REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana

***F** aculté des **S** ciences et de la **T** echnologie*

Notes de cours:

ANTENNES

Destinées aux étudiants de:

Master 1 de Systèmes de Télécommunications

Année universitaire : 2019 – 2020

Chapitre I : GENERALITE ET PARAMETRES CARACTERISTIQUES DES ANTENNES 5

I.1. Généralité 5

I.2. Rappels sur les paramètres caractéristiques d'une antenne 6

I.2.1. Diagramme de rayonnement, Plans E et H 6

I.2.2. Polarisation 6

I.2.3. Hauteur effective 6

I.2.4. Puissance rayonnée et densité de puissance 7

I.2.5. Résistance de rayonnement 7

I.2.6. Impédance d'antenne 7

I.2.7. Directivité 8

I.2.8. Gain 8

I.2.9. Surface effective 8

I.3. Notion du potentiel vecteur et potentiel scalaire 8

I.3.1. Equations de propagation des potentiels vecteur et scalaire dans un milieu linéaire 9

I.3.1.1. Jauge de Lorentz 9

I.3.1.2. Jauge de Coulomb 10

I.4. Rayonnement du doublet électrique 10

I.4.1. Champ électromagnétique en zone lointaine 10

I.4.2. La densité de puissance 10

I.4.3. L'intensité de rayonnement 11

I.4.4. La fonction caractéristique et le digramme de rayonnement 11

I.4.5. La puissance totale rayonnée 11

I.4.6. La résistance de rayonnement 11

I.4.7. La directivité 12

Chapitre II : ANTENNES FILAIRES 13

II.1. Antenne rectiligne isolée dans l'espace 13

II.1.1. Champ rayonné par antenne rectiligne isolée dans l'espace 13

II.1.2. Fonction caractéristique et diagramme de rayonnement de l'antenne dipôle $\lambda/2$ 14

II.1.3. Fonctions caractéristiques de dipôles multiples de demi-onde 14
II.2. Distribution du courant sur une antenne filaire 15
II.3. Antenne alimentée en son milieu 15
II.4. Antenne verticale au-dessus du sol 16
II.5. Antennes à ondes stationnaires et antennes à ondes progressives 16
II.6. Antennes à ondes progressives 16
II.6.1. Antenne à long fil fonctionnant en ondes progressives 16
II.6.2. Antenne en V et antenne losange 17

Chapitre III : RESEAUX D'ANTENNES 19

III.1. Réseaux d'antennes 19
III.2. Réseau uniforme 19
III.2.1. Réseau uniforme de 2 antennes 19
III.2.2. Réseau uniforme de N antennes 20
III.2.3. Différentes configurations du réseau linéaire 21
III.2.4. Rayonnement transversal et rayonnement longitudinal 22
III.3. Réseau non-uniforme 22
III.4. Principe de multiplication des diagrammes de rayonnement 22

Chapitre IV : RAYONNEMENT DES OUVERTURES PLANES 24

IV.1. Principe de Huygens – Fresnel 24
IV.2. Relation de Kottler 24
IV.3. Rayonnement d'une ouverture rectangulaire 25
IV.4. Rayonnement d'une ouverture circulaire 26

Chapitre V : LES ANTENNES PLANAIRES.....29

V.1. Structure de l'antenne micro-ruban 29
V.2. Avantages et inconvénients des antennes imprimées 29
V.3. Application des relations de Wheeler.....30
V.4. Techniques de miniaturisation d'une antenne planaire 31
V.5. Réseaux d'antennes patch.....31
V.6. Adaptation des antennes planaires.....32
V.6.1. Adaptation par quart d'onde 32
V.6.2. Adaptation par simple Stub 33
V.6.3. Adaptation par double Stub.....33
V.6.4. Adaptation avec encoches.....34
V.7. Rayonnement des antennes planaires 34

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 35

Chapitre I :

GENERALITE ET PARAMETRES CARACTERISTIQUES DES ANTENNES

I.1. Généralité

L'antenne est un dispositif permet la transformation des signaux électriques en onde électromagnétique sur différentes fréquences et réciproquement selon que l'antenne est utilisée en émission ou en réception. Certaines antennes sont même capables d'assurer le fonctionnement dans les deux sens, en émission et en réception.

