

LP n° 27 Titre : Propagation guidée des ondes

Présentée par : Lionel Djadaojee

Rapport écrit par : Samuël Zouari

Correcteur : F. Debbasch

Date : 14/09/18

Bibliographie de la leçon :			
Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Le cours de physique de Feynman - électromagnétisme 2	Feynman, Leighton, Sands	Dunod	1999
Micro-ondes – 1 Ligne, guides et cavités	P.F Combes	Dunod	1996
Physique tout-en-un MP	Sanz, Salamito	Dunod	2004

Plan détaillé
<p><u>Niveau choisi pour la leçon</u> : Prépa 2ème année / L2</p> <p><u>Pré-requis</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> - optique ondulatoire - Acoustique - Électromagnétisme (conducteurs, relations de passage) - Dispersion (milieu homogène) <p><u>Plan détaillé</u> :</p> <p><u>Intro</u> :</p> <p>Déf du guidage des ondes. On se concentre sur les ondes EM, on part des ondes planes</p> <p><u>I. Réflexion d'une onde EM sur un conducteur parfait</u></p> <p>On peut dévier une onde plane EM avec un conducteur parfait. On considère une OPP monochromatique (→ formalisme complexe, E polarisé selon x) Schéma pour étudier la réflexion sur 1 conducteur (plan Oyz, onde dans Oxz) On pose l'onde réfléchie Er, on pose le vecteur d'onde.</p> <p>On cherche à exprimer l'onde réfléchie : Utilisation des relations de passage (continuité de la composante tangentielle de E). On trouve le vecteur d'onde réfléchi.</p> <p>On écrit le champ total $E_i + E_r = E_0 \cdot \exp(j(\omega t - k_z z)) \sin(k_x x)$ Onde progressive (et monochromatique) selon z, et stationnaire selon x.</p> <p>(9')</p>

II. Confinement d'une onde entre 2 conducteurs parfaits

(il rajoute un plan conducteur sur son schéma précédent)

L'onde est réfléchiée successivement par chacun des plans.

Elle garde la même expression ($k_z \rightarrow K_{\text{parallèle}}$)

La condition sur le conducteur doit être exprimée sur le second conducteur : on a une quantification sur k_x (noté k_{perp}) $k_x = n \cdot \pi / a$

Transparent avec les différents n (1, 2, 3) et la variation transverse de E

Ce qui nous intéresse ici c'est k projeté selon la direction z

1) Relation de dispersion

On écrit la relation de dispersion dans le vide $k_{\text{para}}^2 = w^2/c^2 - (n \cdot \pi/a)^2$, $w_{cn} = n \cdot \pi/a$

n implique l'existence de modes de l'onde

Si pour un n donné, $w < w_{cn}$, on a une onde évanescence.

2) Dispersion

vitesse de phase = vitesse des plans équi-phase dans la direction $z = w/k_{\text{para}} = c/\cos \theta > c$
(θ angle de réflexion)

Ce qui nous intéresse c'est plutôt la vitesse de groupe

$$v_g = c \cdot \cos(\theta) < c \\ = c \sqrt{1 - (w/w_{cn})^2}$$

Commentaire sur la dispersion : à n donné, v_g dépend de w (dispersion intramodale), et à w donné, v_g dépend de n (dispersion intermodale)

Revenons sur la relation de dispersion :

transparent avec les différentes valeurs de k_{para} en fonction de w (pour chaque mode), pour $w \rightarrow \infty$ on retrouve l'équation de dispersion dans le vide (pour k_{para})

On voit aussi la disponibilité ou non des mode selon w (plus w petit, moins de mode dispo)

3) Interprétation géométrique

On a regardé des ondes planes qui se réfléchissent sur des « miroirs »

(schéma où l'on projette la distance parcourue $c \cdot t$ sur z , et ça donne $v_g \cdot t$, aussi explication graphique de la vitesse de phase $> c$, et de son caractère non physique, au contraire de la vitesse de groupe)

Transparent où l'on voit que les angles θ sont quantifiés, et que la vitesse de groupe dépend de l'angle θ de réflexion (donc de w) et cela explique la dispersion.

Et pour $\theta \rightarrow 0$ on retrouve une onde plane non réfléchiée, et pour $w \rightarrow w_{c1}$ on a une onde qui ne se propage plus.

(30')

III. Guide d'onde EM

1) Guide d'onde rectangulaire

On confine cette fois l'onde selon 2 directions, et on a propagation selon la 3ème (schéma)

Transparent : la solution précédente est encore valide ! (du fait de relation de passage sur les nouveaux plans)

On peut introduire des ondes dont le champ E est polarisé selon l'autre direction transverse, cela introduit une autre quantification, donc un autre entier m . Et (n, m) définissent ici un mode.

Expérience (analogie acoustique) : explication de l'analogie avec champ de vitesse/pression
Un émetteur piézoélectrique (40kHz) qui émet des paquets d'onde (20 sinusoïdes) à travers un guide cylindrique en PVC, et on observe le signal reçu en bout de guide (on cherche les différents modes cf TP VIII)

2) Application

on utilise ces guides pour des fréquences entre 1 et 10 GHz pour un seul mode (taille du guide quelques cm)

Utilisé pour les radars par exemple : on peut transporter des champs électrique de grande amplitude, donc de forte puissance, jusqu'à 1 MW à 1 GHz

Conclusion :

Approche étape par étape, d'abord la réflexion, puis le confinement selon une direction. On a mis en évidence la dispersion et les différents mode, notamment grâce à une interprétation géométrique.

