

# Chapitre I : Généralités et Paramètres Caractéristiques des Antennes

<b>Définition et mécanisme de rayonnement</b>	<b>2</b>
<b>Antenne d'émission</b>	<b>2</b>
<b>Antenne de réception</b>	<b>2</b>
<b>Réciprocité de réception</b>	<b>2</b>
<b>Domaines d'utilisation</b>	<b>2</b>
<b>Antenne de référence</b>	<b>5</b>
<b>Source isotrope</b>	<b>5</b>
<b>Le stéradian</b>	<b>6</b>
<b>Diagramme de rayonnement</b>	<b>9</b>
<b>Fonction caractéristique de rayonnement (FCR)</b>	<b>9</b>
<b>Condition de rayonnement par ondes sphériques</b>	<b>11</b>
<b>Paramètres caractéristiques du diagramme de rayonnement</b>	<b>12</b>
<b>Plan E et Plan H</b>	<b>16</b>
<b>DIRECTIVITÉ ET GAIN D'UNE ANTENNE</b>	<b>16</b>
Rendement de l'antenne	16
Directivité de l'antenne	16
Gain de l'antenne	17
Relation entre le gain max et le diagramme de rayonnement	18

## Définition et mécanisme de rayonnement des antennes

### Antenne d'émission

- ⇒ C'est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre un émetteur et l'espace libre où cette énergie va se proposer.

### Antenne de réception

- ⇒ Réciproquement, une antenne de réception est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie d'une onde électromagnétique, se propageant dans l'espace, à un appareil récepteur (Voir la figure (1)).

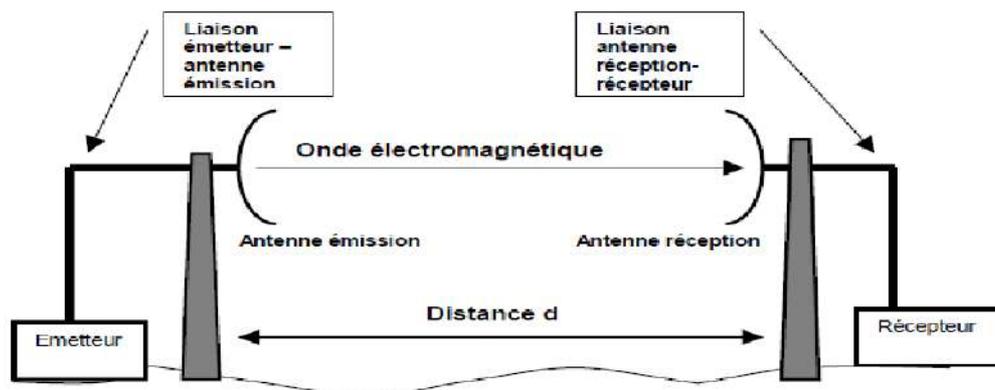


Figure.1. Liaison Antenne émettrice – Antenne réceptrice

### Réciprocité de réception

- ⇒ Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes ;
- ⇒ On dit alors que son fonctionnement est réciproque ;
- ⇒ Cette réciprocity électromagnétique permet, lors de la conception de l'antenne, de simuler à la fois l'émission et la réception ;
- ⇒ Elle permet également d'utiliser la même antenne pour les deux fonctions émission et réception, comme c'est le cas dans un système Radar monostatique.

### Domaines d'utilisation

- ⇒ Les antennes sont utilisées dans des gammes de longueur d'onde très différentes pour un très grand nombre d'applications dont nous ne citerons que quelques exemples.
- ⇒ Dans ce qui suit, on présente le spectre des fréquences.

Tableau.1. Spectre des fréquences

Nom de la bande de fréquences	Plage de fréquences	Longueur d'onde en mètre	Applications
Extremely Low Frequency (ELF)	3-30 Hz	10,000-100,000 km	Communication Sous-marine.
Super Low Frequency (SLF)	30-300 Hz	1,000-10,000 km	Les militaires américains, russes et

			indiens ont construit d'énormes émetteurs radios utilisant les fréquences SLF pour communiquer avec leurs sous-marins.
Ultra-Low Frequency (ULF), appelée aussi Voice Frequency (VF)	300-3000 Hz	100-1,000 km	Les communications robustes à faible débit de données sous l'eau, sous la terre et en milieu urbain, Communications téléphoniques.
Very Low Frequency (VLF)	3-30 kHz	10-100 km	Les balises de navigation ; Communications marines.
Low Frequency (LF)	30-300 kHz	1-10 km	Radiodiffusion en Modulation AM, Communications marines.
Medium Frequency (MF)	300-3000 kHz	100-1,000 m	Aviation, Radiodiffusion en modulation AM.
High Frequency (HF)	3-30 MHz	10-100 m	Radio à ondes courtes, les liaisons radio intercontinentales ou maritimes, Communications longue distance avion/navire
Very High Frequency (VHF)	30-300 MHz	1-10 m	Radiodiffusion FM, la télévision, la radionavigation ;
Ultra High Frequency (UHF)	300-3000 MHz	10-100 cm	La télévision, Téléphone Mobile, GPS.
Super High Frequency (SHF)	3-30 GHz	1-10 cm	Liaisons satellitaires, WI-FI, UWB.
Extremely High Frequency (EHF)	30-300 GHz	1-10 mm	Astronomie, Radar de véhicule, ondes millimétriques, la 5G Le WLL.
Infrared	300 GHz to 400 THz	1 mm to 770 nm	Électronique grand public.
Visible Spectrum	400-790 THz	380-750 nm (nanometers )	Communications Optiques, Communication par lumière visible (VLC).

⇒ Un exemple d'une représentation graphique du spectre électromagnétique est donné dans la figure (2).

