

Ondes : propagation et conditions aux limites.

Correcteurs : Jean-Yonel Chastaing¹ et Étienne Thibierge²

Montage présenté le jeudi 20 février 2014

Le présent compte-rendu a pour but de résumer et compléter la discussion qui a suivi la présentation du montage en classe. Bien entendu, il est partiel et partial, et n'est qu'un point de vue qui n'engage que ses auteurs. Rappelons que c'est vous qui présenterez les montages en fin d'année, et que c'est donc à vous de décider de ce que vous voulez en faire.

Extrait des rapports du jury

Je vous rappelle que le préambule du rapport de l'épreuve de montage s'attache à présenter en détails les attentes et exigences du jury. Vous êtes plus qu'encouragés à le lire.

2010 à 2013 : L'existence de conditions aux limites permet aussi l'apparition de phénomènes de réflexion, réfraction, diffraction, interférence, propagation guidée... La notion d'impédance caractéristique n'est pas limitée au câble coaxial.

Commentaires généraux

Le montage présenté a été préparé avec sérieux, et les expériences choisies doivent permettre une présentation relativement complète, et en tous cas de qualité. Un seul aspect mériterait (à mon avis) d'être traité plus en détails : la propagation dans un milieu dispersif, *via* la mesure d'une relation de dispersion.

Des problèmes sur le banc hyperfréquence ont perturbé la fin du montage (arrêté à la relation de dispersion dans le guide d'ondes), mais il est très positif de s'être arrêté pour prendre le temps de conclure posément dans le temps imparti. La discussion a montré une vraie réflexion sur les expériences, ce qui est appréciable.

En revanche, il faut être plus soigneux sur la présentation. Il est indispensable de mieux expliquer les expériences, ce qui veut dire prendre le temps de présenter clairement

- ▷ les motivations qui conduisent à faire l'expérience (« je veux montrer tel effet physique ») ;
- ▷ le dispositif expérimental, en présentant chaque appareil et ses paramètres de réglage (« on alimente le transducteur par un GBF émettant un signal crête de telle amplitude et telle fréquence, qu'on a choisi comme ça parce que ça et ça ») ;
- ▷ la mesure brute ;

▷ l'exploitation complète des résultats, ce qui inclut une valeur numérique, éventuellement une barre d'erreur si elle est digne d'intérêt (parler d'incertitude si on ne mesure qu'un ordre de grandeur est ridicule), et une comparaison à une valeur attendue, tabulée, théorique, ou mesurée par une méthode différente.

Pour une bonne présentation, rien n'est facultatif. En particulier, donner une valeur numérique sans la comparer à quoi que ce soit n'a souvent pas d'intérêt. Ne pas oublier au milieu de tout ça de raconter de la physique, et éviter l'écueil d'une présentation purement technique et « mathématique ».

L'utilisation de la calculatrice est probablement à modérer, car elle est souvent chronophage et source d'erreurs. Au contraire, essayez d'utiliser le plus possible la feuille de calcul de REGRESSI (ou de votre logiciel préféré), qui permet de corriger beaucoup plus simplement les erreurs.

Le choix d'une régression linéaire ou d'une régression affine peut donner lieu à d'interminables discussions. De notre point de vue (nous sommes tous les deux d'accord, mais ça n'engage que nous), si la physique prédit une loi linéaire, que le zéro est dans les barres d'erreur de l'ordonnée à l'origine, et qu'aucune cause physique d'offset n'apparaît, alors une régression linéaire est plus naturelle. Au contraire, si une régression linéaire est manifestement fautive, il faut se poser sérieusement la question de la cause de l'ordonnée à l'origine. Dire qu'il est « aberrant » d'interpréter l'incertitude sur la pente d'une régression linéaire parce qu'on impose le point (0,0) sans incertitude ne nous semble pas vraiment (vraiment pas) fondé.

Retour sur le montage présenté

Introduction

Il est important d'insister sur la diversité et l'universalité des phénomènes ondulatoires, mais il est sûrement possible de le faire de façon un peu plus convaincante. Penser à annoncer dès l'introduction le plan du montage d'une façon qui permette à l'auditoire de bien voir la démarche choisie.

Vitesse du son dans le Dural

Plusieurs bosses étaient visibles sur la réponse du récepteur. Elles peuvent avoir deux origines, ou bien des réflexions multiples entre les transducteurs, l'eau et le Dural, ou bien des ondes de cisaillement dans le bloc de Dural

1. jeanyonel.chastaing@ens-lyon.fr

2. etienne.thibierge@ens-lyon.fr ; <http://perso.ens-lyon.fr/etienne.thibierge>

sur lequel l'onde n'arriverait pas en incidence parfaitement normale. Il est important d'en parler pour montrer que vous maîtrisez tous les aspects de l'expérience.

