

**Antennes
Master MMR**

**A. MAAOUNI
2017-2018**

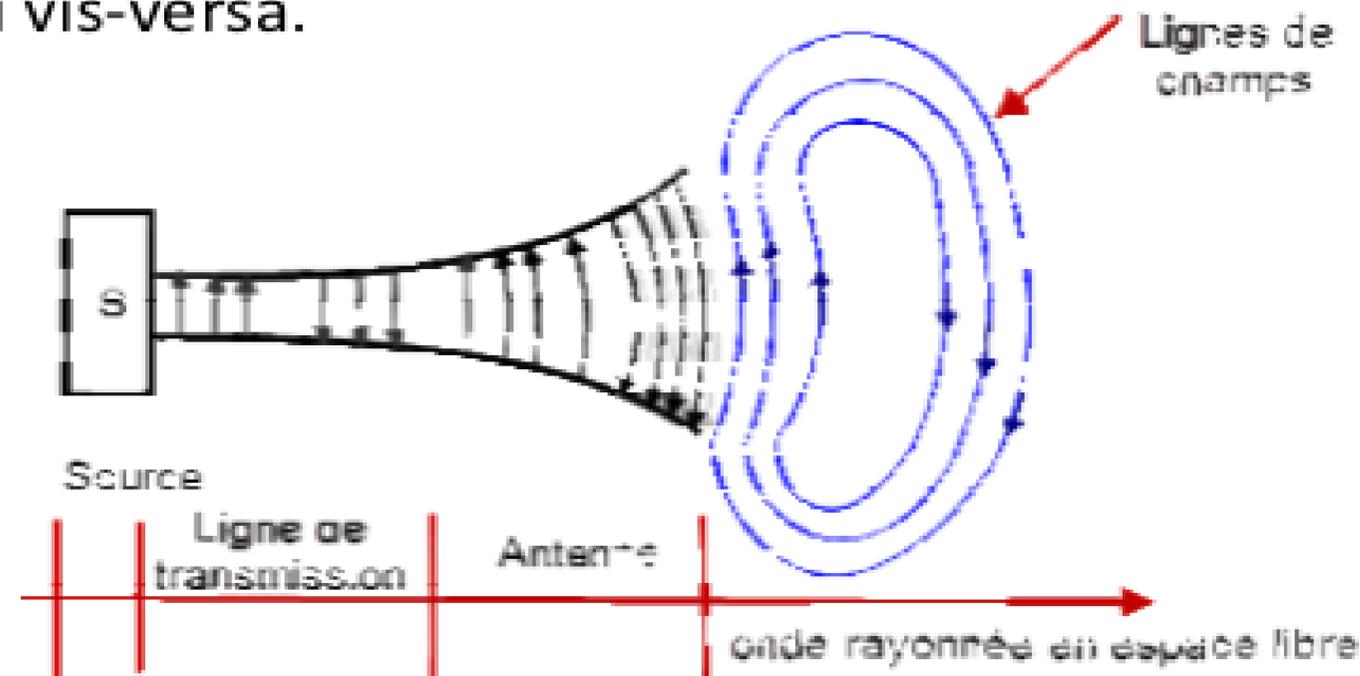
**Equipe
ESMAR**

Paramètres d'antennes

Chapitre 2

Introduction

Une antenne est un dispositif passif qui assure la transition entre une structure de guidage (ligne de transmission, guide d'ondes, ...etc.) et l'espace libre. Elle permet le transfert de l'énergie électrique vers l'énergie magnétique ou vis-versa.



On distingue deux modes de fonctionnement pour l'antenne : émission et réception

- L'antenne en émission est alimentée par l'émetteur; elle est considérée comme une charge
- En réception, l'antenne fournit de la puissance au récepteur; elle est considérée comme une source avec sa propre résistance interne.

- En vertu du théorème de réciprocité (voir plus loin), émission ou réception sont liées par des caractéristiques semblables de point de vue antennes.

En théorie on préfère une source de tension à la réception et une source de courant à l'émission.

- L'antenne de point de vue électrique est équivalente à une impédance dont la partie active est liée au champ rayonné, donc à la puissance transmise en espace libre, et la partie réactive représente les champs d'induction aux voisinages de l'antenne.