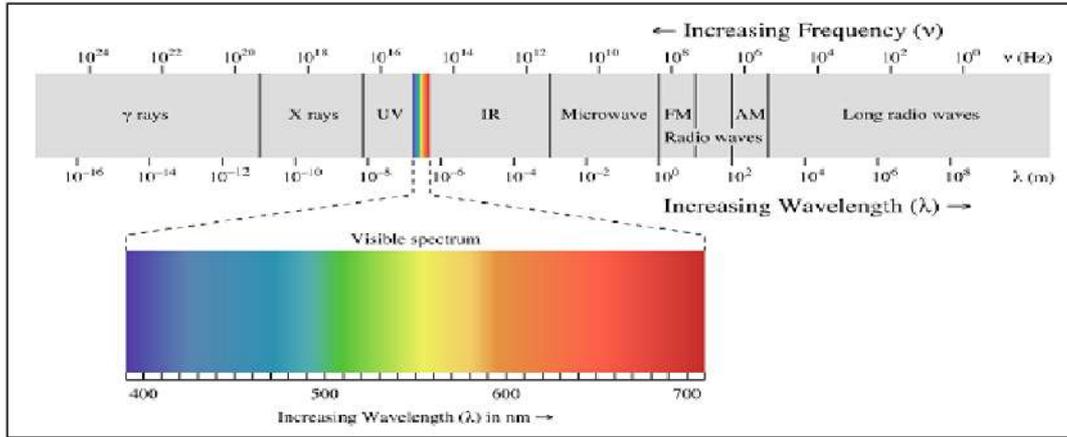


Figure.2. Spectre Electromagnétique

⇒ D'une extrémité à l'autre du spectre radioélectrique, différentes structures d'antennes existent. Celles-ci comprennent, comme le montre la figure (3), le monopôle filaire, le dipôle filaire, la spirale, la boucle, le Yagi-Uda, le coplanaire, le cornet, le patch microruban, les réflecteurs paraboliques, le réflecteur d'angle, etc.

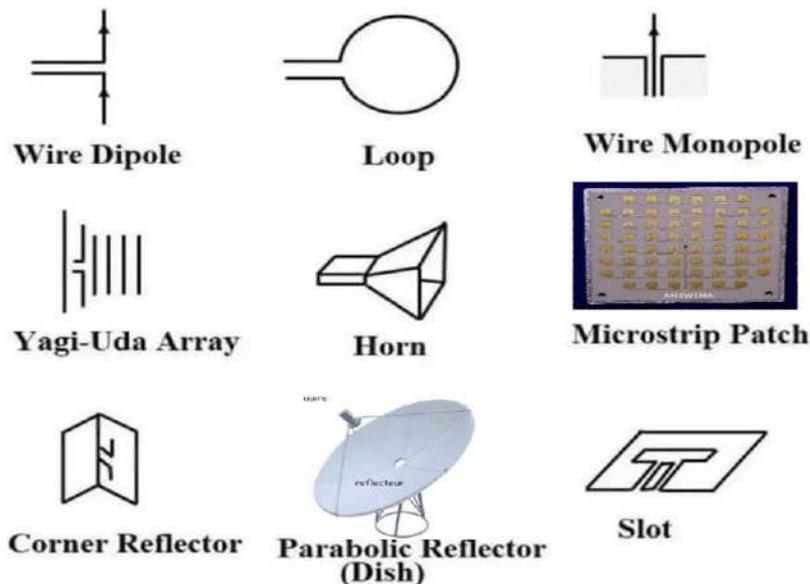


Figure.3. Quelques types d'antennes

## Antenne de référence

### Source isotrope

- ⇒ La source isotrope est constituée par une source ponctuelle qui rayonne sa puissance d'alimentation  $P_a$  de façon identique dans toutes les directions de l'espace (Voir la figure (4)).

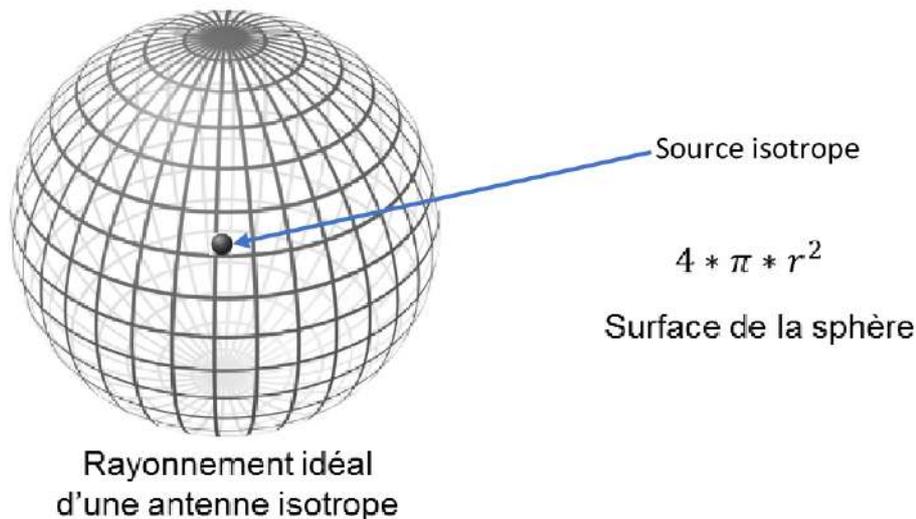


Figure.4. Rayonnement d'une source isotrope

- ⇒ Dans un milieu homogène et isotrope, l'onde rayonnée est une onde sphérique. C'est-à-dire que les surfaces équiphasés (les surfaces d'ondes) sont des sphères centrées sur cette antenne (Voir la figure (5)).

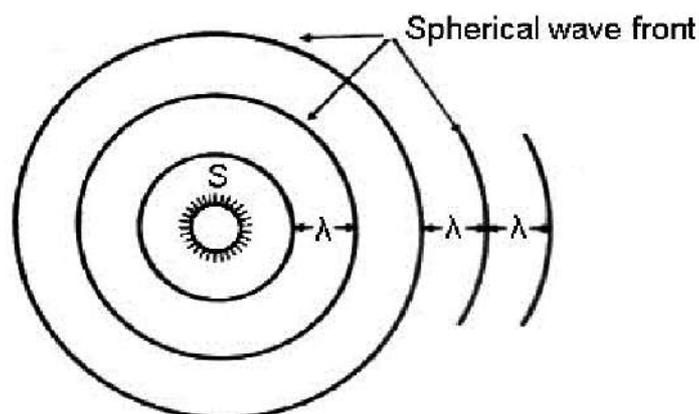


Figure.5. Surfaces équiphasés sphériques

- ⇒ Une source ponctuelle et omnidirectionnelle n'est pas de réalité physique ;
- ⇒ Elle est utilisée comme source de référence ;
- ⇒ La figure (6) montre comment la source isotrope est utilisée pour différencier une antenne directive de gain  $G_E$  dans une direction donnée.