L'incertitude sur la mesure de vitesse est imputée essentiellement à l'incertitude sur la mesure de la distance L entre les deux transducteurs. Une méthode efficace pour réduire cette incertitude consiste à faire plusieurs mesures pour différentes valeurs de L , et à extraire la célérité d'une régression linéaire appropriée. À défaut de mettre en place cette méthode à chaque fois (vous n'avez pas forcément le temps, et vous n'êtes pas forcément intéressés par la mesure la plus précise possible), vous devez systématiquement l'avoir en tête et la proposer lors des questions.

Le fonctionnement des transducteurs ultrasonores est tel qu'il faut repérer le *début* de l'augmentation d'amplitude et pas le *maximum*. Il s'agit *a priori* d'un cristal de quartz excitant (ou excité par) une membrane, ladite membrane produisant les ondes acoustiques. On exploite ensuite l'effet piézoélectrique pour commander ou lire la réponse du transducteur. Néanmoins, le quartz ayant une résonance aiguë, le régime transitoire a une durée non négligeable à l'échelle qui nous intéresse. Il faut donc repérer le début dudit transitoire, et non pas sa fin. Un argument auquel vous pourriez penser est qu'en repérant les maxima, vous mesurez la vitesse de groupe, mais il se trouve que la dispersion des ultrasons dans l'eau comme dans le Dural est très faible, et ne joue pas sur la forme des signaux.

Câble coaxial

Penser à préciser la vraie nature des ondes se propageant dans le câble. On peut parler d'ondes « électrocinétiques », mais avec des guillemets. Il s'agit d'ondes électromagnétiques guidées, et le câble étant monomode, seul le mode TEM se propage. Ce dernier peut alors être décrit par un modèle électrocinétique.

Pour expliquer l'origine de l'atténuation des pulses réfléchis dans le câble, la dissipation est bien sûr à évoquer (deux origines : conducteurs imparfaits, et isolant imparfait), mais ne pas oublier non plus la (faible) transmission à l'extrémité du câble. La déformation des impulsions est à relier à la dispersion, qui a les mêmes origines que la dissipation dans le câble. Attention à ne pas faire de confusion : le câble coaxial est certes un guide d'onde, mais il est utilisé en régime monomode, l'unique mode étant le TEM. La propagation d'un mode TEM étant non-dispersive (cf. Jackson §8.2, repris dans mes notes de cours §3.5), la dispersion observée n'est pas due au guidage mais au milieu.

La mesure d'impédance caractéristique du câble a toute sa place dans ce montage, mais il faut comparer la valeur numérique obtenue à quelque chose. L'impédance caractéristique s'exprime en fonction des paramètres géométriques du câble (cf. Garing « OEM dans le vide et les conducteurs », repris au §3.4 de mes notes de cours). Dans le pire des cas, il faut au moins mentionner qu'une impédance de 75Ω est celle des câbles coaxiaux de télévision, et qu'il n'est pas surprenant de trouver cette valeur.

3. Nuançons un peu : si jamais le forçage n'est pas harmonique, alors l'onde n'est pas stationnaire mais combinaison linéaire d'ondes stationnaires aux différentes fréquences du forçage ; et si jamais la condition initiale a la forme d'un mode propre (c'est-à-dire un sinus), alors l'onde est stationnaire. Toutefois, ce ne sont pas les cas les plus courants.

Corde de Melde

Préciser clairement la méthode de repérage des résonances : les ventres y sont d'amplitude maximale, et les nœuds sont de vrais nœuds.

D'un strict point de vue formel, il est « déconseillé » de mesurer les fréquences sur l'écran du GBF. Même si la précision est équivalente, il faut utiliser un instrument de mesure pour cela, en l'occurrence un fréquencesmètre (adapté à la fréquence mesurée) ou un stroboscope.

Enfin, en dépit de son apparente simplicité, la physique de la corde de Melde contient un bon nombre de pièges. Les résultats sur les oscillations libres et ceux sur les oscillations forcées ne doivent pas être mélangés, la différence provenant des conditions de bord (au sens mathématique) imposées à la corde. En effet,

- ▷ dans le cas des oscillations libres, l'onde dépend de la donnée d'une condition *initiale*, c'est-à-dire $\xi(x, t = 0)$ à un instant t unique et en tout point x ;
- ▷ dans le cas des oscillations forcées, l'onde dépend de la donnée d'une condition *aux limites*, c'est-à-dire $\xi(x = 0, t)$ en un point x unique et à tout instant t .

Il est donc logique que les résultats ne soient pas directement transposables d'un cas à l'autre. En particulier :

- ▷ Lorsque les oscillations sont forcées sinusoidalement, l'onde est stationnaire puisqu'elle découple espace et temps. Au contraire, lorsque les oscillations sont libres, elle ne l'est pas, mais est une combinaison linéaire d'ondes stationnaires.³
- ▷ Il n'y a pas de « décomposition sur la base des modes propres » ou « d'excitation de plusieurs modes » dans le cas des oscillations forcées harmoniquement, cela ne vaut que pour les oscillations libres. Ce résultat devient « évident » en remarquant qu'un mode propre est caractérisé par la donnée de sa pulsation, alors que dans le cas des oscillations forcées la pulsation est donnée par le forçage : la pulsation des oscillations de la corde ne peut donc pas correspondre à celle de plusieurs modes propres à la fois.

