

Chapitre 1

Généralités et paramètres caractéristiques des antennes

1. Introduction

Une antenne est un élément passif permettant le transfert d'énergie électrique vers l'énergie électromagnétique et vice-versa.

- L'antenne émettrice tire sa puissance de l'émetteur qui l'alimente, étant vue comme une charge.
- L'antenne réceptrice fournit la puissance captée au récepteur, agissant comme source avec sa propre impédance interne.

Les antennes sont utilisées dans des gammes de longueurs d'ondes très différentes, pour un très grand nombre d'applications. On cite :

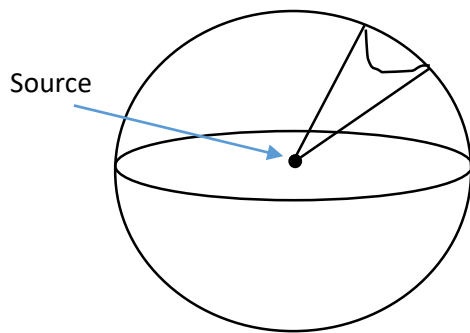
- Ondes kilométriques (30 kHz-300 kHz) et hectométriques (300 kHz-3 MHz), pour la radiodiffusion à modulation d'amplitude ou les liaisons avec les sous-marins ;
- Ondes décamétriques (3 MHz-30 MHz), pour les liaisons radio intercontinentales ou maritimes ;
- Ondes métriques (30 MHz-300 MHz), pour la radiodiffusion à modulation de fréquence, la télévision, la radionavigation ;
- Ondes décimétriques (300 MHz-3 GHz), pour la télévision, le radar, les liaisons avec les mobiles ;
- Ondes centimétriques (3 GHz-30 GHz), pour les liaisons terrestres par faisceaux Hertiens, les liaisons spatiales avec les satellites artificiels ou les sondes spatiales ainsi que pour la radiodiffusion, la télédétection pour satellites artificiels, etc. ;
- Ondes métriques (30 GHz-300 GHz), pour la radioastronomie et certains radars.

D'une extrémité à l'autre du spectre électromagnétique radioélectrique, les antennes ont des structures très différentes : pylônes verticaux, en ondes kilométriques et hectométriques, longs fils obliques ou horizontaux en ondes décamétriques, dipôles en ondes métriques et

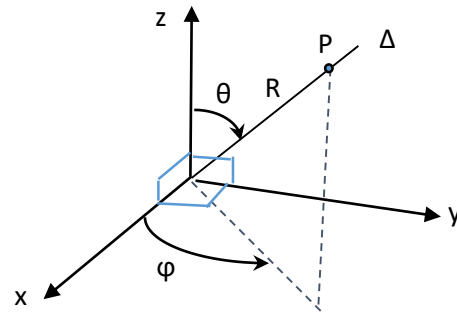
décimétriques jusqu'à 1 GHz, réflecteurs et ouvertures rayonnantes au-delà de 1 GHz et en ondes centimétriques et millimétriques.

2. Antenne de référence

La source isotrope est constituée par une source ponctuelle qui rayonne sa puissance d'alimentation P_a de façon identique dans toutes les directions. Dans un milieu homogène et isotrope, l'onde rayonnée est une onde sphérique, les surfaces équi-phases sont des sphères centrées sur cette source. Elle est utilisée comme source de référence bien qu'elle **n'existe pas** physiquement.



Source de rayonnement omnidirectionnelle



Système de coordonnées sphériques

Figure 1. 1 : Source de rayonnement omnidirectionnel et système de coordonnées sphérique.

- La puissance rayonnée par unité d'angle solide (stéradian) dans une direction quelconque Δ , définie par deux angles : θ , φ , est (puisque'il y a 4π stéradians dans l'espace) $P_a/4\pi$.

$$P(\theta, \varphi) = \frac{P_a}{4\pi} \quad (\text{W/stéradian}) \quad (1.1)$$

Elle est parfois appelée intensité de rayonnement notée aussi $K(\theta, \varphi)$

- La puissance rayonnée par unité de surface à la distance R ou densité de puissance rayonnée est $P_a/(4\pi R^2)$

$$p(\theta, \varphi) = p = \frac{P_a}{4\pi R^2} \quad \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad (1.2)$$

- ❖ Le concept de puissance rayonnée par unité d'angle solide est intéressant car il ne fait pas intervenir la distance à laquelle on se place. Il est donc plus général que p (densité de puissance).

