LP00 – Titre

29 juin 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

Niveau :

Commentaires du jury

Bibliographie

✍ *Le nom du livre*, **l'auteur** [1] ⟶ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

Prérequis

➢ Optique géométrique

➢ EM dans le vide

➢ corde de Melde.

➢ Relations de passages EM

➢ Conducteur parfait

Expériences

☕ Biréfringence du quartz

Table des matières

1 Approche phénoménologique du guide d'onde avec la fibre à saut d'indice **3**
- 1.1 Condition de confinement : approche géométrique . . . 4
- 1.2 Condition de propagation, approche interférentielle . . . 4
- 1.3 Dispersion et effets . . . 5

2 Guide d'onde électromagnétique **6**
- 2.1 Modèle du guide d'onde plan-plan . . . 6
- 2.2 Structure du champ électromagnétique . . . 6
- 2.3 Etude d'un mode transverse électrique . . . 7
- 2.4 Dispersion . . . 8
- 2.5 Aspect énergétique . . . 8
- 2.6 Le mode TEM . . . 8

3 Quelques guides d'onde utilisés en télécommunications **9**
- 3.1 Guide rectangulaire . . . 9
- 3.2 Câble coaxial . . . 9
- 3.3 Fibre optique (si le temps) . . . 10

4 Commentaires **12**

Préparation

Biblio :

- ma fiche manuscrite onde guidées 3 (jusqu'à la fin)
- Polyerge
- HPrepa, ondes.
- Taillet : fibre optique, culture et odg.
- Garing
- Complément : BUP 742, R. Moreau, Propagation guidée des ondes acoustiques dans l'air

Préparation : Suivre largement Polyierge et compléter par des odg (cf. tableau en jpg, wikipedia ?), voir Taillet, Hprepa. Il faut travailler la présentation du III. Prendre les schémas sur le Polyierge.

Plan :

Manip : QI dans un guide de lumière coudé ? banc hyperfréquences pour le guide carré ?

Passage : Il faut aller vite sur l'aspect géométrique, le coeur de la leçon est de discuter du modèle EM. Insister sur les messages clés du guidage : quantification, fréquence de coupure.

Questions : jeter un coup d'oeil sur les guides acoustiques (en acoustique, on a un mode de plus car , guidage non-linéaire (propagation de solitions), analogie avec la mécanique quantique (relation dispersion électron libre $E = \hbar^2 k^2/2m$, effet du confinement), effet Casimir (moins de photons virtuels entre les plaques à cause de la condition $L = n\lambda/2$, donc supression des photons virtuels à l'extérieur), tout sur le câble coaxial (adaptation d'impédance, comment mesurer Z, c) Dans un guide acoustique, les conditions limites portent sur la vitesse normale v_n donc (éq. Euler) sur le gradient de (sur)pression ($\vec{\nabla} p_1$) donc dans une géométrie simplement connexe (guide rectangulaire) si $(n, m) = (0, 0)$, on peut quand même avoir $p_1 \neq 0$ et donc un mode "TEM", alors que ça n'aurait pas été possible en électromagnétisme. Conclusion : les CL d'un guide acoustique portent sur l'annulation gradient de p_1 donc on peut toujours avoir $p_1 = cte \neq 0$ comme mode qui se propage.

Introduction

Télécommunications Nous avons étudié précédemment le caractère propagatif des ondes dans différents domaines de la physique. Cette propriété fondamentale est utilisée aujourd'hui pour le transport de l'information, notamment dans le domaine des télécommunications. Ce transport se fait majoritairement grâce aux ondes électromagnétiques car leur vitesse de propagation est rapide (en comparaison avec des ondes acoustiques par exemple).

Propagation guidée : dilution sphérique Les ondes se propageant dans l'espace libre ont une amplitude et une énergie qui décroissent à grande distance par simple étalement dans l'espace, en l'absence de toute absorption. Par exemple, l'amplitude des ondes sphériques décroît comme 1/r et leur densité locale d'énergie comme 1/r2. Cela rend leur usage pour transporter de l'information à grande distance assez peu pratique. *On sait quand même faire des choses très efficaces : la sonde Rosetta qui étudie la comète 67P/Churyumov–Gerasimenko envoie des informations sur Terre alors que nous en sommes à plus de 400 millions de kilomètres.*

Propagation libre d'une onde sonore
BUP 742, p.385 ou Quaranta I, p. 467 (Ultrasons) On utilise un couple émetteur récepteur ultrasons Jeulin (P.73.23) à 40 kHz : à 2m, sans tuyau, quasiment aucun signal.

Il y a atténuation. C'est pourquoi la propagation libre, ici illustrée avec des ondes ultrasonores, n'est utilisée pour le transport de l'information avec des ondes em que sur des courtes distances. Ondes sonores ici non ? Et pour les ondes em, portée des ondes radio ? je dirai 10-20km mais je suis pas sûr

Solution : guide d'onde Des dispositifs matériels ont donc été développés pour permettre de guider ces ondes, par exemple les fibres optiques, permettant leur propagation avec une amplitude suffisante sur des distances beaucoup plus grandes.

Propagation guidée d'une onde sonore
BUP 742, p.385 ou Quaranta I, p. 467 (Ultrasons) On utilise un couple émetteur récepteur ultrasons Jeulin (P.73.23) à 40 kHz. Avec un tuyau de faible diamètre (<5mm). MAIS : avec un tuyau de plus grand diamètre (25mm) on voit tout un tas de nouveaux signaux qui arrivent. . . Le signal est donc déformé. Peut-on comprendre l'apparition de ces nouveaux signaux ? Peut-on toujours les éviter ? Bien entendu, on ne se restreindra pas à l'acoustique car la plupart des signaux que l'on transmet sont plutôt des ondes électromagnétiques ou des signaux électriques.

Fontaine de lumière
On montre la vidéo : https://youtu.be/iwsLBXW46Uc?t=13

Objectif L'objectif est d'étudier les conséquences de ces dispositifs de guidage sur la propagation. Nous commencerons par mettre en évidence la phénoménologie associée à la propagation guidée sur un modèle rudimentaire de fibre optique. Nous passerons ensuite à une approche quantitative, mais toujours sur un système très simple, en étudiant le guidage d'une onde électromagnétique par deux plans conducteurs. Puis nous appliquerons les principales idées ainsi dégagées à un autre type d'onde, les ondes acoustiques, pour décrire leur guidage par un tuyau sonore. Pour terminer, deux compléments sont proposés. Nous nous intéresserons dans un premier temps au câble coaxial, où nous retrouverons le modèle des constantes réparties par une approche électromagnétique, avant de présenter des démonstrations générales sur la structure des modes d'un guide d'ondes électromagnétiques. *On pourrait parler du guidage des ondes acoustiques mais comme ce n'est plus utilisé en télécommunication, on fait le choix ici de ne pas en parler.*

1 Approche phénoménologique du guide d'onde avec la fibre à saut d'indice

✍ Thibierge, section 3.1 "Phénoménologie"

L'objectif de cette partie est de dégager les propriétés du guidage des ondes, avant de les formaliser quantitativement dans la deuxième partie.

