

4. Électromagnétisme

4.5. Propagation et rayonnement

D - Rayonnement dipolaire électrique

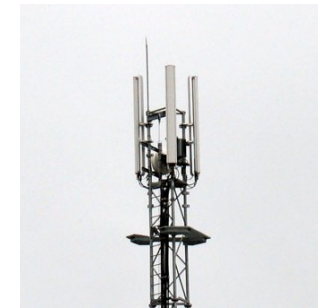
Table des matières

1. Dipôle électrique oscillant	2
1.1. Généralités	2
1.2. Les approximations du modèle	2
1.3. Zone de rayonnement (champ lointain)	3
2. Champ électromagnétique rayonné	3
2.1. Expressions des champs \vec{E} et \vec{B}	3
2.2. Interprétation	4
2.3. Rayonnement anisotrope	4
2.4. Puissance rayonnée	5
3. Quelques propriétés optiques de l'atmosphère	7

Introduction

La source des ondes électromagnétiques est constituée par des distributions de charges et de courants variables (antennes d'émission des ondes hertziennes, atomes ou molécules...).

Pour comprendre le principe de cette émission, on peut partir d'un dipôle électrique ou magnétique, variable au cours du temps et chercher le champ électromagnétique compatible avec les équations de Maxwell en régime variable.

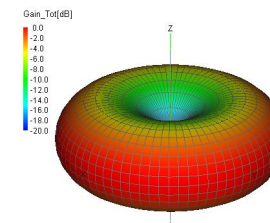


(a) Antennes téléphonie mobile

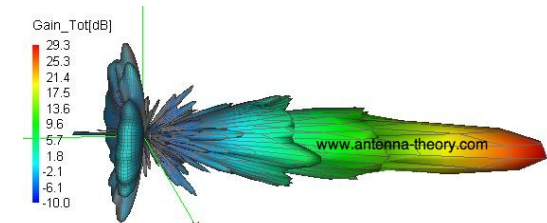


(b) Antenne demi-onde FM

FIGURE 1 – Antennes



(a) Antenne non directionnelle



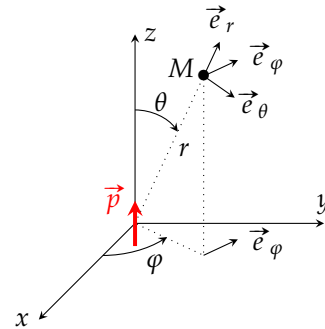
(b) Antenne directionnelle

FIGURE 2 – Diagrammes de rayonnement

1. Dipôle électrique oscillant

1.1. Généralités

On considère dans le repère $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$, un dipôle électrique de moment dipolaire variable $\vec{p}(t)$ placé au point O et dirigée suivant \vec{e}_z : $\vec{p}(t) = p(t)\vec{e}_z$. On appelle $d(t)$ la distance (variable au cours du temps) entre les deux charges opposées.



➔ Peut-on prévoir les orientations de \vec{E} et \vec{B} composantes du champ électromagnétique émis par ce dipôle oscillant ?

1.2. Les approximations du modèle

Supposons la charge $-q$ fixe à l'origine du repère et $+q$ la charge située en un point S animé sur l'axe Oz d'un mouvement sinusoïdal de pulsation ω et d'amplitude d_0 : $d(t) = d_0 \cos(\omega t)\vec{e}_z$.

Le moment dipolaire est donc

$$\vec{p} = qd_0 \cos(\omega t)\vec{e}_z$$

L'étude du rayonnement du dipôle fait apparaître **trois échelles de longueur pertinentes** :

- la **taille maximale du dipôle** d_0 ;
- la **distance** r à laquelle le dipôle est étudié ;
- la **longueur d'onde** $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$.

Les **deux approximations** à retenir sont les suivantes :

Approximation dipolaire L'étude est faite à des distances r très grandes par rapport aux dimensions du système, soit

$$d_0 \ll r$$

Approximation non relativiste Le mouvement de S est supposé non-relativiste. La vitesse maximale de S étant ωd_0 ,

$$\omega d_0 \ll c \Rightarrow a \ll \lambda$$

★ Exemples

Ces deux approximations sont-elles vérifiées dans le cas

1. d'un atome d'hydrogène émettant dans le visible ou dans le proche ultra-violet ?
2. de l'antenne émettrice GO de France-Inter (hauteur 350 m) émettant à la fréquence $f = 162$ kHz ?
3. d'une antenne émettrice d'onde FM ?
4. d'une borne Wi-Fi ?

1.3. Zone de rayonnement (champ lointain)

Les deux approximations précédentes ne donnent pas de relation d'ordre entre r et λ .