- ❖ En pratique, on mesure p à l'aide d'un wattmètre et le champ rayonné avec un champmètre.
- ❖ On rappelle que cette densité e puissance est reliée au vecteur de Poynting par : $\vec{p} = \frac{1}{2} \vec{E} \wedge \vec{H}$

En espace libre : $\vec{E} \perp \vec{H}$ et sont équiphases : $p = \frac{EH}{2}$ et $\frac{E}{H} = 120\pi$, d'où :

$$\begin{cases} p = \frac{1}{2} \frac{E^2}{120\pi} \\ \frac{P_a}{4\pi R^2} = \frac{E^2}{240\pi} \\ E \left(\frac{V}{m} \right) = \frac{\sqrt{60 P_a}}{R} \end{cases} \quad (1.3)$$

3. Diagramme de rayonnement

C'est un diagramme qui représente les variations de la puissance que rayonne l'antenne par unité d'angle solide dans les différentes directions.

3.1. Fonction caractéristique d'un rayonnement

Soit une antenne de centre géométrique O dans un système donné par la figure (1.1). Soit $P(\theta, \varphi)$ la puissance que rayonne l'antenne par stéradian autour de la direction $\Delta(\theta, \varphi)$. En dehors des cas des antennes omnidirectionnelles dans certains plans, il y a une direction de l'espace $\Delta_0(\theta_0, \varphi_0)$ dans laquelle la puissance rayonnée par unité d'angle solide est maximale, soit $P_0(\theta_0, \varphi_0)$. On définit la fonction caractéristique de rayonnement de l'antenne par :

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0(\theta_0, \varphi_0)} \quad (1.4)$$

$$\text{Des fois elle est notée : } K_n(\theta, \varphi) = \frac{K(\theta, \varphi)}{K_{max}} = F_a^2(\theta, \varphi) \quad (1.5)$$

Sa valeur dépend de la direction Δ considérée et varie entre **0 et 1**.

D'après les équations (1.4) et (1.5), on aura **la fonction caractéristique en champ** donnée par :

$$\sqrt{r(\theta, \varphi)} = \frac{E(R_0, \theta, \varphi)}{E_{max}(R_0)} = F_a(\theta, \varphi) \quad (1.6)$$

L'échelle utilisée peut être en linéaire (V/m) ou en logarithmique (dB), on rappelle :

$$10 \log K_n = 20 \log F_a$$

Pour les antennes en ondes kilométriques et décamétriques qui sont utilisées par des liaisons terrestres, on ne relève les diagrammes de rayonnement que dans les deux plans particuliers :

- Dans le plan horizontal ($\theta=90^\circ$)
- Dans le plan vertical ($\varphi = \text{cste}$) par rapport auquel le diagramme de l'antenne présente une symétrie intéressante.

Pour les antennes en ondes métriques et autres pour lesquelles le champ E a une direction de polarisation bien déterminée, on relève le diagramme de rayonnement dans les plans \vec{E} et \vec{H} qui sont les plans définis par la direction de rayonnement maximal et par la direction du champ \vec{E} ou \vec{H} .

Remarque

*En pratique, on mesure $\{p(R, \theta, \varphi)/p_0(R, \theta, \varphi)\}$ par un wattmètre c'est une densité de puissance et $\{E(R, \theta, \varphi)/E_0(R, \theta, \varphi)\}$ par un champmètre. Les rapports ne sont égaux à $r(\theta, \varphi)$ et $\sqrt{r(\theta, \varphi)}$ que si les ondes rayonnées sont **sphériques**.*

On montre que les ondes sont sphériques si la plus contraignante des deux conditions suivantes est remplie :

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \text{ et } R > 10D$$

Où D est la dimension maximale de l'antenne, λ la longueur d'onde.

