

**Titre :** Ondes électromagnétiques dans les milieux conducteurs

**Présentée par :** Camille Meridja

**Rapport écrit par :** Richard Wild

**Correcteur :** Richard Monier

**Date :** 4 Novembre 2019

**Bibliographie de la leçon :**

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Electromagnétisme Fondements et applications	J-P Pérez	Dunod	
Electromagnétisme	J-M Rax	DeBoeck	
Ondes électromagnétiques dans le vide et les milieux conducteurs	Ch. Garing	Ellipses	
Physique des plasmas	J-L Delcroix	EDP	

## Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Premier cycle universitaire

Prérequis :  
-Equations de Maxwell  
-Propagation d'ondes EM dans le vide  
-Milieux diélectriques  
-Phénomènes ondulatoires  
-Equation de diffusion

Introduction

**1 minutes**

### **I)Modèle du conducteur, régime statique**

#### **A)Conducteur**

Définition d'un conducteur : Milieu matériel dans lequel sont susceptibles de se déplacer sur des distances macroscopiques des porteurs de charge.

Exemple des métaux, plasmas, solutions électrolytiques.

Modèle de Drude : porteurs de charges soumis à une force de frottement fluides  $-m\mathbf{v}/\tau$   
Ordre de grandeur de  $\tau$  dans le cuivre.

#### **B)Loi d'Ohm locale**

PFD sur un électron soumis à la force de Lorentz et de Drude

Obtention de l'expression  $\mathbf{J}=\gamma\mathbf{E}$  (en négligeant le terme magnétique de la force de Lorentz pour des porteurs de charge non relativistes)

**8 minutes 40 secondes**

### **II) Réponse en régime variable**

#### **A)Loi d'Ohm complexe**

Même PFD mais en prenant des grandeurs complexes

On en déduit  $\mathbf{j}=\gamma\mathbf{E}$  avec  $\gamma$  complexe et dépendant de la pulsation  $\omega$

On étudie les différents régimes fréquentiels par la suite

#### **B)A basse fréquence**

On retrouve un  $\gamma$  réel

A partir de l'équation de conservation de la charge on montre que la densité volumique de charge peut être considérée comme nulle dans le conducteur

Obtention de l'équation de propagation de E dans le conducteur en partant de  $\text{rot}(\text{rot } E)$ , puis obtention de la relation de dispersion en considérant une onde plane harmonique arrivant en incidence normale sur une plaque métallique → effet de peau

Ordre de grandeur de l'épaisseur de peau pour le cuivre et commentaire par rapport à l'utilisation du cuivre pour les fils électriques

### C) A haute fréquence

On trouve  $\gamma$  imaginaire pur. Introduction d'une susceptibilité diélectrique complexe  
 $J = i\omega\chi\epsilon_0 E$

Equation de conservation de la charge donne  $i\omega \epsilon_r(\omega)\rho = 0$

Deux possibilités : -  $\rho = 0$  comme précédemment

-  $\epsilon_r(\omega) = 0 \rightarrow$  existence d'une pulsation plasma  $\omega_p$

Equation de propagation de E avec  $\epsilon_r$  complexe ( $\omega_p \sim 10^{17}$  rad/s pour le cuivre)

→ obtention de l'équation de Klein Gordon puis discussion selon les cas :

-  $\omega < \omega_p$  : réflexion totale

→ réflexion de la lumière visible par les métaux

-  $\omega > \omega_p$  : milieu transparent + obtention des vitesses de phase et groupe

→ transparence ultraviolette des métaux

34 minutes 30 secondes

### III) Plasmas dilués : application à l'ionosphère

Particularités des plasmas peu denses :  $\tau \gg \tau_{\text{cuivre}}$  ;  $\omega_p \ll \omega_{p\text{cuivre}}$

Ordre de grandeur sur l'ionosphère :  $\omega_p$  de l'ordre de 10 MHz

Applications : -  $\omega > \omega_p$  : pour contacter les satellites en orbites

-  $\omega < \omega_p$  : réflexion totale sur l'ionosphère utilisée pour les télécommunications radio (grandes longueurs d'ondes)

39 minutes

Conclusion générale sur l'utilisation des conducteurs comme réflecteurs et le modèle du conducteur parfait ( $\gamma_0 \rightarrow \infty$ )

39 minutes 50 secondes

### Questions posées par l'enseignant

Pouvez-vous tracer les vitesses de phase et de groupe selon la pulsation ?

Pour quel régime de fréquence a-t-on réflexion totale sur l'ionosphère ?

Qu'est ce que ça vous évoque la pression de radiation ?

- Démontrer la relation avec la force de Laplace
- Connaissiez-vous une autre démonstration ? (corpusculaire)
- Application de la pression de radiation ? (radiomètre de Crookes)

Pourquoi a-t-on réflexion totale à l'interface et pas absorption de l'énergie de l'onde par effet Joule ?

### Commentaires donnés par l'enseignant

Bonne leçon, plan correct, calculs très bien menés, peu de chose à redire

L'équation de conservation de la charge pour justifier la décroissance exponentielle de la densité de charge c'est très bien

Faire un tableau regroupant les épaisseurs de peau pour différentes fréquences pour le cuivre

Attention à ne pas oublier des vecteurs

On aurait pu mentionner les guides d'ondes

**Partie réservée au correcteur**

**Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)**

*Tres bonne presentation, bien preparee. Bonne distance par rapport a vos notes. Le rythme est bon. Bonne gestion du temps.*

**Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates**

Pensez a ecrire au tableau un ordre de grandeur de l'épaisseur de peau pour differentes frequences. Indiquer dans quelles autres domaines de la physique on arrive a une equation de diffusion.

On peut mentionner la pression de radiation et en faire un calcul rapide.

**Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)**

Penser au radiometre de Crookes.

**Bibliographie conseillée**

La bibliographie utilisee est tout a fait bonne.

Note indicative : 16-17 ou A