1.1 Condition de confinement : approche géométrique

Système Commençons par un modèle rudimentaire de fibre optique, où la géométrie est simplifiée au maximum. On considère une fibre optique à saut d'indice avec un indice n_1 dans le coeur et n_2 dans la gaine, tels que $n_2 < n_1$. On montre un schéma

Hypothèses Dans cette sous-partie, on se place dans le cadre de l'optique géométrique : la lumière est modélisée par des rayons lumineux, obéissant aux lois de Snell-Descartes. On fera une modélisation électromagnétique plus fondamentale plus tard.

Condition de confinement L'optique géométrique nous dit que pour qu'un rayon lumineux se propage sans sortir de la fibre, il faut être en condition de réflexion totale. Donc, il faut que l'indice du coeur soit plus grand que celui de la gaine et il faut :

$$\cos\theta > \frac{n_2}{n_1} \tag{1}$$

On ne peut faire rentrer des angles d'incidence faibles. **ODG:** Pour une fibre industrielle le coeur est en silice $n_1 = 1,456$ et la gaine en silicone avec $n_2 = 1,410$, avec $d_{gaine} = 125\mu$m, $d_{coeur} = 10\mu$m, et $\theta_{lim} = 14°$. On va justifier pourquoi Δn est petit avec la limitation de débit. Il y a aussi une condition d'entrée, qui va limiter le nombre de modes, mais on ne s'y intéresse pas

Message

L'utilisation d'interfaces (de conditions aux limites) judicieusement choisies permet le guidage d'une onde, c'est-à-dire son confinement dans une région restreinte de l'espace et sa propagation dans une direction donnée.

Cependant, ce n'est pas parce qu'une onde est confinée qu'elle peut se propager.

1.2 Condition de propagation, approche interférentielle

Modélisation ondulatoire On se place maintenant dans le cadre de l'optique ondulatoire. Associons une onde plane à chaque rayon lumineux. Elle est supposée monochromatique, de longueur d'onde dans le vide λ, et sa direction est celle du rayon. Les fibres en silice connaissent un minimum d'atténuation vers 1 550 nm. Cette longueur d'onde du proche infrarouge sera donc privilégiée pour les communications optiques. *Au début, on utilisait 1300 nm pour minimiser la dispersion chromatique. De nos jours, la maîtrise des procédés de fabrication permet d'atteindre couramment une atténuation aussi faible que 0,2 dB/km à 1 550 nm : après 100 km de propagation, il restera donc encore 1% de la puissance initialement injectée dans la fibre, ce qui peut être suffisant pour une détection. Si l'on désire transmettre l'information sur des milliers de kilomètres, il faudra avoir recours à une réamplification périodique du signal, le plus généralement par l'intermédiaire d'amplificateurs optiques, aussi appelés répétiteurs.*

Condition d'interférence constructive Quelles ondes peuvent se propager dans la fibre ? Lorsque la condition de confinement est satisfaite, la fibre contient une superposition de toutes les ondes réfléchies, qui interfèrent entre elles. Les ondes qui se propagent sans atténuation sont celles pour lesquelles toutes les interférences sont constructives. Calculons la différence de marche puis le déphasage entre deux ondes réfléchies successives. On obtient *on peut faire le schéma du réseau équivalent* :

$$\Delta\phi = \frac{4\pi a \sin\theta}{\lambda} \tag{2}$$

Pour avoir des interférences constructives, il faut alors

$$\frac{4\pi a \sin\theta}{\lambda} = 2p\pi \tag{3}$$

où $p \in \mathbb{N}$. *Ce raisonnement peut étonner, puisque les interférences qu'on étudie ici ont lieu entre des plans d'ondes "qui ne se voient pas". Il faudrait une approche électromagnétique pour le justifier, ce qui est fait en partie II.* On obtient donc une condition sur les angles

$$\sin\theta_p = \frac{p\lambda}{2a}, p \in \mathbb{N} \tag{4}$$

Ce n'est ni plus ni moins que la condition donnant la position des pics d'intensité pour un réseau, ce qui n'a rien d'étonnant Les angles d'incidence permettant la propagation dans la fibre prennent des valeurs discrètes. *Il n'y a pas besoin de prendre en compte l'indice optique n_1 ici. En effet, λ est défini comme étant la longueur d'onde dans le vide. Dans la gaine, $\lambda_1 = n_1\lambda$, et le chemin optique $(S2H) = n_1 S2H$. Les indices se simplifient donc.*

Message

Les modes de propagation de la fibre optique sont discrets, caractérisés par un entier p.

Un mode est passe-haut On considère un mode fixé p. On remarque que toutes les longueurs d'ondes ne peuvent pas se propager dans le mode p, il y a une fréquence de coupure basse *i.e.* un comportement passe-haut. **ODG:** fréquence de coupure, pour $p = 1$, $\lambda_1 = 2a = 20\mu$m. $f_{c,1} = c/\lambda_1 = c/2a = 3\dot{1}0^{13}$Hz. Le signal à 1550 nm/$2 \cdot 10^{14}$Hz passe bien dans la fibre.

Une pulsation de coupure basse est associée à chaque mode.

On a obtenu les conditions de propagation. En télécommunications, un enjeu majeur est le débit d'information transmissible, qui est limité par la dispersion.

1.3 Dispersion et effets

Vitesse effective On s'intéresse au temps mis par le mode p pour traverser un guide d'onde de longueur L. C'est simplement un effet géométrique, on fait le calcul sur diaporama. *Comme $v_g < c$, le photon a une "masse effective".*

Dispersion intermodale et limitation du débit On montre le schéma sur diaporama, le calcul est sur ma fiche. On trouve une fréquence/débit maximal

$$D_{max} = \frac{cn_1n_2}{\ell(n_1 - n_2)} = 100MHz = 0.1Gbit/s$$

pour $l = 100m$. Ainsi, cela justifie l'ordre de grandeur de Δn qui doit être pris petit pour limiter le nombre de modes et maximiser le débit de transmission. En 1970 : fibres multimodes avec dispersion chromatique 1 Gbit/s. On réduit la dispersion avec des fibres monomodes. Fin 1970 : fibres monomodes 100 GBit/s. Aujourd'hui (multiplexage), 100 Tbit/s.

Message

La dispersion intermodale ou dispersion de mode caractérise la différence de vitesse effective de propagation de deux ondes harmoniques de même pulsation (ω fixée) mais portées par des modes différents. Elle est due aux conditions aux limites imposées à l'onde.

Deux types de dispersion On a donc deux types de dispersion : intermodale due aux CL et intramodale due aux CL mais aussi au milieu (loi de Cauchy).

Fibres à gradient d'indice En revanche, on peut limiter cette dispersion, on peut utiliser des fibres à gradient d'indice : l'indice optique diminue continument de la gaine vers l'extérieur. On a alors un degré de liberté suplémentaire : le choix d'un bon profil permet de limiter la dispersion intermodale. Il reste la dispertion intramodale, en partie due à la dispersion chromatique intrinsèque au matériau.