La première condition est plus restrictive si $\frac{2D^2}{\lambda} > 10D$ d'où : $D > 5\lambda$. Elle s'impose plutôt pour les antennes et réseaux utilisés aux fréquences $> 300 \text{ MHz}$ ($\lambda < 1\text{m}$). Au contraire, c'est la deuxième condition qui est la plus restrictive si $D < 5\lambda$, elle s'impose plutôt pour les antennes et réseaux utilisés aux fréquences $f < 300 \text{ MHz}$ ($\lambda > 1\text{m}$).

3.2. Paramètres caractéristiques du diagramme de rayonnement

Les antennes ne rayonnent pas la puissance de façon uniforme dans toutes les directions (hormis les antennes omnidirectionnelles dans un plan horizontal). Il y a en général une direction de rayonnement maximal autour de laquelle se trouve concentrée une grande partie de la puissance rayonnée et des directions de rayonnement secondaires autour desquelles se répartit la fraction de la puissance restante. La puissance rayonnée hors de cette direction est perdue. Elle peut même perturber des liaisons situées dans d'autres directions. Il est donc nécessaire d'affiner le lobe de rayonnement principal et de réduire au minimum le niveau des lobes secondaires.

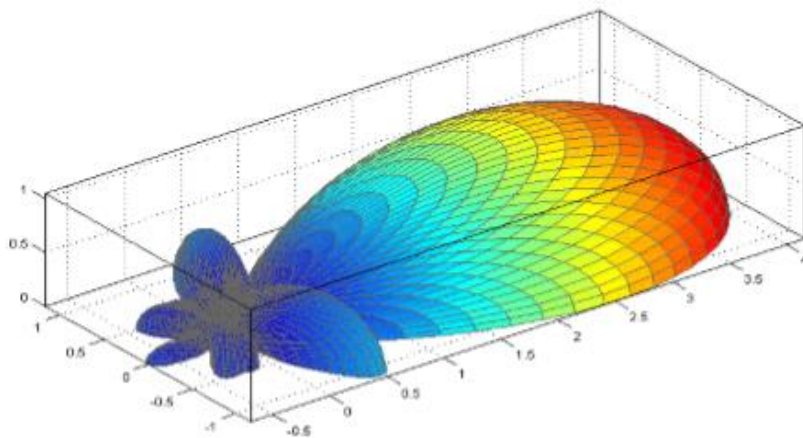


Figure 1. 2 : Illustration de diagramme de rayonnement en 3D.

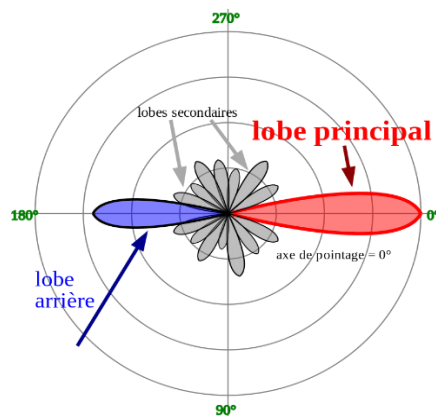


Figure 1. 3 : Illustration du diagramme de rayonnement en coordonnées polaires.

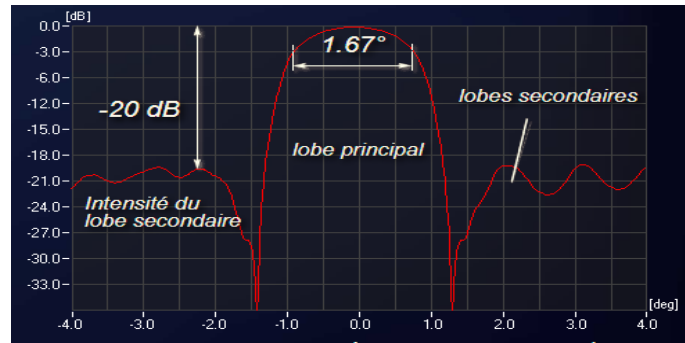


Figure 1. 4 : Exemple de diagramme d'émission en dB, pour une antenne en coordonnées cartésiennes.

