

Chapitre I : Généralités et Paramètres Caractéristiques des Antennes

Puissance isotrope rayonnée équivalente	20
Puissance rayonnée équivalente PRE	20
Utilité du PIRE et du PRE	21
Exemple de calcul du PIRE	21
Hauteur effective d'une antenne	22
Surface équivalente à une antenne	23
Relation entre le Gain et la surface équivalente d'une antenne	24
Impédance d'entrée	24
Polarisation d'une antenne	25
Catégories de polarisation	27
Polarisation linéaire	27
Polarisation horizontale	27
Polarisation verticale	28
Polarisation oblique	28
Polarisation circulaire	28
Polarisation circulaire droite	29
Polarisation circulaire gauche	29
Polarisation elliptique	29
Applications pour différents types de polarisation d'antenne	29
Bande passante d'une antenne	30
Paramètres S21 et S11 d'une antenne	31
Rapport d'onde stationnaire ROS	33

Puissance isotrope rayonnée équivalente

- ⇒ La puissance rayonnée isotrope équivalente, PIRE (EIRP en anglais pour Effective Isotropic Radiated Power), est la puissance rayonnée totale d'une antenne émettrice multipliée par la directivité numérique de l'antenne dans la direction du récepteur, ou la puissance délivrée à l'antenne multipliée par le gain numérique de l'antenne ;
- ⇒ En d'autres termes, il s'agit du rayonnement maximal disponible au niveau de l'antenne après prise en compte de toutes les pertes de puissance et de tous les gains du système ;
- ⇒ En décibel, les pertes sont soustractives et peuvent être, par exemple, une perte de câble ;
- ⇒ Les gains sont additifs et peuvent être le gain de l'antenne ou d'un amplificateur. Le calcul du PIRE utilise la formule suivante, P_E étant la puissance de sortie de l'émetteur, L_E étant les pertes de l'émetteur et G_E étant le gain de l'antenne, tous exprimés respectivement en dBw ou dBm , dB ou dB_i .

$$PIRE[dBm] = P_E[dBm] + G_E[dB] - L_E[dB].$$

$$PIRE[dBw] = P_E[dBw] + G_E[dB] - L_E[dB].$$

Pour des pertes nulles, le PIRE est donné par :

$$PIRE[dBm] = P_E[dBm] + G_E[dB].$$

$$PIRE[dBw] = P_E[dBw] + G_E[dB].$$

- ⇒ En valeur normale (Lorsque la puissance est exprimée en W ou en mW), le PIRE est donné par :

$$PIRE[W] = P_E[W] \cdot G_E \cdot L_E.$$

$$PIRE[mW] = P_E[mW] \cdot G_E \cdot L_E.$$

Pour des pertes nulles, le PIRE est donné par :

$$PIRE[W] = P_E[W] \cdot G_E.$$

$$PIRE[mW] = P_E[mW] \cdot G_E.$$

- ⇒ Pour les deux dernières équations, le gain G_E et les pertes L_E sont sans unités.

Puissance rayonnée équivalente PRE

- ⇒ En plus du PIRE, il existe également le PRE (ERP en anglais pour (Effective Radiated Power) puissance rayonnée équivalente ;
- ⇒ Ici, au lieu d'utiliser une antenne isotrope comme référence, le dipôle demi-onde standard est utilisé comme référence ;

- ⇒ La formule de calcul du PRE est la même que celle du PIRE sauf que le gain de l'antenne en dB ou dB_i est remplacé par le gain en dB_d ;
- ⇒ La relation entre le gain en dB_i et le gain en dB_d est donnée par :

