

MP32 : Ondes : Propagation et conditions aux limites

Julien Ollitrault et Yoram Vadée Le Brun. 2012-2013

Bibliographie :

- Notice du banc hyperfréquence
- Traité d'électricité volume 13 : Hyperfréquence de Fred Gardiol
- Un livre où trouver la vitesse du son : Le handbook (manip 2)
- Notice du générateur de signaux agilent (33220A) (manip 2)
- Cap prépa (manip 3)
- La physique par les objets quotidiens (on y trouve succinctement de quoi expliquer le néon)

Éléments des rapports de jury :

2008 à 2012	La notion d'impédance caractéristique n'est pas spécifique au câble coaxial.
2009	Il n'est pas interdit de penser à d'autres domaines que l'optique.
2010 à 2012	L'existence de conditions aux limites permet aussi l'apparition de phénomènes de réflexion, réfraction, diffraction, interférence, propagation guidée...
2007	Ce montage met traditionnellement en difficulté les candidats qui ne savent pas trop comment aborder la notion d'impédance.

Liste de matériel :

- Ordinateur avec régressi et synchronie
- Manip 1 : Illustration de la propagation
 - Tube néon et générateur de HF (P88.1) avec une noix sur son antenne
- Manip 2 : mesure de la vitesse du son
 - Emetteur et récepteur ultrason sur pied pour banc d'optique + petit banc d'optique
 - Générateur de signaux agilent (33220 A) et oscilloscope
- Manip 3 : impédance caractéristique d'une bobine de câble coax
 - Bobine de câble coax et sa résistance variable + raccords en T et petits câbles coax
 - Générateur de signaux (Agilent) et oscilloscope
- Manip 4 : Réflexion sur une longue corde
 - Longue corde élastique
- Manip 5 : corde de Melde
 - Poids, corde et pot vibrant sur support boy
 - Poulie, noix et pied pour la fixer en hauteur
 - Générateur BF Hameg
- Manip 6 : Effet Fabry Pérot en hyperfréquence
 - Banc hyperfréquence et son détecteur
 - Le moteur linéaire et les deux plaques de verre
- Manip 7 : Rapport d'onde stationnaire
 - Oscilloscope + précédent
- Manip 8 : Relation de dispersion dans le banc
 - précédent

Introduction

- Influence très connue en optique des conditions aux limites : réflexion, diffraction ... C'est grâce à ce phénomène que nous pouvons voir les objets !
- On peut distinguer deux types d'ondes : les ondes nécessitant un milieu matériel pour se propager (ondes mécanique par exemple) et celles qui se propage sans milieu matériel (ondes EM).
- Dans ce montage on va illustrer tout d'abord la propagation libre d'une onde puis nous nous intéresserons dans deux parties différentes à l'influence des conditions aux limites dans le sens de propagation puis à celle dans le sens transverse.

Plan

I.	Propagation libre.....	3
A.	Mise en évidence de la propagation.....	3
B.	Mesure d'une vitesse de propagation	3
II.	Effet des conditions aux limites dans le sens de la propagation	4
A.	Réflexion et transmission.....	4
B.	Ondes stationnaires	4
III.	Guidage : effet des conditions aux limites transverses	7

Prérequis :

- Electromagnétisme
- Ondes (ce qu'on voit en prépa : corde de Melde et câble coax)
- Notion d'impédance
- Acoustique

