

Titre : Milieux diélectriques

Présentée par : Alfred Hammond

Rapport écrit par : Léa Chibani

Correcteur : Alexis Bres

Date : 26/03/2020

Bibliographie de la leçon :			
Titre	Auteurs	Éditeur	Année
BFR 4 Feynman http://www.matthieurigaut.net/public/vieux_spe/elmg/cours_elmg04_prof.pdf			

Plan détaillé

Niveau : Licence

Prérequis : Relation de Maxwell/potentiel d'un dipôle électrostatique/Oscillateur amorti/

Introduction :

-Définition d'un milieu diélectrique : (isolant, neutre) milieu susceptible d'acquérir une polarisation électrique sous l'effet d'un champ E extérieur.

-Exemples de milieux diélectrique : le Verre, l'air, les matériaux plastiques

→ état électrique d'un milieu diélectrique ?

I)Électrostatique des milieux diélectriques :

A)Polarisation électrique

-Définition du vecteur polarisation $P(M)$: densité volumique du moment dipolaire

-Schéma d'un volume mésoscopique avec le vecteur polarisation comme étant égal à la somme des i vecteurs moments dipolaires p_i par unité de volume mésoscopique

→ physiquement, la description en terme de polarisation peut aussi s'interpréter en terme de densité de charges **liées**

B)Densité de charges de polarisation

1)Approche physique (expliqué dans le **BFR p7-9**)

-On prend un volume mésoscopique constitué de n particules par unité de volume

-En l'absence de polarisation : le milieu est neutre

-La polarisation, résulte d'un déplacement de distance δi de particules de charges q_i à travers une surface

dS . On a un flux. Charge à l'intérieur du cylindre de volume $\delta i * dS$ est :

$$\sum q_i * \delta i * dS = P \cdot dS = \sigma_{polarisation}$$

-La charge totale Q ayant traversé S et donc qui a quitté le volume mésoscopique dV est

$$\iint P \cdot dS = Q$$

-Or le milieu est neutre donc à l'intérieur du volume dV il reste : $\iint -P \cdot dS = -Q$

-On applique Green-Ostrogradski et il vient **$\rho_{pola} = -\text{div}(P)$**

2)Approche mathématique

-Donner le potentiel créé par un dipôle et en déduire les expressions grâce notamment à l'astuce mathématique **$\text{grad}(1/r) = -r/r^3$**

→ Champ extérieur crée une polarisation. Mais la polarisation est aussi une source de champ électrique

C)Champ électrique dans un diélectrique (cas statique)

-On étudie la polarisation comme source d'un champ électrique ; Cela modifie les équations de Maxwell

-**Hyp : cas statique** : $\text{div}(E) = (\rho_{\text{libre}} + \rho_{\text{liée}}) / \epsilon_0$

-**OR** on sait que sans champ E il n'y a pas de polarisation **donc** $P(M)$ est une fonction de E .

-**Hyp** : milieux DLHI (à justifier correctement) → $P(M) = \epsilon_0 * \chi * E$

-Remplacer → on trouve $\text{div}(E) = (\rho_{\text{libre}}) / \epsilon_0(1 + \chi)$

-Discussion physique grâce à un exemple ; le condensateur plan :

- Formule du champ E avec diélectrique et sans diélectrique : facteur $(1+\chi)=\epsilon_r$ à définir **correctement** au dénominateur dans le diélectrique
- Formule Capacité d'un condensateur avec et sans le condensateur
- Finalement on en déduit **qu'à tension égale, si le champ E est diminué d'un facteur ϵ_r alors la charge est augmentée du même facteur \rightarrow capacité de stockage de l'énergie est plus grande.**

\rightarrow Comment se polarise le milieu diélectrique ? Il y a 3 sources de polarisation :