Le schéma ci-dessous regroupe les principaux paramètres d'antennes

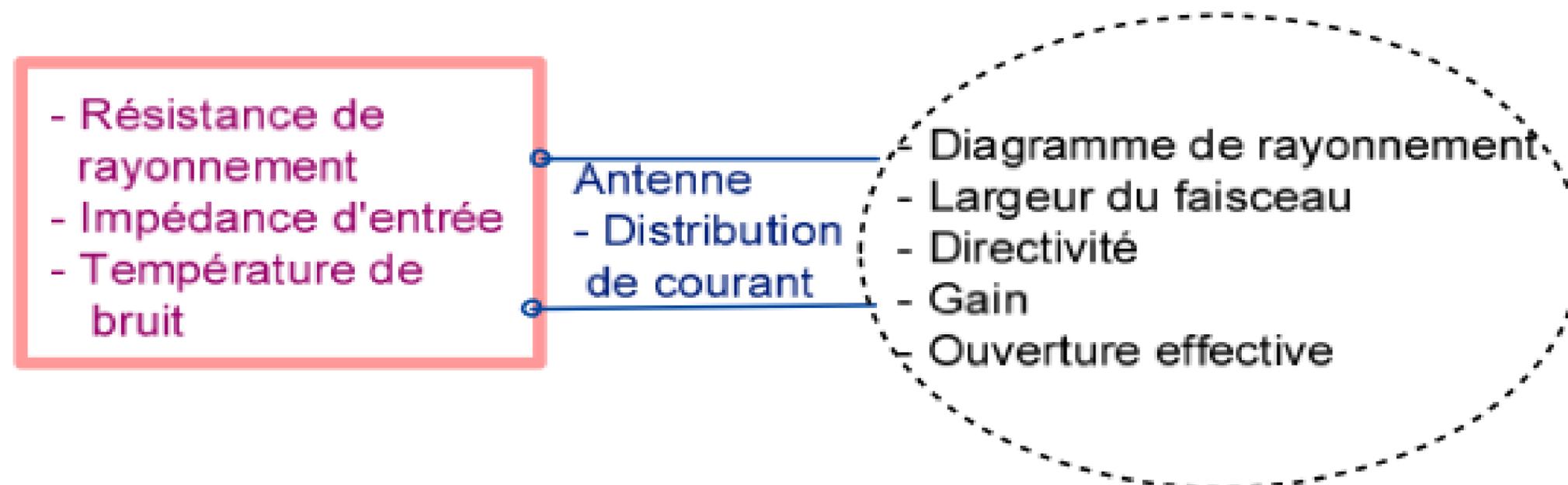
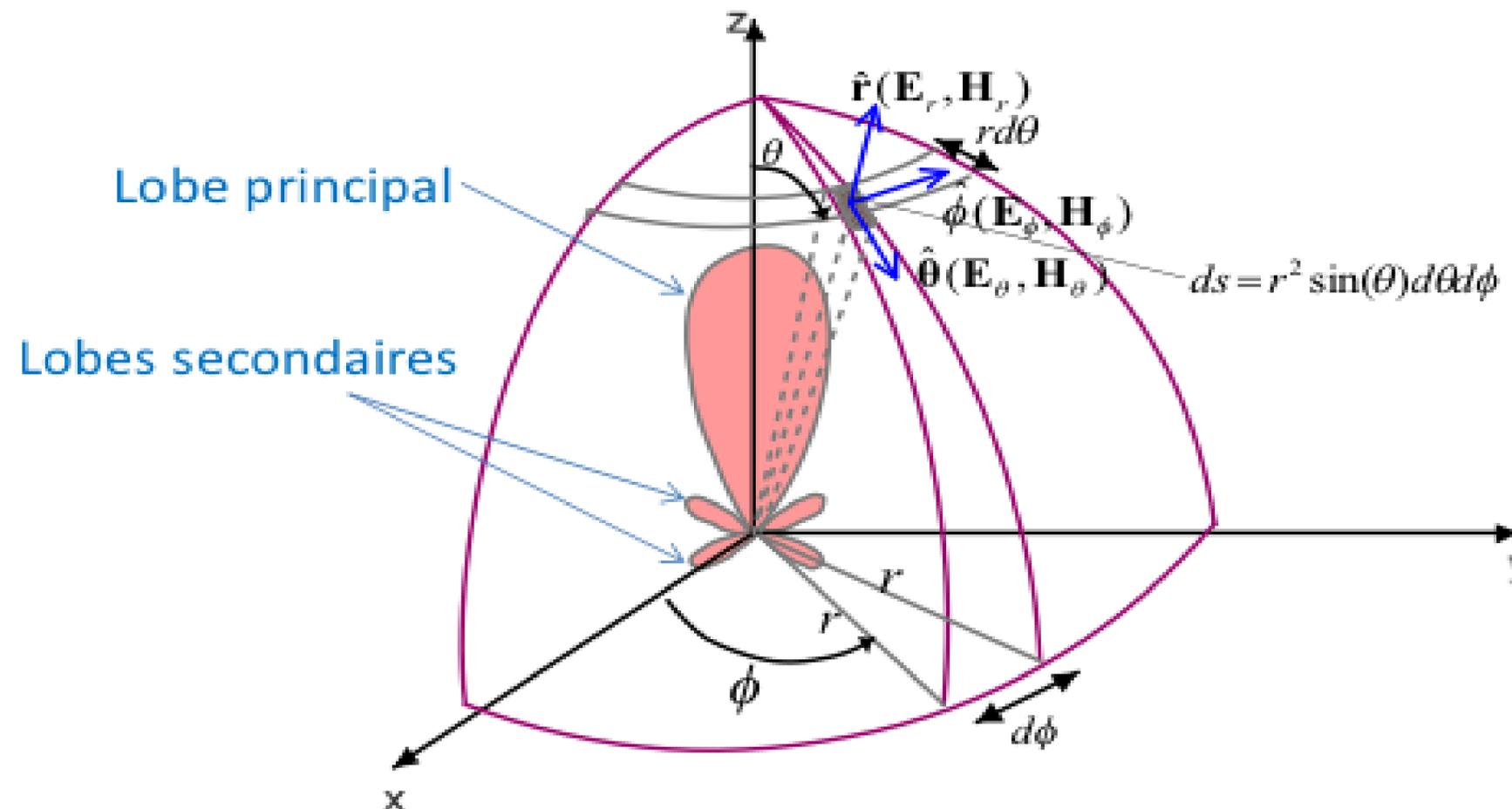


Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est défini comme étant une fonction mathématique ou une représentation graphique en fonction des coordonnées spatiales (coordonnées sphériques) des propriétés de rayonnement de l'antenne. Il s'agit d'une représentation des champs ou celle de la densité de puissance à une **distance fixe r** dans les directions **(θ, ϕ)** . La direction caractérisée par Les coordonnées angulaires est appelée direction d'observation.

Ci-dessous un exemple type de diagramme de rayonnement.



On distingue différents diagrammes de rayonnement:

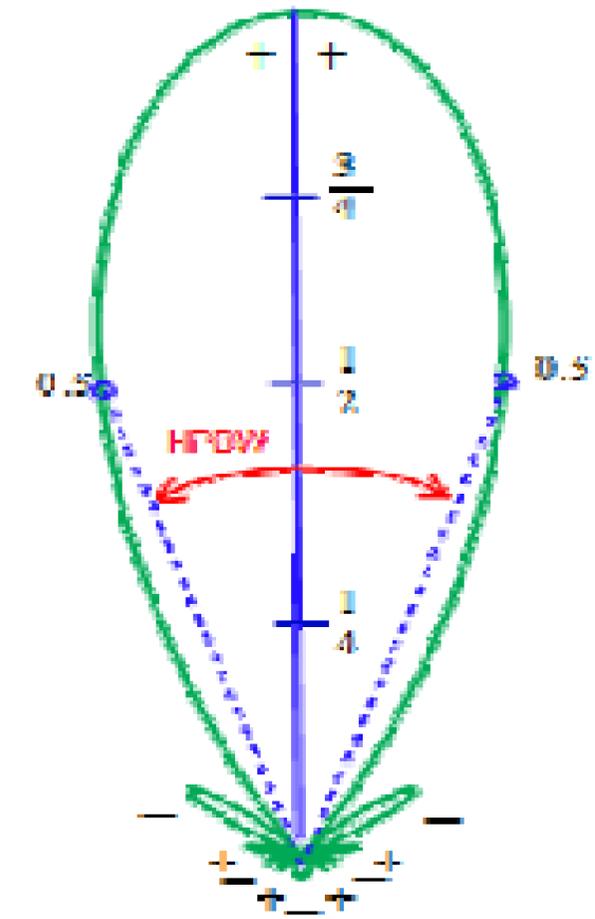
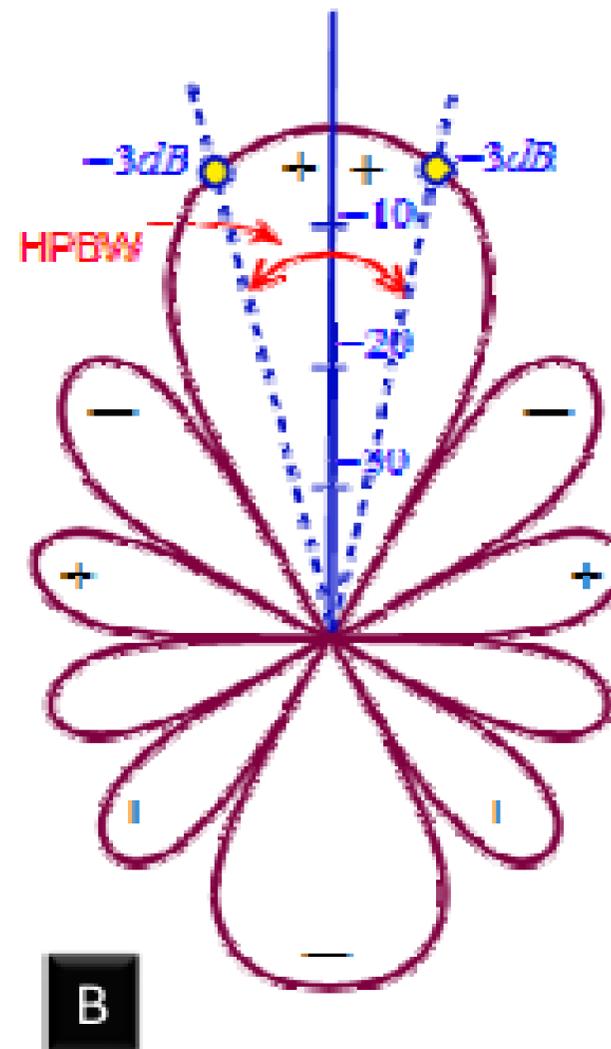
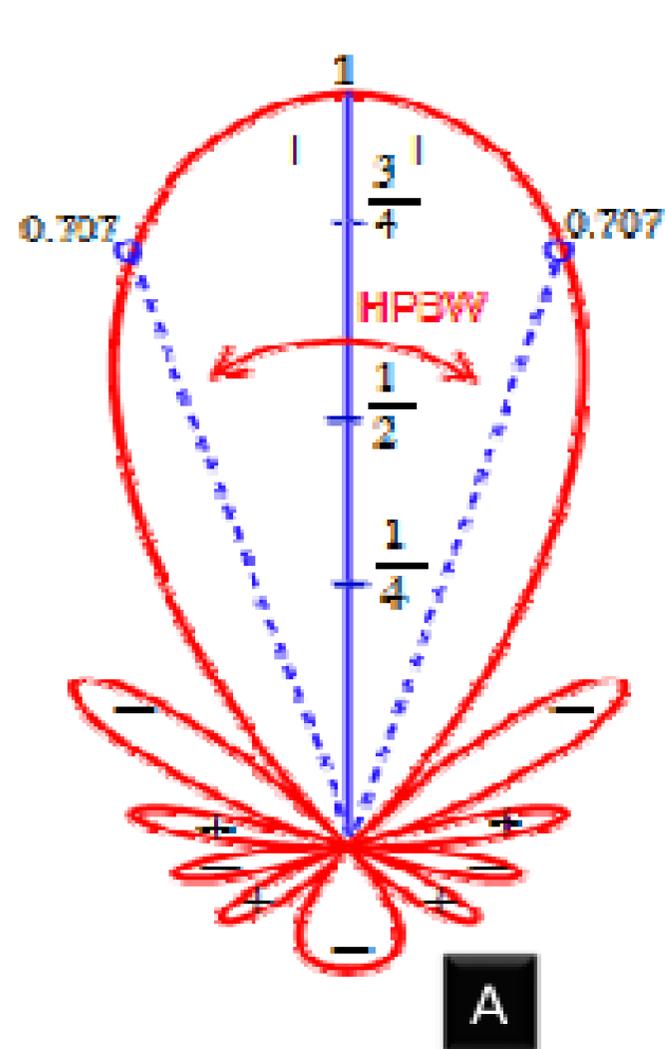
- Diagramme de rayonnement représentant le module du champ électrique ou magnétique total sur échelle linéaire en fonction des variables angulaires ϕ et θ . La normalisation du diagramme de rayonnement par rapport à la valeur maximale du champ électrique (ou magnétique) porte le nom de **fonction caractéristique de rayonnement** $F(\theta, \phi)$.

$$F(\theta, \phi) = \frac{E(r_0, \theta, \phi)}{E_{max}}$$

- Diagramme de l'intensité de rayonnement $K(\theta, \phi)$ qui représente le module au carré du champ électrique (magnétique) en fonction des coordonnées angulaires sur échelle linéaire ou logarithmique (en dB)

$$K_n(\theta, \phi) = \frac{K(\theta, \phi)}{K_{max}}$$

Les diagrammes de la fonction caractéristique et de l'intensité de rayonnement en dB sont équivalents puisque : $K_n = F^2$, $10 \log_{10} K_n = 20 \log_{10} F$