On peut donc définir trois zones

- $r \ll \lambda$: la zone proche ;
- $r \simeq \lambda$: la zone intermédiaire ;
- $r \gg \lambda$: la **zone de rayonnement** encore appelée **zone de champ lointain**.

★ Exemples

Reprendre les exemples précédents en précisant si le récepteur de l'onde se trouve généralement dans la zone de rayonnement.

Conclusion L'étude du dipôle électrique oscillant dans la zone de rayonnement sera donc menée en utilisant les approximations

$$d_0 \ll \lambda \ll r$$

2. Champ électromagnétique rayonné

2.1. Expressions des champs \vec{E} et \vec{B}

Dans la zone de rayonnement, le champ électromagnétique créé par le dipôle électrique oscillant est, en posant $k = \frac{\omega}{c}$:

$$\vec{E}(M, t) = \frac{\mu_0 \sin \theta}{4\pi r} \ddot{p} \left(t - \frac{r}{c} \right) \vec{e}_\theta$$

$$\vec{B}(M, t) = \frac{\mu_0 \sin \theta}{4\pi r c} \ddot{p} \left(t - \frac{r}{c} \right) \vec{e}_\varphi$$

On en déduit alors

$$\vec{E}(M, t) = -\frac{\mu_0 \omega^2 \sin \theta}{4\pi r} p_0 \cos(\omega t - kr) \vec{e}_\theta$$

$$\vec{B}(M, t) = -\frac{\mu_0 \omega^2 \sin \theta}{4\pi r c} p_0 \cos(\omega t - kr) \vec{e}_\varphi$$

Ces expressions ne sont pas à retenir. Elles seront fournies si nécessaires. En revanche, vous devez être capable

- de vérifier la dimension physique ;
- d'interpréter physiquement ces expressions ;
- d'en déduire la puissance électromagnétique rayonnée par le dipôle oscillant.

★ Analyse dimensionnelle

Vérifier que les deux expressions ci-dessus sont homogènes.

2.2. Interprétation

- ➡ Commenter le fait que le champ électromagnétique en M à l'instant t soit proportionnel à $\ddot{p}\left(t - \frac{r}{c}\right)$.
- ➡ Décrire les caractéristiques et la structure du champ de rayonnement.
- ➡ Justifier que le champ de rayonnement a, localement, la structure d'une onde plane progressive.
- ➡ Comment varie l'amplitude du champ rayonné en fonction de la distance d'émission r ?
- ➡ L'onde est-elle polarisée ?

2.3. Rayonnement anisotrope

- ➡ Y a-t-il un champ rayonné sur l'axe du dipôle ? Dans quelle direction, le champ rayonné est-il le plus intense ? Comment faut-il orienter l'antenne émettrice située sur Terre si on destine l'onde émise à des récepteurs également situés sur Terre (c'est-à-dire dans un même plan horizontal) ?

- ➡ Exprimer le vecteur de Poynting et sa moyenne temporelle .

L'indicatrice de rayonnement est la représentation en coordonnées sphériques de la surface définie, à r fixé, par la fonction

$$(\theta, \varphi) \mapsto \langle \|\vec{R}\| \rangle$$

Dans notre cas, c'est une surface de révolution autour de l'axe Oz et sa représentation dans un plan $\varphi = \text{constante}$ suffit.

