

Antennes

-Cours-

Master 1 : Systèmes des Télécommunications

Par

Pr. BENATIA DJAMEL

Professeur à l'Université

Mostefa Benboulaïd- BATNA 2



Année Universitaire : 2020/2021

Semestre : 2
Unité d'enseignement : UEF 1.2.1
Matière 2 : Antennes
VHS : 45h00 (Cours : 1h30, TD : 1h30)
Crédits : 4
Coefficient : 2

Objectifs de l'enseignement :

On vise par cette matière le calcul détaillé du rayonnement du doublet électrique et des antennes. Dans cette matière, on étudié également les réseaux d'antennes uniformes et non uniformes ainsi que les rideaux d'antennes, les ouvertures rayonnantes (rectangulaires et circulaires) et les antennes planaires.

Connaissances préalables recommandées :

Des connaissances de rayonnements électromagnétiques sont nécessaires pour suivre cette matière. Ces connaissances sont dispensées au niveau de la matière « Antennes et lignes de transmission » de la troisième année licence de Télécommunications.

Contenu de la matière :

Chapitre 1. Généralité et paramètres caractéristiques des antennes (3 Semaines)

- Rappels sur les paramètres caractéristiques d'une antenne (Plans E et H, longueur d'onde d'accord, polarisation, diagrammes de rayonnement, hauteur effective, puissance rayonnée, résistance de rayonnement, impédance d'antenne, gain, directivité, puissance reçue, surface effective).
- Notion du potentiel vecteur et potentiel scalaire.
- Rayonnement du doublet électrique (calcul du champ électromagnétique en zone lointaine, surface caractéristique, puissance rayonnée, hauteur équivalente, résistance de rayonnement, digramme de rayonnement).

Chapitre 2. Antennes filaires (3 Semaines)

- Antenne rectiligne isolée dans l'espace (Fonction caractéristique, diagramme de rayonnement).
- Antenne alimentée en son milieu. - Antenne verticale au-dessus du sol.
- Antennes filaires à onde progressives (Antenne horizontale, Antenne en V, Antenne losange).

Chapitre 3. Réseaux d'antennes (3 Semaines)

- Réseaux d'antennes, Type de réseaux d'antennes (Rayonnement longitudinal et transversal).
- Réseau uniforme. - Réseau non uniforme (Pondération de Dolph-Tchebychev).
- Autres méthodes de synthèse des réseaux d'antennes (méthode de Shelkunof, méthode de la transformée de Fourier,...). - Rideau d'antennes.

Chapitre 4. Rayonnement des ouvertures planes (3 Semaines)

- Etude générale du rayonnement d'une ouverture (Principe de Huygens - Fresnel, relations de Green et de Kottler). - Rayonnement d'une ouverture rectangulaire.
- Rayonnement d'une ouverture circulaire.

Chapitre 5. Les antennes planaires (3 Semaines)

- Les antennes patch, application des relations de Wheeler, les réseaux d'antennes patch, adaptation et rayonnement des antennes planaires.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

1. F. Gardiol, "Electromagnétisme: Traité d'électricité", Edition Lausanne.
2. P. Combes, "Mico-ondes, circuits passifs, propagation, antennes, Cours et exercices", Dunod, 1997.
2. R.-C. Houzé, "Les antennes, Fondamentaux", Dunod, 2006.
3. A. Ducros, "Les antennes: Théorie et pratique", Emission et réception, Elektor, 2008.
4. W.L. Stutzman, G.A. Thiele, "Antenna Theory and Design", John Wiley.
5. C. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design", 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc, 2005.
6. R. Aksas, "Télécommunications: Antennes Théorie et Applications", Ellipses Marketing, 2013.
7. O. Picon et al, "Les Antennes: Théorie, conception et applications", Dunod, 2009.

Chapitre 1

Généralité et paramètres caractéristiques des antennes

1.1 Définition

Une antenne est un dispositif qui permet de transformer une onde guidée en ondes se propageant dans l'espace libre. Ce phénomène est réversible, car la même antenne peut jouer le rôle d'un émetteur ou de récepteur, dans le dernier cas elle capte les ondes provenant de l'espace.

Le principe de rayonnement des antennes est basé sur la circulation d'un courant électrique (onde guidée) dans un fil conducteur qui donne à une certaines distances une onde électromagnétique.

La première antenne inventée, c'est celle réalisée par le russe Alexander Popov en 1900.

1.2 Caractéristiques de rayonnement des antennes

1.2.1 Surface caractéristique ou surface équivalente

On peut voir cette surface surtout au niveau de la réception des ondes où l'antenne réceptrice capte une puissance (densité de puissance) multipliée par une surface dite surface équivalente de l'antenne.

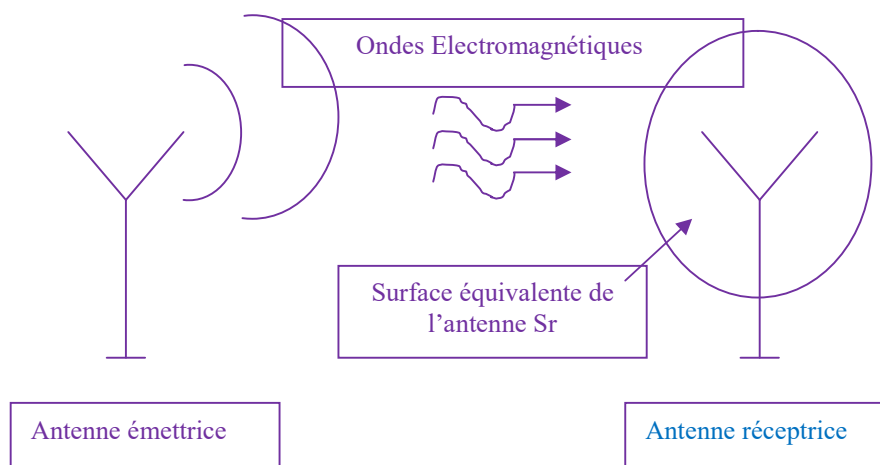


Fig. 1 : Surface équivalente d'une antenne

1.2.2 Diagramme de rayonnement

C'est la coupe par un plan de la surface caractéristique. Dans le cas où notre antenne rayonne de la même façon dans toutes les directions (cas d'une antenne isotrope ou omnidirectionnel), le digramme de rayonnement sera un cercle.