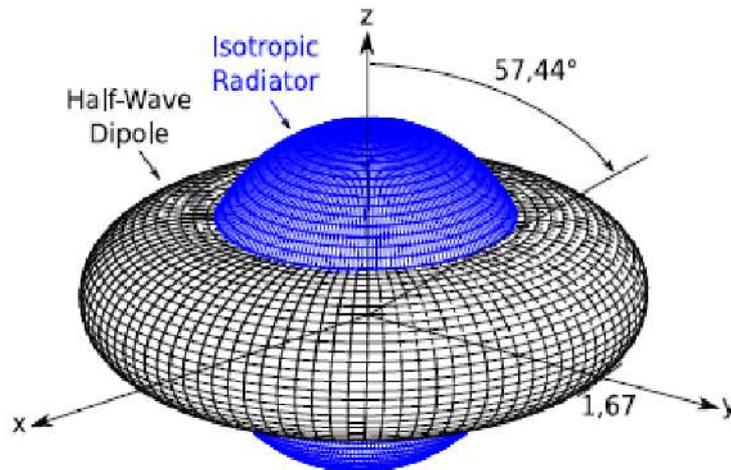


Figure.6. Utilisation de la source isotrope comme référence

⇒ Comme le montre la figure (6), le rayonnement d'une antenne dipôle  $\frac{\lambda}{2}$  est comparé avec celui de la source isotrope utilisée pour.

#### Le stéradian

⇒ Comme le montre la figure (7) du côté droit, le stéradian est un angle solide d'un cône qui, ayant son sommet au centre d'une sphère, découpe sur la surface de cette sphère une aire égale à celle d'un carré ayant pour côté une longueur égale au rayon de la sphère. Dans le côté gauche de cette même figure, on montre la notion de radian.

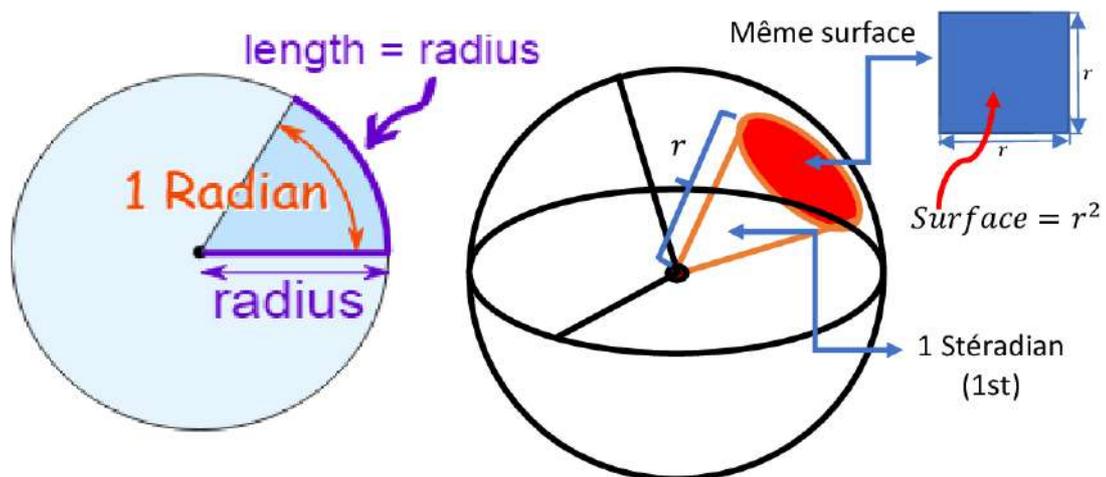


Figure.7. Le Radian et le Stéradian

- ⇒ La puissance rayonnée par unité d'angle solide (stéradian), dans une direction ( $\Delta$ ), définie par deux angles  $\theta$  et  $\varphi$  (voir la figure (8)), est  $\frac{P_a}{4\pi}$ . Elle est donnée par :

$$P(\theta, \varphi) = \frac{P_a}{4\pi} \text{ (Watts/stéradian).}$$

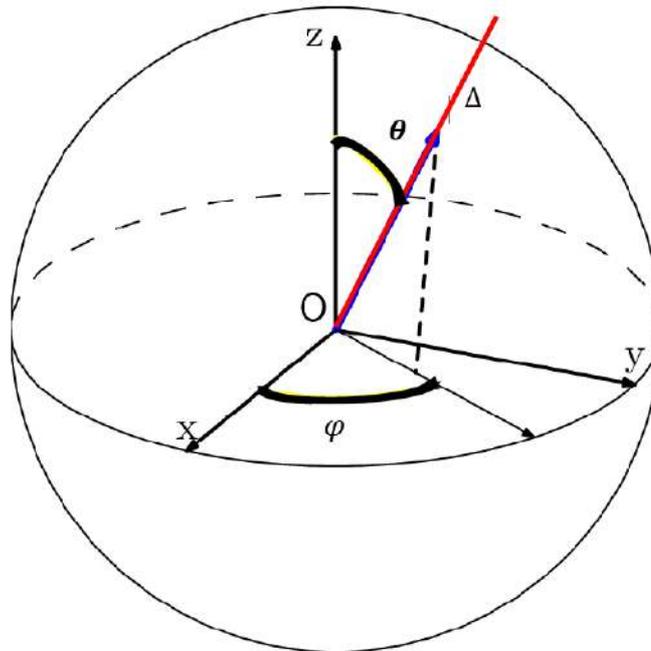


Figure.8. Direction de rayonnement

- ⇒  $P(\theta, \varphi)$  est appelée aussi intensité de rayonnement ;  
 ⇒ Elle est exprimée en watts par stéradian (Watts/stéradian) ;  
 ⇒ A une distance  $R$  de l'antenne, on mesure la densité de puissance (la puissance rayonnée par unité de surface à la distance  $R$ )  $p(R, \theta, \varphi)$  ;  
 ⇒ Elle est donnée par :

$$p(R, \theta, \varphi) = \frac{P_a}{4\pi R^2} \text{ (Watts/m}^2\text{).}$$

$4\pi R^2$  est la surface de la sphère.