Résumons ce qu'on a appris sur l'effet du guidage sur la propagation d'une onde plane.

Caractéristiques de la propagation guidée

- Confinement de l'onde
- Guidage de la propagation de l'onde
- Modes discrets de propagation avec chacun sa fréquence de coupure basse
- Le prix du confinement est la dispersion inter/intramodale due aux conditions limites

Cette première approche donne une idée de ce que l'on va trouver en général pour un guide d'ondes. Pour les caractériser plus rigoureusement, il faudrait faire une approche électromagnétique avec les équations de Maxwell et il faudrait prendre en compte la géométrie cylindrique de la fibre optique, la dispersion dans le coeur liée à l'indice optique, l'existence d'ondes évanescentes dans la gaine. On va plutôt s'intéresser à un cas plus simple que la fibre optique, mais toujours utilisé en télécommunication : le guide d'onde métallique. [tableau odg ?]

$\Big\downarrow$

2 Guide d'onde électromagnétique

✍ Thibierge section 3.2 "Guidage d'une onde électromagnétique entre deux plans parfaitement conducteurs" (sauf 3.2.3 et 3.2.5)

2.1 Modèle du guide d'onde plan-plan

Présentation du modèle L'objectif de cette section est de passer de l'approche qualitative de la section précédente à une formulation quantitative précise, en menant une étude électromagnétique complète. Pour réaliser l'étude EM, on simplifie le problème par rapport à l'étude de la fibre optique. Deux aspects posent des complications particulières : (i) La réflexion totale s'accompagne d'une onde évanescente dans la gaine. Pour ne pas avoir à en tenir compte, disons que le milieu (2) est tel qu'aucun champ ne puisse y pénétrer. C'est par exemple le cas s'il s'agit d'un conducteur parfait. (ii) La dispersion due au milieu de propagation complique l'étude, et n'est pas propre aux phénomènes de guidage. Disons donc que le milieu (1) est non dispersif, et à la limite posons $n_1 = 1$: le milieu est donc le vide. Finalement, l'étude va être celle de la propagation d'une onde électromagnétique dans le vide limité par deux plans conducteurs parfaits, comme représenté. On étudie le guide d'onde suivant : deux plaques d'un conducteur parfait. Comme pour la fibre optique, l'onde est confinée par les réflexions métalliques sur les plans. **ODG:** a $\sim$ 10 μm (comme la fibre optique d'avant) On montre un schéma **ODG:** Pour $f \sim GHz$, l'épaisseur de peau du cuivre est $\delta \sim \sqrt{2/\mu_0\sigma_0\omega} \sim 1\mu m$

Hypothèses Le conducteur est parfait. L'effet de peau est donc négligé : l'onde ne pénètre pas dans les conducteurs. Entre les deux, on suppose qu'il y a du vide. Il ne peut d'onde y a voir des que des charges et des courants à la surface du conducteur.

Conditions aux limites Le champ électromagnétique doit respecter les conditions limite associées au conducteur parfait, où $\vec{B}$ et $\vec{E}$ sont nuls à l'intérieur.

$$B_z(z=0) = B_z(z=a) = 0 \tag{5}$$

$$E_x(z=0) = E_x(z=a) = 0 \tag{6}$$

$$E_y(z=0) = E_y(z=a) = 0 \tag{7}$$

2.2 Structure du champ électromagnétique

Décomposition en modes TE et TM Écrivons explicitement les équations de Maxwell en termes des composantes des champs, en remarquant que dans le cas du guide plan envisagé ici, la propagation a lieu selon e_x, mais le système demeure invariant par translation parallèle à e_y. Par conséquent les champs ne dépendent pas de y.

Maxwell-Gauss et Maxwell-Thomson donnent

$$\partial_x E_x + \partial_z E_z = 0 \tag{8}$$

$$\partial_x B_x + \partial_z B_z = 0 \tag{9}$$

Maxwell-Ampère et Maxwell-Faraday donnent

$$\begin{bmatrix} -\partial_z E_y \\ \partial_z E_x - \partial_x E_z \\ \partial_x E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial_t B_x \\ \partial_t B_y \\ \partial_t B_z \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\begin{bmatrix} -\partial_z B_y \\ \partial_z B_x - \partial_x B_z \\ \partial_x B_y \end{bmatrix} = \frac{1}{c^2} \begin{bmatrix} \partial_t E_x \\ \partial_t E_y \\ \partial_t E_z \end{bmatrix} \tag{11}$$

Deux familles d'ondes : TE (en bleu) et TM (en rouge).

- Mode TE : connaître E_y suffit à connaître sans ambiguïté les autres composantes du groupe
- Mode TM : connaître B_y suffit à connaître sans ambiguïté les autres composantes du groupe

Le champ électrique d'une onde du groupe TE est transverse à la direction de propagation, et réciproquement pour le groupe TM, d'où la dénomination. La linéarité des équations donne qu'on peut étudier les groupes TE et TM séparément. Les modes TE et TM forment une base des modes de propagation d'un guide d'onde uniaxe.

La solution générale est une superposition des modes TE et TM

On ne va étudier en détail qu'un seul groupe dans la suite, le groupe TE, mais l'étude du groupe TM suit les mêmes idées.

2.3 Etude d'un mode transverse électrique

Ansatz, constante de propagation L'équation de d'Alembert pour la composante E_y est

$$\Delta E_y - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = 0 \tag{12}$$

Ici, on va rechercher une solution propagative selon z, mais sans être une onde plane

$$E_y(x,z,t) = f(z)e^{i(\beta x - \omega t)} \tag{13}$$

On appelle β la constante de propagation. En injectant dans l'équation de d'Alembert, on obtient :

$$\frac{d^2 f}{dz^2} + (\frac{\omega^2}{c^2} - \beta^2)f(z) = 0 \tag{14}$$

Par analogie, la période spatiale de l'onde dans la direction de propagation est appelée longueur d'onde guidée $\lambda_g = 2\pi/\beta$

Conditions limite et forme du champ La nature des solutions dépend du signe de $\frac{\omega^2}{c^2} - \beta^2$. Si $\frac{\omega^2}{c^2} - \beta^2 < 0$, la solution est une somme d'exponentielle croissante et décroissante. Elles ne peut s'annuler deux fois et respecter les CL sans être identiquement nulle. Si $\frac{\omega^2}{c^2} - \beta^2 = 0$, alors la solution est affine et ne peut s'annuler deux fois sans être identiquement nulle. La seule possibilité valable est $\frac{\omega^2}{c^2} - \beta^2 > 0$, on pose alors $K^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - \beta^2$. Pour l'instant, on ne dit pas si K et β sont réels ou imaginaires pur et β!. On a alors :

$$f(z) = A\cos(Kz) + B\sin(Kz) \tag{15}$$

On utilise les Cl pour déterminer A et B :

$$E_y(z=0) = E_y(z=a) = 0 \tag{16}$$

donc

$$A = 0 \tag{17}$$

$$\sin(Ka) = 0 \Leftrightarrow Ka = p\pi, p \in \mathbb{N} \tag{18}$$

Finalement, on a

$$E_y(x,z,t) = E_0 \sin\left(\frac{p\pi}{a}z\right)e^{i(\beta_p x - \omega t)} \tag{19}$$

où $p \in \mathbb{N}$ et $\beta_p^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - \left(\frac{p\pi}{a}\right)^2$ C'est une structure d'onde stationnaire, comme la corde de Melde On montre un schéma : avec les profils $n = 1, 2, 3...$ on a des ventres et des noeuds.