I. Propagation libre

A. Mise en évidence de la propagation

➤ Manip 1 : qualitative

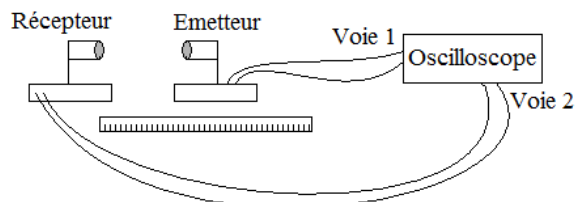
- **But :** Montrer la propagation d'énergie par une onde électromagnétique.
- **Description de l'expérience :** On approche le tube néon de l'antenne de l'émetteur d'hyperfréquence. En tournant la molette (permet de régler la longueur d'onde à une résonance de l'antenne) on arrive à l'allumer alors qu'il n'est pas alimenté électriquement.
- **Théorie :** L'onde hyperfréquence excite directement les atomes de gaz du tube néon ce qui l'allume.
- **Observation :** Le néon s'allume pour une certaine valeur de la molette.
- **Conclusion :** Cet émetteur transmet de l'énergie au néon sans contact on a donc propagation d'une onde électromagnétique.

Transition : Cette propagation n'est pas instantanée et on peut en mesurer la vitesse. On va le faire sur une onde acoustique car les ondes électromagnétiques sont très rapides ce qui complique la mesure de leur vitesse.

B. Mesure d'une vitesse de propagation

➤ Manip 2 : quantitative

- **But :** mesurer la vitesse du son (c'est la vitesse de propagation de l'onde acoustique)
- **Description de l'expérience :** On place l'émetteur et le récepteur le plus près possible sur le banc d'optique. On acquiert les signaux émis et reçus à l'oscilloscope. Ensuite, on cherche les positions où les deux signaux sont en phase. On trace sur régressi la position en fonction du nombre de phases passées. Afin de mieux voir le signal on peut utiliser le moyennage sur l'oscilloscope. (Tout en direct.)



- **Théorie :** Sur l'oscilloscope, entre deux positions où les signaux sont en phase on a λ : la longueur d'onde de l'onde sonore. La pente de la courbe nous donne donc directement la longueur d'onde. On a alors $c = \lambda * f$ pour remonter à la vitesse de propagation de l'onde.
- **Incertitudes :** La principale source d'incertitude vient de la lecture sur le banc d'optique estimée à un mm. La détermination de la phase nulle est une erreur négligeable devant l'erreur de lecture (on procède en cherchant la phase depuis la droite et la gauche et on compare). Enfin, l'incertitude sur la fréquence est estimée à $1\mu\text{Hz}$ d'après la notice du GBF Agilent mais cela semble beaucoup trop faible ...
- **Observation :** On trouve $c = 352,2 \pm 1,6 \text{ m.s}^{-1}$ (résultat indicatif !). Remarque cette valeur est un peu haute on peut donc discuter de la dépendance en température de la vitesse du son.
- **Conclusion :** On a pu mesurer directement une vitesse de propagation d'une onde acoustique.

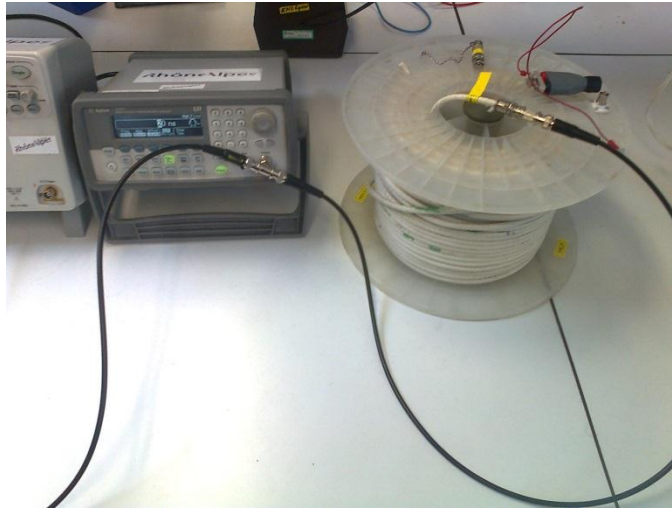
Transition : On voit déjà ici les limites de la méthode : plus la longueur d'onde diminue et plus cela devient compliqué ! Afin de pouvoir mesurer plus finement les longueurs d'ondes plus faibles, on peut utiliser l'effet des conditions aux limites dans le sens de la propagation. Il faut donc premièrement montrer leurs effets ...