$$G_E[dB]=G_E[dB_i]=G_E[dB_d]+ 2.15.$$

Utilité du PIRE et du PRE

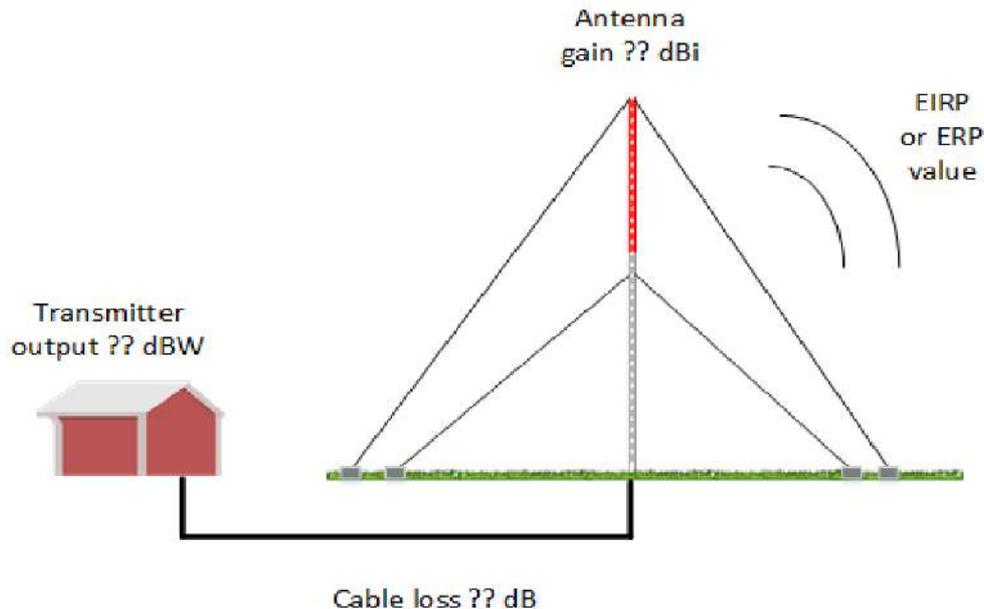


Figure.1. Poste émetteur

- ⇒ Les diverses réglementations qui régissent les niveaux de puissance peuvent indiquer leurs limites en valeurs EIRP ou ERP (Voir la figure (21));
- ⇒ Dans ce cas, étant donné que ces niveaux représentent la puissance de sortie finale après prise en compte de la puissance de l'émetteur, des pertes et du gain d'antenne, le concepteur peut décider de la puissance de sortie de l'émetteur, des pertes et du type d'antenne (et donc de son gain) à utiliser afin que leur équipement reste dans la limite réglementaire ;
- ⇒ EIRP et ERP sont utilisés lors du calcul des bilans de liaison.

Exemple de calcul du PIRE

- ⇒ Pour les communications sans fil, la valeur PIRE maximale pour une utilisation en extérieur sur la fréquence $2,4 GHz$ est de $36 dBm$;
- ⇒ Pour une utilisation en intérieur, elle est de $27 dBm$;
- ⇒ Pour la fréquence $5,8 GHz$, pour une utilisation en extérieur point à point et point à multipoint, un maximum de $36 dBm$ est autorisé ;
- ⇒ Pour connaître la valeur du PIRE, le calcul est très simple, il suffit d'additionner la valeur de la puissance radio émise de $10 dBm$ avec la valeur du gain de l'antenne émettrice comme indiqué sur la figure (22).

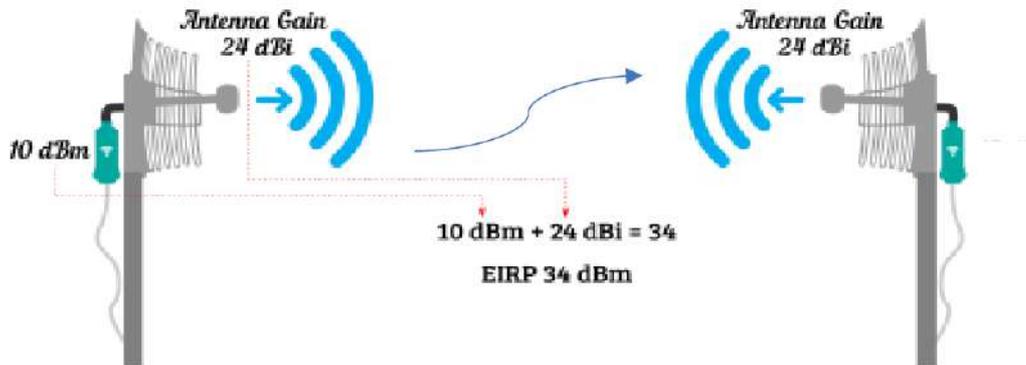


Figure.2. Calcul du PIRE

⇒ Sur la figure (22), on peut voir que l'antenne a un gain de 24 dB_i . Pour une puissance radio d'entrée de 10 dBm , le PIRE est de 34 dBm .

Hauteur effective d'une antenne

- ⇒ Une antenne en mode réception, qu'elle soit sous forme de fil, de cornet, d'ouverture, de réseau, de tige diélectrique, etc., peut capter des ondes électromagnétiques pour en extraire de l'énergie ;
- ⇒ La hauteur/longueur effective d'une antenne est une grandeur qui est utilisée pour déterminer la tension induite sur les bornes (en circuit ouvert) de l'antenne lorsqu'une onde la frappe ;
- ⇒ C'est la longueur d'un fil conducteur mince droit orienté perpendiculairement à la direction de propagation et parallèle à la polarisation de l'antenne qui serait parcourue par un courant constant égal au courant moyen dans l'antenne réelle, et qui rayonnerait la même puissance (Voir la figure (23)).