Message On retrouve bien les modes de propagation discrets qu'on avait associé avec la propagation guidée dans la première partie.

Les modes de propagation TE sont entièrement caractérisés par un unique entier p non nul. Un mode particulier est noté TE_p.

Fréquence de coupure basse On voit, avec la relation de dispersion (équation de Klein-Gordon) que la constante de propagation associée au mode est réelle uniquement si la pulsation ω est suffisamment élevée. On voit donc apparaître la pulsation de coupure, pour un mode TE_p donné, i.e. à p fixé :

$$\omega_p = \frac{pc\pi}{a} \tag{20}$$

On a donc propagation du mode p si $\omega > \omega_p$, tandis qu'on aura une onde évanescente dans le cas inverse. On fait le lien avec la partie précédente : on a retrouvé le même résultat ! Cette pulsation est la même que celle que l'on avait trouvé avec notre modèle simplifié, mais maintenant on peut savoir ce qui arrive à une onde qui ne peut pas se propager. **ODG:** comme dans la partie précédente. fréquence de coupure, pour $p = 1$, $\lambda_1 = 2a = 20\mu$m. $f_{c,1} = c/\lambda_1 = c/2a = 3\dot{1}0^{13}$Hz.

Une onde de fréquence donnée ne peut se propager que dans un nombre fini de modes.

Structure de l'onde Pour déterminer le champ B, rappeler qu'on ne peut pas utiliser la relation de structure d'une OEM dans le vide illimité parce qu'on travaille dans un milieu confiné : le confinement modifie la structure de l'onde et donc les résultats connus pour un milieu illimité ne sont pas valables. On peut calculer le champ magnétique avec l'équation de Maxwell-Faraday calcul sur fiche. Ainsi, l'onde n'est pas transverse ni plane, alors qu'elle se propage dans le vide : ici les CL sont primordiales.

Justification du modèle géométrique ✍ Polyerge. En utilisant des formules de trigonométrie, le champ électrique dans le guide apparaît comme la superposition de deux OPPH de deux vecteurs d'onde qui ont la même composante selon x (*ce n'est pas une onde plane!*), mais composante opposée selon z. Ainsi, ils s'obtiennent l'un l'autre par réflexion sur les parois du guide. On retrouve donc les ingrédients du modèle géométrique.

Étudions plus en détails les propriétés de ces modes, et en particulier la relation de dispersion.

2.4 Dispersion

Relation de dispersion Pour le groupe TE_p, on a pris la relation de dispersion suivante [expression], de type Klein-Gordon, qui est celle du plasma dilué. Ici, le milieu est le vide : la dispersion est engendrée par les CL.

Différents cas On montre le graphe de la relation de dispersion pour différents modes.

- Si $\omega < \omega_{c,1}$, l'onde ne peut pas se propager dans le guide : comportement passe-haut.
- $\omega_{c,1} < \omega < \omega_{c,2}$, l'onde n'est propagée que par le mode fondamental. Il n'y a pas de dispersion intermodale, uniquement intramodale. C'est un guide monomode pour cette fréquence.
- Pour ω plus élevé, l'onde peut être propagée par plusieurs modes différents, il y a de la dispersion intermodale. Le guide est alors multimode pour l'onde en question. [expression de v_ϕ et v_g] l'onde se propage plus lentement que dans le vide.

Limitation du débit ✍ Hprepa p228 **ODG:** ? Non renseigné car peu utilisé.

2.5 Aspect énergétique

Avec l'équation de Maxwell-Faraday, on peut retrouver l'expression du champ magnétique associé au mode TE$_p$.

Thibierge équation (3.34)

Le vecteur de Poynting associé au mode TE$_p$ est donc on peut admettre les calculs

$$\vec{\Pi} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0} \Rightarrow < \vec{\Pi} >_t = \frac{E_0 \beta_p}{2\mu_0 \omega} \sin^2 \frac{p\pi}{a} z \vec{e_x} \tag{21}$$

L'énergie se propage donc bien selon l'axe de propagation de l'onde $\vec{e_x}$ sans atténuation. On a réussi l'objectif fixé : obtenir une onde directionnelle. **ODG:** puissance ? Petit car on veut transmettre de l'information.

2.6 Le mode TEM

Existence du mode TEM La dispersion pose problème en pratique, l'idéal serait donc d'avoir un mode où il n'y a pas de dispersion intermodale. Il faut alors considérer les modes $p = 0$ (pour enlever le deuxième terme dans l'équation de Klein-Gordon). Pour le mode TE$_0$, le champ est nul partout. Mais puisque les CL sont moins strictes pour le champ magnétique, le mode TM$_0$ est non identiquement nul et la relation de dispersion associée est celle d'une onde plane $\beta^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$. On a donc trouvé un mode TEM, qui a exactement la structure d'une onde plane EM. Plus généralement, on peut montrer que dès qu'on a un mode TEM, celui-ci est unique et vérifie la relation de dispersion d'une onde se propageant de manière libre dans le milieu. *Attention, le champ électrique de cette onde TEM est bien transverse, mais elle ne fait pas pour autant partie du groupe TE.*

Propriétés du mode TEM Ce mode est très intéressant car il y a possibilité de transmission d'information sans déformation et sans dispersion lors de son transport entre l'émetteur et le récepteur, et seul le mode TEM peut satisfaire ces conditions. On parle alors de guide monomode, car seul le mode $p = 0$ y est représenté. On résume les propriétés du mode TEM *démonstration admise* :

- On retiendra les trois résultats suivants, très généraux, à propos des modes TEM :

- Pour qu'un guide d'ondes électromagnétiques puisse propager un mode TEM, il faut qu'il ait une géométrie non simplement connexe. Informellement, il faut qu'il soit constitué d'au moins deux conducteurs différent. *Démontration : dans le vite, le potentiel électrique vérifie $\Delta\phi = 0$ et $\phi = cte$ sur un conducteur (conditions de Dirichlet). Dans une géométrie simplement connexe, la solution $\phi = cte$ convient et par unicité, c'est la seule. Alors les champs E et B sont nuls* Dans un guide acoustique, les conditions limites portent sur la vitesse normale v_n donc (éq. Euler) sur le gradient de (sur)pression ($\vec{\nabla}p_1$) donc dans une géométrie simplement connexe (guide rectangulaire) si $(n, m) = (0, 0)$, on peut quand même avoir $p_1 \neq 0$ et donc un mode "TEM", alors que ça n'aurait pas été possible en électromagnétisme. Conclusion : les CL d'un guide acoustique portent sur l'annulation gradient de p_1 donc on peut toujours avoir $p_1 = cte \neq 0$ comme mode qui se propage.
- Un mode TEM vérifie la relation de dispersion des ondes planes dans le milieu illimité. En revanche, une onde TEM n'est pas forcément plane au sens strict.
- Par opposition aux modes TE et TM, lorsqu'il existe, le mode TEM est unique.