- ⇒ 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 celui de la puissance rayonnée par unité de surface ;  
 ⇒ En pratique, on mesurera, en un point de l'espace :  
 ➤ Soit la puissance rayonnée par unité de surface (en utilisant un Wattmètre) ;  
 ➤ Soit le champ rayonné et il s'agira alors du champ électrique ( $V/m$ ) qui se mesure à l'aide d'un Champmètre.

⇒ La puissance par unité de surface (ou densité de puissance) est aussi liée avec le vecteur de Poynting  $\vec{p}$ , comme suit :

$$\vec{p} = \frac{1}{2} \vec{E} \wedge \vec{H}^*.$$

⇒ En espace libre, le champ électrique  $\vec{E}$  et le champ magnétique  $\vec{H}$  sont perpendiculaires l'un par rapport à l'autre et sont perpendiculaires à la direction de propagation comme le montre la figure (9) ;

⇒ Comme l'illustre la même figure,  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  sont aussi en phase ;

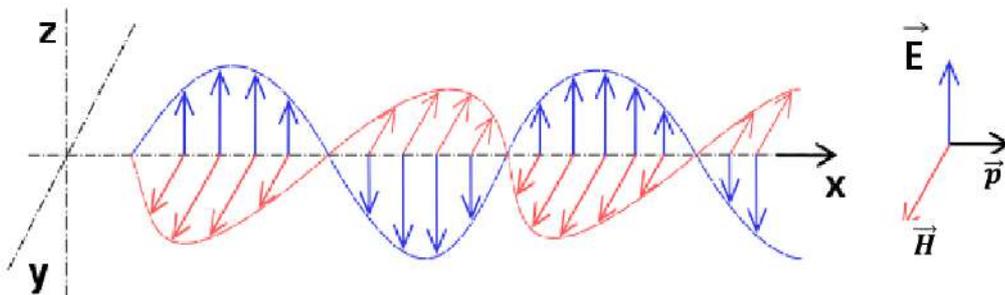


Figure.9. Propagation d'une onde électromagnétique

⇒ La puissance par unité de surface est donnée comme suit :

$$p = \frac{1}{2} E \cdot H.$$

⇒ Dans le cas d'une onde transverse électromagnétique TEM, les modules des champs électrique et magnétique sont reliés par la relation suivante :

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = Z_0 = 120\pi.$$

Avec :

$Z_0$  est l'impédance d'onde dans le vide dont la valeur vaut  $120\pi$  ;

$\epsilon_0$  est la **permittivité du vide**, également nommée **permittivité diélectrique** du vide ou encore **constante diélectrique** ;

$\mu_0$  est la **perméabilité du vide**, pareillement appelée **perméabilité magnétique** du vide ou **constante magnétique** ;

⇒ Dans ces conditions, la puissance par unité de surface est donnée comme suit :

$$p = \frac{1}{2} E \cdot \frac{E}{120\pi} = \frac{E^2}{240\pi}.$$

⇒ On peut donc écrire :

$$\frac{P_a}{4\pi R^2} = \frac{E^2}{240\pi}$$

⇒ D'où l'on déduit la valeur du champ électronique rayonné :

$$E (V/m) = \frac{\sqrt{60P_a}}{R}$$

## 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 de l'espace ;
- ⇒ Cette variation de puissance est observée dans le champ lointain de l'antenne.
- ⇒ À titre d'exemple, considérons le diagramme de rayonnement tridimensionnel de la figure (10), tracé en décibels (dB).

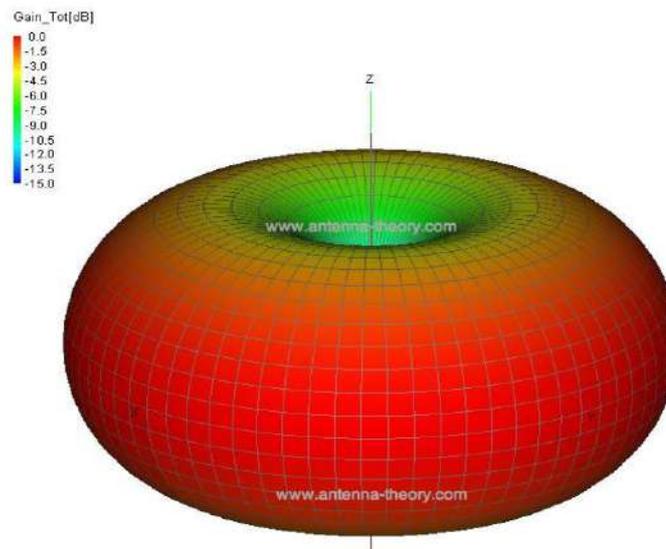


Figure.10. Exemple de diagramme de rayonnement pour une antenne.

- ⇒ C'est un exemple d'un diagramme de rayonnement en forme de beignet ou toroïdal ;
- ⇒ Ces tracés sont utiles pour visualiser dans quelles directions l'antenne rayonne ;
- ⇒ Comme le montre cette figure, le long de l'axe z, qui correspondrait au rayonnement directement au-dessus de l'antenne, il y a très peu de puissance transmise ;
- ⇒ Dans le plan x – y (perpendiculaire à l'axe z), le rayonnement est maximal.

## Fonction caractéristique de rayonnement (FCR)

- ⇒ Soit une antenne de centre géométrique O (Voir la figure (11)) ;

- ⇒ Dans un système de coordonnées sphériques, un point  $P$  est défini par les coordonnées sphériques  $(R, \theta, \varphi)$  ;
- ⇒ Une direction  $\Delta$  de l'espace est définie par deux angles  $\theta$  et  $\varphi$  ;

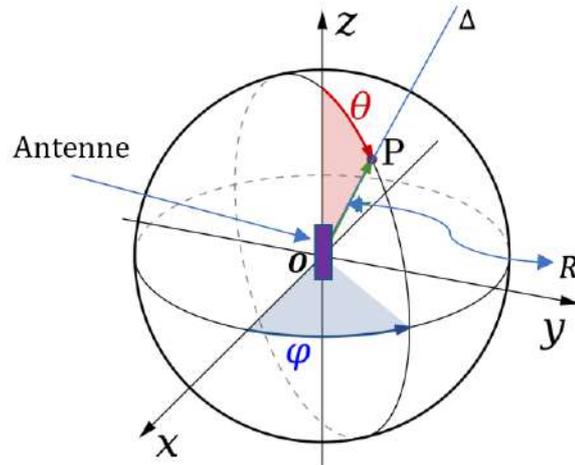


Figure.11. Antenne rayonnant selon une direction  $\Delta$  quelconque

- ⇒ Soit  $P(\theta, \varphi)$  la puissance que rayonne l'antenne par unité d'angle solide autour de la direction  $\Delta(\theta, \varphi)$  ;
- ⇒ En dehors du cas d'antennes omnidirectionnelles, dans certains plans, il y a une direction de l'espace  $\Delta_0(\theta_0, \varphi_0)$  (Voir la figure (12)) dans laquelle la puissance rayonnée par unité d'angle solide est maximale, soit  $P_0(\theta_0, \varphi_0)$  cette puissance ;