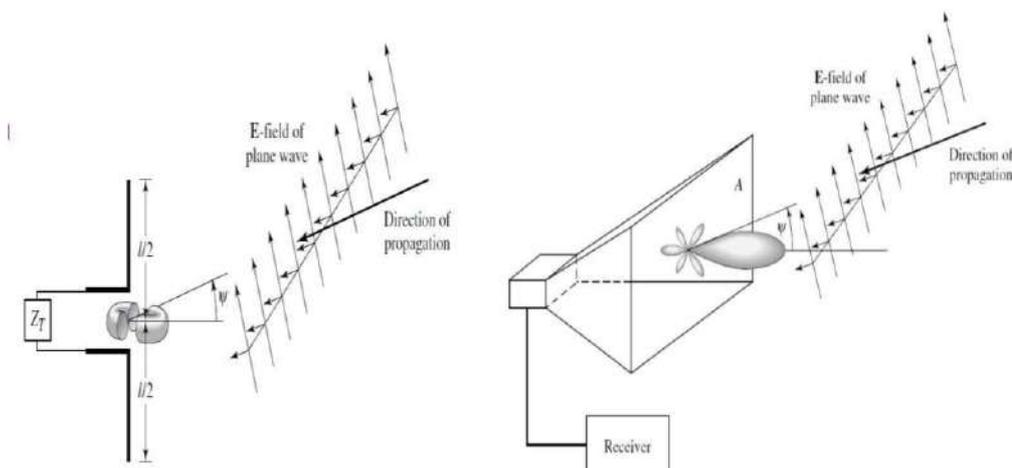


Figure.3. Hauteur/longueur effective d'une antenne

⇒ La longueur effective L_e , représentant l'antenne dans ses modes d'émission et de réception, peut être exprimée comme suit :

$$L_e = \frac{V_{CO}}{E_i}$$

Avec :

V_{CO} est la tension au bornes de l'antenne en circuit ouvert;

E_i est le champ électrique incident ;

L_e est la longueur effective.

Surface équivalente à une antenne

- ⇒ A la réception, une antenne capte une puissance égale au produit de la densité de puissance à l'endroit où elle se trouve par un coefficient Σ caractéristique de l'antenne et homogène à une surface, que l'on appelle « Surface équivalente à une antenne » ;
- ⇒ Dans la figure (24), on présente des ondes électromagnétiques qui frappent une ouverture plane. Dans la même figure, on montre ces mêmes ondes électromagnétiques qui frappent un dipôle (respectivement une antenne parabolique) ;

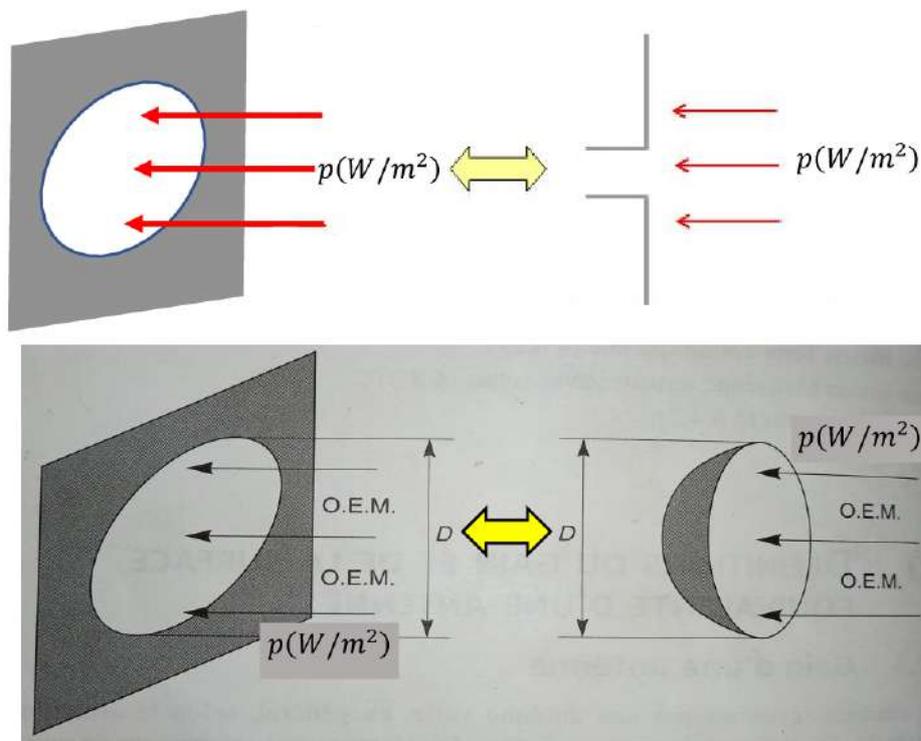


Figure.4. Surface équivalente à une antenne

- ⇒ Σ est la surface d'une ouverture plane qui, perpendiculairement à la direction de propagation des ondes électromagnétiques, capterait la même puissance que l'antenne considérée ;

⇒ Pour les antennes à ouverture rayonnante plane telles que les paraboloïdes ou les cornets, Σ est donnée par :

$$\Sigma = S f_g.$$

Avec :

f_g est le facteur de gain qui dépend de la loi de variation de l'amplitude du champ sur l'ouverture ;

S est la surface géométrique de l'ouverture.