En termes d'application, les plages de fréquences sont restreinte, pour de plus petite : cable coaxiaux, et fibre pour les plus hautes

Questions posées par l'enseignant

- dispersion malgré la propagation dans le vide, pourquoi ? Un mode différent implique plus de réflexion donc dispersion
- champ électrique de grande amplitude...par rapport à ? C'est la puissance qui est pertinente
- quel lien entre puissance et amplitude ? On écrit le vecteur de Poynting (question sur sa définition : puissance surfacique) on prend le flux à travers une surface, on en déduit la puissance.
- Parler du champ magnétique ? Choix de pas l'évoquer pendant la leçon, on peut le calculer avec les équations de Maxwell, on peut d'ailleurs s'en servir pour calculer le vecteur de Poynting.
- quel direction a le champ B ? dessin sur le guide rectangulaire (c'est technique)... l'enseignant recommande de le faire sur le guide plan-plan d'abord. L'idée est que pour E transverse, B a deux composantes, dont une selon la direction de propagation. Lionel cite donc les modes TE (transverse électrique), et il existe également des modes TB.
- existe-t-il d'autres modes ? Oui parfois des modes TEM
- question sur la manip : caractéristiques des éléments, fonctionnement de l'émetteur.
- sur la transition EM-acoustique : ok pour l'équation d'onde sur P et v, mais quelles sont les équivalences entre les grandeurs vectorielles de l'onde acoustique et de l'onde EM ? l'analogie ne marche pas si bien, c'est plus compliqué au niveau des conditions aux limites [conseil de l'enseignant, faire un transparent pour expliquer ça mieux, la manip avec le câble coaxial est plus bateau mais évite ces problèmes]
- question obligée sur les autres domaines, ici ce serait tombé sur l'acoustique ou l'hydro, il faut y être prêt.
- sur le mot « quantification », est-ce la même physique que celle derrière la quantification en physique quantique ? Équations de Schrödinger avec des conditions aux limites, mais ici on quantifie le vecteur d'onde, en méca Q c'est une particule dans une boîte, et ici aussi (c'est un photon).
- nombre quantique du photon ? Photon caractérisé par λ et..., [aide de l'enseignant : un électron par exemple c'est qdm et spin, un photon a une hélicité, i.e la polarisation.]
- sur la polarisation ? ici polarisation linéaire, c'est une propriété de la lumière qu'on peut mettre

en évidence avec des matériaux spéciaux.

[question ouverte est-ce qu'on peut faire du guidage avec la polarisation?]

- onde réfléchi a même pulsation que l'onde incidente, pourquoi ? Il expliquer

- vitesse de phase et de groupe : la $v_{\text{phi}} > c$ « mais c'est pas grave », alors que $v_g < c$ « transporte l'info et l'énergie » [techniquement c'est parfait c'est le dogme de l'inspection générale], mais question : peut-on prouver ce second point ?

On regarde le paquet d'onde : on développe $k(\omega)$ autour de la pulsation centrale (v_g apparaît), et on voit la progression à v_g

En fait on ne peut pas dire $v_e = v_g$ rigoureusement, ça marche souvent mais il faut le redémontrer au cas par cas.

- Parfois : $v_g > c$, est-ce que ça infirme la relativité ? Non

- [discussion de l'enseignant Quel est le bon concept ici ? La vitesse qui est toujours $< c$? Signal velocity : vitesse d'un heavyside, et là ce serait $< c$, mais il faut pas trop en parler, sauf si le jury connaît le truc et nous attaque dessus]

Commentaires donnés par l'enseignant

- Autant que possible faire des leçons qui reste dans le programme de prépa, le mieux possible, et être prêt à répondre à des choses compliquées pour les questions.

- le cœur de la leçon c'est bien le guide d'onde EM rectangulaire, avec éventuellement un peu de cable coaxial (la fibre c'est limite, soit c'est la même chose, soit on fait des choses plus poussées et là c'est plus de l'optique et c'est du haut niveau) et parler du champ B un peu quand même.

- Se méfier avec les ondes acoustiques, c'est une boîte à questions pas évidente, on peut l'ouvrir mais faut être prêt

- La direction de propagation qu'on a pris n'est pas la vraie direction de propagation de l'onde (qui ne nous intéresse pas)

- interprétation géométrique : bof, c'est une appréciation personnelle, mais il faut quand même voir ce que ça apporte concrètement, qu'est-ce qu'on peut en tirer ?

- impédance : plutôt ne pas en parler pendant la leçon, mais on peut avoir une question dessus, donc il faut être prêt.

- émetteur/récepteur : on va avoir des questions dessus, donc idem être prêt (histoires d'impédance)

- l'originalité : faut pas trop conter dessus, on surprend surtout par le fait qu'on fait les choses bien comme il faut, les 5 % d'originalité qu'on se permet il faut les cadrer très bien. Parce que si plein de gens font des plans similaires, le faire bien c'est loin d'être évident et c'est déjà largement suffisant (beaucoup de gens se plantent sur des choses convenues).

Partie réservée au correcteur

Avis sur le plan présenté : OK

Concepts clés de la leçon : guide d'onde EM, ondes TE et TB

Concepts secondaires mais intéressants : guidage acoustique, coax.

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) : coax., guidage acoustique

Points délicats dans la leçon : comparaison EM/acoustique. Rendre la leçon atrayante.

Bibliographie conseillée : Jackson, par exemple.