Sur le diagramme de rayonnement, on distingue :

- ❖ Dans le lobe principal : l'angle d'ouverture à 3 dB est l'angle selon lequel la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal, pour le champ ça correspond à $(\frac{1}{\sqrt{2}})$ du champ rayonné dans la direction maximale. Il est noté par : θ_{HPBW} ou θ_{3dB} (Half Power Beam Width). C'est une caractéristique. L'angle du premier zéro par rapport à la direction de rayonnement maximal est noté : θ_{BWFN} (Beam Width First Null).
- ❖ Le niveau N_1 du premier lobe secondaire. En télécommunications, ce niveau doit être inférieur à -20 dB par rapport au maximum du lobe principal (en général, le niveau de référence est à 0 dB)
- ❖ Le rapport avant-arrière (Front to Back Ratio), en général, il être inférieur à -20 dB.

4. Directivité et gain d'une antenne

Soit une antenne qui rayonne $P(\theta, \varphi)$ dans la direction (θ, φ) , soit P_a la puissance d'alimentation de cette antenne et P_r la puissance totale qu'elle rayonne. Nous avons :

$$P_r = \eta P_a \quad (1.7)$$

Où : η représente le rendement de l'antenne.

4.1. Définition

La directivité est le rapport de la puissance $P(\theta, \varphi)$ à la puissance que rayonnerait la source isotrope par unité d'angle solide, à condition que les puissances totales rayonnées soient les mêmes.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r/4\pi} \quad (1.8)$$

$$P_r = \iint_0^{4\pi} P(\theta, \varphi) d\Omega$$

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$$

Dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0) :

$$D(\theta_0, \varphi_0) = 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_r}$$

Le gain de l'antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport de la puissance $P(\theta, \varphi)$ à la puissance que rayonnerait la source isotrope par unité d'angle solide, à condition que les puissances d'alimentation soient les mêmes.

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a} \quad (1.9)$$

L'appellation gain d'une antenne, sans préciser la direction considérée est réservée au gain dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0) , il est noté G .

$$G = 4\pi \frac{P_0(\theta_0, \varphi_0)}{P_a}$$

$$G (dB) = 10 \log [4\pi \frac{P_0(\theta_0, \varphi_0)}{P_a}]$$

La relation entre gain et directivité est :

$$G = \eta D$$

Le rendement est aussi appelé efficacité de rayonnement notée e_r .

4.2. Relation entre gain et diagramme de rayonnement

Dans la direction de rayonnement maximal, on a vu que :

$$G = \eta 4\pi \frac{P_0(\theta_0, \varphi_0)}{P_r}$$

Et
$$P_r = \iint_0^{4\pi} P(\theta, \varphi) d\Omega$$

et :
$$P(\theta, \varphi) = r(\theta, \varphi) \cdot P_0(\theta_0, \varphi_0)$$

d'où :
$$G = \eta \frac{4\pi}{\iint_0^{4\pi} r(\theta, \varphi) d\Omega} \quad (1.10)$$

Si le diagramme de rayonnement est de révolution autour de l'axe Oz , il est indépendant de φ , $r(\theta, \varphi) = r(\theta)$, $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$, en remplaçant dans (1.10), on obtient :

$$G = \frac{2\eta}{\int_0^\pi r(\theta) \sin \theta d\theta}$$

❖ Dans le cas où le lobe principal de rayonnement de l'antenne est assez fin ($\theta_{HPBW} < 10^\circ$), le gain de l'antenne est calculé approximativement par :

$$G = \frac{25000}{(\theta_{HPBW})_E (\theta_{HPBW})_H} \quad (1.11)$$

Les angles sont donnés en degrés.

4.3. Relation gain-surface équivalente

A la réception, une antenne capte une puissance :

$$P(w) = p\left(\frac{w}{m^2}\right) \cdot \Sigma(m^2) \quad (1.12)$$

Σ est la surface équivalente de l'antenne. C'est la surface d'une ouverture plane qui placée perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde incidente, capterait la même puissance que l'antenne considérée.