Relation entre le Gain et la surface équivalente d'une antenne

- ⇒ Une même antenne peut être utilisée à l'émission ou à la réception ;
- ⇒ La relation entre le gain G_0 et Σ (la surface équivalente à cette antenne utilisée à l'émission ou à la réception) est donnée par :

$$G_0 = 4\pi \frac{\Sigma}{\lambda^2}.$$

Où :

$$\Sigma = \frac{G_0 \lambda^2}{4\pi}.$$

λ est la longueur d'onde dans le vide.

⇒ Pour une antenne paraboloidale, pour laquelle $S = \pi \frac{D^2}{4}$, G_0 est donné par :

$$G_0 = 4\pi \frac{S f_g}{\lambda^2} = 4\pi \frac{\pi \frac{D^2}{4} f_g}{\lambda^2} \rightarrow$$

$$G_0 = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 f_g.$$

Impédance d'entrée

⇒ Considérons une antenne de deux bornes A et B. La tension entre ces deux bornes et le courant d'alimentation de cette antenne sont respectivement donnés comme suit :

$$\underline{V}_e = V_e \cdot e^{j\varphi}.$$

$$\underline{I}_e = I_e \cdot e^{j\varphi'}.$$

⇒ L'impédance d'entrée est donnée par :

$$Z_e = \frac{\underline{V}_e}{\underline{I}_e} = R_e + jX_e.$$

⇒ Comme Z_e est complexe, alors la puissance fournie à l'antenne se compose des quantités suivantes :

➤ Une puissance active donnée par :

$$P_{active} = \frac{1}{2} R_e I_e^2.$$

➤ Une puissance réactive donnée par :

$$P_{réactive} = \frac{1}{2} X_e I_e^2.$$

La puissance active est la somme de deux puissances données comme suit :

• Une puissance rayonnée donnée par :

$$P_{ray} = \frac{1}{2} R_{ray} I_e^2.$$

• Une puissance dissipée donnée par :

$$P_{dis} = \frac{1}{2} R_p I_e^2.$$

Avec :

R_{ray} : la résistance liée au rayonnement ;

R_p : la résistance liée aux pertes ;

⇒ Le rendement de l'antenne peut se définir comme suit :

$$\eta = \frac{R_{ray}}{R_{ray} + R_p}.$$

Polarisation d'une antenne

⇒ C'est un facteur important lors de la conception et/ou l'installation d'antennes radio (en décidant bien sûr d'une forme particulière d'antenne) ou même lors de leur intégration dans de petits systèmes de communication sans fil ou mobiles ;

⇒ Les antennes radio avec une polarisation particulière ne seront pas efficaces pour recevoir des ondes électromagnétiques avec une polarisation différente ;

⇒ La polarisation d'une onde, rayonnée en zone lointaine par une antenne, est définie par la projection, dans le plan orthogonal à la direction de propagation, de la courbe définissant la variation de l'extrémité du vecteur champ électrique $E(t)$ en fonction du temps ;

⇒ Dans le cas général, la polarisation d'une antenne est une ellipse contenue dans un plan perpendiculaire à la direction de rayonnement considérée comme le montre la figure (25) ;

⇒ Cette ellipse est identifiée en utilisant le paramètre rapport axial AR donné par :

$$AR = \frac{\text{grand diamètre de l'ellipse}}{\text{petit diamètre de l'ellipse}} = \frac{AA'}{BB'}$$

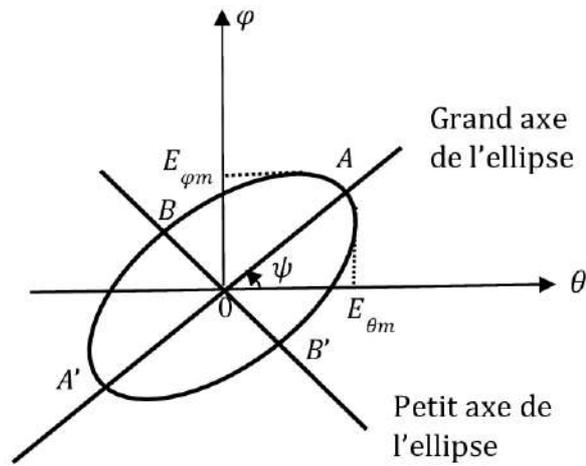


Figure.5.Ellipse de polarisation

- ⇒ D'après cette figure, on voit que l'axe principal est incliné d'un angle ψ par rapport à l'axe (θ) ;
- ⇒ AR est souvent exprimé en dB, comme suit :