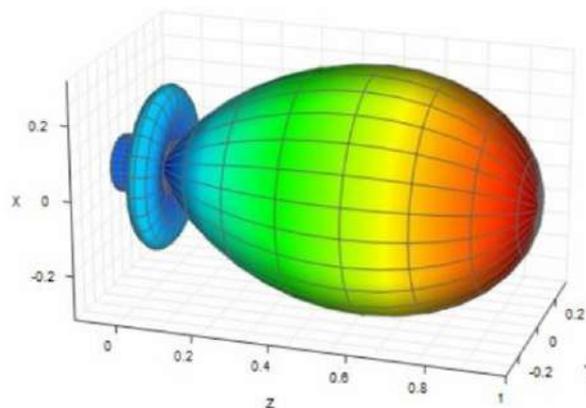


Figure.12. Rayonnement directionnel

- ⇒ Dans ce cas, la fonction caractéristique de rayonnement de l'antenne est donnée par :

$$FCR(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0(\theta_0, \varphi_0)}$$

- ⇒ La valeur de cette fonction varie entre 0 et 1 ;

- ⇒ Elle dépend de la direction  $\Delta$  considérée ;
- ⇒ Pour faire un relevé complet du diagramme de rayonnement de l'antenne, on doit calculer la  $FCR$  dans toutes les directions de l'espace avec un pas d'incrémentation convenable en  $\theta$  et en  $\varphi$  ;
- ⇒ Le diagramme ainsi obtenu permet de visualiser globalement le rayonnement de l'antenne ;
- ⇒ Pour les antennes en ondes kilométriques, hectométriques et décamétriques qui sont utilisées pour des liaisons terrestres, on ne relève les diagrammes que dans deux plans particuliers :
  - Dans le plan horizontal ( $\theta = 90^\circ$ ) ;
  - Dans un plan vertical ( $\varphi = cte$ ) par rapport auquel le diagramme de l'antenne présente une symétrie intéressante.
- ⇒ Pour les antennes en ondes métriques et inférieures, pour lesquelles le champ électrique a une direction de polarisation bien déterminée, on relève le diagramme de rayonnement dans les plans  $E$  et  $H$  qui sont les plans définis par la direction de rayonnement maximal et par la direction du champ électrique ou du champ magnétique ;
- ⇒ Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a de sens que si l'onde est sphérique.

#### Condition de rayonnement par ondes sphériques

- ⇒ En pratique, ce n'est pas la puissance rayonnée par unité d'angle solide que l'on peut mesurer directement. Les appareils de mesure wattmètre ou champmètre déterminent la puissance par unité de surface ou le champ électrique ;
- ⇒ Dans la direction  $\Delta(\theta, \varphi)$ , nous avons  $p(R, \theta, \varphi)$  ou  $E(R, \theta, \varphi)$  ;
- ⇒ Dans la direction  $\Delta_0(\theta_0, \varphi_0)$ , nous avons  $p_0(R, \theta_0, \varphi_0)$  ou  $E_0(R, \theta_0, \varphi_0)$  ;
- ⇒ Avec le wattmètre, on mesure  $\frac{p(R, \theta, \varphi)}{p_0(R, \theta_0, \varphi_0)}$  ;
- ⇒ Avec le Champmètre, on mesure  $\frac{E(R, \theta, \varphi)}{E_0(R, \theta_0, \varphi_0)}$  ;
- ⇒ Ces deux rapports ne sont égaux à  $FCR(\theta, \varphi)$  et à  $\sqrt{FCR(\theta, \varphi)}$  que si les ondes rayonnées sont sphériques ;
- ⇒ La condition de rayonnement par onde sphérique est fonction de la distance  $R$  et du type d'antenne utilisée ;
- ⇒ Par exemple, pour les dipôles rayonnants et les ouvertures rayonnantes, on peut démontrer (Pour une antenne de dimension maximale  $D$ ) que les ondes rayonnées sont sphériques si la plus contraignante des deux conditions suivantes est remplie :

$$R > 2 \frac{D^2}{\lambda}$$

Et

$$R > 10D.$$

⇒ La 1<sup>ère</sup> condition est la plus restrictive si :

$$2 \frac{D^2}{\lambda} > 10D. \rightarrow D > 5\lambda.$$

⇒ Elle s'impose plutôt pour les antennes et réseaux d'antennes utilisés aux fréquences supérieures à 300 MHz ( $\lambda < 1m$ ) ;

⇒ La 2<sup>ème</sup> condition est la plus restrictive si :

$$D < 5\lambda.$$

⇒ Elle s'impose plutôt pour les antennes et réseaux utilisés aux fréquences inférieures à 300 MHz ( $\lambda > 1m$ ).

#### Paramètres caractéristiques du diagramme de rayonnement

⇒ Pour le cas des antennes de radiodiffusion, le diagramme est omnidirectionnel dans le plan horizontal ;