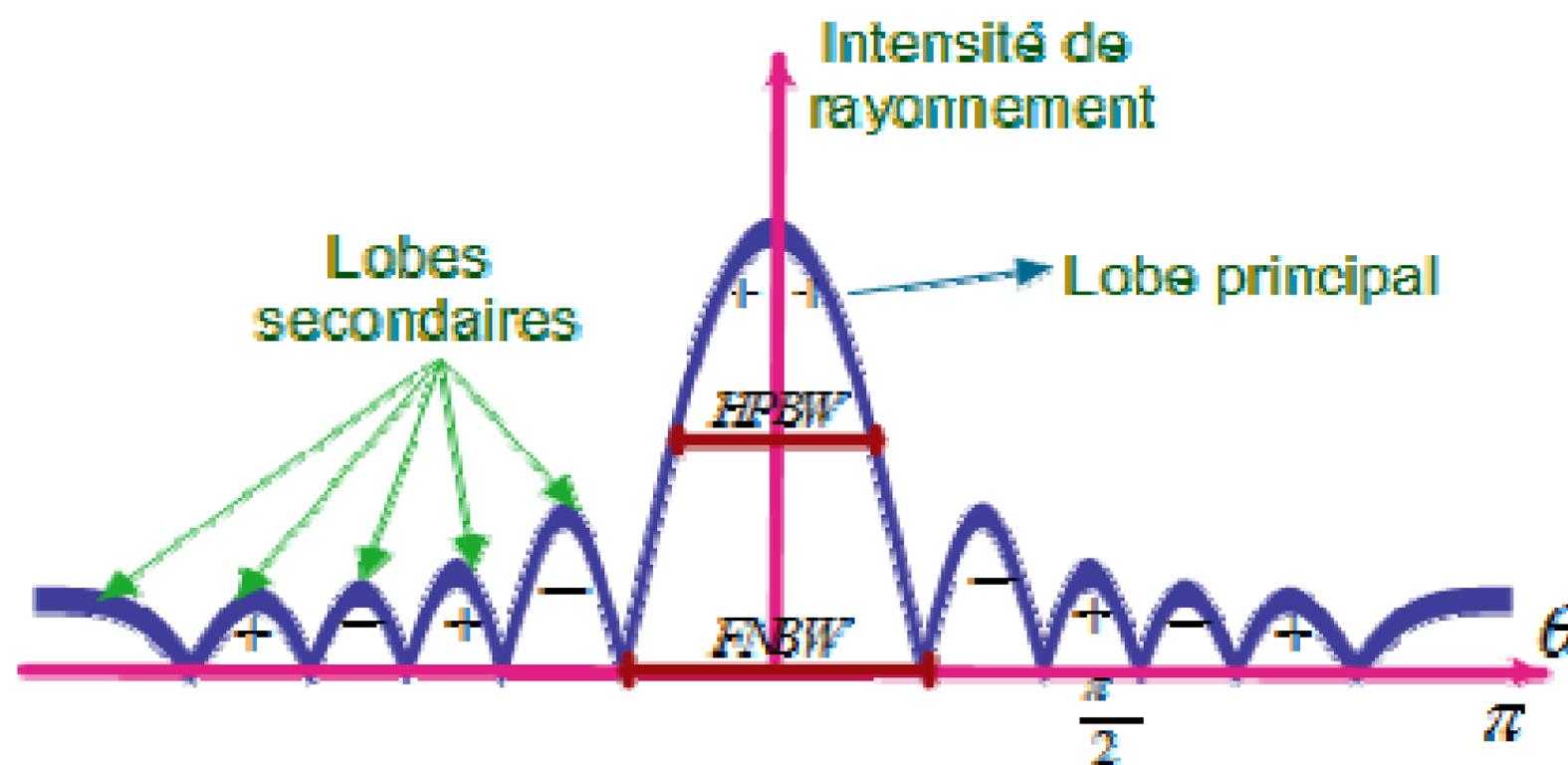


*Intensité de rayonnement
sur échelle linéaire*

*Fonction caractéristique de rayonnement d'une
antenne-réseau à 10 éléments espacés de $d = 0,25\lambda$.
A) échelle linéaire, B) échelle logarithmique*

Les diagrammes de rayonnement exhibent souvent un lobe principal (max de rayonnement) ou faisceau avec des lobes secondaires. On définit la largeur du lobe principal *HPBW* à 0.707 pour la fonction caractéristique de rayonnement sur échelle linéaire, à 0.5 pour l'intensité de rayonnement sur échelle linéaire ou à 3 *dB* sur échelle logarithmique.

On peut représenter l'intensité de rayonnement en utilisant un graphique linéaire comme le montre la figure ci-dessous. On définit parfois la largeur du lobe principal *FNBW* entre les premiers nuls de chaque côté.



- Le lobe de rayonnement principal correspond à la direction où il y'a maximum de Rayonnement.
- Les lobes secondaires représentent souvent le rayonnement dans des directions indésirables; ils devraient en conséquence être réduits.

Intensité de rayonnement

Les ondes électromagnétiques servent au transport d'énergie en espace libre ou dans des structures de guidage. La quantité de puissance électromagnétique instantanée qui se propage dans de tels milieux est décrite par le vecteur de **Poynting** défini par :

$$\mathcal{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (\text{W/m}^2)$$

Le vecteur de Poynting représente la densité de puissance. La puissance totale à travers une surface S est donnée par :

$$p = \iint_S \mathcal{P} \cdot \hat{\mathbf{n}} \cdot d\mathbf{S}$$

La densité de puissance moyenne $\langle \mathcal{P} \rangle$, en régime sinusoïdal permanent est définie par :

$$\langle \mathcal{P} \rangle = \frac{1}{T} \int_T \mathcal{P} dt = \text{Re} \left(\underbrace{\frac{1}{2} \bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}^*}_{\bar{\mathbf{P}}} \right)$$

$$\bar{\mathbf{P}} = \frac{1}{2} \bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}^*$$

$$\mathbf{E} = \text{Re}(e^{j\omega t} \bar{\mathbf{E}}), \mathbf{H} = \text{Re}(e^{j\omega t} \bar{\mathbf{H}})$$

$\bar{\mathbf{P}}$ est le vecteur de Poynting complexe. $\bar{\mathbf{E}}, \bar{\mathbf{H}}$ sont les phaseurs associés aux champs \mathbf{E} et \mathbf{H} .

La puissance moyenne rayonnée par une antenne peut donc s'écrire :

$$P_{rad} = \langle p \rangle = \oiint_S \langle \mathcal{P}(r, \theta, \phi) \rangle \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{2} \oiint_S \text{Re}(\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}^*) \cdot d\mathbf{S}$$

Dans un milieu uniforme sans pertes, la vitesse de propagation est indépendante de la direction. L'onde électromagnétique rayonnée par une antenne possède des fronts d'ondes sphériques. Le flux du vecteur de Poynting à travers une surface fermée sphérique de rayon r donne la puissance émanant du volume délimité par cette surface.

- La densité de puissance varie en $1/r^2$. La mesure de la puissance est affectée en conséquence par la position r à laquelle on l'effectue.