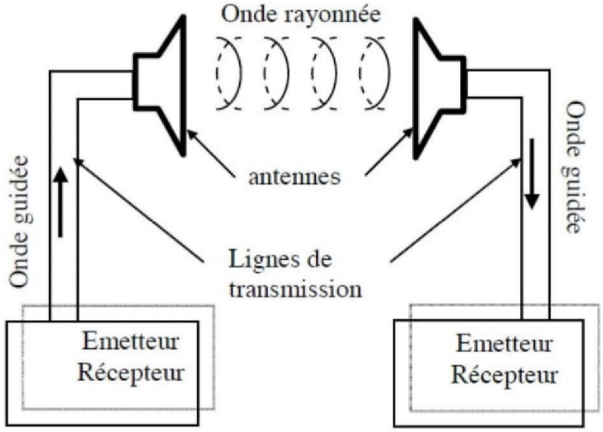


Figure I.1: Principe d'une liaison radioélectrique

Il existe plusieurs modèles d'antenne, chacune avec des spécificités qui lui sont propres. L'élément qui marque le plus leurs différences, c'est leur forme. Les antennes peuvent être regroupées en cinq grandes familles qui sont facilement reconnaissables, pour la plupart, à leur forme:

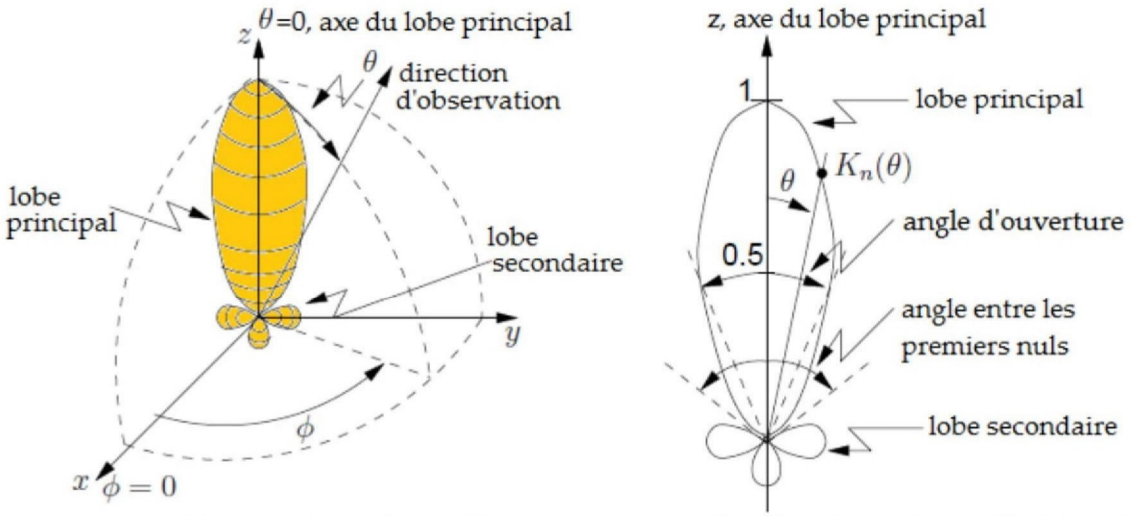
- les antennes filaires (dipôle, monopôle, Yagi…)
- les antennes à fentes (demi ou quart d'onde)
- les antennes imprimées ou patchs (planaires)
- les antennes à ouverture (cornets)
- les antennes à réflecteurs (paraboles)

I.2. Rappels sur les paramètres caractéristiques d'une antenne

Les définitions et les compréhensions de divers paramètres caractéristiques sont nécessaires pour décrire les performances d'une antenne. En ce qui suit, nous rappelons brièvement les paramètres principaux.

I.2.1. Diagramme de rayonnement, Plans E et H

Un diagramme de rayonnement est une représentation graphique tridimensionnelle (en 3D) des propriétés de rayonnement du champ lointain d'une antenne en fonction des coordonnées spatiales. Autrement dit, il représente la distribution de l'énergie en fonction de la direction (angles θ et φ) du signal émis ou reçu par l'antenne.