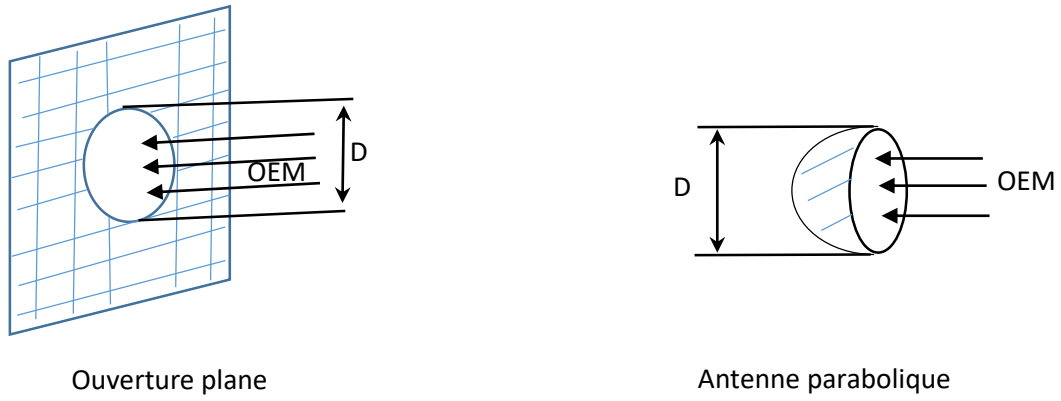


Figure 1. 5 : Illustration de la surface équivalente.

$$G = \frac{4\pi\Sigma}{\lambda^2} \quad (1.13)$$

$$\Sigma = \frac{G \lambda^2}{4\pi} \quad (1.14)$$

5. Impédance d'entrée, résistance de rayonnement

Ces propriétés caractérisent uniquement les antennes que l'on peut assimiler à des lignes. Ce sont en général les éléments rayonnants linéaires.

5.1. Impédance d'entrée

Soit une antenne définie par ses deux bornes A et B (comme illustré sur la figure 1. 6).

Soient $\underline{V_e}$ et $\underline{I_e}$: la tension aux bornes de l'antenne et le courant qui circule dans l'antenne respectivement où :

$$\underline{V_e} = V_e e^{j\phi}$$

Et :
$$\underline{I_e} = I_e e^{j\phi}$$

L'impédance d'entrée de l'antenne est :

$$Z_a = \frac{\underline{V_e}}{\underline{I_e}} = R_a + jX_a \quad (1.15)$$

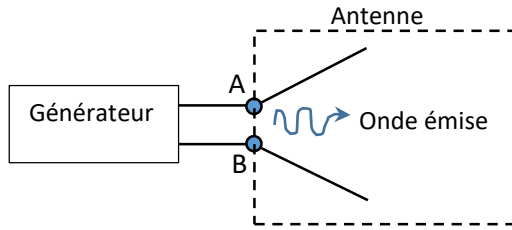
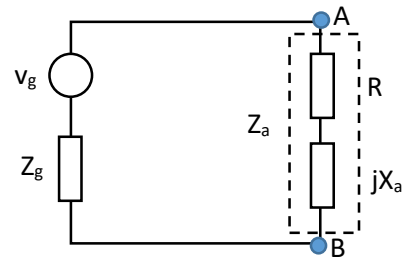


Schéma bloc d'une antenne émettrice



Son schéma électrique équivalent

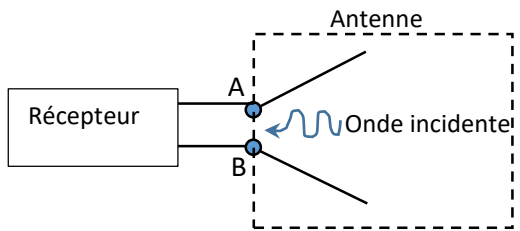
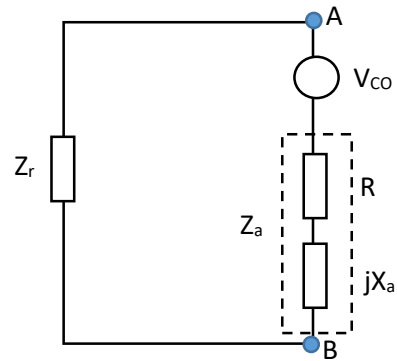


Schéma bloc d'une antenne réceptrice



Son schéma électrique équivalent

Figure 1. 6 : Illustration de l'impédance d'une antenne (émettrice et réceptrice).