Afin d'obtenir des mesures indépendantes de la distance, on définit la quantité :

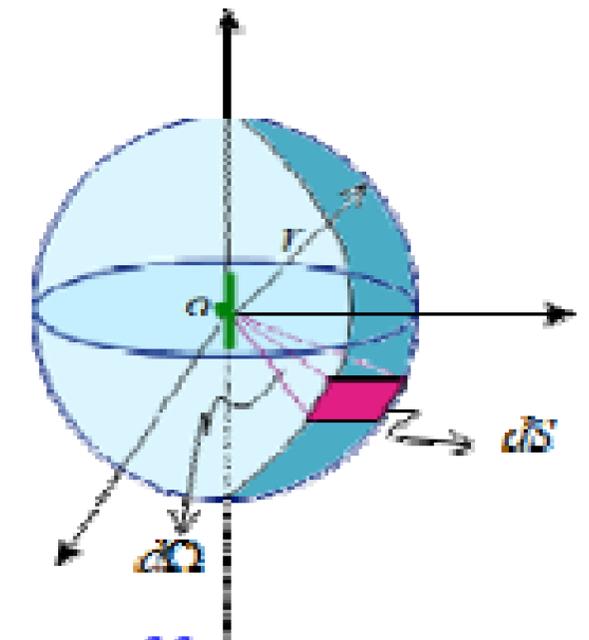
$$K(\theta, \phi) = \langle \mathcal{P}(r, \theta, \phi) \cdot \hat{\mathbf{a}}_r \rangle r^2 = P(\theta, \phi)$$

appelée **intensité de rayonnement**. $\hat{\mathbf{a}}_r = \hat{\mathbf{r}}/r$

Il est possible d'obtenir la puissance totale p_{rad} en intégrant sur l'angle solide sous lequel on voit la sphère entourant l'antenne ($4\pi \text{ srad}$) :

$$p_{rad} = \langle p \rangle = \iint_S \langle \mathcal{P}(r, \theta, \phi) \rangle \cdot ds \hat{\mathbf{a}}_r = \iint_S \langle p(r, \theta, \phi) \hat{\mathbf{a}}_r \rangle \cdot r^2 d\Omega \hat{\mathbf{a}}_r = \iint_{4\pi} K(\theta, \phi) d\Omega$$

$$d\Omega = \sin^2(\theta) d\theta d\phi$$



Source isotropique

Une source d'émission isotropique est une source dont le rayonnement ne privilégie aucune direction (rayonnement égal dans toutes les directions).

- Une telle source n'existe pas en pratique. Cependant, elle est utilisée en tant que référence de comparaison pour les autres antennes.

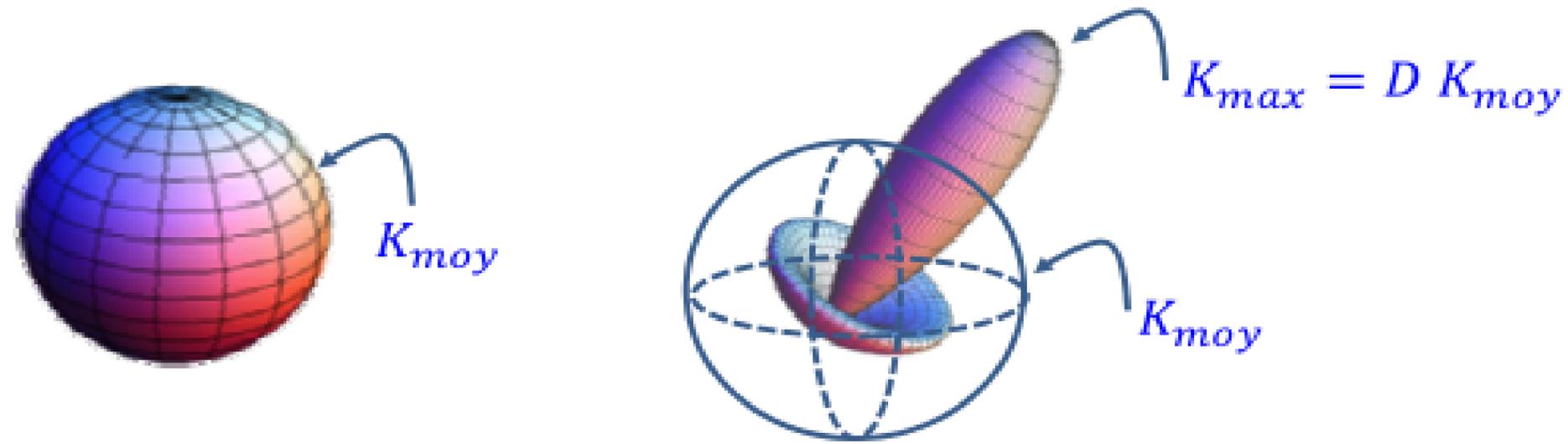
Pour une source isotrope, l'intensité de rayonnement est indépendante des angles θ, ϕ . L'intensité de rayonnement K_0 est liée à la puissance rayonnée par la relation :

$$p_{\text{rad}} = \oint_{4\pi} K_0 d\Omega = 4\pi K_0$$

$$K_0 = p_{\text{rad}}/4\pi$$

Directivité

La directivité de l'antenne est définie comme le rapport de l'intensité de rayonnement $K(\theta, \phi)$ dans une direction donnée à l'intensité moyenne K_{moy} de rayonnement sur toutes les directions. K_{moy} est l'intensité obtenue si la puissance était émise uniformément dans toutes les directions par une antenne isotrope : $K_0 = K_{\text{moy}}$



Directivité :

$$D(\theta, \phi) = \frac{K(\theta, \phi)}{\frac{P_{rad}}{4\pi}}$$

$$= 4\pi \frac{K(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi K(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi}$$

La directivité max est donnée par :

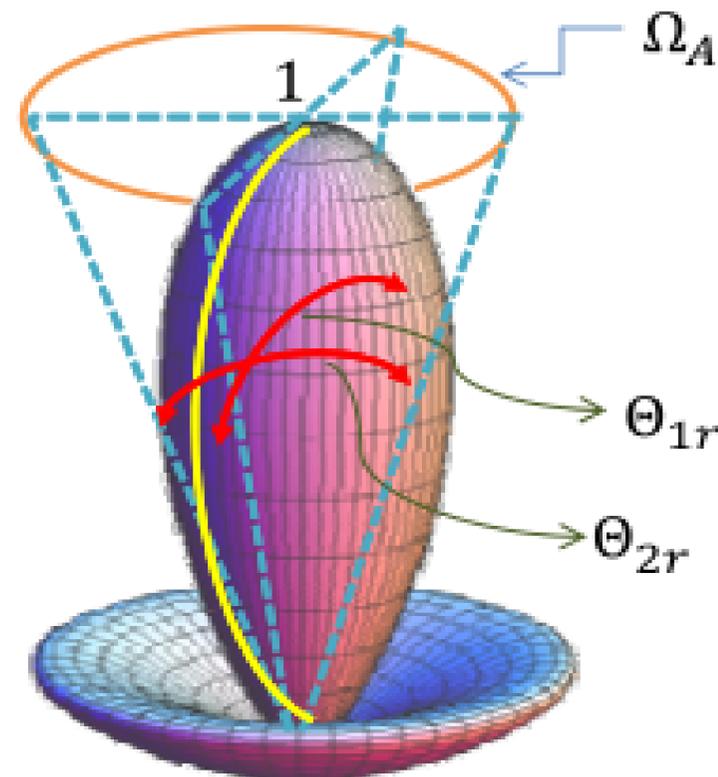
$$D_{max} = \frac{K_{max}}{P_{rad}/4\pi}$$

$$= \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi K(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi / K_{max}}$$

$$= \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

Où Ω_A est l'angle solide du faisceau :

$$\Omega_A = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi K(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi}{K_{max}} = \int_{4\pi} K_n(\theta, \phi) d\Omega$$