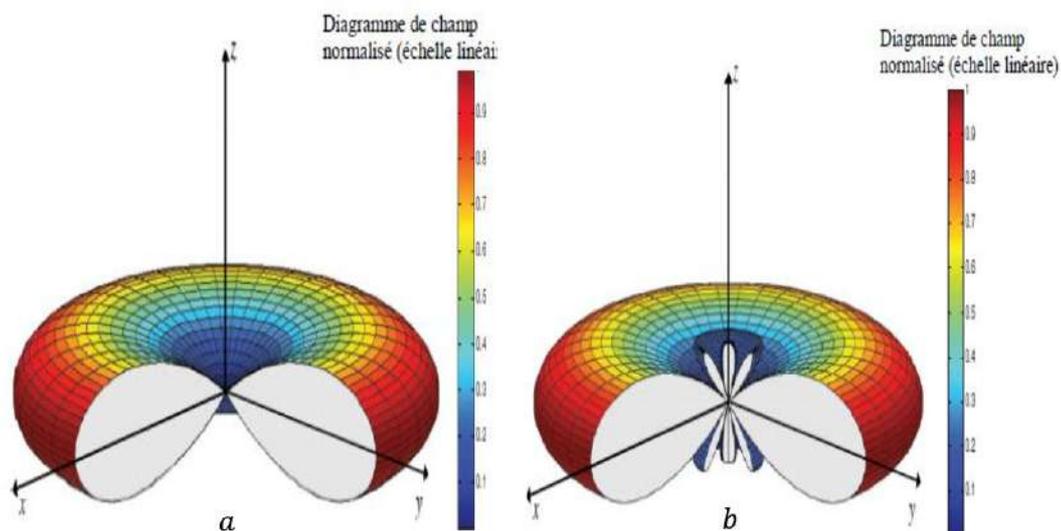


Figure.13. Diagramme de rayonnement omnidirectionnel (a)- sans lobes secondaires ; (b) avec lobes secondaires

- ⇒ Pour les autres antennes, le rayonnement de la puissance n'est pas effectué d'une façon uniforme dans toutes les directions de l'espace ;
- ⇒ Pour ce type d'antennes, 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 ;
- ⇒ Dans un plan, le diagramme de rayonnement a l'allure générale représentée par la figure (14), en coordonnées polaires, ou par la figure (15), en coordonnées cartésiennes ;

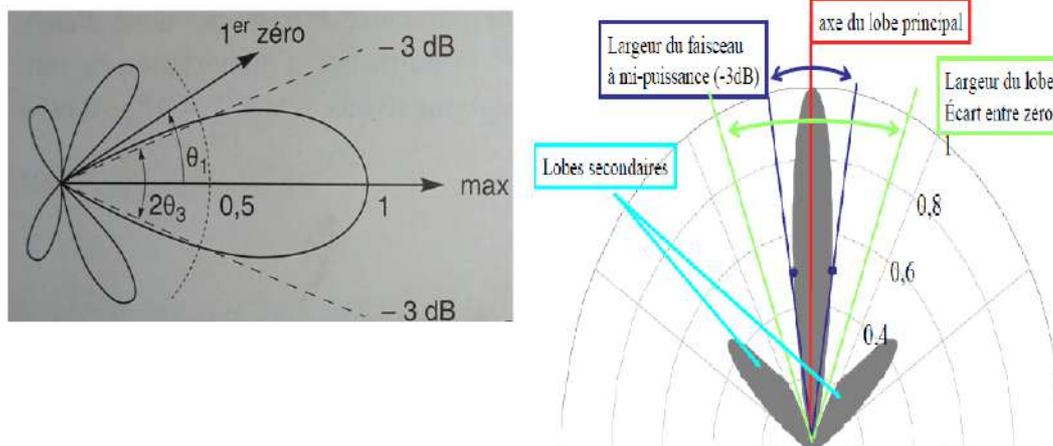


Figure.14. Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires

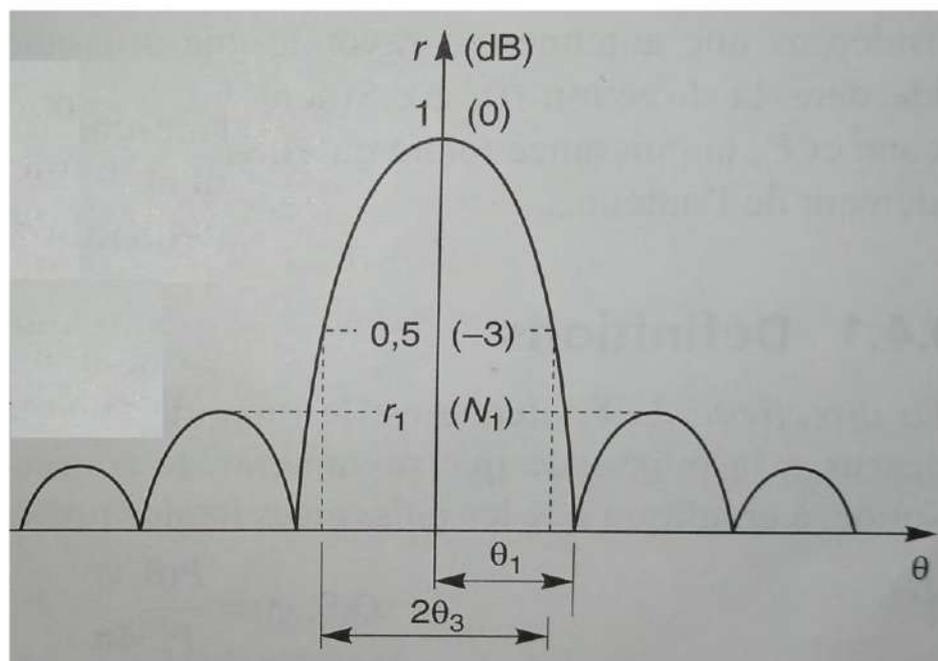


Figure.15. Diagramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes

⇒ Ces diagrammes sont caractérisés par ce qui suit :

- Un lobe principal et des lobes à rayonnement secondaire : Lorsque l'on désire établir une liaison directionnelle entre deux points A et B, il faut que la direction de rayonnement maximal (pour chaque antenne) coïncide avec la direction AB comme le montre la figure (16).