II. Effet des conditions aux limites dans le sens de la propagation

A. Réflexion et transmission

➤ Manip 3 : quantitative

- **But :** Montrer la réflexion et le fait qu'elle s'annule lorsque la résistance vaut une certaine valeur qu'on nomme l'impédance caractéristique du câble. Mesure de cette impédance.
- **Description de l'expérience :** Voir schéma. On crée avec le GBF une impulsion brève (20 ns) répétée dans le temps tous les 10 μ s. On regarde à l'oscillo. Attention à ne rien brancher d'autre que la résistance en sortie de la bobine sinon cela modifie son impédance.



- **Théorie :** Cap prépa : coefficient de réflexion en tension en bout de ligne $\underline{r} = \frac{R-R_c}{R+R_c}$ avec $R_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$
- **Incertitudes :** La principale source d'incertitude vient de la détermination de la réflexion nulle : en vrai elle ne s'annule jamais ! Il faut donc trouver le minimum. En répétant la manip plusieurs fois on trouve une incertitude de 1 à 2 ohms.
- **Observation :** On trouve $R = 78 \pm 2 \Omega$. C'est une valeur plus haute que la valeur attendue de 75 ohms mais on trouve tous cette valeur. Ce câble a dû vieillir ou être abîmé ...
- **Conclusion :** On a montré l'existence d'une réflexion et la notion d'impédance caractéristique.

Transition : Une conséquence de ces réflexions est l'apparition d'ondes stationnaires si le milieu est confiné à deux endroits.

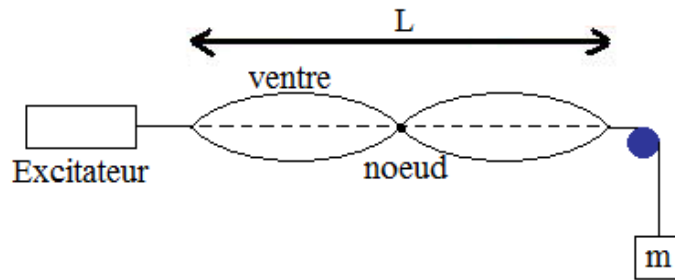
B. Ondes stationnaires

➤ Manip 4 : qualitative

- **But :** Montrer comment la réflexion induit des ondes stationnaires
- **Description de l'expérience :** Attacher une longue corde à un objet fixe. Lancer une impulsion et faire observer la réflexion. Ensuite, commencé en RSF on s'asservit très vite à un mode de la corde.
- **Théorie :** Ondes dans les cordes mais c'est en prérequis.
- **Conclusion :** On comprend ainsi comment vont se produire les ondes stationnaires. Ici, l'expérience n'est pas quantitative : notre bras s'adapte à la corde et ne produit pas du tout un vrai RSF. On va donc passer à la corde de Melde où on maîtrise les paramètres

➤ **Manip 5 : quantitative. Corde de Melde**

- **But :** Illustrer la quantification des modes des ondes stationnaires : quantification en demi-longueur d'onde.
- **Description de l'expérience :** On accroche la corde d'un côté au pot vibrant de l'autre à des masses via une poulie. On excite la corde à des fréquences déterminées grâce au GBF.



- **Théorie :** Traité dans le cap prépa p 579. On doit avoir $n * \frac{\lambda}{2} = L$ où n est le mode. Comme $c_s = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ où T est la tension de la corde et μ sa masse linéique. Cela se traduit par une quantification des fréquences de résonance.
- **Incertitudes :** Pas détaillées pour cette manip ...
- **Observation :** On trouve des résonances pour 33,3 Hz 66,6 Hz et 99,9 Hz pour une longueur donnée. Ça sera différent quand on présentera car la longueur ne sera pas la même. On peut voir les 4 premiers modes car, au-delà, ça se complique puisque le pot a du mal à répondre à des fréquences au-delà de 200 Hz.
- **Conclusion :** On a montré à quoi ressemblait les ondes stationnaires, la distance entre les nœuds qui vaut une demi longueur d'onde et le phénomène de quantification qui lui est dû.