Pour un diagramme de rayonnement à symétrie de révolution : $\Theta_{1r} = \Theta_{2r}$

L'angle solide du faisceau peut être relié aux produits des largeurs du lobe principal à $3dB$ dans chacun des plans perpendiculaires en radians, Θ_{1r} et Θ_{2r} :

$$\Omega_A \cong \Theta_{1r} \Theta_{2r} \quad \Theta_{ir} \text{ en radians}$$

La directivité maximale peut donc être approximée par :

$$\mathbf{K} \quad D_{max} \cong \frac{4\pi}{\Theta_{1r} \Theta_{2r}} \quad \text{Formule de Krauss}$$

Si les Θ_i sont en degré, l'expression K peut être reformulée ainsi :

$$D_{max} \cong \frac{41,253}{\Theta_{1d} \Theta_{2d}} \quad \Theta_{ir} \text{ en degrés}$$

Une autre approximation de la directivité maximale a été proposée par **Tai et Pereira**, elle consiste à définir la directivité max par la formule :

$$D_{max}^{-1} = \frac{1}{2} (D_1^{-1} + D_2^{-1})$$

$$D_{1,2} \cong \frac{16 \ln(2)}{\Theta_{1,2r}^2}$$

$$\mathbf{T-P} \quad D_{max} = \frac{22,181}{\Theta_{1r}^2 + \Theta_{2r}^2} \quad D_{max} = \frac{72,815}{\Theta_{1d}^2 + \Theta_{2d}^2}$$

Formule de Tai et Pereira

Les largeurs Θ_{1r} et Θ_{2r} du faisceau de rayonnement à mi- puissance dans le cas de la formule de **Tai et Pereira** sont définies pour les plans principaux **E** et **H** respectivement

- Plan H : Plan engendré par le vecteur champ magnétique et la direction du max de rayonnement
- Plan E : Plan engendré par le vecteur champ électrique et la direction du max de rayonnement

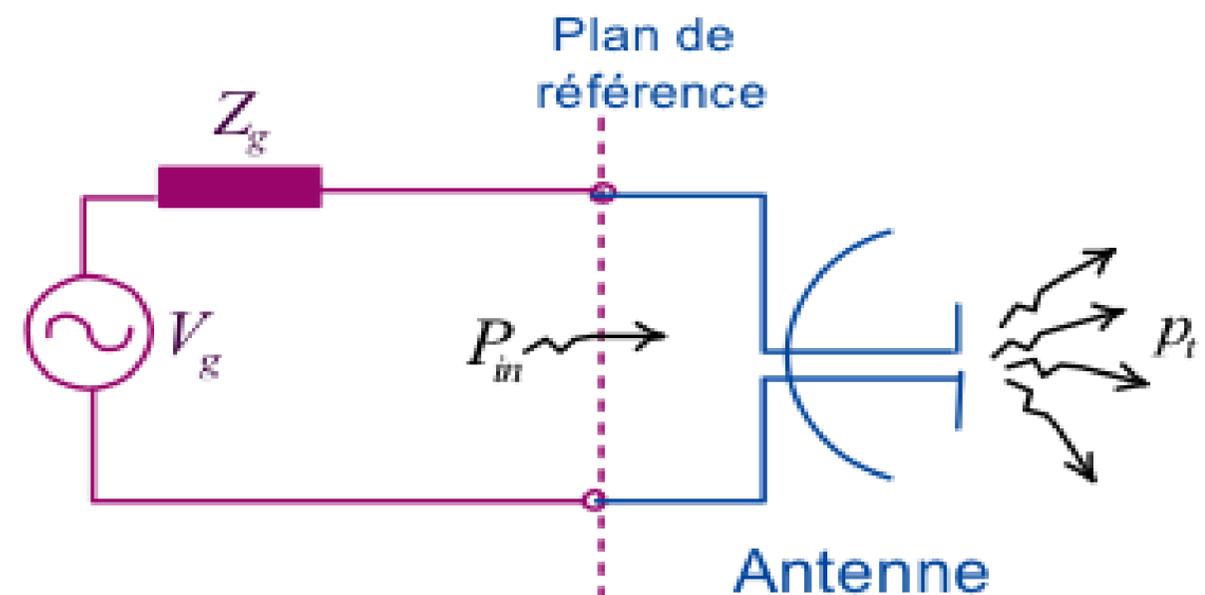
Gain de l'antenne

Idéalement la puissance moyenne disponible au niveau du générateur d'alimentation de l'antenne (cf. figure ci-contre)

$P_{disp} = \frac{V_g^2}{8Re(Z_g)}$ n'est pas

rayonnée en intégralité par l'antenne à cause des pertes ohmiques dans l'antenne et de la désadaptation d'impédance.

Supposons qu'on ignore l'effet de la désadaptation pour le moment en considérant uniquement l'effet des pertes.



Désignons par p_{in} la puissance disponible à l'entrée de l'antenne. Seule, une fraction e_r de cette puissance est rayonnée :

$$p_{rad} = e_r p_{in} \quad (r)$$

e_r est appelée **efficacité** de l'antenne. Elle peut être exprimée ainsi :

$$e_r = \frac{p_{rad}}{p_{in}} = \frac{p_{rad}}{p_{pertes} + p_{rad}}$$

La puissance perdue est due aux pertes ohmiques ou un autre mécanisme. Compte tenu de la relation (r), l'intensité de rayonnement s'écrit:

$$K(\theta, \phi) = \frac{1}{4\pi} p_{in} (e_r D(\theta, \phi))$$

La quantité entre parenthèses est appelée **gain** de l'antenne : $G(\theta, \phi) = e_r D(\theta, \phi)$

Pour introduire l'effet de la désadaptation entre l'impédance d'antenne et celle du générateur, le formule (r) doit être modifiée de la sorte :

$$p_{rad} = e_r (1 - \Gamma_a^2) p_{disp}$$

Γ_a est le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne :

$$\Gamma_a = \frac{Z_{ant} - Z_g}{Z_{ant} + Z_g} \quad Z_{ant}: \text{impédance d'antenne}$$

L'intensité de rayonnement devient :

$$\begin{aligned} K(\theta, \phi) &= \frac{1}{4\pi} (1 - \Gamma_a^2) P_{disp} (e_r D(\theta, \phi)) \\ &= \frac{1}{4\pi} (1 - \Gamma_a^2) P_{disp} G(\theta, \phi) \end{aligned}$$

