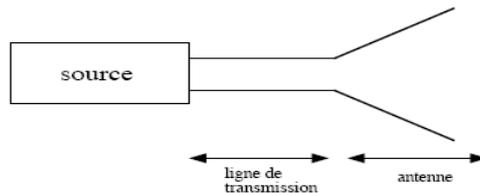


## Chapitre V. Généralités sur les Antennes

### V.1. Définition

Une antenne est un dispositif permettant de créer, d'émettre et de recevoir des ondes électromagnétiques. En général, elle est conçue pour rayonner ou capter le maximum d'énergie d'une onde électromagnétique se propageant en espace libre. On peut représenter une antenne par le schéma suivant :



La source produit les ondes électromagnétiques, la ligne de transmission les guide et les achemine à l'antenne qui les rayonne. La ligne de transmission est soit un guide d'onde, soit un câble. Fondamentalement l'antenne s'oppose à la ligne de transmission. Alors que celle-ci se doit de transporter l'énergie avec un minimum de pertes par rayonnement, l'antenne, elle, se doit au contraire de rayonner (ou capter) le maximum d'énergie dans une ou plusieurs directions.

Une autre façon d'aborder la notion d'antenne est de la décrire comme la région de transition entre les ondes guidées et les ondes rayonnées. De ce point de vue, une antenne d'émission est le composant qui transforme les ondes guidées en ondes rayonnées, une antenne de réception assumant le rôle inverse. Bien évidemment une antenne peut être utilisée en émission comme en réception, en émission elle doit être capable de supporter des courants forts, en réception suffisamment sensible pour que s'y induisent des courants faibles, elle peut même être utilisée dans ces deux modes quasiment simultanément (à partir des fréquences UHF).

### V. 2. Le rôle des antennes

#### Antenne d'émission

Afin d'assurer la propagation dans l'air, il est nécessaire qu'un dispositif génère une onde rayonnée. Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. Dans ce sens, c'est un transducteur.

#### Antenne de réception

De façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception. Dans ce sens, l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée. Elle joue le même rôle qu'un télescope qui capte la lumière issue des étoiles et la transforme.

## Réciprocité

Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes. On dit que son fonctionnement est réciproque. Ceci est une conséquence du théorème de réciprocité qui sera démontré plus loin. Dans quelques cas exceptionnels pour lesquels les antennes comportent des matériaux non linéaires ou bien anisotropes, elles ne sont pas réciproques.

Du fait de la réciprocité des antennes, il ne sera pratiquement jamais fait de différence entre le rayonnement en émission ou en réception. Les qualités qui seront annoncées pour une antenne le seront dans les deux modes de fonctionnement, sans que cela soit précisé dans la plupart des cas.

## V. 3. Grandeurs et paramètres caractéristiques d'une antenne

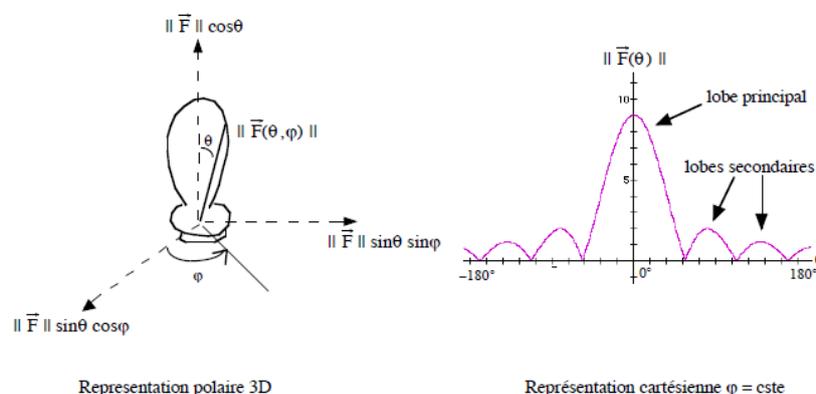
On ne caractérise pas les antennes mais leur rayonnement par un petit nombre de paramètres.