On peut ici grâce à deux conducteurs parfaits, réaliser un guide d'onde dans le lequel l'énergie se propage, nous allons maintenant voir quelques applications de ces conducteurs.

3 Quelques guides d'onde utilisés en télécommunications

3.1 Guide rectangulaire

On peut sauter pour traiter directement le câble coaxial ✍ Thibierge sous-sections 3.2.3 et 3.2.5

Guides d'ondes rectangulaire Les guides d'onde présentés précédemment sont très peu utilisés : il n'est pas possible d'avoir un espace "infini". Les guides dont la géométrie est la plus proche sont les guides d'onde rectangulaires creux : il faut rajouter deux plaques conductrices en $y = 0$ et $y = b$. Comme on rajoute des CL/du confinement dans une direction transverse, chaque mode est désormais caractérisé par deux indices et plus un seul. [expression, justifiée par analogie avec la partie précente et l'analyse dimensionnelle]. La propagation guidée y est toujours possible, mais le mode TEM dans cette géométrie n'existe plus. En fait, le mode TEM n'existe que pour des guides d'ondes non simplement connexe.

Fréquences de coupure Pour le guide rectangulaire, attention à bien sélectionner les fréquences de coupures pertinentes pour déterminer si le guide est monomode ou non : ici, ce sont les fréquences des modes (0,1) et (1,0). **ODG:** $\omega_c \sim \pi c/a$. Pour des ondes hyperfréquences 5 GHz, $a = 3$cm. Pour une fréquence de coupure 50 Hz, $a = 3000$km, on préfère utiliser des lignes bifilaires. ✍ HPrepa p235.

Un exemple de guide d'onde non infini non simplement connexe ?

3.2 Câble coaxial

✍ Thibierge section 3.4 "Complément : Câble coaxial, de l'électromagnétisme aux constantes réparties", d'autres ref : Brébec, Garing On peut donner les résultats des calculs comme Laura et commenter à l'oral

Constitution d'un câble coaxial ✍ cf. fiche. Rappelons qu'un câble coaxial est constitué de deux conducteurs cylindriques coaxiaux, de rayons a et $b > a$, séparés par un isolant. Pour s'affranchir des propriétés diélectriques de l'isolant, on l'assimile au vide. On montre un schéma Il a donc une géométrie non simplement connexe.

Applications Pour limiter la dispersion, on peut imposer une différence de potentiel entre les deux conducteurs, comme c'est le cas pour le câble coaxial, qui est utilisé en TP mais aussi pour relier les ordinateurs en réseau ou la télévision au décodeur par exemple.

Confinement Contrairement au guide avec les deux plaques parallèles infinies, on n'a pas invariance par translation mais par rotation autour de Oz. En fait, le confinement est radial mais aussi orthoradial : le champ doit avoir une certaine périodicité. D'où deux indices qui repèrent le mode.

Expression du mode TEM L'étude exhaustive du problème est assez lourde techniquement, faisant intervenir des fonctions de Bessel et de Neumann généralisées. Ce qui nous intéresse c'est de savoir que le mode TEM peut s'y propager et qu'il vérifie une relation de propagation d'onde plane (Thibierge équation (3.84). On peut aussi connaître la forme des champs associés au mode TEM

$$\vec{E} = \frac{1}{r}\frac{\Psi_1-\Psi_2}{\ln b/a}e^{\mathrm{i}(\beta z-\omega t)}\vec{u}_r$$
$$\vec{B} = \frac{1}{r}\frac{\Psi_1-\Psi_2}{c\ln b/a}e^{\mathrm{i}(\beta z-\omega t)}\vec{u}_\theta$$

On voit donc qu'en dépit des similitudes entre elles, l'onde du mode TEM n'est pas identique à une OPPH se propageant dans le vide illimité, puisque (i) l'amplitude des champs décroit avec la distance à l'axe r (ii) leur direction direction est selon $\vec{u}_r$ et $\vec{u}_\theta$, et dépend donc du point d'observation. L'onde qui se propage n'est donc pas une onde plane car les champs associés ne sont pas constants sur toute une surface de z constant.

Modèle électrocinétique Cependant, en calculant les courants surfaciques avec les conditions de passage, ces équations permettent de retrouver l'onde électrocinétique qui se propage dans le câble coaxial : on peut montrer que le champ $U(z)$ est couplé au champ $I(z)$, et que l'onde associée est plane. On retrouve donc bien un modèle de propagation d'une "onde électrocinétique" dans le câble coaxial. On peut aussi retrouver la capacité et l'inductance linéiques associées à la propagation de l'onde électrocinétique dans le cadre du modèle des constantes réparties. Schéma du modèle des constantes réparties, Brébec

Ordres de grandeur Calcul des ODG des inductance et capacité linéiques avec a et b donnés par Thibierge. Par ailleurs, un câble coaxial étant constitué de deux conducteurs, il propage un mode TEM vérifiant comme attendu la relation du vide illimité. Les fréquences de coupure des premiers modes valent

$$f_\mathrm{c} = \frac{c}{2(b-a)} \qquad \text{(premier mode TM)}$$
$$f_\mathrm{c} = \frac{c}{\pi(b+a)} \qquad \text{(premier mode TE)}$$

Pour un câble de télévision de rayons $a = 2.4$mm et $b = 8.8$mm, la fréquence de coupure la plus basse est de l'ordre de 8.5GHz. Pour l'utilisation habituelle avec des fréquences au plus de l'ordre du MHz, seul le mode fondamental contribue à la propagation.

Pertes ✍ wikipedia. Les pertes dans le câble coaxial sont dûs à l'effet Joule dans l'épaisseur de peau des conducteurs. Plus le diamètre du conducteur est petit, plus grande sera sa résistance, et donc plus il y aura de pertes, plus la fréquence augmente, plus il y aura de pertes, plus on augmente la longueur du câble, plus il y aura de pertes. **ODG:** 19 dB/100 mètres à une fréquence de référence de 800 MHz.

En outre, il existe un rapport optimum du diamètre de l'âme sur celui du blindage. Celui-ci correspond à une impédance caractéristique de 75 Ω, ce qui explique que cette valeur soit employée pour les câbles de réception qui doivent minimiser les pertes, toutes choses étant égales par ailleurs.