Transition : On va pouvoir utiliser ce phénomène d'onde stationnaire et en particulier des résonances pour mesurer facilement la vitesse de la lumière (sur des ondes hyperfréquences car longueur d'onde à échelle plus humaine !)

➤ **Manip 6 : quantitative, mesure de c**

- **But :** mesurer la vitesse de la lumière dans l'air. (Les ondes hyperfréquences sont des ondes EM et depuis Maxwell on est au courant que c'est la même chose que la lumière.)
- **Description de l'expérience :** On place l'émetteur et le récepteur de chaque côté du Fabry Pérot. Ensuite, on lance l'acquisition sur synchronie (durée 2 à 3 min) et on démarre le moteur.
- **Théorie :** Les deux vitres constituent des lames semi réfléchissantes pour les ondes hyperfréquences. On a donc l'analogue d'un Fabry Pérot optique qu'on chariote. On va donc observer des pic d'intensité du signal lorsque la distance entre les deux plaques est un multiple de la moitié de la longueur d'onde (un aller retour doit correspondre à un nombre entier de longueur d'ondes pour qu'il y ait recouvrement en sortie.) **C'est le phénomène de résonance qu'on vient de voir avec la corde de Melde !** Lien entre vitesse de la lumière (c), vitesse du moteur (v), fréquence temporelle donné par synchronie (ν) : $c = \frac{2\nu f}{\nu}$.
- **Incertitudes :** On a une incertitude sur la fréquence de l'onde émise de 10 MHz : erreur de lecture sur l'abaque la fréquence émise étant d'au moins 8500 MHz ça fait moins de 0.12 % d'erreur. On a aussi une erreur sur la vitesse du moteur de $6 \mu m.s^{-1}$ pour une vitesse de $799 \mu m.s^{-1}$ soit 0,75% d'erreur. Enfin on a une erreur de 0,006 Hz sur la TF numérique de synchronie (l'incertitude de lecture est, elle de 0,0006 Hz donc négligeable) pour une fréquence de 0,04519 Hz soit 13% d'erreur. C'est l'erreur principale et la seule qu'on prendra en compte vu que la formule de propagation statistique des erreurs fait intervenir les carrés des erreurs relatives.

- **Observation :** On observe la figure classique attendue sur une expérience de ce genre en optique. La distance entre deux pics correspond à une demi-longueur d'onde. (Convertir le temps en distance via la vitesse du moteur). Attention il se peut qu'on observe un deuxième pic parasite !
- **Mesures :** On trouve $c = \pm 10^8 m.s^{-1}$. On a fait les mesures en préparation pour différentes fréquences. Rajouté le point sur régressi et fitter (oui c'est anglais mais ça parle !) par une affine : la pente est quasi nulle : le milieu n'est pas dispersif. Rem : la vraie valeur de la vitesse de la lumière est donnée dans la notice du banc hyperfréquence.
- **Conclusion :** On vient de mesurer une vitesse de propagation de manière indirecte en connaissant la fréquence et la longueur d'onde de l'onde. Résultat important : on n'a pas de dispersion.

Transition : Vous avez pu constater que l'émetteur et le récepteur étaient munis de cornet. Pour quelle raison ?