II) Approche microscopique

A) Polarisation électronique

- La matière au niveau micro est composée d'électrons et de noyau. Les électrons (masse $m_e < m_{\text{noyau}}$ (satbles)) vont se déplacer sous l'effet d'un champ extérieur que l'on prend sinusoïdale ici $E = E_0 \cos(\omega t)$
- Schéma + repérage de l'électron avec le vecteur r
- PFD \rightarrow **modèle de l'électron élastiquement lié.**
- On en déduit **p (moment dipolaire pour un électron)** or on étudie un volume mésoscopie dV qui contient n particules par unité de volume : $P(M) = \epsilon_0 \chi E$
- Identification de χ

B) Polarisation ionique

- [slide]
- Titanate de Barium : les atomes de Titane se déplacent vers ceux d'Oxygène. Il se crée ainsi un moment dipolaire de source ionique. \rightarrow Ferroélectricité [BFR p72]

C) Polarisation d'orientation

- Par exemple dans la molécule d'eau \rightarrow molécule polaire
- Il se crée une polarisation moyenne dans le fluide sous l'effet d'un champ extérieur E .
- Cependant processus non instantané [voir BFR p90 et le processus de relaxation]

D) Polarisabilité d'un milieu/notion de permittivité électrique dans les milieux

- Quel est le champ ressenti par un atome à l'intérieur d'un diélectrique ? [BFR p64]
- Modélisation du champ local de Lorentz : $E_{\text{trou}} = E_{\text{ext}} + E_{\text{dépolarisant}} (=P / 3\epsilon_0)$
- En déduire l'expression de χ
- Valeurs caractéristiques de ϵ_r (statique) eau/air/quartz

\rightarrow On s'intéresse maintenant plus précisément au cas où χ dépend de la pulsation

III) Propagation d'une onde EM dans un milieu diélectrique

A) Equation de propagation

- Equation de Maxwell \rightarrow à modifier car il y a aussi des densités de courant de charges liées (2 justifications possibles : soit prendre milieux sans charges libres/soit BFR p10)
- Expression équation de dispersion \rightarrow vitesse de phase/ vecteur d'onde complexe

B) Indice de réfraction complexe

- En déduire égalité entre $n^2 = \epsilon_r$ à partir de l'expression de $k \rightarrow$ on en déduit qu'il peut y avoir **dispersion + absorption (partie imaginaire de n)**
- Analyse des courbes expérimentales \rightarrow cas de l'eau [slide]
- Analyser les différents régimes **haute fréquence/basse fréquence** du champ E_{ext}

Conclusion :

-Les milieux diélectriques ont d'autres propriétés. Par exemple, si l'on fait un bilan d'énergie sur une onde EM harmonique, on remarque qu'il y a 3 réservoirs d'énergie : **E, B et P or P proportionnel à E** donc..



Questions posées par l'enseignant

Questions :

1) Fil rouge de la leçon ?

Traiter les aspects statiques et dynamique de la réponse d'un milieu diélectrique à un champ E_{ext}

2) Différence entre milieu conducteur et milieu diélectrique ?

- Conducteur : charges **libres**, les porteurs de charges se déplacent dans toute la masse du matériau. A l'équilibre électrostatique $E_{\text{int}} = 0$ pour un conducteur.

- Milieux diélectriques : champ E_{ext} peut pénétrer à l'intérieur (d'ailleurs préfixe dié de diélectrique ça veut dire « **à travers** »)

3) Comment définir le volume d'étude ?

-Volume mésoscopique. On veut faire des moyennes ! A relier à la mécanique des fluides. Localement, les grandeurs électriques varient énormément → on veut avoir des grandeurs **moyennées**

4)Densité de charges est-elle conservée ?

Oui , le diélectrique neutre

5)Lien entre **P** et **E** ? Nom de l'équation ?

-Equation d'état

6)Hypothèse DLHI : redéfinir ce à quoi ça correspond et surtout lien avec la formule ?

7)De quoi dépend χ ?

-Dépend de la température et de la densité volumique **n**

8)On a pour l'eau $\epsilon_r=80$ alors que $n_{\text{eau}}=1,33 \rightarrow n^2$ n'est pas égal à ϵ_r ???