(a) : Représentation en 3D (b) : Représentation en 2D (plan E)

Figure I.2: Exemple de diagramme de rayonnement

Les directions dans lesquelles le rayonnement est nul, sont appelées nuls et la région comprise entre deux nuls adjacents se désigne par lobe.

I.2.2. Polarisation

La polarisation d'une antenne décrit la direction dans l'espace du vecteur champ électrique de l'onde électromagnétique produite et rayonnée par cette antenne dans le champ lointain. Plus précisément, elle décrit la direction dans laquelle l'intensité du champ est maximale.
Il y a trois types de polarisation:

- Polarisation rectiligne (horizontale ou verticale)
- Polarisation circulaire
- Polarisation elliptique

I.2.3. Hauteur effective

Une antenne plongée dans un champ électromagnétique de valeur instantanée E, est le siège d'une force électromotrice U qui se crée à ses bornes tel que:

$$U = E \cdot h_{eff} \qquad (I.1)$$

où h_{eff} a la dimension d'une longueur dite hauteur effective.

I.2.4. Puissance rayonnée et densité de puissance

Considérons une onde électromagnétique produite par une antenne et traversant un élément de surface dS en un point M à l'espace distant de r par rapport à l'antenne. Soit dP la puissance électromagnétique traversant cet élément dS. On peut définir :

1) La densité de puissance par unité de surface (densité surfacique de puissance) au point M par la relation :

$$\pi_r(s) = \frac{dP}{dS} \qquad [w/m^2] \tag{I.2}$$

2) La densité de puissance par unité d'angle solide au point M par la relation :

$$\pi_r(\Omega) = \frac{dP}{d\Omega} \qquad [w/sr] \tag{I.3}$$

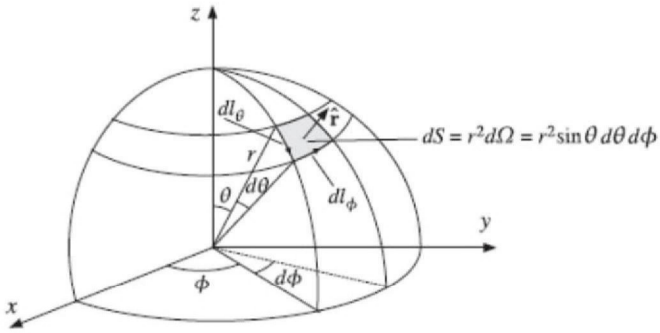


Figure I.3: Puissance rayonnée par une antenne dans une direction de l'espace

L'angle solide élémentaire $d\Omega$ d'une antenne est exprimé par :

$$d\Omega = sin\theta d\theta d\varphi \quad [sr: \text{stéradian}] \tag{I.4}$$

On rappelle la définition de l'angle solide $d\Omega$ sous lequel est vue une surface dS:

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} \tag{I.5}$$

I.2.5. Résistance de rayonnement

Une antenne rayonne de l'énergie associée aux champs électrique et magnétique qu'elle émet, s'agissant de puissance réelle (active), elle se comporte vis-à-vis de l'émetteur qui l'alimente comme résistance appelée résistance de rayonnement de l'antenne.

La puissance électrique qui lui est fournie est une puissance égale à:

$$P_r = R_r I^2 \tag{I.8}$$

où : I est le courant circulant le long de l'antenne.

I.2.6. Impédance d'antenne

Le modèle électrique équivalent à une antenne est généralement un circuit RLC série, c.à.d. un circuit passif et déphaseur de courant.

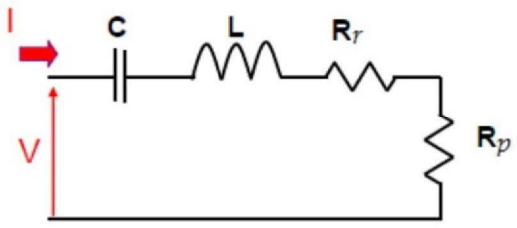


Figure I.4: Modèle électrique d'une antenne

L'impédance d'entrée complexe de l'antenne s'écrit sous la forme suivante :

$$Z_e(\omega) = R(\omega) + jX(\omega) \quad (I.9)$$

Avec $\omega = 2\pi f$: la pulsation, $X = L\omega - \frac{1}{C\omega}$: la réactance, et $R = R_r + R_p$: la résistance de rayonnement + la résistance de perte.

