

Niveau : CPGE - MP

Prérequis : • Electrostatique (dont champs créés par un dipôle) • Equations de Maxwell • Ondes électromagnétiques dans le vide et aspects énergétiques • Modèle de l'électron élastiquement lié

Biblio :

- [1] M. Bertin, J.P. Faroux, and J. Renault. Electromagnétisme 3. Dunod, 1984.
- [2] J.P. Pérez. Electromagnétisme. 1990.
- [3] M.-N. Sanz. Physique, tout-en-un. MP/MP*. Dunod, 2004.
- [4] S. Olivier, H. Gié, and J.P. Sarmant. Physique Spé. PC*, PC. Tec & Doc, 2000.
- [5] C. Garing. Ondes électromagnétiques dans le vide et les milieux conducteurs. Ellipses, 1998.
- [6] Cours de Jules III. Champ rayonné par un dipôle électrique oscillant

Idées : Le calcul des champs rayonnés est compliqué : on l'étudie ici sous des hypothèses simplificatrices mais censées. Toute charge accélérée rayonne et en particulier le dipôle électrique oscillant permet de générer une onde avec une structure agréable, localement OPPM. Cela permet de comprendre le phénomène de diffusion.

Intro : [2] p. 373 On a étudié la propagation des champs électromagnétiques dans le vide, notamment celle des OPPM, sans jamais se poser la question de l'origine de ces ondes. C'est ce qu'on fait ici, et la source la plus simple est forcément non ponctuelle (loin de la charge on ne verrait pas de variation du champ) donc on va essayer de décrire le champ créé par deux charges ne se ramenant pas à une seule charge : un dipôle !

I. Sources de rayonnement et modèle du dipôle électrique oscillant

1. Sources de rayonnement - Échelles caractéristiques

[6] p. 1 Tout système contenant des charges mobiles (courant $j(M,t)$) est source d'un champ électromagnétique. En régime variable ce champ est de nature propagative et on dit que la source RAYONNE ce champ. En Régime permanent sinusoïdal l'onde rayonnée est monochromatique. La source est caractérisée par trois longueurs principales : a , r , et λ **PWP**. Ordres de grandeur dans le cas de l'atome et d'une antenne quart-d'onde.

On va faire dans cette leçon les hypothèses $a \ll \lambda$ et $a \ll r$. En pratique on a aussi $r \gg \lambda$: c'est la ZONE DE RAYONNEMENT. Remarque : On est à l'opposé de l'ARQS qui correspond à $r \ll \lambda$.

2. Rôles des hypothèses

[6] p. 2 Le calcul des champs est HP, mais on fait le parallèle avec le principe d'Huygens : le champ en M à l'instant t résulte de la superposition des champs émis à un instant antérieur aux points P appartenant au dipôle.

Donc E et B dépendent de l'atténuation (en $1/PM^n$) et du retard à la propagation (en $t - PM/c$).

• [4] p. 730 Pour l'atténuation on a déjà vu une méthode de traitement en électrostatique : on fait le DL de la distance grâce à $a \ll r$. C'est l'APPROXIMATION DIPOLAIRE.

• Pour le retard on peut négliger la variation de j si le δt est négligeable devant la période ce qui équivaut bien à $a \ll \lambda$ (faire un schéma - remarquer que $t - PM/c = t - r/c + \delta(t)$ avec $\delta(t) \approx a/c$ que l'on veut très inférieur à la période T de l'onde).

Transition : [6] p. 5 la distribution la plus simple possible est un dipôle électrique oscillant. Intérêt : les résultats qualitatifs sont généralisables à de nombreuses sources de rayonnement et ce dipôle peut servir de modèle pour décrire des sources réelles.

3. Modèle du dipôle électrique oscillant

[6] p. 5 + [3] p. 576 **PWP** Modèle de charge multiple variable : charge $+q$ fixe, charge $-q$ oscillant autour de O sur l'axe z ce qui donne un moment dipolaire $p(t) = q NP = -qrd(t)$ on note $rd(t) = -a \cos(\omega t)$ et alors $p(t) = aq \cos(\omega t)$ uz. Interprétation de l'hypothèse $a \ll \lambda$ comme hypothèse non relativiste.

Présentation de l'intérêt du modèle :

- Résultats généralisables à de nombreuses sources (notamment sur l'énergie)
- [6] p. 6 Bon modèle pour des sources réelles : électron élastiquement lié, antenne (superposition de dipôles).

Transition : A ce stade on est dans une situation pour laquelle on pourrait mener le calcul des champs mais ça n'est pas attendu au programme. On se contente d'en analyser les expressions et de les interpréter (et c'est déjà très riche

!) - A titre d'information et en vue de répondre aux questions du jury, la démonstration se fait à partir des potentiels retardés. Elle est intégralement traitée dans [4] p. 729-731.