$$AR_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{AA'}{BB'} \right).$$



Figure.6. Antennes Yagi verticale & horizontale

- ⇒ Une antenne verticale (c'est-à-dire une antenne avec des éléments verticaux - Voir la figure (26)) recevra mieux les signaux polarisés verticalement ;
- ⇒ De même, une antenne horizontale recevra les signaux polarisés horizontalement ;
- ⇒ Il est donc important de faire correspondre la polarisation de l'antenne RF à celle du signal reçu. De cette façon, un signal maximum est obtenu. Si la polarisation de l'antenne RF ne correspond pas à celle du signal, il y a une diminution correspondante du niveau du signal. Elle est réduite d'un

facteur de cosinus de l'angle entre la polarisation de l'antenne RF et le signal ;

- ⇒ Si l'antenne et le signal reçu sont polarisés de manière croisée, alors en théorie, aucun signal ne serait capté.
- ⇒ Pour les applications de radiocommunications terrestres, on constate qu'une fois qu'un signal a été transmis, sa polarisation restera globalement la même. Cependant, les réflexions des objets sur la trajectoire peuvent modifier la polarisation. En effet, comme le signal reçu est la somme du signal direct plus un certain nombre de signaux réfléchis, la polarisation globale du signal peut changer légèrement bien qu'elle reste globalement la même.

Catégories de polarisation

- ⇒ Il existe plusieurs catégories de polarisation, et à l'intérieur de chaque type, il existe plusieurs sous-catégories. Ces catégories et sous-catégories seront données dans les sections suivantes.

Polarisation linéaire

- ⇒ La polarisation rectiligne ou linéaire ($AR \rightarrow \infty$ ou $AR = 0$) est obtenue quand le champ reste parallèle à une direction au cours du temps. Dans ce cas, l'ellipse devient un segment de droite.
- ⇒ C'est la forme la plus courante de la polarisation d'antenne. Elle se caractérise par le fait que tout le rayonnement est dans un plan - d'où le terme linéaire. Ses différents types sont montrés sur la figure (27).

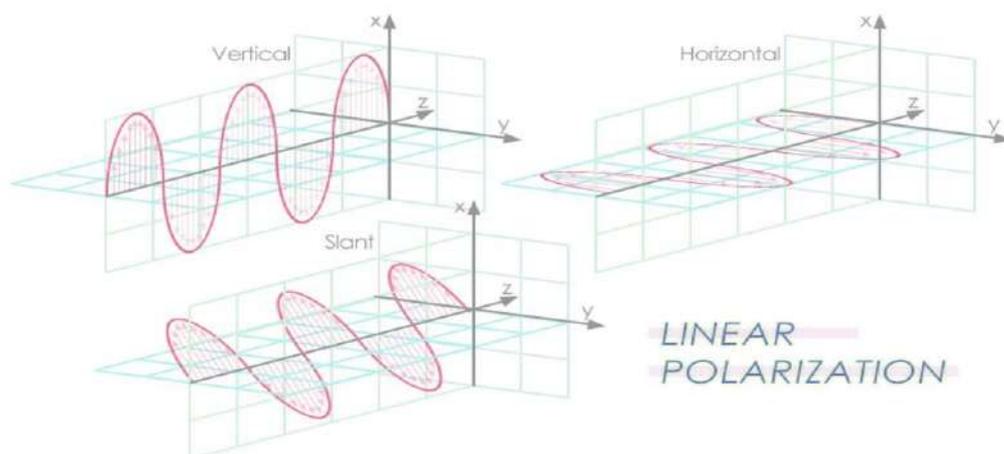


Figure.7. Polarisation linéaire

Polarisation horizontale

- ⇒ Cette forme de polarisation d'antenne comporte des éléments horizontaux ;

- ⇒ Elle capte et émet des signaux polarisés horizontalement, c'est-à-dire des ondes électromagnétiques avec le champ électrique dans le plan horizontal.

Polarisation verticale

- ⇒ Cette forme d'antenne est caractérisée par les éléments verticaux à l'intérieur de l'antenne. Il peut s'agir d'un seul élément vertical ;
- ⇒ L'une des raisons d'utiliser la polarisation verticale est que les antennes constituées d'un seul élément vertical peuvent rayonner de manière égale autour d'elles dans le plan horizontal ;
- ⇒ Généralement, les antennes à polarisation verticale ont ce qu'on appelle un faible angle de rayonnement permettant à une grande partie de leur puissance d'être rayonnée à un angle proche de la surface de la terre ;
- ⇒ Les antennes polarisées verticalement sont également très pratiques pour une utilisation avec les automobiles.

Polarisation oblique

- ⇒ Il s'agit d'une forme de polarisation d'antenne radio qui forme un angle par rapport aux plans horizontal ou vertical. De cette manière, les antennes à polarisation verticale et horizontale sont capables de recevoir le signal.

