

LP29 : ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DANS LES MILIEUX CONDUCTEURS (L2)

Prérequis

- OEM dans le vide
- équations de Maxwell dans les milieux
- modèle de Drude
- théorie générale des ondes (vue avec les ondes mécaniques)

Idées directrices à faire passer

- l'effet de peau est un phénomène caractéristique des conducteurs (du milieu donc), non des ondes
- intérêt et validité du modèle du conducteur parfait

Commentaires du jury

- les traitements BF **et** HF doivent être faits
- Les exemples sont importants pour illustrer les conséquences de la relation de dispersion

Bibliographie

- [1] Hprépa Ondes 2nd année, Brebec, Hachette (central dans l'étude, on se réfère au "chapitre 7 dispersion absorption et paquet d'onde")
- [2] Electromagnétisme I, Feynman, Dunod (explication de la pulsation plasma)
- [3] Chimie physique, Atkins, De Boeck (pour les électrolytes)
- [4] Magnétisme : statique, induction et milieux, Garing, Ellipses

Introduction

I Modélisation d'un milieu conducteur [1]

1 Cadre de l'étude

- définition milieu conducteur (trois cas : métaux, plasma, électrolyte)
- équations de Maxwell dans les conducteurs (non magnétiques, non polarisables)
- + équation constitutive -> loi d'Ohm

└ Pour le moment, nous ne simplifions pas ces équations. On appliquera ensuite l'ARQS magnétique et on montrera que la densité volumique de charge peut être prise nulle dans un bon conducteur.

2 Modèle de Drude [1]

- reprendre rapidement l'approche du Hprépa dans le modèle de fluide conducteur
- justifier que la contribution de \vec{B} est négligeable
- établir l'équation du mouvement
- en déduire la valeur de la conductivité complexe

3 Application aux trois milieux conducteurs précédents [1] et [3]

- l'équation de mouvement est valable dans les 3 milieux
- donner une interprétation de τ dans ces 3 milieux et quel est le type d'interaction (Atkins pour l'électrolyte)
- donner des ODG de τ
- montrer que vue l'ODG de τ , la densité volumique de charge peut être considérée nulle pour des fréquences raisonnables.
- donner des ODG de la conductivité dans ces milieux

II Vers la relation de dispersion [1]

1 Equation de propagation

- établir l'équation de propagation de \vec{E}
- on constate que c'est l'équation de d'Alembert classique mais avec un terme supplémentaire. Ce terme sera à l'origine de la dispersion dans le milieu
- choix de base OPPM (par linéarité) + ondes transverses (à démontrer avec les équations de Maxwell)

2 Relation de dispersion [1]

- donner la relation
- elle est non linéaire
- définir la permittivité et l'indice complexes
- dans la suite, on va s'intéresser à l'étude des différents cas limites

3 Liens relation de dispersion / propriétés de l'onde [pas de réf.]

Il faut connaître cette partie, elle n'est pas présentée de manière synthétique dans un livre

- k dépend de ω -> dispersif
- $\text{Re}(k)$ non nul -> propagation
- $\text{Im}(k)$ non nul -> absorbant
- $\text{Re}(\sigma)$ non nul -> dissipation

III Etude des cas limite

1 Cas des basses fréquences ($\omega\tau \ll 1$) : effet de peau

1.1 relation de dispersion, épaisseur de peau [1]

- conséquence de l'approximation -> conductivité réelle
- relation de dispersion associée
- écriture de k et introduction de δ
- expression des champs dans le cadre OPPM. Interpréter δ
- ODG de δ selon la fréquence pour le cuivre

1.2 Aspect énergétique [1]

Calculer la puissance dissipée par effet Joule (que l'on pourra intégrer sur toute l'épaisseur du matériau). Il y a propagation avec dissipation. Montrer que cette valeur est égale au vecteur de Poynting évalué à l'abscisse 0.

1.3 Application aux fils électriques [4]

Reprendre le traitement du Garing p177. On ne fera pas de calcul mais on explicitera la démarche. On donnera sans démonstration la valeur de la puissance linéique dissipée dans le conducteur et on en déduira la résistance. Commenter.

2 Cas des hautes fréquences ($\omega\tau \gg 1$)

2.1 pulsation plasma [1] et [2]

- milieu dans la limite non collisionnelle (cas des plasmas ou des métaux à haute fréquence)
- introduire la pulsation plasma
- utiliser le Feynman pour le sens physique de cette pulsation (pulsation propre du gaz de porteurs)

2.2 cas $\omega < \omega_p$ et conséquences pratiques [1]

- relation de dispersion
- onde évanescente sans propagation
- calculer le vecteur de Poynting. La réflexion est totale

- explique la brillance des métaux et la couleur des alcalins (dont ω/ep est dans le visible), mais pas la couleur du cuivre ou de l'or
- utilisation en télécoms (communication radio avec réflexion ionosphérique)

2.3 Cas $\omega > \omega_p$ et conséquences pratiques [1]

- relation de dispersion
- zone de transparence (propagation sans atténuation mais dispersive)
- évaluer la vitesse de phase
- zone de transparence permet de communiquer avec les satellites

Conclusion : reprendre l'excellent tableau récapitulatif d'Adrien.

Q/R

1. Le modèle de Drude permet d'expliquer la couleur de certains métaux, mais pas de tous. Expliquer lesquels et pourquoi.
2. Développer l'hypothèse de l'ARQS magnétique. S'assurer qu'elle est valable ici.
3. Relier la dissipation à une perte par effet Joule. Peut-on parler de courant de Foucault dans le matériau ?
4. Que représente v dans le modèle de Drude ? ODG et comparer à la vitesse des électrons de conduction dans un solide (vitesse de Fermi)
5. Comment peut on expliquer la couleur des métaux si le modèle de Drude est insuffisant ?
6. Donner un exemple de miroir dans le domaine IR.
7. Comment distinguer un diélectrique d'un conducteur ?
8. Donner la signification physique de τ dans le modèle de Drude.