I.2.7. Directivité

La directivité $D(\theta, \varphi)$ d'une antenne est le rapport entre l'intensité de rayonnement $U_{max}(\theta, \varphi)$ dans une direction donnée et l'intensité de rayonnement d'une antenne isotrope émettant la même puissance totale.

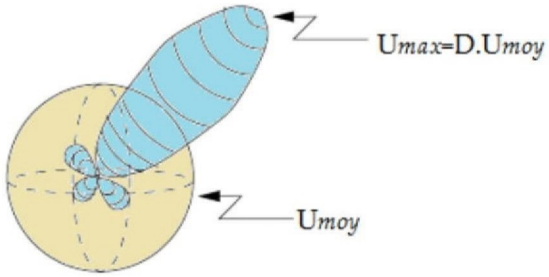


Figure I.5: La directivité; rayonnements isotrope et directionnel

L'intensité de rayonnement est la densité de puissance par unité d'angle solide :

$$U(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\Omega} \quad (I.10)$$

La directivité $D(\theta, \varphi)$ s'exprime, alors:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{P_t/4\pi} \quad (I.11)$$

avec :

$$P_t = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} U(\theta, \varphi) sin\theta d\theta d\varphi \quad (I.12)$$

I.2.8. Gain

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne ne diffère de sa directivité $D(\theta, \varphi)$que par le rendement η de l'antenne:

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad (I.13)$$

En général, le gain G correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0). Cette propriété caractérise la capacité d'une antenne à focaliser la puissance rayonnée dans une direction.

Le gain est exprimé en décibel:

$$G_{(dB)} = 10log_{10}(G) \quad (I.14)$$

I.3. Notion du potentiel vecteur et potentiel scalaire

La troisième équation de Maxwell (Maxwell- Gauss de flux magnétique) montre que l'induction magnétique dérive d'un rotationnel:

$$div\,\vec{B} = 0 \tag{I.19}$$

Il est tentant d'écrire, en analogie avec le champ électrique:

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot}\,\vec{A} \quad \text{c.à.d.} \quad \vec{H} = \frac{1}{\mu}\overrightarrow{rot}\,\vec{A} \tag{I.20}$$

Le remplacement de $\vec{H}$ par son expression dans la première équation de Maxwell (Maxwell-Ampère), nous donne:

$$\overrightarrow{rot}\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = 0 \rightarrow \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \pm\overrightarrow{grad}(V) \tag{I.21}$$

La solution retenue ($-\overrightarrow{grad}$) correspond à une réalité physique ce qui nous permet d'écrire:

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{grad}(V) \tag{I.22}$$

où les potentiels vecteur $\vec{A}$ et scalaire V sont indéterminés car ils possèdent une infinité de solutions.

$$\vec{A}'(x,y,z) = \vec{A}(x,y,z) + \overrightarrow{grad} f(x,y,z) \tag{I.23}$$

$$V'(x,y,z) = V(x,y,z) + \frac{\partial f(x,y,z)}{\partial t} \tag{I.24}$$

I.3.1. Equations de propagation des potentiels vecteur et scalaire dans un milieu linéaire

En utilisant l'équation de Maxwell relative au rotationnel du champ magnétique et compte tenu des équations (I.20) et (I.22) nous trouvons:

$$\overrightarrow{rot}\vec{H} = \overrightarrow{rot}\left(\frac{1}{\mu}\overrightarrow{rot}\vec{A}\right) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} + \varepsilon\,\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{I.25}$$

$$\rightarrow \quad \overrightarrow{rot}\left(\overrightarrow{rot}\vec{A}\right) = \mu\vec{J} + \mu\varepsilon\,\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu\vec{J} + \mu\varepsilon\,\frac{\partial}{\partial t}\left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{grad}(V)\right) \tag{I.26}$$

De plus,

$$\overrightarrow{rot}\left(\overrightarrow{rot}\vec{A}\right) = \overrightarrow{grad}\left(div\,\vec{A}\right) - \Delta\vec{A} \tag{I.27}$$