Pour le transport de puissance, on aurait tendance à penser que maximiser le diamètre de l'âme diminue la résistance et donc les pertes. Ceci est vrai en continu, mais en haute fréquence, l'épaisseur réduite du diélectrique entraîne une tension de claquage plus faible, et donc une puissance maximale admissible limitée. L'optimum se réalise pour une impédance caractéristique de l'ordre de 30 Ω. La valeur de 50 Ω correspond à un compromis entre pertes en émission et pertes en réception.

Une technique pour propager des signaux est d'utiliser des solitons.

Bonus : guide d'ondes acoustiques

Les conclusions importantes demeurent inchangées. Il existe un mode d'onde plane, qui vérifie la relation de dispersion du vide illimité, et tant que la fréquence est suffisamment faible ce mode est le seul à être propagé. Les fréquences de coupure des modes supérieurs font intervenir la position des extrema des fonctions de Bessel, qui peuvent être calculés numériquement.

3.3 Fibre optique (si le temps)

✍ Taillet chp8, `https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique` et plus technique `https://www.cercle-credo.com/docs/technologies-et-composants-du-reseau-d-accescercle-credo.pdf` p51

La fibre optique permet également une propagation parfaite dans le mode 0, suivant ce qu'on a vu dans l'approche géométrique. On parle alors de fibre monomode.

Il existe des fibres optiques multimodes, utilisées pour des petites distances, pour lesquelles l'effet de la dispersion intermodale n'est pas important.

Conclusion

[tableau récapitulatif des guides d'ondes en jpg]

Nous avons dégagé les caractéristiques de la propagation guidée des ondes, on ne peut propager que certains modes discrets, chacun de ces modes ont une fréquence de coupure, contrairement à la propagation libre. Les conditions aux limites introduisent une dispersion intermodale, qui n'est pas due au milieu. La transmission d'information peut se faire sur de très longues distances.

Nous avons vu quelques applications des guides d'onde : pour limiter les effets de la dispersion, on maximum de se placer dans les modes fondamentaux du guide, qui ont des propriétés très proches de la propagation libre.

Cette approche reste incomplète car les modèles que nous avons utilisés se plaçaient dans un cadre "parfait". Pour étudier plus précisément les guides d'ondes, il faudrait également prendre en compte l'absorption d'énergie par le guide (effet Joule dans l'épaisseur de peau), qui peut avoir des conséquences (baisse de la qualité d'une vidéo reçue par fibre optique...). *Il faut aussi prendre en compte les adaptations d'impédance.*

Compléments

Guide dans un micro ondes ✍ Perez. La source est un magnétron **ODG:** 750 W, 2.45 GHz, λ_0 =12.2 cm. Les ondes émises sont véhiculées par un guide d'onde métallique vers un brasseur d'ondes qui sert à homogénéiser le champ EM dans le four. Le four sert de cavité résonante où des ondes stationnaires se développement. L'introduction d'objet métallique risque d'augmenter le champ E au-dessus de la limite du champ disruptif de l'air. **ODG:** 30 kV/cm.

Guides d'onde acoustiques Stéthoscope, guide à gradient d'indice dû à la stratification océanique ou guide entre fond et surface libre.

Lien avec la mécanique quantique, effet Casimir Si $v_g < c$, le photon a une "masse effective". L'effet Casimir est une force attractive entre deux plaques parallèles conductrices et non chargées. Cet effet, dû aux fluctuations quantiques du vide, existe également pour d'autres géométries d'électrodes. Expérimentalement, on utilise souvent des miroirs.

Les fluctuations quantiques du vide sont présentes dans toute théorie quantique des champs. L'effet Casimir est dû aux fluctuations du champ électromagnétique, décrit par la théorie de l'électrodynamique quantique. L'énergie du « vide » (due à l'énergie de point zéro des oscillateurs harmoniques quantiques) entre deux plaques se calcule en tenant compte uniquement des photons (y compris des photons virtuels) dont les longueurs d'onde divisent. Ceci implique que la densité d'énergie du vide (entre ces deux plaques) est fonction du nombre de photons qui peuvent exister entre ces deux plaques.

Plus les plaques sont proches, moins il y a de photons obéissant à la règle $n\lambda = L$, car sont exclus les photons dont la longueur d'onde est supérieure à L. Il y a donc moins d'énergie.

La force entre ces deux plaques, à savoir la dérivée de l'énergie par rapport à L, est donc attractive.

4 Commentaires

Partir du guide d'onde rectangulaire pour faire émerger le plus tôt possible la notion de quantification, sur laquelle il faut impérativement insister à plusieurs reprises.

Un autre pilier de le leçon est la notion de fréquence de coupure.

On pourrait parler du guidage des ondes acoustiques mais comme ce n'est plus utilisé en télécommunication, on fait le choix ici de ne pas en parler.

Comme on a commencé par une approche qualitative avec la fibre optique, on choisit de ne pas trop la développer à la fin mais c'est tout à fait possible de la faire si on a du temps (très peu probable). Dans tous les cas il faut s'attendre à des questions sur la fibre optique.

Très largement inspirée de la leçon de Clément (D15), qui est très largement inspirée du cours de E. Thibierge.

Conclusion

Nous avons vu tout au long de cette leçon qu'il était possible, en imposant des conditions aux limites bien choisies à une onde, de récupérer un signal se propageant avec des pertes minimales dans la direction que nous souhaitons. Cependant, en faisant cela, l'onde qui se propage n'est en général plus la même que celle qui a été émise initialement car la propagation dans un guide d'ondes se fait selon des modes propres du guide qui n'ont rien à voir avec la propagation libre. On ajoute ainsi de nouvelles sources de dispersion à notre propagation. Pour limiter ces effets, on essaye au maximum de se placer dans les modes fondamentaux du guide, qui ont des propriétés très proches de la propagation libre. Cette approche reste incomplète car les modèles que nous avons utilisés se plaçaient dans un cadre "parfait". Pour étudier plus précisément les guides d'ondes, il faudrait également prendre en compte l'absorption d'énergie par le guide, qui peut avoir des conséquences mineures (baisse de la qualité d'une vidéo reçue par fibre optique) ou plus importantes (résonances d'une turbine aéronautique par exemple). **Ouverture :** Giovannini 2015 That the speed of light in free space is constant is a cornerstone of modern physics. However, light beams have finite transverse size, which leads to a modification of their wavevectors resulting in a change to their phase and group velocities. En fait, même sans confinement, la structure transverse d'une onde dans le vide (ex : faisceau gaussien) fait qu'elle se propage avec dispersion et plus lentement que c. Même dans le vide, sa structure transverse fait que c'est "comme si elle était confinée". Finalement, la vitesse de la lumière est c pour les ondes planes (ou les TEM).

Compléments/Questions

Passage

Plan

Prérequis. Optique géométrique, optique ondulatoire, interférences, électromagnétisme dans le vide, relations de passage.

Introduction. Ondes acoustiques pour parler, ondes électromagnétique pour voir, ondes à la surface de l'océan. Manip. Onde ultrason guidée dans un cylindre en plastique → l'amplitude augmente.

