

# LP27 : Propagation guidée des ondes

Armel JOUAN, Géraud DUPUY

## Leçons annexes

- Propagation des ondes et transmission de l'information

Niveau : L2

## 1 Approche géométrique du guidage [2], [4]

### 1.1 Reflexion totale

- Poser le modèle de la fibre à saut d'indice
- On a réflexion totale dans le guide
- Calculer angle limite. Application numérique.
- L'onde est manifestement guidée et maintenue dans l'enceinte

### 1.2 Temps de propagation

- On prends une impulsion.
- Elle peut arriver soit directement par une incidence rasante, soit par une incidence limite. Les deux chemins ont un temps de trajet différents
- Calculer la différence des temps de propagation entre les deux trajets
- On obtient  $\Delta t = \frac{n_c l}{c} \left( \frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right)$
- Application numérique: Pour  $n_c = 1.5$  et  $l = 100$  km, on a  $\Delta t = 3.4 \mu s$ . On peut en déduire le débit  $Q = \frac{1}{\Delta t} = 294$  kbit/s
- *Remarque : on touche à la dispersion intermodale sur laquelle on revient dans le 3.*

**Transition:** Ici on considère que toutes les incidences peuvent se déplacer. Dans la réalité ce n'est pas vrai. Voyons comment on peut utiliser un modèle ondulatoire simple pour le comprendre.

*Remarque : on peut déjà mettre en évidence le fait que seuls certains modes sont propagés par une approche géométrique, voir [2] p.263-264*

## 2 Guidage d'une onde électromagnétique

### 2.1 Champ E entre deux plans métalliques [1],[3],[5]

- On prend une propagation dans le vide (D'Alembert)
- On place deux plaques de métal parfait en  $\pm a$
- On prend une solution particulière en  $\vec{E} = E_o(x, y, z)e^{i(\omega t - kz)}\vec{e}_y$
- Montrer que cela est possible si on a la forme suivante  $\vec{E} = E_o e^{i(\omega t - kz)} \sin\left(\frac{p\pi a}{x}\right)\vec{e}_y$

### 2.2 Structure du l'onde [1]

- Onde se propageant selon  $\vec{e}_z$  et stationnaire selon  $\vec{e}_x$
- Attention, à z fixé, le champ dépend de x. L'onde n'est donc pas plane
- On s'est placé dans le cadre d'une onde dite TE. Il peut exister des ondes TM.
- Dans notre exemple, une onde TEM est impossible.
- Transformer le produit d'un sinus et d'un cosinus en une somme de deux ondes planes se propageant avec un angle :

$$\begin{aligned}\vec{E} &= E_o \cos(\omega t - \kappa z) \sin\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \vec{e}_y \\ \vec{E} &= \frac{E_o}{2} \left[ \sin\left(\omega t - \kappa z + \frac{p\pi x}{a}\right) + \sin\left(\omega t - \kappa z - \frac{p\pi x}{a}\right) \right] \vec{e}_y \\ \vec{E} &= \frac{E_o}{2} \left[ \sin\left(\omega t - \kappa \left[z + \frac{p\pi x}{\kappa a}\right]\right) + \sin\left(\omega t - \kappa \left[z - \frac{p\pi x}{\kappa a}\right]\right) \right] \vec{e}_y\end{aligned}$$

- En fait on a une somme d'ondes planes se propageant selon des directions en biais, quantifiées, et données par un angle vis à vis de l'horizontale  $\theta_p$  vérifiant  $\sin(\theta_p) = \frac{p\lambda}{2a}$

## 2.3 Aspects énergétiques (sur slide) [1]

- Calculer le champ  $\vec{B}$  associé
- En déduire le vecteur de Poynting, prendre sa moyenne temporelle, la composante selon  $x$  est alors nulle
- L'énergie se propage bien selon  $z$  : c'est gagné

**Transition:** On voit que l'énergie transite bien dans la bonne direction, mais ça se fait au prix d'une propagation modale. Vérifions qu'on a des vitesses différentes comme pour la fibre

## 3 Conséquences du guidage : la dispersion

### 3.1 Relation de dispersion

- Injecter la forme du champ  $\vec{E}$  obtenue en 2.1 dans l'équation de D'Alembert
- En déduire la relation de dispersion :

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

- Tracer (2) les relations de dispersions pour les différents modes.
- Mettre en évidence que pour une même pulsation  $\omega$  d'entrée, on a **plusieurs modes possibles**.
- Calculer la vitesse de groupe  $v_g$ , montrer que deux modes ne se propagent alors pas à la même vitesse : c'est la **dispersion intermodale** (3) (dans un premier temps, ajuster le code pour montrer juste deux modes, puis en rajouter au besoin). Faire le lien avec la fibre optique en 1.2

### 3.2 Pulsation de coupure

- Mettre en évidence la pulsation de coupure
- En déduire une condition sur  $\lambda$  pour avoir un guide monomode :  $\lambda < \lambda_c = \frac{2a}{p}$
- Donner un ODG pour un guide d'onde métallique de TP par exemple, ou pour une fibre optique.

### 3.3 Contraintes technologiques

- Insister sur la notion phare : le guidage induit une dispersion et une sélection de certains modes pouvant se propager dans le guide.
- Sur slide, donner les différents guides adaptés au guidage et à la transmission des différents domaines fréquentiels :
  - à BF, il faudrait de trop grandes dimensions de guides pour éviter de couper les basses fréquences : il faut de nouvelles CL  $\Rightarrow$  câble coaxial
  - pour des fréquences intermédiaires, le guide d'ondes métalliques marche bien
  - à HF, autre problème de l'atténuation à longue distance (limites du conducteur parfait !)  $\Rightarrow$  fibre optique

## Conclusion

Ouverture vers le guidage d'ondes acoustiques [6]: sélection des modes en fonction de la géométrie de l'instrument et des CL qu'on lui impose.

## Bibliographie

- [1] PUF Mauras, **Électromagnétisme** : chap 5 p.182 pour le guide d'ondes métallique
- [2] Taillet, **Optique** : début du chap 8 pour le traitement géométrique de la fibre optique
- [3] H Prépa Ondes : chap 8.3 pour le guide d'ondes métallique
- [4] Garing, **OEM diélectriques** : fibre en optique géométrique (exo 3.6 p.104-108)
- [5] Sanz, **MP physique tout en un** : chap 15, calcul simple dans le guide d'onde métallique
- [6] Epreuve A 2009 pour le guidage en acoustique :
  - [http://b.louchart.free.fr/Documents/CE/01/Aggregation/Agreg\\_ext\\_Physique\\_2009\\_A\\_Enonce.pdf](http://b.louchart.free.fr/Documents/CE/01/Aggregation/Agreg_ext_Physique_2009_A_Enonce.pdf)
  - <http://agregation-physique.org/images/Annales/2009/ccp09.pdf>

## Manipulations, ressources

- (1) Geogebra pour la fibre à saut d'indice :  
<https://www.geogebra.org/m/ebYXaHG2>
- (2) Tracé sur python des relations de dispersion dans le guide d'onde
- (3) "Séparation des modes TE" sur <https://www.sci-phy.org/agreg>
- (4) Visualisation des modes TE et TM dans un guide d'ondes :  
<https://www.falstad.com/embox/guide.html>
- (5) Vidéo fibre optique JT France 2 :  
<https://www.francetvinfo.fr/internet/securite-sur-internet/internet-des-cables-s-1532971.html>