Polarisation circulaire

- ⇒ La polarisation circulaire est un peu plus difficile à visualiser que la polarisation linéaire. Cependant, elle peut être imaginée en visualisant un signal se propageant à partir d'une antenne RF qui tourne. On verra alors que la pointe du vecteur de champ électrique trace une hélice ou un tire-bouchon lorsqu'il s'éloigne de l'antenne ;
- ⇒ La polarisation circulaire ($AR = 1$, droite ou gauche) est obtenue lorsque les deux composantes du champ électrique sont équi-amplitudes ($E_{\theta m} = E_{\phi m}$) et vibrent en quadrature de phase. Dans ce cas, l'ellipse devient alors un cercle (Voir la figure (28)).

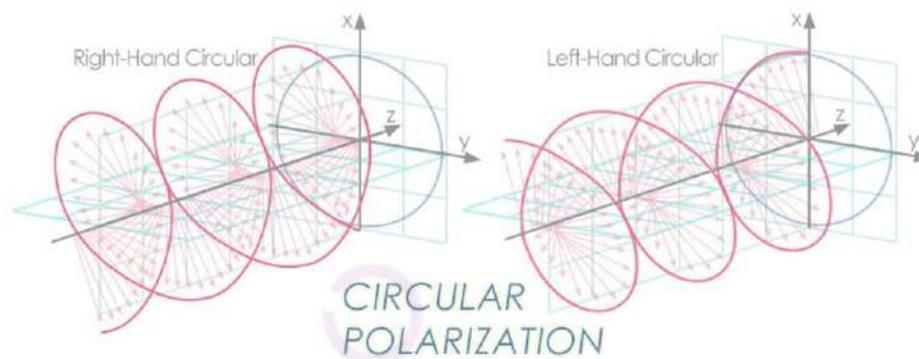


Figure.8. Polarisation circulaire

- ⇒ Cela présente un certain nombre d'avantages pour des domaines tels que les applications satellitaires où elle aide à surmonter les effets des anomalies de propagation, les réflexions au sol par exemple.

Polarisation circulaire droite

- ⇒ Dans cette forme de polarisation, le vecteur champ tourne dans le sens de la droite.

Polarisation circulaire gauche

- ⇒ Dans cette forme de polarisation, le vecteur tourne à gauche, c'est-à-dire à l'opposé de la droite.

Polarisation elliptique

- ⇒ Comme nous l'avons plus haut (Voir la figure (29)), la polarisation elliptique est la plus générale ;
- ⇒ Cette polarisation peut être visualisée comme précédemment par la pointe du vecteur de champ électrique traçant un tire-bouchon de forme elliptique ;

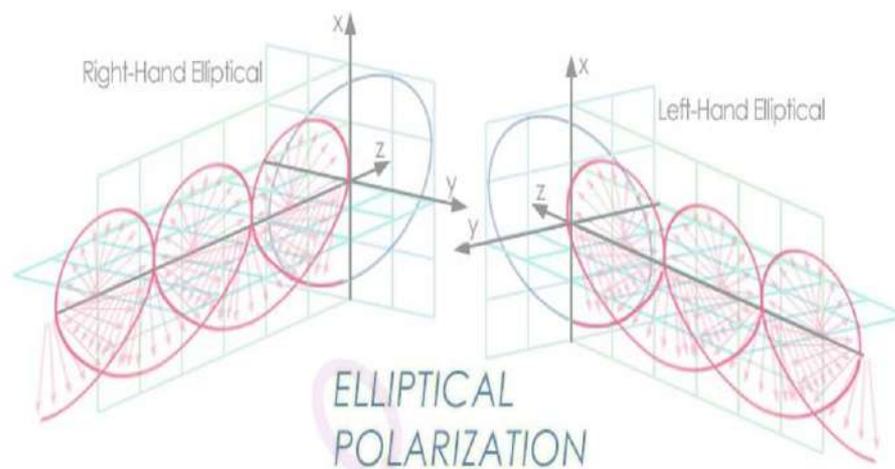


Figure.9. Polarisation elliptique

Applications pour différents types de polarisation d'antenne

- ⇒ Chaque forme de polarisation d'antenne radio a ses propres avantages ;
- ⇒ La sélection de la bonne forme de polarisation peut offrir certains avantages et peut donc être très importante ;
- ⇒ Différents types de polarisation sont utilisés dans différentes applications pour permettre d'exploiter leurs avantages ;
- ⇒ Dans les communications radio générales, la polarisation linéaire est la plus largement utilisée pour la plupart des applications de

radiocommunication, car les antennes radio sont généralement plus simples et plus directes ;