I) La fibre optique. 1) Conditions d'incidence. (fibre optique à saut d'indice). Condition de réflexion totale avec l'angle limite donnée par la loi de Snell Descartes (schéma sur diapo). Angle d'acceptance (i) : angle limite d'entrée dans la fibre. $sin(i) = n_c sin(r)$. **ODG:** Fibre optique : $n_{gaine} = 1.475$, $n_{coeur} = 1.515$, $\theta_{lim,refl} = 13°$, $\theta_{lim,accept} = 20°$. 2) Quantification. Calcul de la différence de marche entre deux rayons qui interfèrent après réflexion sur le dioptre gaine/coeur. (schéma des grandeurs sur diapo, écriture de l'expression seule au tableau). Condition d'interférences constructives. $\cos\theta_p(p)$ Discrétisation des modes. 3) étude de la fibre. Caractère passe-haut de la fibre optique en fréquence, donné par la condition $\cos\theta_p < \cos\theta_{lim,refl}$. En fréquence, il faut une fréquence seuil minimum. Longueur effective, vitesse effective. Ordre de grandeur de la vitesse pour différent modes (2/3 c, 1/3 c). Cherche ordre maximal avec $n_c > n_g > sin(\theta_p)$. En choisissant les caractéristiques de la fibre, on peut alors choisir quels modes propager. Exemple : en choisissant a (rayon) assez petit, on obtient une fibre monomode.

II) Guide d'onde plan-plan. 1) Position du problème. Hypothèses : pas d'ondes évanescentes dans le métal, charges et courants surfaciques ?. Choix sur le vecteur de propagation, invariance selon y. Conditions limites. 2) Equations de Maxwell. Ondes TE et TM (diapo avec les systèmes d'équations). 3) résolution. Utilisation des conditions aux limites. condition de propagation. C'est un passe haut. **ODG:** $h = 6cm$, $f_1 = 2.5GHz$. 4) Guide rectangulaire. Ordre de grandeur.

Conclusion. Aspect énergétique et atténuation (pas abordé). Calcul pour des ondes EM. Mais même calculs pour guide d'onde rectangulaire et les ondes acoustique.

Questions

- Peut-il y avoir propagation d'une onde et transport de matière ? Oui, par exemple une onde sonore dans un fluide qui s'écoule dans une canalisation.
- Pourquoi le champs EM est nul dans conducteur parfait ? Conséquence de la loi d'Ohm avec une conductivité infinie.
- Un guide d'onde EM peut-il propager autre chose d'un mode TE ou un mode TM ? La réponse est oui : une combinaison de modes TE et TM peut se propager, il s'agit de modes hybrides.
- Une fibre optique à gradient d'indice bien calibrée est-elle vraiment non dispersive ? La dispersion intermodale est bien compensée, mais il reste une (faible) dispersion intramodale résiduelle, qui est due à l'absorption par la fibre (OdG : 0.2 dB/km) . La longueur d'onde de 1,3 microns choisie en pratique est celle qui limite au maximum cette dispersion.
- Vous avez parlé de quantification. Quel lien faites-vous avec la mécanique quantique ? Qu'est-ce que l'effet Casimir ?
- Vous avez montré qu'on pouvait guider une onde acoustique dans un tube en PVC jusqu'au micro- phone. Cela fonctionne-t-il pour toutes les fréquences / longueurs d'ondes sonores ? La réponse est non, les conditions sont les mêmes que celles qui apparaissent dans la fibre optique par exemple. ? Comment faire pour maximiser l'amplitude du signal reçu par le microphone ? Il s'agit une question d'adaptation d'impédance, ici avec un cornet avec une forme adaptée. Cette situation est totalement similaire à ce qui apparait pour le guide d'ondes EM rectangulaire ou pour le câble coaxial.
- Est-ce que l'émission depuis une antenne se fait de manière isotrope ? La réponse est non, l'émission se fait préférentiellement perpendiculairement à l'antenne (évollution du champ électrique en sinus de l'angle entre l'antenne et le champ). Mais le vecteur de Poynting décroît en $1/r^2$, ce qui est gênant à grande distance.
- Peut-on propager des modes autres que TE ou TM dans un guide d'onde ? Oui, les modes TE et TM forment en fait une base de l'ensemble des modes qui peuvent se propager dans le guide d'onde. Ceci vient du fait que l'on peut découpler les équations de Maxwell, cf. Garing. Ainsi toute combinaison linéaire des modes TE et TM peut se propager dans le guide. De tels modes sont appelés modes hybrides.
- Une fibre optique à gradient d'indice bien calibrée est-elle vraiment non dispersive ? La dispersion intermodale est bien compensée, ce qui est l'objectif, mais il reste une (faible) dispersion intramodale résiduelle, qui est due à l'absorption par la fibre. La longueur d'onde de 1,3 microns choisie en pratique est celle qui limite au maximum cette dispersion, cf. Portelli.
- Comparer la dispersion intramodale et intermodale ? La dispersion intramodale est due à un terme supplémentaire dans l'équation de propagation, qui n'est plus l'équation de d'Alembert. La dispersion intermodale est une dispersion effective, qui relie β à ω. Cette dispersion effective traduit l'influence des conditions aux limites sur la propagation, qui ne peut plus être celle d'une onde plane dans le vide.
- Pertes dans la fibre optique de 0.01 dB/m, comment fait-on pour transmettre des informations sur plusieurs km ? Répétiteurs à l'aide d'une cavité type laser qui réamplifie le signal.
- Du point de vue énergétique, que change le guide d'onde ? Sans guide, atténuation de la puissance en $1/r^2$. "dilution sphériqué". En focalisant, on perds moins d'énergie.
- Prix du confinement ? Dispersion inter/intramodale → borne supérieure du débit d'information : (i) le nombre de modes est limité (ii) dispersion brouille l'info ? Comparer les longuers/longueurs effectives sur c. Gamme de fréquence d'utilisation.
- Amélioration du débit d'information avec une fibre à gradient d'indice. Facteur 100-1000 (voir Garing, exo).
- Pourquoi peut-on faire de l'optique géométrique dans une fibre optique ? Longueur d'onde $\ll$ diamètre de la fibre (20 microns). Mais pour des fibres monomodes (5 microns) c'est moins vrai → diffraction. Valable dans le fibre a saut d'indice mais pas dans la fibre monomode.
- Avantage de la fibre optique par rapport au guide d'onde.
- Problématique : comment adapter un guide d'onde à la fréquence de travail ? Basse fréquence vers haute fréquence : conducteur plan, câble coaxial, plan-plan, fibre optique.
- Dans un câble coaxial, c'est un guide d'onde. Pourquoi ça marche ? L'impédance du câble coaxial est celui du générateur (50 Ω).

