + \left(\frac{\pi}{a}\right)^2$$

Pour différentes fréquences entre 8,5 GHz et 9,5 GHz, relever la fréquence  $f$  au fréquencemètre et la longueur d'onde  $\lambda$  avec la ligne de mesure. Tracer ensuite  $f^2$  en fonction de  $1/\lambda^2$ . On doit obtenir une droite de pente  $c^2$  et d'ordonnée à l'origine  $c^2/(4a^2)$ . Mesurer au pied à coulisse la dimension du guide  $a$  pour valider les paramètres d'ajustement.

Ah la c'est dispersif

Ces deux cas de transmission totale et de réflexion totale qui donnent un sens aux termes d'ondes progressives et stationnaires, sont des cas limites d'un cas plus général où une partie de l'onde est réfléchi et une autre est transmise. Ce phénomène est caractérisé par la notion d'impédance.

### 3 Notion d'impédance

**Principe** En électricité, on a une bonne vision de ce qu'est une impédance, c'est le rapport  $Z = \frac{u}{i}$ . On va illustrer l'effet de l'impédance terminale sur un câble coaxial.

**Hypothèses :** Modèle sans perte pour avoir une expression simple de  $Z$  Mise en équation & Hprépa p. 62 On prend le modèle des constantes réparties, on obtient  $Z_c = \sqrt{\frac{\lambda}{\gamma}}$ .

Le but de cette manip n'est pas tant de regarder l'impédance caractéristique du câble coaxial (parce que bon, voilà quoi...) mais discuter de la généralité de la notion, on peut revenir sur la définition, qui est plutôt :  $Z = \frac{\text{cause}}{\text{conséquence}}$ . Et de parler des relations avec les coefficients de réflexion  $r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$  et  $t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$  et en énergie :  $R = |r|^2$  et  $T = \frac{Z_2}{Z_1} |t|^2$  On peut alors revenir sur les ultrasons, où l'impédance est  $\frac{p}{v} = \sqrt{\frac{\rho}{\chi_s}}$  (on définit aussi parfois  $(\frac{p}{Sv})$  pour les tuyaux de section variable. On peut faire des OdG pour l'air ( $3 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ ) et l'eau ( $3 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ ) on voit donc que l'on aura presque pas de transmission entre un émetteur fait pour l'air et l'eau et vice-versa.

#### Mesure de la vitesse de propagation

Prendre la bobine de 100 m de câble coaxial P58.34. Envoyer en entrée un burst sinusoïdal (1 cycle, fréquence 5 MHz, amplitude 5 V, intervalle entre les burst : suffisamment long par rapport au temps de propagation dans le câble, par exemple 1 ms), ne rien mettre en sortie. En regardant à l'oscilloscope le signal à l'entrée du câble, on doit voir le pulse envoyé puis ce même pulse qui a été réfléchi et qui est revenu. Mesurer la durée entre le signal envoyé et le signal réfléchi. Le plus aisé est de prendre comme référence le premier maximum. En déduire la vitesse de propagation dans le câble. On attend environ  $2 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Le pulse réfléchi est déformé : le câble est en réalité dispersif, ce qui n'est pas pris en compte dans notre modélisation.

**Mesure de  $Z$**  L'impédance du câble est purement résistive, dans le sens où  $u$  et  $i$  ne sont pas déphasés. Attention cependant à ne pas conclure trop vite : il n'y a pas d'effet Joule dans ce modèle, puisque nous n'avons pas pris en compte de résistance linéique.

Placer une boîte à décades ou un potentiomètre de  $100 \Omega$  en sortie du câble (résistance  $R$ ). Chercher à annuler autant que possible l'onde réfléchi à l'entrée du câble en réduisant la résistance en sortie. Lorsqu'il n'y a plus d'onde réfléchi, sortir la boîte à décades ou le potentiomètre du circuit et mesurer sa résistance à l'ohmmètre. On attend  $50 \Omega$  (attention, il existe d'autres câbles d'impédances différentes dans la collection).

Le coefficient de réflexion en amplitude est  $r = (Z - R)/(Z + R)$ . À l'annulation de l'onde réfléchi, on a donc  $R = Z$ .

On peut aussi observer de la dispersion dues aux conditions limites pour les ondes mécaniques

### 4 Ondes gravito-capillaires

cf montage surfaces et interfaces.