### V.3.1 Le diagramme de rayonnement

C'est la répartition sur une sphère du champ électromagnétique rayonné au loin par une antenne. A grande distance le champ électromagnétique présente une structure d'onde sphérique localement plane avec une expression mathématique dans laquelle les dépendances en distance et angulaire sont clairement séparées :

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi) = \frac{e^{-jkr}}{r} \vec{F}(\theta, \varphi) \quad (1)$$

On appelle diagramme de rayonnement la représentation de  $\|\vec{F}(\theta, \varphi)\|$  ou  $\|\vec{F}(\theta, \varphi)\|^2$ . Bien que,  $\vec{F}(\theta, \varphi)$  soit une fonction vectorielle complexe, il est d'usage de ne représenter que sa norme. Le diagramme de rayonnement est une surface 3D que l'on trace en coordonnées polaires ou cartésiennes. Le plus souvent on se contente de coupes suivant deux plans perpendiculaires. Ces plans peuvent être des plans de symétries ou des plans de polarisation (plan E, plan H).



Les diagrammes de rayonnement en coupe sont le plus souvent représentés en dB :

$20 \log_{10} \left( \frac{\|\vec{F}(\theta, \varphi)\|}{\|\vec{F}(\theta, \varphi)\|_{\max}} \right)$  Ils constituent une représentation de la répartition de la puissance

électromagnétique rayonnée sur une sphère de grand rayon. En effet la densité surfacique de puissance est donnée par le vecteur de Poynting moyen qui en notation complexe s'écrit :

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{E} \wedge \vec{H}^* \quad (\text{watt/m}^2) \quad (2)$$

et puisque l'onde rayonné est localement plane :

$$\vec{H} = \frac{1}{\eta} \vec{e}_r \wedge \vec{E} \quad (3)$$

on a :

$$\vec{S} = \frac{1}{2\eta} \vec{E} \wedge (\vec{e}_r \wedge \vec{E}^*) = \frac{1}{2\eta} |\vec{E}|^2 \vec{e}_r = \frac{1}{2\eta r^2} |\vec{F}|^2 \vec{e}_r \quad \Rightarrow S = \frac{F^2}{2\eta r^2} \Rightarrow F^2 = 2\eta S r^2 \quad (4)$$

$F^2$  est donc bien proportionnel à une puissance présente en tout point d'une sphère de rayon  $r$  grand. Il est clair que le diagramme de rayonnement ne dépend ni de la distance ni de la puissance d'émission. Il ne dépend que de la distribution de courant sur l'antenne. Du point de vue pratique, il dépend au 1er ordre de la fréquence.

### V.3.2 L'intensité de rayonnement

Calculons la puissance  $dP$  de l'onde qui traverse un élément de surface  $ds$  de la sphère au centre de laquelle est située notre antenne.

$$dP = \vec{S} d\vec{s} = \frac{|\vec{F}|^2}{2\eta r^2} \vec{e}_r ds \vec{e}_r = \frac{|\vec{F}|^2}{2\eta r^2} ds = \frac{|\vec{F}|^2}{2\eta} d\Omega \quad (\text{watt}) \quad (5)$$

$d\Omega$  étant l'angle solide élémentaire sous lequel est vu l'élément de surface  $ds$ . La définition de l'intensité de rayonnement en découle : c'est la puissance rayonnée par unité d'angle solide.

$$U(\theta, \varphi) = \frac{dP}{d\Omega} = \frac{|\vec{F}|^2}{2\eta} = S r^2 \quad (6)$$

### V.3.3 La puissance totale rayonnée

C'est la puissance rayonnée dans tout l'espace. Elle se calcule par intégration de  $U$  sur l'angle solide sous lequel est vu l'espace, c'est-à-dire  $4\pi$ . En voici les différentes formulations :

$$P_{\text{totale}} = \int_{4\pi} U d\Omega = \int_{4\pi} \frac{|\vec{F}|^2}{2\eta} d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi = \int_{\text{sphère}} S ds \quad (7)$$

### V.3.4 Le gain directif et la directivité

Par définition, le gain directif est égal au rapport de l'intensité de rayonnement de l'antenne sur l'intensité de rayonnement  $U_0$  de l'antenne isotrope équivalente rayonnant la même puissance totale.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_0} \quad (8)$$

Cette grandeur, sans dimension, traduit la capacité d'une antenne à concentrer la puissance qu'elle rayonne dans un angle solide limité. Un gain directif élevé correspond à un rayonnement localisé dans un angle solide restreint et donc à un rayonnement intense dans cette direction. Inversement, une antenne faiblement directive rayonnera faiblement dans une grande portion de l'espace, la limite d'une antenne non directive étant une antenne isotrope.