II. Champs rayonnés par le dipôle électrique oscillant

1. Considérations sur la forme générale des champs

[6] p.8 et [3] p. 481 en bas Étude des symétries et invariances (Principe de Curie). $E_\phi = 0$ et $B = B_\phi$ On admet la forme générale des champs présentés sur PWP.

[6] p. 8 et [4] p. 731 Dépendance temporelle en $t - r/c$: caractère propagatif et cohérent avec l'hypothèse non-relativiste.

[6] p. 8 et [4] p. 731 Structure spatiale : pas une onde plane (vecteur de propagation dépend de θ) ni sphérique (à r fixé l'amplitude n'est pas constante). On parle de RAYONNEMENT ANISOTROPE. Renvoyer au traitement énergétique traité un peu plus loin.

2. Structure de l'onde dans la zone de rayonnement

[1] p. 228 et [6] p. 7 - Ordres de grandeur des différents termes (p/r^3 , \dot{p}/r^2c et \ddot{p}/rc^2). Zones de rayonnement, intermédiaire, et ARQS (on retrouve le champ statique). Expressions des champs dans la zone de rayonnement au tableau.

[6] p. 9 et [4] p. 732 Interpréter la structure locale d'onde plane : structure vectorielle et amplitude constante si r et θ ne varient pas trop (plan tangent local).

[6] p. 9 et [4] p. 731 Décroissance en $1/r$ cohérente avec l'hypothèse dipolaire, et atténuation sans perte d'énergie (i.e. sans absorption cohérent avec le fait qu'on soit dans le vide, cf. III)

[6] p. 10 et [3] p. 581 Accélération : Les champs sont proportionnels à \ddot{p} donc on vérifie que pour rayonner un champ électromagnétique les charges doivent être accélérées !

Transition : On doit enfin s'intéresser à la manière dont une telle source de champ rayonne l'énergie, notamment pour quantifier l'anisotropie du champ dont on a parlé plus haut et voir comment la puissance dépend du mouvement de la charge.

III. Puissance rayonnée par le dipôle électrique oscillant

1. Anisotropie du rayonnement

[4] p. 732 On donne la formule et l'expression du vecteur de Poynting, parallèle à \mathbf{u}_r (direction du rayonnement), proportionnel à $1/r^2$ (pas d'absorption), mais dépendant de θ . PWP On trace l'indicatrice de rayonnement pour quantifier l'anisotropie.

2. Puissance rayonnée - Formule de Larmor

[4] p. 732 et [3] p. 582-583 Quelle puissance traverse une sphère de rayon r ? On calcule le flux du vecteur Π pour trouver Φ indépendant de r (énergie conservée). On retrouve que la puissance moyenne est proportionnelle à la moyenne de l'accélération de la charge au carré (formule de Larmor).

[6] p. 10 On a donc rayonnement si la charge est accélérée : antenne (mouvement de charges sinusoïdal), rayonnement thermique, rayonnement synchrotron, de freinage, etc...

Dans le cas du dipôle on a même $P \sim \omega^4$ donc pour une excitation plane en fréquence on rayonne plus à ω élevée

3. Diffusion Rayleigh

[4] p. 734 et [3] p. 583 En fonction du temps, rappeler le lien entre le déplacement du barycentre des électrons de valence et l'excitation électrique, la résonance à ω_0 . Dans l'atmosphère N_2 et O_2 vibrent dans l'UV donc bien en dessous de la fréquence de résonance : approximation faite on a r indépendant de ω et sous l'excitation du soleil (plat dans le visible) on rayonne beaucoup plus le bleu que le rouge ! On peut développer plus ou moins le modèle, et si possible parler un peu de polarisation.

Exp : cuve de diffusion du lait éclairée : on ne voit pas la même couleur suivant la distance. [TP Polarisation I.]

Conclusion : Modèle riche en interprétations. Calcul faisable avec des outils pas trop évolués même si hors programmes car très calculatoires. Suffit à modéliser pas mal de chose, on a vu ici l'électron lié, on pourra prolonger sur les antennes

Commentaires :

- Revoir le cours de Jeremy Neuveu sur l'ARQS
- Diffusion de rayleigh/diffusion de Mie
- Comparer les distances entre elles, et les phases par rapport à 1
- Pour prouver la fameuse assertion « toute charge accélérée rayonne » on peut superposer le dipôle à une charge fixe qui annule la charge fixe du dipôle.
- Pourquoi on se penche principalement sur cette source de rayonnement et pas une autre ?
- Voir la preuve en potentiels retardés dans le Gié + antennes p. 748