Attention toutefois, j'insiste ici sur ce qui change d'un cas à l'autre, mais il ne faut pas croire pour autant que les deux cas n'ont « rien à voir ». En particulier, l'autre condition aux limites qui impose une extrémité fixe à la corde et qui entraîne l'existence d'ondes stationnaires est la même dans les deux situations.

Banc hyperfréquences

Remarque importante : le banc hyperfréquences part à Saint-Maur **démonté**. Le premier à l'utiliser doit donc le remonter. Ce n'est pas compliqué, les pièces sont numérotées dans l'ordre et la notice explicite, mais mieux vaut être prévenu . . .

La présentation de chaque élément du banc hyperfréquences était bien conduite. Seuls manquaient sans doute une discussion sur l'allure du champ dans le guide (en particulier la polarisation et les deux nœuds du mode TE_{10}), et des détails sur le capteur servant à mesurer le champ

dans le guide. Celui-ci est constitué d'une antenne, donnant donc une réponse linéaire vis-à-vis de \vec{E} , reliée à un cristal non-linéaire tel que la réponse du détecteur complet est finalement quadratique. Une réponse linéaire ne pourrait pas convenir, les hyperfréquences étant trop élevées pour bon nombre d'instruments de mesure.

Des problèmes sur le banc hyperfréquence ont empêché les mesures d'être menées à bien, c'est dommage. Celles qui étaient prévues étaient pertinentes. Il semble en particulier incontournable de mesurer la relation de dispersion dans le guide et de bien dégager l'origine de la dispersion.

La mesure du rapport d'ondes stationnaires est intéressante, mais peut donner lieu à des confusions. En particulier, une différence essentielle par rapport à la corde de Melde est l'absorption de l'onde réfléchie par l'isolateur : au lieu d'avoir deux conditions aux limites strictes, il n'y en a qu'une (à l'endroit où on visse les différentes impédances), alors que de l'autre côté tout se passe comme si le guide était semi-infini. La conséquence directe est que pour une impédance de sortie donnée, le rapport d'onde stationnaire ne dépend presque pas de la fréquence de l'onde incidente. Il n'y a en particulier pas de résonance. Une façon simple de le comprendre est de remarquer que l'élément vissé fixe la position d'un premier nœud, mais que la position des autres est indifférente puisque non contrainte. La faible dépendance du ROS en fréquence vient de l'atténuateur calibré : ce dernier fonctionne de façon analogue à un pavillon, transmettant et réfléchissant plus ou moins l'onde émise par l'oscillateur Gunn. Il renvoie en particulier vers le guide une partie de l'onde réfléchie, mais cet effet est faible lorsque l'atténuateur est ouvert, et pris en compte dans la calibration.

La mesure d'un diagramme de rayonnement est intéressante également, mais pas essentielle. Dans tous les cas, il faut faire l'effort de la relier explicitement à des propriétés générales des ondes.

Questions

Les questions suite à un montage portent quasi-exclusivement sur les protocoles expérimentaux et les mesures que vous avez réalisées. En particulier, vous devez

maîtriser le fonctionnement des capteurs que vous utilisez.

Dans le montage présenté, le banc hyperfréquences aurait très probablement amené des questions. Vous devez être au point sur le fonctionnement de chaque élément, notamment l'antenne servant à faire les mesures. J'imagine aussi que le jury est susceptible de vous poser des questions sur la structure de l'onde électromagnétique à l'intérieur du guide, auxquelles il faut vous préparer.

D'autres choix possibles

Les expériences choisies sont toutes pertinentes, et il nous semble qu'elles permettent de traiter correctement le sujet.

Il n'y a à mon sens qu'un seul aspect qui mériterait vraiment d'être abordé et qui ne l'a pas été, la dispersion due au milieu (ici seule la dispersion due aux conditions aux limites a été vraiment discutée). Une expérience qui l'illustre est la mesure de la relation de dispersion des ondes gravito-capillaires, qui donne accès à la tension de surface de l'eau. Cela permettrait de mieux mettre en avant les deux sources de dispersion.

Un écueil à éviter est de présenter deux fois le même effet physique. En particulier, présenter la corde de Melde et le Fabry-Perot centimétrique est redondant. De même, si vous présentez l'impédance caractéristique du banc hyperfréquences, il n'est pas nécessaire de mesurer celle du câble coaxial, d'autant plus que le jury semble en être un peu lassé.

Conclusion

Le montage présenté est un peu décevant sur la forme, mais positif sur le fond. Il constitue donc une base de travail solide pour la préparation de votre propre montage. Bien sûr, vous pouvez aussi vous référer sans hésiter au montage de démonstration fait par Paco Maurer, disponible sur le portail des études.

Si vous avez d'autres questions, nous restons à votre disposition par mail, en TP, ou dans de futures séances de correction.