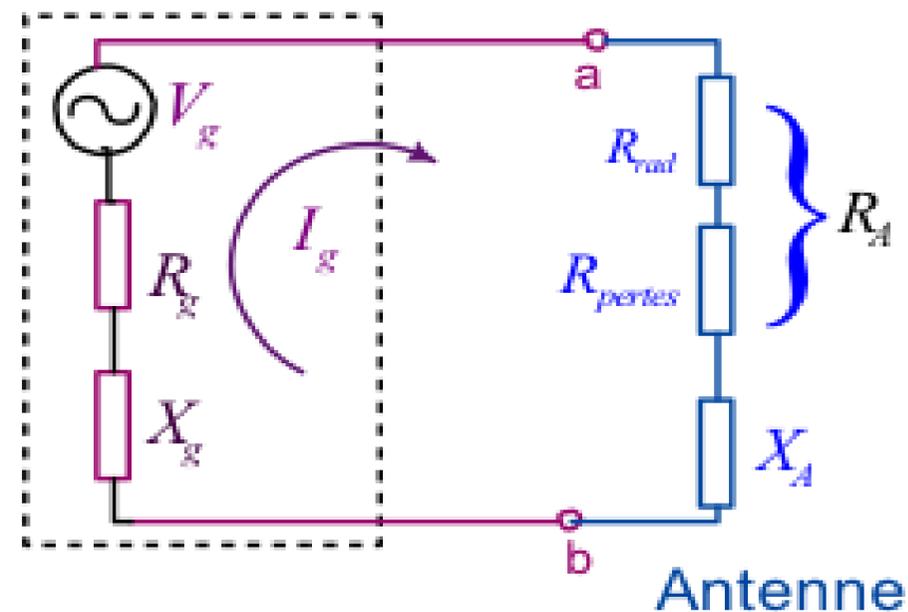
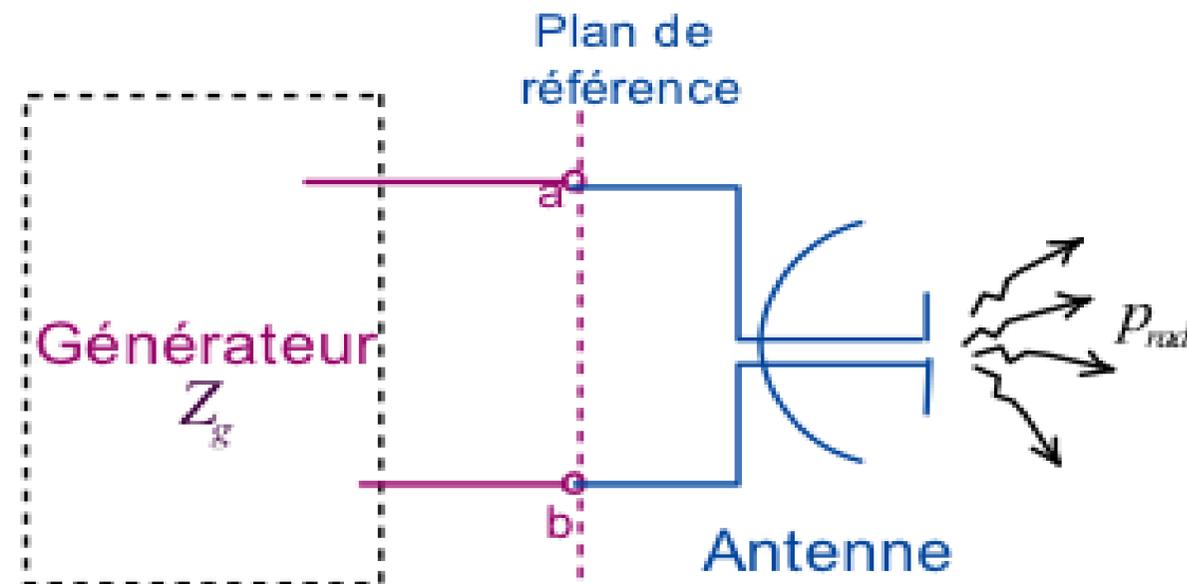
Circuit avec antenne

Impédance

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue à ses bornes d'entrée. C'est donc le rapport de la tension au courant à son entrée. On définit cette impédance par :

$$Z_{ant} = R_A + jX_A \quad \begin{array}{l} R_A = \text{Résistance} \\ X_A = \text{Réactance} \end{array}$$

Antenne en émission



La partie réelle de l'impédance de l'antenne R_A s'écrit :

$$R_A = R_{pertes} + R_{rad}$$

R_{pertes} : Résistance qui représente les pertes ohmiques, les pertes dans le diélectrique et les pertes de retour (conductivité du sol) pour les monopoles.

R_{rad} : Résistance de rayonnement de l'antenne.

Le courant de maille I_g est :

$$I_g = \frac{V_g}{Z_{ant} + Z_g} \quad , \quad |I_g| = \frac{|V_g|}{\left((R_{rad} + R_{pertes} + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2 \right)^{1/2}}$$

$|V_g|$ est la valeur crête du signal délivrée par le générateur.

La puissance rayonnée par l'antenne est définie par :

$$p_{rad} = \frac{1}{2} R_{rad} |I_g|^2$$

Le maximum de puissance est transmis à l'antenne pour rayonnement lorsqu'on a adaptation d'impédance entre l'antenne et le générateur, soit :

$$Z_{ant} = Z_g^*, \quad R_{rad} + R_{pertes} = R_g, \quad X_A = -X_g$$

Dans ce cas :

$$p_{rad} = \frac{1}{2} R_{rad} |I_g|^2 = \frac{|V_g|^2}{8} \frac{R_{rad}}{(R_{rad} + R_{pertes})^2} \quad P_1$$

La puissance perdue par effet Joule s'exprime ainsi :