- ⇒ Dans les téléphones mobiles et les communications sans fil à courte portée, la polarisation linéaire est aussi utilisée car les antennes à polarisation linéaire sont plus faciles à fabriquer ;
- ⇒ Dans les communications ionosphériques HF longue distance, les polarisations verticale et horizontale sont utilisées ;
- ⇒ Pour la diffusion à ondes moyennes, la polarisation verticale est utilisée car la propagation des ondes de sol sur la terre est considérablement meilleure en utilisant la polarisation verticale, tandis que la polarisation horizontale montre une amélioration marginale pour les communications longue distance utilisant l'ionosphère ;
- ⇒ Dans les communications par satellite, la polarisation circulaire est parfois utilisée car elle présente certains avantages en termes de propagation et pour surmonter l'évanouissement causé si le satellite change d'orientation.

Bande passante d'une antenne

- ⇒ La largeur de bande d'une antenne se définit par la plage de fréquences sur laquelle celle-ci peut fonctionner correctement. Elle est définie :
- En pourcentage autour de la fréquence centrale f_c , comme suit :

$$B(\%) = 100 \times \frac{f_h - f_l}{f_c}$$

- En différence entre les limites des fréquences de la bande passante, comme suit :

$$B = f_h - f_l$$

Avec :

f_h est la fréquence la plus élevée de la bande ;

f_l est la fréquence la plus basse de la bande.

- ⇒ Généralement, la bande passante correspond à la plage de fréquence pour laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à -10dB ;
- ⇒ Dans certaines applications, les niveaux -6 dB ou à -3 dB peuvent être utilisés.

Dans la figure (30), on montre la bande passante à partir de la courbe du coefficient de réflexion.

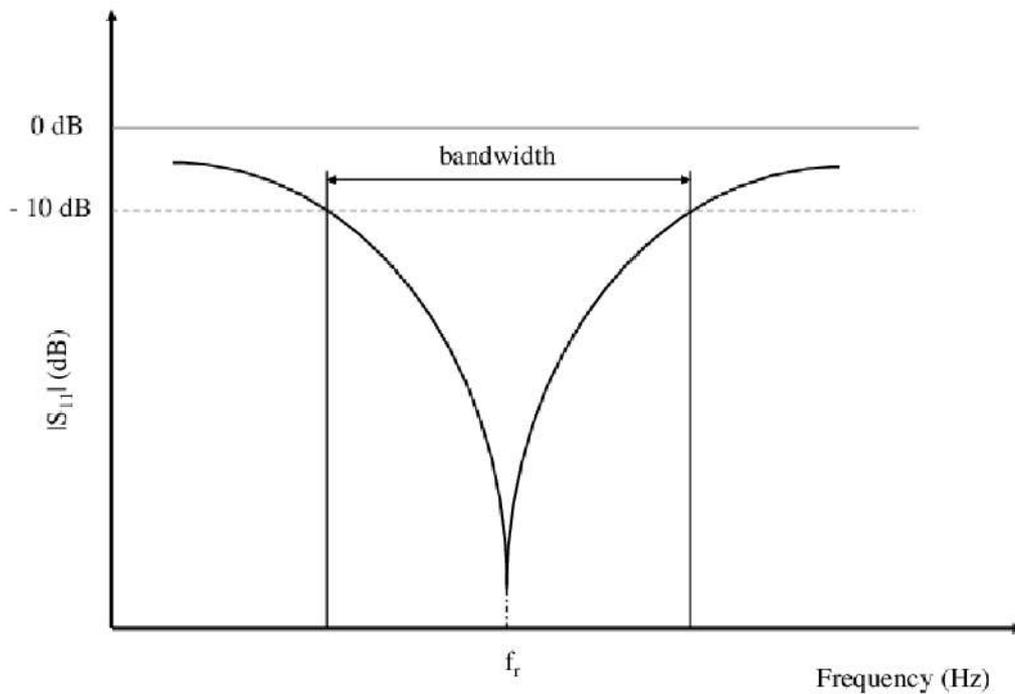


Figure.30. Polarisation elliptique

Paramètres S21 et S11 d'une antenne

⇒ Considérons le réseau, à deux ports, montré dans la figure (30).

