

LP n° 29 **Titre :** Ondes électromagnétiques dans les milieux conducteurs

Présentée par : Emmanuelle Poncet

Rapport écrit par : Guillaume Pages

Correcteur : Richar Monier ; Erwan Allys

Date : 04/12/2018

Bibliographie de la leçon :			
Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Dunod PC			
Dunod MP			

Plan détaillé
<p><u>Niveau choisi pour la leçon : CPGE</u></p> <p><u>Pré-requis :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Equations de Maxwell • OEM • Puissance et énergie EM • formalisme complexe <p><u>Introduction :</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Définition conducteur 2. Différents types de conducteurs (métaux, solutions ioniques, semi conducteurs..) <p><u>I) Conduction dans les métaux :</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Loi d'ohm <ul style="list-style-type: none"> • Loi d'ohm locale • Modèle de Drude avec : Bilan de forces sur l'électron, PFD en complexe <p>→ expression de la densité de courant en fonction de E → apparition d'une conductivité complexe → si $w=0$, conductivité réelle en régime permanent</p> <p>ODG : $n=10^{28} \text{ m}^{-3}$ gamma environ égale à 10^7 S.m^{-1} Taux=10^{-13} s si $w.\text{taux} \ll 1$, $w=10^{13} \text{ rad.s}^{-1}$ → gamma réelle, loi d'ohm applicable si $w < 10^{13} \text{ rad.s}^{-1}$ si $w.\text{taux} \gg 1$ gamma imaginaire pur, exprimable avec la pulsation plasma</p> <ol style="list-style-type: none"> 2) Densité de charges d'un conducteur <p>loi d'ohm +conservation de la charge → densité de charges s'annule vite ;</p>

(projeté au tableau)

Temps caractéristique = 10^{-19} s

II) Propagation dans un conducteur, généralités.

1) Equation de propagation

projection des équations de Maxwell

→ obtention de l'équation de propagation avec équations de Maxwell

2) Relation de dispersion

Obtention d'un vecteur d'onde complexe

3) Interprétation physique

A partir d'un champ E pseudoharmonique, apparition d'un terme de propagation et d'un terme d'atténuation

projection de k_1 et k_2 sur un même graphe en fonction de ω

→ 3 domaines

4) différents domaines :

$\omega \tau \ll 1 \rightarrow k_1 = k_2$ (ondes hertziennes) → domaine ohmique
domaine optique :

- $1/\tau < \omega < \omega_p \rightarrow k_2 > k_1$ (visible)
- $\omega < \omega_p \rightarrow k_1 > k_2$

III) Domaine Ohmique

1) relation de dispersion

$\omega \tau \ll 1$

→ k est complexe

→ notation de k avec δ

2) Forme des champs, effet de peau.

A partir d'un champ E pseudoharmonique, apparition de l'épaisseur de peau

→ Le champ électrique ne peut pénétrer dans le conducteur que jusqu'à une épaisseur de l'ordre de quelques δ

Tableau avec épaisseur de peau en fonction de la fréquence

→ fils de cuivre, le courant circule bien

→ pour fréquences trop élevées, pertes par effet joule

3) Aspect énergétique

Projeté le calcul du champ B à partir du champ E et de Maxwell Faraday

Projeté l'expression du vecteur de Poynting moyen

IV) Domaine optique

1) Relation de dispersion

$$w.taux \gg 1$$

$$k^2 = (w^2 - w_p^2)/c^2$$

2) Cas où $w \gg w_p$

$$k = \sqrt{w^2 - w_p^2}/c$$

→ milieu dispersif, expression de vitesse de phase et de groupe, de leur relation

→ relation de Klein Gordon

Projette graphe vitesse de phase et de groupe en fonction de w

→ commentaire sur la propagation d'un champ E Harmonique (pas d'atténuation)

→ milieu transparent à l'onde

3) Cas où $w \ll w_p$

k est imaginaire pur

→ expression de E

→ l'onde ne se propage pas (onde évanescente)