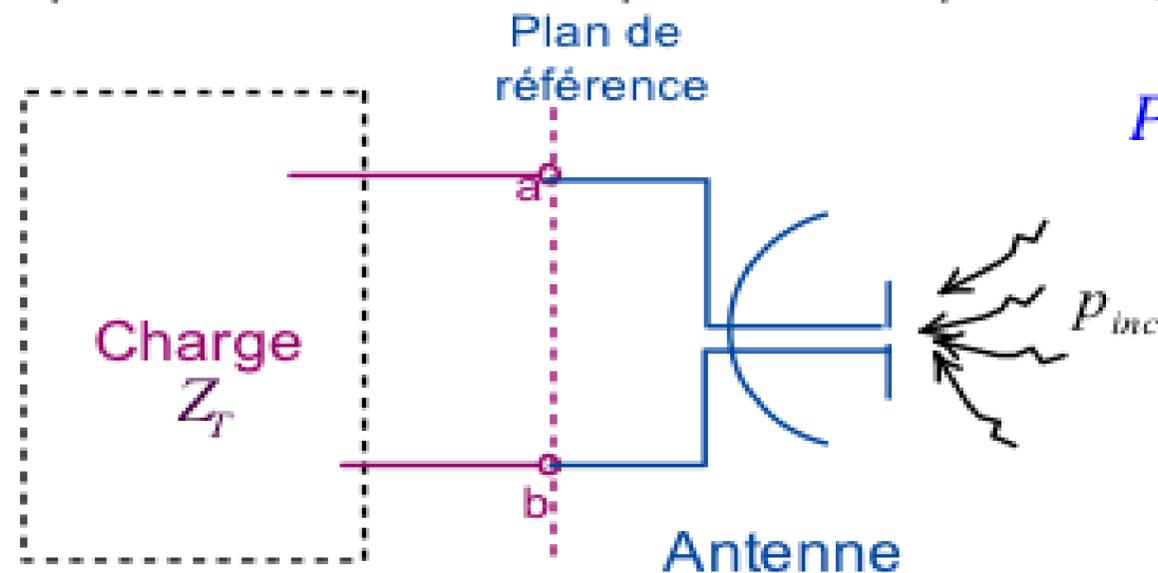
$$p_{pertes} = \frac{1}{2} R_{pertes} |I_g|^2 = \frac{|V_g|^2}{8} \frac{R_{pertes}}{(R_{rad} + R_{pertes})^2} \quad P_2$$

Compte tenu des relations p_1 et p_2 , on peut déduire l'expression de l'efficacité de rayonnement en fonction des résistances de rayonnement et de pertes :

$$e_r = \frac{p_{rad}}{p_{in}} = \frac{p_{rad}}{p_{pertes} + p_{rad}} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{pertes}}$$

La puissance disponible au niveau de l'antenne est somme de la puissance rayonnée par l'antenne et la puissance perdue, soit :

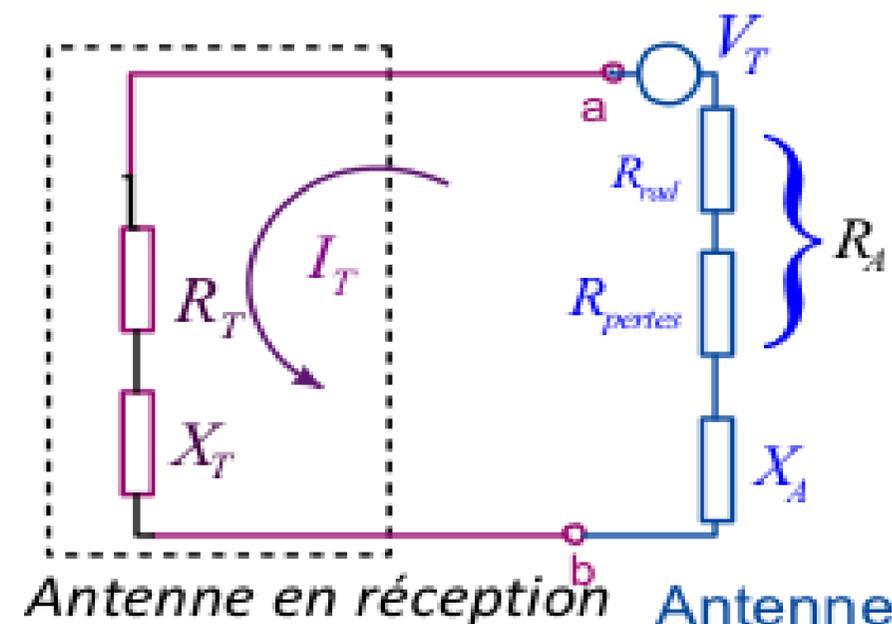
$$P_{disp} = P_{rad} + P_{pertes} = \frac{|V_g|^2}{8R_g}$$



Pour l'antenne en mode de réception, l'onde incidente induit une tension V_T . La puissance totale capturée par l'antenne, sous la condition $Z_T = Z_{ant}^*$, est :

$$P_c = \frac{1}{2} V_T I_T^* = \frac{|V_g|^2}{4R_T}$$

La moitié de cette puissance est ré-rayonnée par R_{rad} et la seconde moitié est délivrée à la charge R_T



Ouverture et longueur effective

On parle d'ouverture de l'antenne lorsque cette dernière est en mode de réception. Elle est définie par :

$$\langle P_{inc} \rangle A_e = P_T$$

$\langle P_{inc} \rangle$ est la densité de puissance (W/m^2) de l'onde électromagnétique incidente à l'endroit où est située l'antenne.

P_T est la puissance disponible à la sortie de l'antenne, laquelle est fournie au récepteur.

L'expression ci-dessus peut s'écrire :

$$P_T = \frac{|I_T|^2 R_T}{2} = \frac{|V_T|^2 R_T}{2 \left((R_{rad} + R_{pertes} + R_T)^2 + (X_A + X_T)^2 \right)^{1/2}}$$

Si l'antenne et le récepteur sont adaptés, l'ouverture effective est maximale est vaut :

$$A_{em} = \frac{|V_T|^2}{8 \langle P_{inc} \rangle} \frac{1}{R_{rad} + R_{pertes}}$$

L'efficacité de l'ouverture est définie comme étant le rapport de l'ouverture effective maximale A_{em} de l'antenne à l'ouverture physique de l'antenne A_p :

$$\epsilon_{ap} = A_{em}/A_p$$

En général, l'ouverture effective maximale Est liée à la directivité maximale par le relation :

$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} e_r D_{max} \quad \mathbf{e}$$

Pour des antennes à ouvertures tels que les guides d'ondes, les cornets et les réflecteurs $A_{em} \leq A_p$

L'expression e suppose que l'antenne est adaptée à la charge et sa polarisation est adaptée à celle de l'onde reçue.

Pour les antennes filiformes, on peut aussi définir la hauteur effective de rayonnement h_e :

$$h_e E_{inc} = V_{co}, \quad h_e I_{in} = \int_0^h I(z) dz$$

V_{co} est la tension induite aux bornes en circuit ouvert de l'antenne par le champ incident E_{inc} . I_{in} est le courant à la base de l'antenne et $I(z)$ est la distribution de courant le long de l'antenne.