-La valeur de 80 est obtenu pour une fréquence de l'ordre du kHz alors que l'indice optique de $n=1,33$ est l'indice $n(w)$ avec w pulsation/fréquence dans le domaine **optique (du visible) !!**

9)Modèle historique du modèle de l'électron élastiquement lié ?

-Modèle avec une sphère chargée + et un électron qui gravite autour

-il suffit de faire le calcul champ **E** crée par une sphère uniformément chargée et on obtient le « même » résultat

10)A quoi correspond physiquement le terme de frottement ?

-Interprétation 1 : l'électron rayonne car il est accéléré

-Interprétation 2 : du à la largeur de la bande spectrale → on a une lorentzienne et on peut en déduire un temps **tau** (de relaxation)

11)Polarisation par orientation : qu'est ce qui fait que tous les dipôles ne s'orientent pas ?

-En fait il faut aussi prendre en compte l'agitation thermique.

-Chaque molécule polaire dans le système à une orientation aléatoire (avec agitation thermique). Cela coutera plus d'énergie thermique pour aligner une molécule polaire lorsque son moment dipolaire fait un angle avec la direction du champ **E_ext** / qu'un molécule dont le moment dipolaire est déjà presque aligné avec la direction du champ **E_ext** (**il faut ajouter le poids du facteur de Boltzmann**)

13) Dans quoi est utilisé le quartz ?

-On utilise souvent les propriétés piézoélectrique du quartz dans les écran tactils

14)Est-ce qu'on a le droit d'appliquer la conservation de la charges **uniquement** à la densité volumique de polarisation ?

-Oui car on peut « considérer » que la densité volumique de courant lié est un un dvpt limité de la densité volumique de courant libre

15)Le nivellement impose-t-il une limite sur les phénomènes à étudier ?

-oui : on peut le voir en temps : les échelles de temps considérer doivent être plus grande qu'un certain temps de relaxation du milieu diélectrique afin de pouvoir moyenner.

Commentaires donnés par l'enseignant

- Plan qui correspond à ce que l'on attend.
- Il faudrait peut-être plus d'application : par exemple loi de Cauchy qui permet d'ouvrir sur l'optique (réseau etc) /laser vert / cristaux non linéaires
- On peut parler de biréfringence (cas polarisation anisotrope) ou en conclusion
- Faire la manip qualitative avec le condensateur plan et un matériau diélectrique pour montrer que la capacité augmente**

Partie réservée au correcteur

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

Bonne leçon qui présente les principales notions en faisant bien l'économie de calcul longs et peu intéressants.

Il serait bon de développer d'avantage le versant applicatif : passer par exemple un peu plus de temps sur l'aspect ondes dans les diélectriques (parler de la propagation, lien avec Cauchy, ...), ou éventuellement tenter une ouverture sur les milieux biréfringents.

Essayer de développer un calcul de manière un peu poussée (par exemple l'électron élastiquement lié à faire à fond).

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates

Description macroscopique des milieux diélectriques (parler des champs nivelés !)

DLHI, relation fondamentales

Aspects microscopiques : modèle de l'électron élastiquement lié (attention, savoir justifier la modélisation), polarisation atomique/ionique/moléculaire/d'orientation.

Ondes dans les DLHI : modification des équations de Maxwell, réflexion/réfraction, indice optique, ...

Diélectriques non-linéaires : lien avec l'optique (on revient sur le L de DLHI)

Approches de la biréfringence (on revient sur le I de DLHI)

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Condensateur d'Aepinus sans/avec diélectrique au centre.

Réfraction dans un prisme (à VD ou non) : lien avec loi de Cauchy, qui est un DL du modèle de l'électron élastiquement lié.

Éventuellement, cellule à effet Kerr si on souhaite parler de non-linéarités...

Bibliographie conseillée

BFR EM 4

Landau EM

Ondes électromagnétiques dans les diélectriques, Garing

Feynman Méca 2 (pour Cauchy)

Polycopié de JMR pour une justification du modèle de l'électron élastiquement lié