➤ **Manip 7 : qualitative. Rapport d'onde stationnaire**

- **But :** Montrer l'intérêt du cornet : c'est de l'adaptation d'impédance qui permet de mieux transmettre l'onde électromagnétique du guide d'onde à l'air.
- **Description de l'expérience :** On compare les rapports d'onde stationnaire (ROS) pour un court-circuit, la charge adaptée, l'ouverture brusque puis le cornet avec les curseurs sur l'oscilloscope.
- **Théorie :** On définit le ROS comme $S = \frac{E_{max}}{E_{min}}$. Comme $E_{max} = |E_i| + |E_r|$ et $E_{min} = |E_i| - |E_r|$, si on introduit le coefficient de réflexion $p = \frac{E_r}{E_i}$ on a : $S = \frac{1+|p|}{1-|p|}$. Le lien entre ROS et réflexion est ainsi explicité.
- **Incertitudes :** Attention le détecteur n'est pas du tout linéaire ni même quadratique. Si on veut mesurer précisément un ROS il faut utiliser la méthode de l'atténuateur calibré (voir notice). Comme on veut juste une relation d'ordre on pourra se contenter de mesurer le rapport $\frac{V_{max}}{V_{min}}$ sachant qu'il varie dans le même sens que S.
- **Observation :** On classe selon S croissant : Charge adaptée, cornet, ouverture, court-circuit. On peut vérifier qu'avec le cornet il y a beaucoup plus de transmission qu'avec l'ouverture brutale.
- **Conclusion :** Bon donc on a rapidement compris l'intérêt du cornet : sans lui on observe quasiment rien dans le récepteur. Rem : Attention néanmoins : le ROS de l'ouverture brutale n'est pas si élevée que ça il y a aussi la diffraction qui nous embête.

Transition : Pour mesurer ce ROS on a mesuré des maxima et minima dans le guide d'onde car il y règne des ondes stationnaires. Mais dans ce cas pourquoi ne pas mesurer la distance entre ces minima (ou maxima) ? En effet sur l'exemple de la corde de Melde on a vu que cette distance correspond à une demi longueur d'onde. On pourrait donc s'intéresser enfin à ce qu'il se passe dans le banc hyperfréquence lui-même.

III. Guidage : effet des conditions aux limites transverses

➤ **Manip 8 : quantitatif. Relation de dispersion dans le banc**

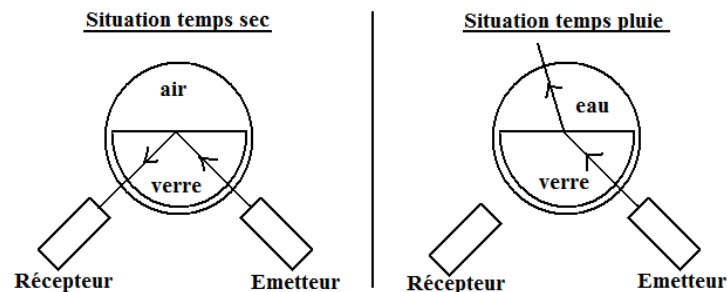
- **But :** Montrer que le guidage induit de la dispersion et la mesurer. Cette mesure permet de remonter à la taille du guide de manière très précise.
- **Description de l'expérience :** on place un court-circuit en bout du banc de manière à avoir le ROS le plus élevé possible. Pour une fréquence fixée par l'association de la cavité résonante et de la diode Gunn, on mesure la longueur d'onde dans le guide via l'antenne de mesure.
- **Théorie :** La relation de dispersion dans le guide est donnée sous la forme :
$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \text{ soit } \frac{1}{\lambda_g^2} = \frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{4a^2} \text{ ou encore } k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2.$$
 La vitesse de phase est donc plus élevée dans le guide que dans le vide et dépasse c. La vitesse de groupe reste, elle, bien sagement plus petite que c.
- **Incertitudes :** On a une incertitude sur la fréquence de l'onde émise de 10 MHz : erreur de lecture sur l'abaque la fréquence émise étant d'au moins 8500 MHz ça fait moins de 0,12 % d'erreur. L'incertitude de mesure de la longueur d'onde est de 0,1 mm (graduations sur le vernier) sur 20 mm au pire soit 0,5%. On va donc prendre en compte les deux.
- **Observation :** On trace (parce qu'on ne sait que faire des droites dans notre vie ...) $\omega^2 = f(k^2)$. On peut ainsi rapidement voir la pulsation de coupure et estimer a facilement.
- **Mesures :** La régression nous donne $a = \pm \quad mm$. La notice nous donne $a = 22,86 \text{ mm}$ et $b = 10,16 \text{ mm}$.
- **Conclusion et transition :** On vient de mettre en évidence l'existence de dispersion dans le guide d'onde alors que le milieu en lui-même on l'a vu n'est pas dispersif !