A partir de ces relations, nous pouvons écrire:

$$\Delta\vec{A} - \mu\varepsilon\frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu\vec{J} + \overrightarrow{grad}\left(\mu\varepsilon\frac{\partial V}{\partial t} + div\,\vec{A}\right) \tag{I.28}$$

Dans ces conditions, l'équation de propagation de potentiel scalaire V est donnée par:

$$div\vec{E} = div\left(-\overrightarrow{grad}(V) - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = \frac{\rho}{\varepsilon} = -\Delta V - \frac{\partial\left(div\vec{A}\right)}{\partial t} \tag{I.29}$$

Alors,

$$\Delta V = -\frac{\rho}{\varepsilon} - \frac{\partial\left(div\vec{A}\right)}{\partial t} \tag{I.30}$$

Pour que les potentiels $\vec{A}$ et V soient uniques, on introduit une contrainte supplémentaire (jauge).

I.3.1.1. Jauge de Lorentz

C'est une condition que l'on peut introduire en électromagnétisme afin d'imposer un lien entre le potentiel scalaire et le potentiel vecteur associés aux champs électrique et magnétique. Dans ce cas, les équations de propagation des potentiels $\vec{A}$ et V auront la même forme que celle des champs $\vec{E}$ et $\vec{H}$.

La jauge de Lorentz est :

$$div\,\vec{A} + \mu\varepsilon\frac{\partial V}{\partial t} = 0 \qquad (I.31)$$

En la remplaçant dans l'équation (I. 28), on obtient l'équation de propagation du potentiel vecteur:

$$\Delta\vec{A} - \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{A}}{\partial t^2} = -\mu\vec{J} \qquad (I.32)$$

Concernant l'équation de propagation du scalaire, nous utilisons la jauge de Lorentz dans l'équation (I. 30) pour trouver :

$$\Delta V = -\frac{\rho}{\varepsilon} - \frac{\partial\left(div\vec{A}\right)}{\partial t} = -\frac{\rho}{\varepsilon} - \frac{\partial}{\partial t}\left(-\mu\varepsilon\frac{\partial V}{\partial t}\right) \qquad (I.33)$$

$$\rightarrow \quad \Delta V - \mu\varepsilon\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \qquad (I.34)$$

I.3.1.2. Jauge de Coulomb

Un autre choix de jauge apparaît possible ; il s'agit de la jauge de Coulomb :

$$div\,\vec{A} = 0 \qquad (I.35)$$

qui mène directement à l'équation de Poisson

I.4. Rayonnement du doublet électrique

I.4.1. Champ électromagnétique en zone lointaine

Le champ électromagnétique rayonné en zone lointaine (à grande distance r, dans la direction $\vec{u}$) par l'antenne doublet électrique est donné par les expressions suivantes:

$$\vec{E}(r,\theta,\varphi) = jz_0\frac{k}{4\pi r}I_0 l sin\theta.\, e^{j(\omega t-kr)}\vec{u}_\theta$$

$$= j\frac{60\pi}{\lambda r}I_0 l sin\theta.\, e^{j(\omega t-kr)}\vec{u}_\theta \qquad (I.36)$$

$$\vec{H}(r,\theta,\varphi) = j\frac{k}{4\pi r}I_0 l sin\theta.\, e^{j(\omega t-kr)}\vec{u}_\varphi$$

$$= j\frac{I_0 l}{2\lambda r}sin\theta.\, e^{j(\omega t-kr)}\vec{u}_\varphi \qquad (I.37)$$

Avec $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ est le vecteur d'onde (le nombre d'onde), et z_0=120π est l'impédance du milieu considéré.

Les trois vecteurs : champ électrique, champ magnétique, et puissance qui correspond au vecteur direction de propagation sont perpendiculaires entre eux.