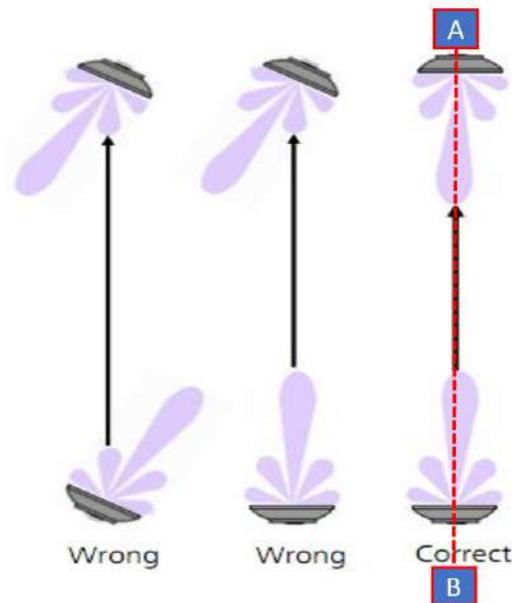


Figure.16. Etablissement d'une liaison directionnelle

- 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 maximum les niveaux des lobes de rayonnement secondaire ;
- L'angle d'ouverture à 3 dB est l'angle  $2\theta_3$ , que font entre elles les deux directions du lobe principal selon lesquelles la puissance (ou le champ) rayonné(e) est égale à la moitié (ou à  $1/\sqrt{2}$ ) de la puissance (ou du champ) rayonné(e) dans la direction de rayonnement maximal. Il s'agit là d'une caractéristique très pratique car l'on remarque que, dès qu'une antenne a un lobe principal assez fin, la plus grande partie de la puissance rayonnée l'est à l'intérieur des deux directions à  $-3$  dB ;
- D'autres caractéristiques intéressantes d'un diagramme d'antenne sont l'angle  $\theta_1$ , du premier zéro par rapport à la direction de rayonnement maximal et 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 dont le niveau de référence est 0 dB ;
- Notons enfin que la courbe enveloppe des maxima des lobes secondaires doit se trouver, selon les normes en vigueur (1996), en dessous du gabarit défini par :
  - $(32 - 25 \log \theta^\circ)$  dB pour  $1^\circ < \theta < 48^\circ$  ;
  - $-10$  dB pour  $\theta > 48^\circ$ .

- Le niveau qui sert de référence 0 dB, dans ces formules, est la puissance que rayonnerait une source isotrope alimentée par la même puissance que l'antenne considérée ;
- Il y a un autre lobe, qui est exactement opposé à la direction du lobe principal. Il est connu sous le nom de lobe arrière, qui est également un lobe mineur. Une quantité considérable d'énergie est gaspillée ici ;

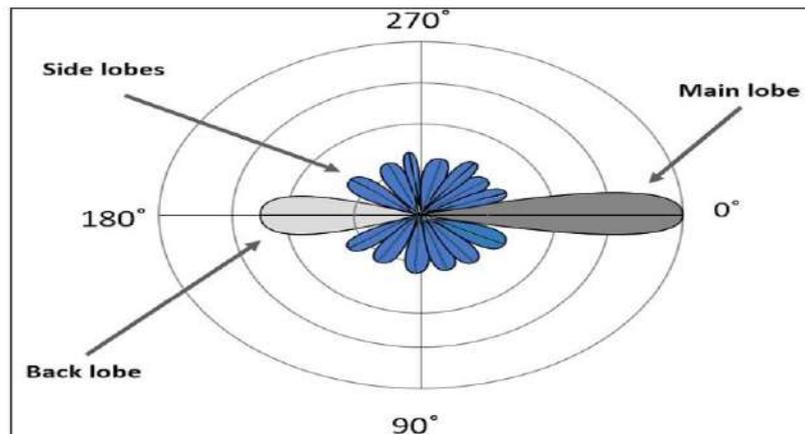


Figure.17. Lobe arrière dans un diagramme de rayonnement.

- La figure (18) montre des exemples du diagramme de rayonnement.

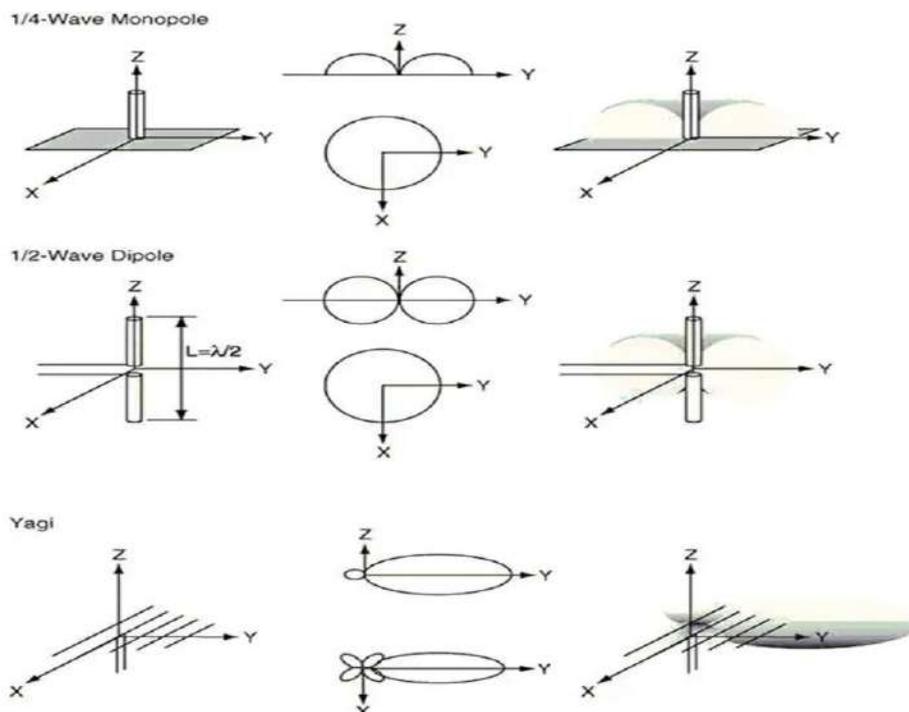


Figure.18. Quelques exemples du diagramme de rayonnement.

### Plan E et Plan H

- ⇒ Du fait de la difficulté de déterminer le diagramme complet dans l'espace, on se contente généralement de réaliser uniquement deux coupes perpendiculaires l'un par rapport à l'autre. Le 1<sup>er</sup>, appelé plan *E*, contient le vecteur champ électrique  $\vec{E}$  et l'autre, appelé plan *H*, contient le vecteur champ magnétique  $\vec{H}$  (voir Figure (19)).