- Quelle dispersion intra/intermodale compte le plus dans la fibre optique ? Intermodale compte le plus → quand on prend une fibre monomode, on améliore pas mal les choses. La dispersion intramodale est donnée par la la loi de Cauchy.
- Pas de TEM dans un guide d'onde ? Pourquoi c'est gênant ? Relation de dispersion associé à un mode TEM ? $\omega = kc$. Donc pas de dispersion. Pas de TEM à amplitude non nulle dans une géométrie à géométrie simplement connexe (plan-plan). Possible dans le cable coaxial.
- Comment vérifier une relation de dispersion ? Avec un banc hyperfréquence. Deux plaques de métal, onde stationnaire, distance entre deux noeuds → longueur d'onde → k.
- Sources d'atténuation des ondes acoustiques ? A l'interface : adaptation d'impédance, pertes de chaleur.
- β n'est pas un vecteur d'onde car ce n'est pas une onde plane.
- Onde sonore dans le domaine audible. Onde acoustique pas de restriction.
- Comment expliquer simplement à un élève de seconde que les pertes par effet Joule augmentent avec la résistance, alors qu'ils connaissent la relation P = U2/R ?
- Dans un conducteur parfait, pourquoi Bint=0 ?
- Dans le câble coaxial, comment obtenir un ordre de grandeur de L,C,G ? (connaissant U et I).
- Avantages de la fibre à gradient d'indice par rapport à celle à saut d'indice ?
- Fréquence de coupure du câble coaxial
- Ordre de grandeur de la vitesse de propagation dans un câble coaxial ? Si on réalise une manip reliant un GBF (sinusoïde) à un câble coaxial de 80 m et qu'on regarde en sortie à l'oscillo, avec différents bouchons (Z = 50 , Z = 1) qu'est-ce qu'on voit ?
- Pour le câble coaxial, vous avez dit vous placer dans l'ARQS, pourtant vous parlez de propagation. N'est-ce pas contradictoire ?
- Justifiez la forme de l'onde prise pour le guide d'onde rectangulaire. Pourquoi parle-t-on de fibres multimodes ?
- Est-ce qu'on peut dire que l'impédance caractéristique traduit la résistance du câble ?
- Exprimez la vitesse de propagation en fonction des données du problème. Que remarque-t-on (on retrouve l'indice du milieu). Quel est l'ordre de grandeur sur le câble utilisé de l'âme et de la gaine ?
- Quelle structure a le champ EM dans une fibre optique à saut d'indice ? Discuter des ondes évanescentes. Vous avez présenté une condition de guidage issue de l'optique géomé- trique (réflexion totale), que devient cette condition dans un modèle EM ?
- Vous avez mesuré une vitesse de propagation dans un câble coaxial, pourquoi cette vitesse est-elle inférieure à la vitesse des ondes ELM dans le vide ? Vous êtes allé un peu vite sur la structure des champs dans le câble coaxial, pouvez-vous expliquer en détail comment déterminer la direction des champs ?
- Pouvez-vous donner les grandes étapes du calcul de la fréquence de coupure d'un mode (non fondamental) dans un câble coaxial ? Quelle est l'origine physique de cette fréquence de coupure ?
- Dans le guide d'onde rectangulaire (hyperfréquence), vous vous êtes intéressé à un mode transverse électrique. Existe-t-il d'autres solutions, et dans ce cas, donner les directions du champ E et du champ B ?
- Vous avez parlé de polarisation, l'onde incidente est-elle toujours polarisée ? Comment traite-t-on alors le problème ? Le jury trouve bien de traiter un modèle EM du fil infini pour déboucher sur le coax.
- Comment procède-t-on en pratique pour transporter de l'information ? Modulation de fréquence/amplitude.
- Expliquer la forme des pulses même en propagation libre ?
- Relation de dispersion obtenue pour le guide, elle a un nom classique ? (Klein Gordon)
- Expliquer pourquoi pour l'onde acoustique on a un mode de plus que le guide EM ? nature des conditions limite
- Adaptation d'impédance pour le coax ? Par analogie, que fait-on avec un canal hydrodynamique ? (en fait, le jury m'a donné la réponse après la délibération : une mousse, ou une éponge, ça absorbe bien..)

- Expliquer ce qu'il se passe avec une trompette ? Pour une flute de pan, on a un son qui est transmis, pourtant le tuyau n'a pas d'adaptation d'impédance. Modèle simple avec impédance ?
- Pourriez-vous détailler le concept d'onde évanescente et applications ? (effet tunnel optique, champ proche, on allonge une fibre optique jusqu'à ce que le diamètre soit très petit,..)
- Un moyen de transporter des impulsions dans les fibres optique couramment employé ? (j'ai commencé à parler d'optique NL, compenser la dispersion, et ai enfin dit le mot magique : soliton !)
- Comment favoriser un mode dans le guide d'onde acoustique ? (émetteur avec un angle) Comment l'expliquer simplement à un élève ?
- Que se passe-t-il si on essaie d'introduire une source incohérente dans la fibre optique ?
- Vous avez parlé de fluide parfait, différence avec un écoulement parfait ? Qu'est-ce que cela implique ? Pour les ondes acoustiques, ça revient à négliger quel temps devant quel temps ? Qu'est-ce que l'effet de peau ? Dépendance en omega ? Pour le conducteur parfait, cet effet est fort ou faible ? Vous avez dit que la vitesse de l'énergie, c'est la vitesse de groupe, pouvez- vous expliquer comment on le démontre ? Pourquoi on moyenne le Poynting en EM ?
- Votre signal (manip guidage tuyau acoustique), c'est un pulse de 7 sinusoïdes. Du coup, en Fourier, ça donne quoi ? Et la largeur du lobe est liée à quoi ?
- Pourquoi faut-il une gaine et un coeur pour la fibre optique (sachant qu'historiquement, on a très tôt fait des fibres optiques avec simple réflexion à l'interface air/verre) ?
- Qu'est-ce qui justifie l'ordre de grandeur de Delta n entre gaine et coeur (environ 0,01) ? On réduit le nombre de modes.
- Vous avez parlé de monomodal, vous ne pensez pas qu'un élève peut s'interroger (en effet, les signaux à transmettre sont sur plusieurs modes) ?
- Les relations de passage pour E viennent de quelles équations de Maxwell ? Et enfin : vous pensez qu'on peut appliquer le guidage à du quantique ? Par exemple, avec des électrons ?
- Que pouvez-vous me dire sur le guidage non-linéaire ?

Biblio : Taillet, H prepa, Dunod. Mauras pour montrer qu'on ne peut pas propager TEM dans guide d'onde.
Possibilité d'utiliser Python pour montrer les dispersions.

Commentaires

Tableau de la fin au début : importance du choix de guide d'onde en fonction de la distance de propagation (atténuation) et de la fréquence de travail.
Message central à insister : le guidage est dû aux conditions limites, au confinement.
Plan-plan en analogie avec la corde de Melde pour trouver les modes propres et gagner du temps.
LP d'avant. Intro : citer le problème de la transmission d'information à longue distance et donc la nécessité de guider les ondes.
Alternative : fontaine de lumière. Baleine : canal sofar (différences de salinité) → guidage des ondes des baleines (fibre à gradient d'indice) propagation sur plusieurs km.
I) propagation guidée dans différents domaines.