Projette le calcul du champ B à partir du champ E et de Maxwell Faraday

Projette expression du vecteur de Poynting moyen

→ vecteur de poynting nul

→ miroir (partie visible)

Conclusion :

projette tableau récapitulatif sur les trois domaines

Questions posées par l'enseignant

- Equation de propagation : C'est vraiment une équation de propagation ?
→ également diffusion
- Unité de J ?
- Vous connaissez la pression de radiation ? Les guides d'ondes ?
- Sur guide d'onde de longueur a et b , comment b se compare à la longueur d'onde qui se propage ?
- Qu'est ce qui explique la couleur orangée du cuivre ?
- Loi d'ohm fondamentale ou phénoménologique ?
- Quelles hypothèses sur loi d'ohm ?
- Analogie avec loi de fourier, ça vous semble toujours valide ? Ecrire la loi de fourier.
- Force de frottements liées à collisions entre électrons ?
- Pourquoi on ne prend pas en compte les interactions entre les ions du réseau ?
- À quoi est lié le temps caractéristique ?
- Loi d'ohm dit que J colinéaire à E ?
- Taux temps entre deux chocs, si $w.taux \ll 1$, comment on interprète ça en terme de chocs ?
Beaucoup de chocs sur une période ? Transfert d'énergie ou pas ? Si $w.taux \gg 1$ transfert d'énergie ou pas ? Compatible avec domaine ohmique et optique ?
- Transfert d'énergie entre onde et matériau quand reflexion totale ?
- On peut avoir densité de charges quand régime permanent dans un métal ?
- Domaine ohmique, vous avez choisi le signe de k , il se passe quoi si on change le signe ?
- Pourquoi avoir choisi $1-i$ et pas $1+i$?
→ choix de la solution physique

- comment évolue la résistance d'un fil en fonction de la fréquence ? Raisonner avec épaisseur de peau
→ S diminue, R augmente donc effet joule augmente
- propagation dans le matériau, flux de poynting diminue, sous quelle forme est transmise l'énergie dans le conducteur ?
- En terme d'énergie, à quel moment en néglige k_1 ou pas ? k_1 et k_2 sont-ils si différents ?
- W_p c'est quoi, ça vient d'où ?
- R_0 excès de charge et pas charge → retour à l'équilibre
- Pourquoi ne pas avoir fait le choix de construire le graphe avec les élèves ?
- Si vous aviez eu plus de temps, vous auriez rajouter quoi ?
- Possibilité à partir de Poynting de parler de réflexion, transmission...
- Différence entre une onde évanescente et un effet de peau ?
- Des exemples d'applications ?
- Comment expliquer les frottements fluides à des élèves ?

Commentaires donnés par l'enseignant

- Notion sur l'énergie pas assez discutée car en lien avec modèle microscopique de la loi d'ohm, modèle de drude. (beaucoup de transfert d'énergie si $\tau \ll 1/\omega$ et inversement; Possibilité de voir aussi que si γ imaginaire pure, ne travaille pas...)
- Dommage de montrer le graphe (k réel) et de faire des calculs avec le k idéal (avec approximations)
- savoir faire calcul avec champ de pression
- Ohm : loi phénoménologique (loi macroscopique, ne fonctionne plus pour champs trop forts)
- analogie avec loi de fourier si pas de champ B , sinon terme avec potentiel vecteur apparaît
- modèle de drude : électrons indépendants ; Interactions avec les défauts du réseau. Discussion à avoir sur le régime permanent → voir aschcroft
- densité de charge non nulle en régime permanent : tout le temps nul sauf si pulsation plasma
- bien lire sur le modèle de drude, nécessaire de bien l'analyser.
- Avoir notions sur pulsation plasma
- faire différence entre k idéal et k réel
-

Avis sur le plan présenté

Concepts clés de la leçon

Concepts secondaires mais intéressants

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Points délicats dans la leçon

Bibliographie conseillée