I.4.2. La densité de puissance

La densité de puissance rayonnée est obtenue par la valeur moyenne du vecteur de Poynting:

$$<\vec{\pi}>=\frac{1}{2}Re\left[\vec{E}\wedge\vec{H}^*\right]=\frac{1}{2}Re\left[E_\theta H_\varphi^*\left(\vec{u}_\theta\wedge\vec{u}_\varphi\right)\right]=\frac{1}{2}Re\left[E_\theta H_\varphi^*\vec{u}_r\right] \qquad (I.38)$$

d'où:

$$<\vec{\pi}(r,\theta,\varphi)>=\frac{z_0}{8}\left(\frac{lI_0}{\lambda r}sin\theta\right)^2\vec{u}_r \qquad (I.39)$$

I.4.3. L'intensité de rayonnement

Elle est de la forme:

$$U(\theta,\varphi) = U(\theta) = r^2 < \vec{\pi} > \vec{u}_r = \frac{z_0}{8}\left(\frac{lI_0}{\lambda} sin\theta\right)^2 \qquad (I.40)$$

et sa valeur maximale est :

$$U_{max} = U\left(\theta = \frac{\pi}{2}\right) = \frac{z_0}{8}\left(\frac{lI_0}{\lambda}\right)^2 \qquad (I.41)$$

I.4.4. La fonction caractéristique et le digramme de rayonnement

La fonction caractéristique normalisée est:

$$F(\theta) = \frac{U(\theta)}{U_{max}} = sin^2(\theta) \qquad (I.42)$$

La représentation graphique de la fonction caractéristique permet d'obtenir le diagramme de rayonnement.

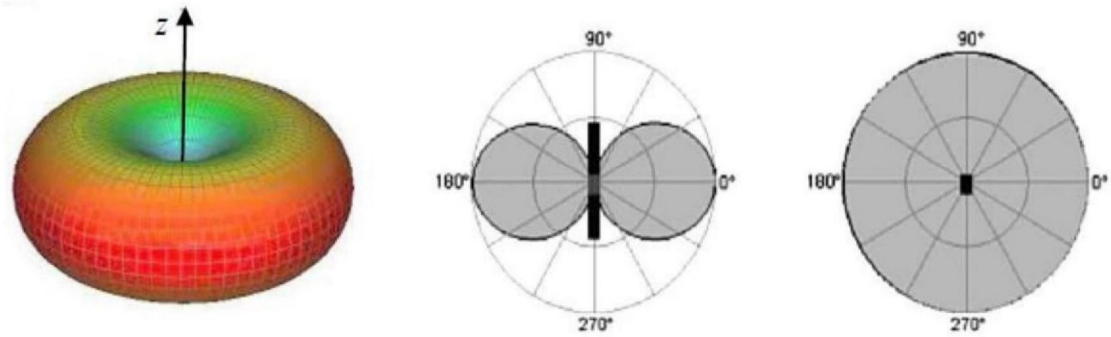


Figure I.7: Diagrammes de rayonnement de l'antenne doublet électrique

I.4.5. La puissance totale rayonnée

En champ lointain, l'antenne doublet électrique rayonne une puissance élémentaire dP qui traverse un petit élément de surface dS tel que:

$$dP = \frac{E^2}{2z_0} dS = \frac{z_0 I_0^2 l^2 sin^3\theta}{8\lambda^2} d\theta d\varphi \qquad (I.43)$$

La puissance totale rayonnée est alors obtenue par l'intégration sur toute la sphère:

$$P_{ray} = \int_S dP = \frac{z_0 I_0^2 l^2}{8\lambda^2} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} sin^3\theta d\theta \qquad (I.44)$$

avec $\int_0^{2\pi} d\varphi = 2\pi$ et $\int_0^{\pi} sin^3\theta d\theta = \frac{4}{3}$

donc:

$$P_{ray} = \frac{\pi}{3} z_0 \left(\frac{I_0 l}{\lambda}\right)^2 \qquad (I.45)$$

I.4.6. La résistance de rayonnement

La résistance de rayonnement du doublet de Hertz s'exprime par:

$$R_r = \frac{2P_{ray}}{I_0^2} = \frac{2\pi}{3} z_0 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 = 80\left(\pi \frac{l}{\lambda}\right)^2 \qquad (I.46)$$

I.4.7. La directivité

La directivité du doublet électrique est:

$$D(\theta) = 4\pi \frac{U(\theta)}{P_{ray}} = \frac{3}{2} sin^2(\theta) \qquad (I.47)$$

et sa valeur maximale, $D_{max} = 1.5$