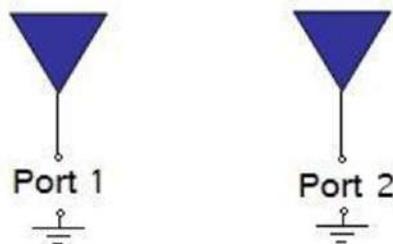


Figure.31. Réseau à deux ports

- ⇒ Dans cette figure, le paramètre S_{21} , appelé coefficient de transmission représente la puissance reçue par l'antenne 2 par rapport à la puissance absorbée par l'antenne 1 ;
- ⇒ Si $S_{21} = 0 \text{ dB}$, alors toute la puissance délivrée à l'antenne 1 (Puissance prévue pour être délivrée à l'antenne 2) arrive aux bornes de l'antenne 2 ;
- ⇒ Si $S_{21} = -10 \text{ dB}$, alors si 1 Watt (ou 0 dB) est délivré à l'antenne 1, alors -10 dB (0,1 Watts) de puissance est reçue par l'antenne 2 ;
- ⇒ Pratiquement, le paramètre le plus couramment utilisé est le paramètre S_{11} ;

- ⇒ Le S_{11} représente la quantité de puissance réfléchiée par l'antenne, et est donc connu sous le nom de coefficient de réflexion (parfois écrit Γ) ;
- ⇒ Si $S_{11} = 0 \text{ dB}$, alors toute la puissance est réfléchiée par l'antenne et rien n'est rayonné ;
- ⇒ Si $S_{11} = -10 \text{ dB}$, cela implique que si 3 dB de puissance sont délivrées à l'antenne, -7 dB est la puissance réfléchiée ;
- ⇒ Le reste de la puissance a été délivré à l'antenne. Cette puissance est donc soit rayonnée ou absorbée sous forme de pertes dans l'antenne ;
- ⇒ Étant donné que les antennes sont généralement conçues pour présenter de faibles pertes, idéalement, la majorité de la puissance délivrée à l'antenne est rayonnée ;
- ⇒ La figure (31) montre un exemple de la courbe de S_{11} ;

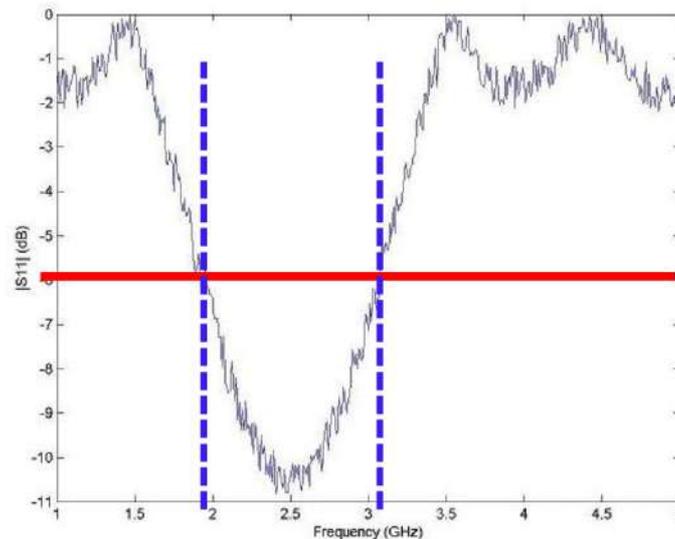


Figure.32. $|S_{11}|$ en fonction de la fréquence

- ⇒ Ce résultat est obtenu à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA) ;
- ⇒ Comme le montre cette figure, l'antenne rayonne mieux à la fréquence $2,5 \text{ GHz}$, pour laquelle $S_{11} = -10 \text{ dB}$;
- ⇒ Pour la fréquence $1,5 \text{ GHz}$, l'antenne ne rayonnera pratiquement rien, car S_{11} est proche de 0 dB (toute la puissance est réfléchiée) ;
- ⇒ La bande passante de l'antenne peut également être déterminée à partir de cette figure. En effet, si la bande passante est définie comme la plage de fréquences dans laquelle S_{11} doit être inférieur à -6 dB , alors la bande passante serait d'environ 1 GHz ;
- ⇒ La fréquence supérieure est de 3 GHz et la fréquence inférieure est de 2 GHz .

Rapport d'onde stationnaire ROS

- ⇒ Le paramètre ROS (VSWR en anglais pour Voltage Standing Wave Ratio ou SWR) est une mesure qui décrit numériquement comment l'impédance de l'antenne est adaptée à la ligne de transmission à laquelle l'antenne est connectée ;
- ⇒ Le VSWR est fonction du coefficient de réflexion. Cette relation est donnée par :

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}$$

- ⇒ Pour le cas des antennes, le VSWR est toujours un nombre réel positif ;
- ⇒ Plus le VSWR est petit, mieux l'antenne est adaptée à la ligne de transmission et plus la puissance délivrée à l'antenne est importante ;
- ⇒ La valeur minimale du VSWR est égale à 1,0. Pour cette valeur, aucune puissance n'est réfléchiée par l'antenne, ce qui représente le cas idéal ;
- ⇒ Souvent, les antennes doivent satisfaire à une exigence de bande passante exprimée en termes de VSWR. En effet, une valeur du VSWR, inférieure à 3,0 sur la plage de fréquences spécifiée, permet à une antenne de fonctionner correctement ;
- ⇒ Cette spécification du VSWR implique un coefficient de réflexion $< 0,5$ sur la plage de fréquences indiquée.