Nous verrons que la directivité d'une antenne est essentiellement liée au rapport  $L/\lambda$  : les "grandes" antennes sont directives, les "petites" antennes le sont moins. La puissance rayonnée par une antenne isotrope étant :

$$P_{isotrope} = \int_{4\pi} U_0 d\Omega = 4\pi U_0 \quad (9)$$

### V.3.5. La bande passante

Le rayonnement d'une antenne dépend, on l'a vu, de la fréquence. Une antenne peut être optimale à une fréquence et se révéler sourde en réception ou muette à l'émission à une autre. La bande passante est l'intervalle de fréquence pour lequel l'antenne présente des caractéristiques presque indépendantes de la fréquence. Cette caractéristique permet de classer les antennes en deux catégories : les antennes larges bandes et les antennes à bandes étroites. Pour ces dernières, plus que la bande passante, c'est la fréquence centrale de fonctionnement qui est la caractéristique la plus importante lors de leurs conceptions. Elle détermine pour une grande part la taille de l'antenne. On peut d'ailleurs jouer sur les dimensions d'une antenne pour faire varier la fréquence centrale comme on le fait avec les antennes filaires télescopique sur les voitures.

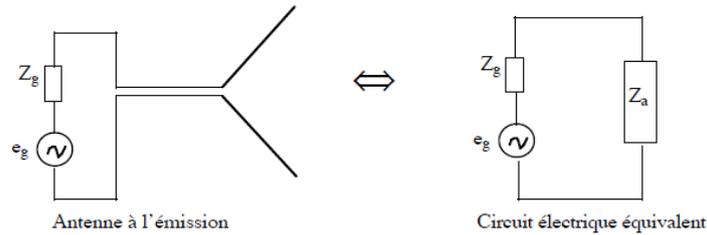
### V.3.6 La résistance de rayonnement

Si on considère une antenne comme un simple dipôle passif alors la grandeur qui la caractérise est son impédance. De ce point de vue, il faut distinguer l'antenne en réception de l'antenne en émission.

#### V.3.6.1. Impédance d'entrée d'une antenne à l'émission

A l'émission, une antenne se comporte comme un dipôle dont l'impédance est celle qu'elle présente à son circuit d'alimentation. Elle constitue la charge terminale et il importe avant toute chose de satisfaire aux conditions d'adaptation en impédance de façon à minimiser les pertes d'énergie par

réflexion entre le générateur et l'antenne. Si on suppose une adaptation parfaite entre le générateur, la ligne de transmission et l'antenne, on peut représenter l'ensemble {générateur - ligne - antenne} par le circuit suivant :



$R_a$  est la résistance de l'antenne,  $Z_a$  est la réactance de l'antenne. La résistance d'antenne se décompose à son tour en une résistance de rayonnement  $R_r$  et une résistance ohmique  $R_\Omega$ .

$$R_a = R_r + R_\Omega \quad (10)$$

La condition d'adaptation en impédance s'écrit :  $Z_a = Z_g^*$ ,  $R_a = R_g$  et  $Z_a + Z_g = 2R_a$

La loi d'Ohm s'écrit :

$$e_g = (Z_a + Z_g)I = 2R_a I \quad (11)$$

Evaluons la puissance moyenne rayonnée  $P_r$  et celle dissipée par effet Joule  $P_\Omega$ .

$$P_r = \frac{1}{2} R_r I^2 = \frac{1}{2} R_r \left( \frac{e_g}{R_r + R_\Omega} \right)^2 = \frac{1}{8} \frac{R_r}{(R_r + R_\Omega)^2} e_g^2 \quad (12)$$

$$P_\Omega = \frac{1}{2} R_\Omega I^2 = \frac{1}{2} R_\Omega \left( \frac{e_g}{R_r + R_\Omega} \right)^2 = \frac{1}{8} \frac{R_\Omega}{(R_r + R_\Omega)^2} e_g^2 \quad (13)$$