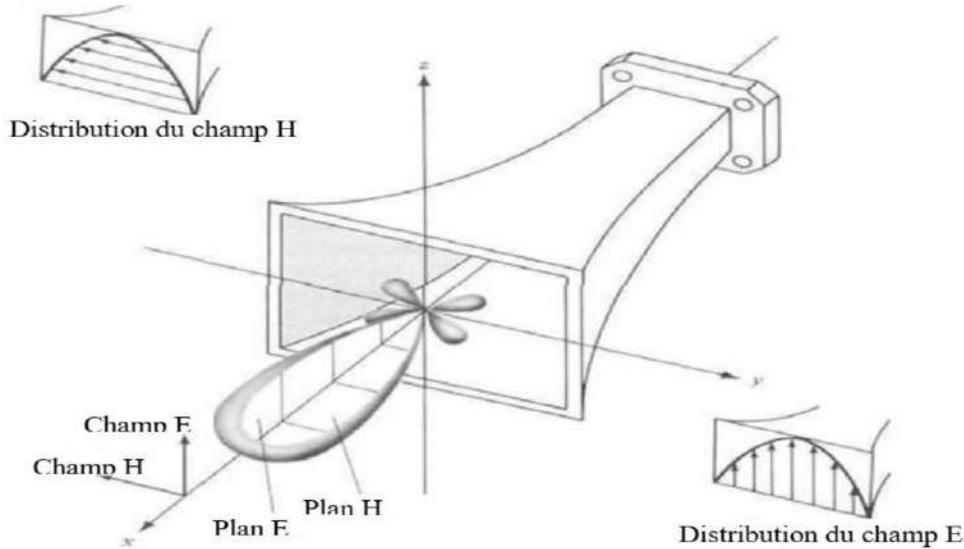


Figure.19. Plans E & H

### DIRECTIVITÉ ET GAIN D'UNE ANTENNE

#### Rendement de l'antenne

- ⇒ Le rendement d'une antenne est un rapport de la puissance fournie à l'antenne par rapport à la puissance rayonnée par l'antenne ;
- ⇒ Une antenne à haut rendement rayonne la majeure partie de la puissance présente à son entrée ;
- ⇒ Une antenne à faible rendement a la majeure partie de la puissance absorbée sous forme de pertes dans l'antenne ou réfléchi en raison d'une désadaptation d'impédance.
- ⇒ Considérons une antenne qui rayonne une puissance  $P(\theta, \varphi)$  par unité d'angle solide dans la direction  $(\theta, \varphi)$ ;
- ⇒ Soient  $P_a$ , la puissance d'alimentation de cette antenne et  $P_r$ , la puissance totale qu'elle rayonne ;
- ⇒ Le rendement de cette antenne est donné par :

$$\eta = \frac{P_r}{P_a}$$

#### Directivité de l'antenne

- ⇒ La directivité  $D(\theta, \varphi)$  de l'antenne est le rapport de la puissance  $P(\theta, \varphi)$  définie ci-dessus à la puissance que rayonnerait la source isotrope par

unité d'angle solide, à condition que les puissances totales rayonnées soient les mêmes. Elle est donnée par :

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

Avec:

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

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

Gain de l'antenne

⇒ Dans la direction de rayonnement maximale  $(\theta_0, \varphi_0)$ , nous avons :

$$D_0(\theta_0, \varphi_0) = 4\pi \frac{P_0(\theta_0, \varphi_0)}{P_r} = D_0.$$

⇒ Le gain  $G(\theta, \varphi)$  de l'antenne dans la direction  $(\theta, \varphi)$  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'alimentations soient les mêmes. Il est donné par :

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

⇒ Dans la direction de rayonnement maximale  $(\theta_0, \varphi_0)$ , nous avons :

$$G_0(\theta_0, \varphi_0) = 4\pi \frac{P_0(\theta_0, \varphi_0)}{P_a} = G_0.$$

⇒  $G_0$  est le gain max de l'antenne. En décibels, il est donné par :

$$G_0[dB] = 10 \log \left( 4\pi \frac{P_0(\theta_0, \varphi_0)}{P_a} \right).$$

⇒ La relation entre  $G_0$  et  $D_0$  est donnée par :

$$G_0 = \eta D_0.$$

⇒ Le gain est en lien étroit avec la directivité. Par analogie avec une lampe électrique, lorsque l'on ajoute des brins à l'antenne (lentilles de la lampe), on concentre les ondes dans une direction donnée. Le gain d'une antenne est la quantité d'énergie émise (ou reçue) dans cette direction.

⇒ Le calcul de ce gain a pour référence (Voir la figure (19)) :

- Soit l'antenne imaginaire isotrope, on exprime alors le gain en  $dB_i$ ;
- Soit l'antenne dipôle 1/2 onde  $(\lambda/2)$ , on exprime alors le gain en  $dB_d$ .

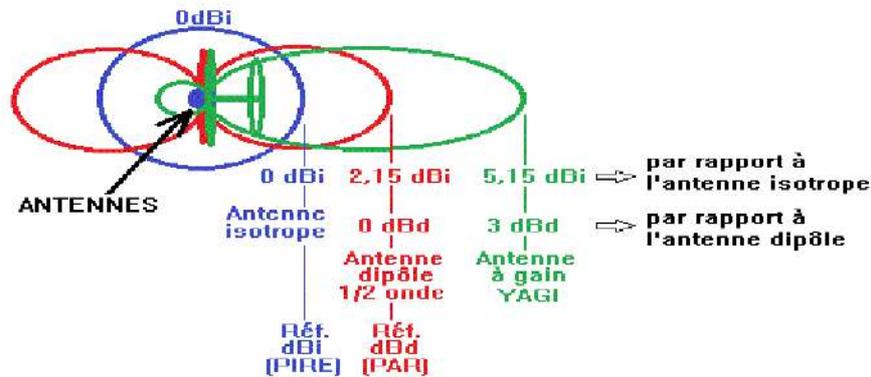


Figure.20. Références pour le calcul du Gain.

Relation entre le gain max et le diagramme de rayonnement

⇒ Dans la direction de rayonnement maximal, nous avons :

$$G_0 = \eta 4\pi \frac{P_0(\theta_0, \varphi_0)}{P_r}$$

$$G_0 = \eta 4\pi \frac{P_0(\theta_0, \varphi_0)}{\iint_0^{4\pi} P(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}$$

$$G_0 = \eta 4\pi \frac{P_0(\theta_0, \varphi_0)}{\iint_0^{4\pi} FCR(\theta, \varphi) P_0(\theta_0, \varphi_0) \sin \theta d\theta d\varphi}$$

$$G_0 = \eta \frac{4\pi}{\iint_0^{4\pi} FCR(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}$$