La puissance fournie à l'antenne se compose :

- D'une puissance active : $\frac{1}{2} R_a I_e^2$;
- D'une puissance réactive : $\frac{1}{2} X_a I_e^2$

La puissance active est la somme :

- D'une puissance rayonnée : $\frac{1}{2} R_{ri} I_e^2$;
- D'une puissance dissipée : $\frac{1}{2} R_p I_e^2$

Avec :
$$R_a = R_{ri} + R_p \quad (1.16)$$

R_p apparaît comme une résistance liée aux pertes de l'antenne tandis que R_{ri} est une résistance liée à son rayonnement.

5.2. Efficacité de rayonnement

Le rendement de l'antenne se définit par le rapport de la puissance rayonnée à la puissance fournie à l'entrée de l'antenne.

$$e_r = \eta = \frac{P_r}{P_a} = \frac{R_{ri}}{R_{ri} + R_p} \quad (1.17)$$

Il y a intérêt à ce que R_p soit aussi petite que possible devant R_{ri} .

5.3. Résistance de rayonnement

Elle est donnée par :

$$R_r = \frac{2P_r}{I_{max}^2}$$

$R_{ri} = R_r$ lorsque le courant entre les bornes de l'antenne est maximum (c'est le cas des dipôles $\lambda/2$).

5.4. Adaptation d'une antenne

On rappelle que le coefficient de réflexion est donné en fonction de l'impédance d'entrée de l'antenne et de l'impédance caractéristique de la ligne par :

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (1.18)$$

$$P_u = P_a(1 - \Gamma^2) \quad (1.19)$$

- En émission : P_u est la puissance délivrée à l'antenne et P_a la puissance fournie par l'émetteur.
- En réception : P_u est la puissance fournie au récepteur et P_a la puissance captée par l'antenne.

Dans les conditions de désadaptation, une partie ($\Gamma^2.P_a$) est :

- Renvoyée vers le générateur dans le cas de l'émission ;
- Re-rayonnée par l'antenne dans le cas de la réception

Il s'agit d'une puissance perdue. L'impédance d'adaptation est $Z_a = Z_0$.

6. Polarisation du champ rayonné par une antenne

Cette section est étudiée en TD

7. Température d'une antenne

Les différentes parties de l'espace entourant une antenne émettent une puissance parasite qui vient se superposer au signal utile capté par l'antenne. Cette puissance parasite est appelée puissance de bruit N et elle est caractérisée par une température de bruit T_a .

$$N(w) = k T_a \Delta f \quad (1.20)$$

Où $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K, est la constante de Boltzmann et Δf la largeur de bande considérée.

Pour une bande de référence de 1 Hz, pour une antenne de gain $G(\theta, \varphi)$ entourée d'un milieu à la température $T(\theta, \varphi)$:

$$N = \frac{k}{4\pi} \iint_0^{4\pi} G(\phi, \varphi) \cdot T(\phi, \varphi) d\Omega \quad (1.21)$$

Dans un angle solide Ω : $T_a = \frac{1}{4\pi} \iint_0^{\Omega} G(\phi, \varphi) \cdot T(\phi, \varphi) d\Omega$

En remplaçant $G(\theta, \varphi) = 4\pi \eta \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r}$:

$$T_a = \eta \frac{\iint_0^{\Omega} r(\phi, \varphi) \cdot T(\phi, \varphi) d\Omega}{\iint_0^{4\pi} r(\phi, \varphi) \cdot d\Omega} \quad (1.22)$$

Dans le cas des satellites de télécommunication, la température de bruit d'une antenne située sur un satellite de la terre :

$$T_a = \frac{T_1}{A} + T_2 + T_3 \quad (1.23)$$

Où : T_1 : température de la terre, A coefficient d'atténuation, T_2 température de bruit du ciel et $T_3 = T_m(1-1/A)$ avec T_m : température de l'atmosphère.