De même la puissance totale fournie par l'alimentation et celle dissipée dans le générateur s'écrivent :

$$P_{\text{alim}} = \frac{1}{2} e_g I = \frac{1}{4} \frac{e_g^2}{(R_r + R_\Omega)} \quad (14)$$

$$P_g = \frac{1}{2} R_g I^2 = \frac{1}{8} \frac{R_g}{(R_r + R_\Omega)^2} e_g^2 = \frac{1}{8} \frac{e_g^2}{(R_r + R_\Omega)} \quad (15)$$

D'où l'on déduit  $P_g = P_r + P_\Omega = P_a = P_{\text{alim}} / 2$ . Ainsi sur la moitié de la puissance que le générateur fournit à l'antenne, une partie  $P_r$  est rayonnée et l'autre  $P_\Omega$  est dissipée en chaleur. De ces dernières expressions, on tire une nouvelle formulation de l'efficacité de rayonnement :

$$e = \frac{P_{\text{totale rayonnée}}}{P_{\text{alim-antenne}}} = \frac{P_r}{P_r + P_\Omega} = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega} = \frac{1}{1 + \frac{R_\Omega}{R_r}} \quad (16)$$

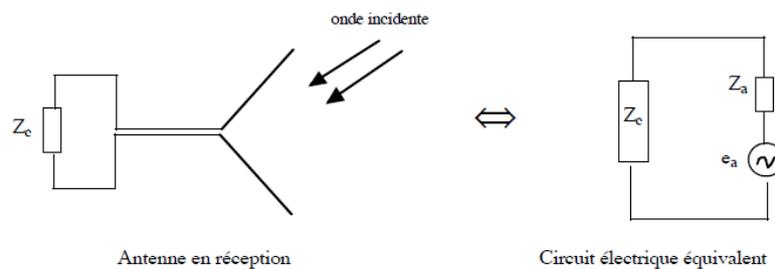
Cas particuliers :

- Pour une antenne sans pertes  $R_\Omega = 0$  et on a  $P_\Omega = 0$  et  $e = 1$ . La puissance fournie par l'alimentation à une antenne adaptée et sans pertes est intégralement rayonnée.

- Pour une antenne filaire demi-onde, la résistance de rayonnement est comprise entre  $50\Omega$  et  $75\Omega$  et la résistance ohmique est de l'ordre de quelques ohm,  $R_\Omega$  est donc négligeable par rapport à  $R_r$ . Mais attention au degré d'approximation car  $R_\Omega$  augmente avec la fréquence.

### V.3.6.2. Impédance d'entrée d'une antenne en réception

En réception, une antenne se comporte comme un générateur de fem  $e_a$  et dont l'impédance interne constitue l'impédance d'antenne  $Z_a$ . Le circuit de réception est remplacé par une impédance de charge  $Z_c$ . Comme à l'émission, une bonne réception suppose de satisfaire aux conditions d'adaptation en impédance ( $Z_c = Z_a^*$ ) de façon à minimiser les pertes d'énergie par réflexion entre l'antenne et la charge. On a l'équivalence suivante :



avec des expressions analogues à celles vues précédemment pour les puissances dissipées dans  $Z_c$  et  $Z_a$ . Le problème majeur est de déterminer  $Z_a$ .

### V.3.7. Les pertes de polarisation

Les résistances ohmiques et de rayonnement ne sont pas les seules causes de pertes d'énergie. Il en est une autre qui est liée à la nature vectorielle du rayonnement : c'est la polarisation. Comme on l'a vu, le champ électrique rayonné au loin en un point M1 par une antenne est transversal. On peut donc légitimement écrire :

$$\vec{E}_{loin} = E_\theta \vec{e}_\theta + E_\phi \vec{e}_\phi \quad \text{car} \quad E_T = 0 \quad (17)$$

Rappelons qu'en régime sinusoïdal, les ondes sont polarisées elliptiquement : en tout point de l'espace situé dans la zone de champ lointain le vecteur  $E$  tourne au cours du temps et son extrémité décrit une ellipse (réduite éventuellement à un cercle dans le cas d'une polarisation circulaire ou à une droite dans le cas d'une polarisation rectiligne). La nature vectorielle du rayonnement contraint à tenir compte de l'orientation des antennes. En effet considérons (Fig.1) le fonctionnement d'une antenne en réception située dans la zone de champ lointain d'une antenne émettrice.