Conclusion :

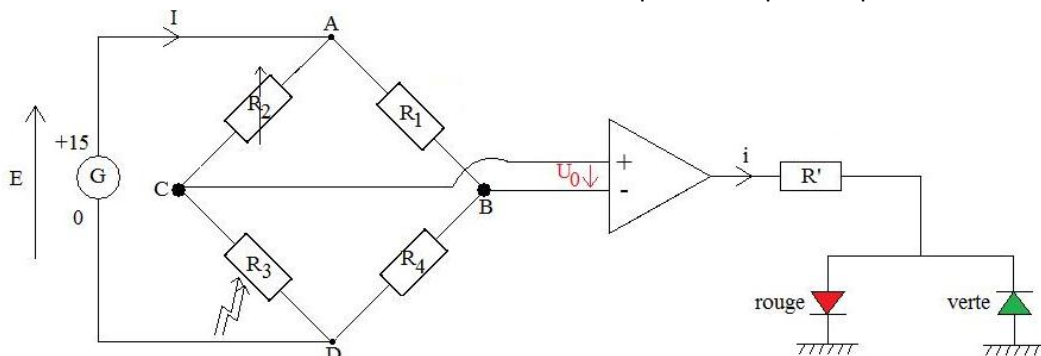
- Dans ce montage on a mis en évidence la notion de propagation et de vitesse de propagation. On a vu l'influence des conditions aux limites dans le sens de propagation qui peut donner naissance à un phénomène de réflexion et du coup d'ondes stationnaires. Enfin, on a vu que le guidage induisait de la dispersion et imposait des conditions sur l'onde guidée.
- On a vu qu'on pouvait utiliser ces phénomènes pour nous permettre des mesures difficiles autrement, avec l'utilisation de l'effet Fabry Péro.

➤ Manip 9 : qualitative. Détecteur de pluie.

- **But :** Montrer que l'étude des ondes et de l'influence des conditions aux limites n'est pas un simple passe-temps de physicien mais a des applications bien concrètes ! Ici on modélise un détecteur de pluie qui permet, dans certains véhicules récents, le déclenchement automatique des essuis glaces. Bien sur on le modélise grossièrement le vrai capteur étant bien plus perfectionné (miniaturisé).
- **Description de l'expérience :**
Le principe général est le suivant :



- On utilise le phénomène de réflexion totale de l'onde lumineuse à l'interface verre-air qui devient réfraction pour une interface verre eau. (D'où les conditions aux limites et sa place dans ce montage.)
- Dans cette manipulation, l'émetteur est un laser et le récepteur est la photorésistance R_3 du pont de Wheatstone ci-dessous. L'information est ensuite traitée par un simple comparateur :



- On règle la résistance variable de manière à ce qu'elle soit plus faible que la photorésistance non éclairée et plus élevée que la photorésistance de manière à ce qu'à la sortie du comparateur passe de +15V à -15V lors de l'ajout d'eau.
- **Théorie :** Il faut placer le LASER dans un angle compris entre 41.8° et 62.5° par rapport à la normale au dioptre. Si on se place en dessous de 41.8° alors on n'aura pas de réflexion totale au départ et, si on se place au-dessus de 62.5° , alors une fois l'eau ajoutée, on aura toujours réflexion totale.
- **Observation :** Lors de l'ajout d'eau dans le cristallisoir (qui simule la pluie sur le pare-brise) la diode rouge s'éteint et la verte s'allume.
- **Conclusion:** ça marche !