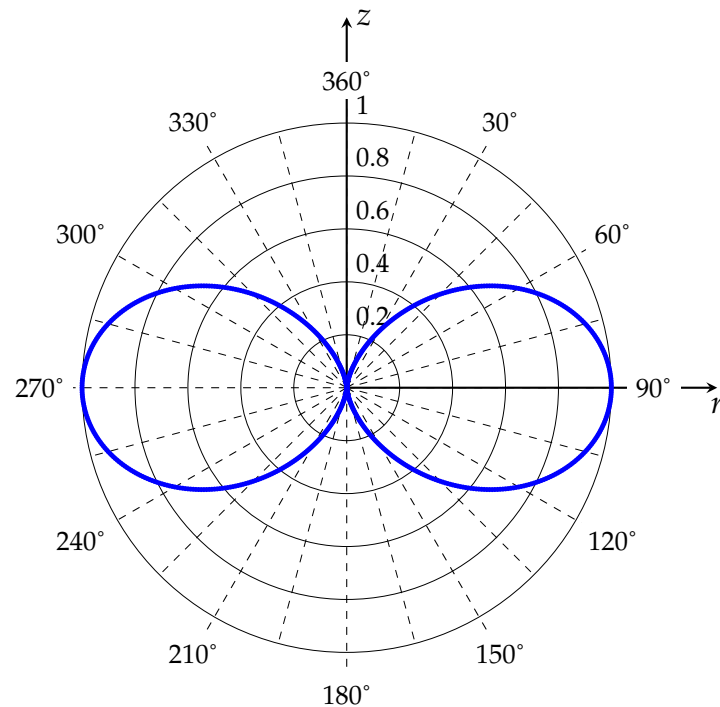


FIGURE 3 – Indicatrice de rayonnement d'un dipôle oscillant parallèle à Oz

2.4. Puissance rayonnée

➔ Justifier, qualitativement, que la puissance moyenne totale rayonnée à travers une sphère de rayon r ne dépend pas de r .

➔ Le vérifier dans la zone de rayonnement en utilisant les expressions de \vec{E} et \vec{B} .

La puissance moyenne rayonnée par le dipôle oscillant s'écrit

$$\mathcal{P} = \frac{p_0^2 \omega^4}{12\pi \epsilon_0 c^3} = \frac{4}{3} \frac{p_0^2 \pi^3 c}{\epsilon_0 \lambda^4}$$

Démonstration :

➡ Établir la formule de Larmor reliant la puissance rayonnée à la valeur moyenne du carré de l'accélération $\vec{a}^2(t)$ de la charge oscillante :

$$\mathcal{P}_{\text{rayonnée}} = \frac{q^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \left\langle \vec{a}^2(t) \right\rangle$$

Cette formule montre que toute particule chargée animée d'un mouvement accélérée rayonne de l'énergie. On peut ainsi comprendre quelques phénomènes :

- **le rayonnement thermique.** Tout corps de température T émet un rayonnement dû au mouvement désordonné des particules le constituant.
- **Le rayonnement continu de freinage** ou **bremsstrahlung**¹ : un des moyens actuels de production de rayons X. En bombardant une cible par un faisceau d'électrons, ces derniers subissent une forte décélération à l'entrée dans le solide et rayonnent une onde électromagnétique.
- **Le rayonnement synchrotron** : rayonnement électromagnétique obtenu par mouvement circulaire (donc accéléré même si la vitesse est de norme constante !) de particules dans des accélérateurs de particules.
- **le modèle de l'atome de Bohr n'est pas viable.** Si les électrons étaient en orbite circulaire autour du noyau d'un atome, ils rayonneraient de l'énergie électromagnétique et auraient donc tendance à se rapprocher du noyau.

1. de l'allemand bremsen « freiner » et Strahlung « radiation »

3. Quelques propriétés optiques de l'atmosphère

- Pourquoi le ciel est-il bleu... en pleine journée et rouge-orangé au lever ou au coucher du Soleil ?
- Pourquoi certaines régions du ciel diffusent-elles de la lumière partiellement polarisée ?



FIGURE 4 – Ciel bleu sur Terre

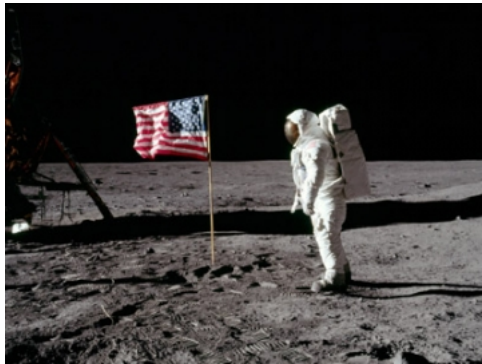
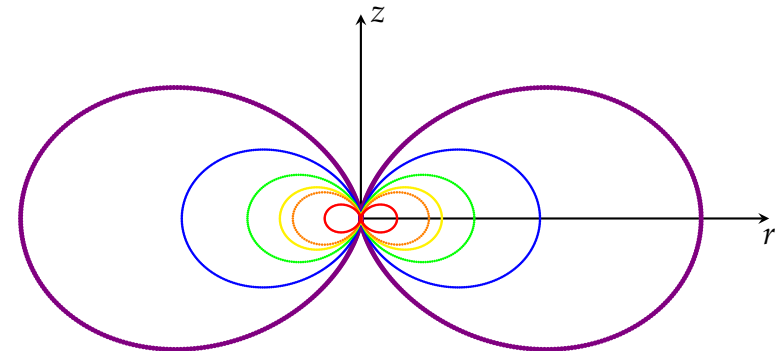


FIGURE 5 – Ciel sur la Lune



FIGURE 6 – Soleil couchant

FIGURE 7 – Indicatrice de rayonnement d'un dipôle oscillant parallèle à Oz selon la longueur d'onde émise