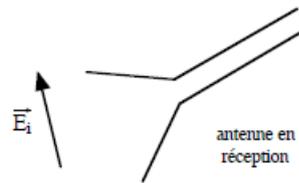


Fig 1

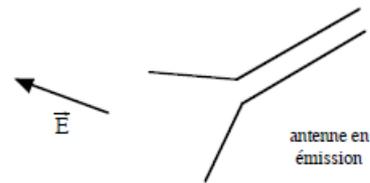
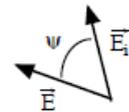


Fig 2

$\vec{E}_i$  est le champ électrique incident de l'onde produite par l'antenne d'émission. L'antenne de réception sera t'elle sensible à l'intégralité de  $\vec{E}_i$  ou à une partie seulement? Pour répondre à cette question aidons nous du théorème de réciprocité et supposons notre antenne en régime d'émission. D'après le théorème, le champ  $\vec{E}$  qu'elle rayonne donne la direction du champ électrique auquel cette antenne est sensible lorsqu'elle fonctionne en réception. Notre antenne sera donc sensible non pas à  $\vec{E}_i$  mais à sa composante suivant la direction de  $\vec{E}$ .



Si  $\vec{E} = E\vec{e}_r$  et  $\vec{E}_i = E_i\vec{e}_i$  alors l'antenne de réception sera sensible à

$$(\vec{E}_i \cdot \vec{e}_r)\vec{e}_r = E_i(\vec{e}_i \cdot \vec{e}_r)\vec{e}_r = E_i \cos \psi \vec{e}_r \quad (18)$$

$\psi$  étant l'angle entre  $\vec{E}_i$  et  $\vec{E}$ . La puissance recueillie sera donc proportionnelle à  $E_i^2 \cos^2 \psi$ .

Le terme  $L = \cos^2 \psi$  est le facteur de pertes par désadaptation de polarisation.

C'est un nombre toujours inférieur à 1 et que l'on exprime en général en dB :  $L_{dB} = 10 \log L < 0$ . Il dépend de l'orientation de l'antenne et de sa géométrie. Il traduit ce que tout le monde sait par expérience : l'orientation d'une antenne conditionne la bonne réception des signaux électromagnétiques.

#### Valeurs particulières :

- $\psi = 0, L_{dB} = 0$  : pas de pertes de polarisation et l'antenne capte l'intégralité du rayonnement incident.
- $\psi = 90^\circ, L_{dB} = -\infty$  : l'antenne ne reçoit plus rien.

La polarisation est donc une caractéristique de l'antenne. En pratique, on distingue principalement les polarisations rectilignes et les polarisations elliptiques. Par exemple, la polarisation verticale est une polarisation rectiligne avec un champ électrique vertical (ex: rayonnement d'un dipôle vertical). La polarisation circulaire est quant à elle obtenue à l'aide de deux éléments de courant orthogonaux égaux mais en quadrature de phase. Sans préjuger de la dépolarisation apportée par le milieu, il est préférable d'utiliser des antennes d'émission et réception ayant les mêmes polarisations. En général, les niveaux de réception en polarisation croisées (HV, VH) sont inférieurs à ceux des polarisations directes (HH ou VV).

### V.3.8. La surface efficace

Quelque soit la forme de l'antenne, son rôle en mode réception est de capter les ondes électromagnétiques et d'en extraire la puissance maximale. On conçoit très bien qu'une antenne est d'autant plus performante qu'elle est de grande dimension. Ainsi les antennes à ouverture captent d'autant plus de puissance que leur surface d'ouverture est grande. On définit la surface de captation d'une antenne ou surface efficace par :

$$A_e = \frac{P_r}{S_i} \quad (\text{m}^2) \quad (19)$$

$P_r$  est la puissance reçue par l'antenne et fournie à la charge,  $S_i$  est le module du vecteur de Poynting de l'onde incidente et correspond à la densité surfacique de puissance incidente rayonnée.  $A_e$  est maximale lorsque  $P_r$  est maximale : il est donc nécessaire que l'antenne soit adaptée à sa charge  $Z_R$ . Cette condition est nécessaire mais non suffisante car il existe une autre cause à une mauvaise réception : c'est la mauvaise adaptation en polarisation comme on l'a vu au paragraphe précédent.