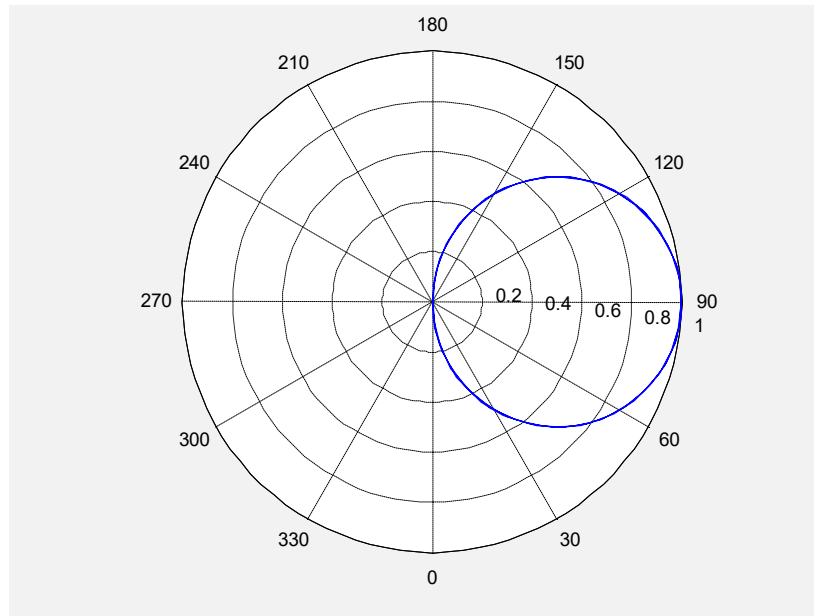


Fig. 2 : Exemple d'un diagramme de rayonnement pour un dipôle élémentaire

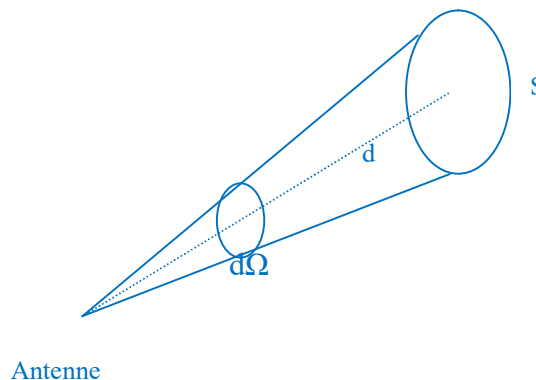
1.2.3 Intensité de rayonnement

On appelle intensité de rayonnement (puissance stérique), c'est la puissance rayonnée par unité d'angle solide.

$$\psi(\theta, \varphi) = \frac{P_A}{d\Omega} \quad (\text{W ou W/sr}) \quad (1)$$

P_A : Puissance de l'antenne en (watt)

$d\Omega$: Unité d'angle solide (Stéradian)



1.2.4 Directivité

La directivité D d'une source rayonnante est définie comme étant le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction $\Delta(\theta, \varphi)$ sur l'intensité de rayonnement d'une source isotrope rayonnant la même puissance totale (étendue sur tout l'espace). Elle peut être exprimée par la formule :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\psi(\theta, \varphi)}{P_{\text{isotrope}}(\theta, \varphi)} = \frac{\psi(\theta, \varphi)}{\frac{1}{4\pi} P_R} = \frac{\psi(\theta, \varphi)}{\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \psi(\theta, \varphi) \cos \theta \, d\theta \, d\varphi} \quad (2)$$

$$P_{\text{Poynting}}(\theta, \varphi) = \frac{\psi(\theta, \varphi)}{R^2} = \frac{P_{\text{Antenne}}(\text{ou } P_R)}{4\pi R^2} = \frac{1}{2} E \cdot H = \frac{1}{2} \frac{E^2(\theta, \varphi)}{Z_0}$$

Alors :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi |E(\theta, \varphi)|_{\text{max}}^2}{\int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |E(\theta, \varphi)|^2 \cos \theta \, d\theta \, d\varphi}$$

Ou encore :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi |f(\theta, \varphi)|_{\text{max}}^2}{\int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |f(\theta, \varphi)|^2 \cos \theta \, d\theta \, d\varphi}$$

La directivité définie ci-dessus est uniquement fonction de l'allure du diagramme de rayonnement de la source.

1.2.5 Rendement

Le rendement η de l'antenne est défini comme le rapport du niveau de puissance rayonnée, P_R , à la puissance, P_A à l'entrée de l'antenne:

$$\eta = \frac{P_R}{P_A} = \frac{R_{\text{rad}}}{R_{\text{rad}} + R_{\text{loss}}} \quad (3)$$

1.2.6 Gain

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction $\Delta(\theta, \varphi)$ est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi) = \psi(\theta, \varphi)$ sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes. En général, le gain G correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal $\Delta(\theta_0, \varphi_0)$. Cette propriété caractérise la capacité d'une antenne à focaliser la puissance rayonnée dans une direction.

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{\psi(\theta, \varphi)}{P_A} \left\{ \begin{array}{l} \psi(\theta, \varphi) : \text{puissance rayonnée par unité d'angle solide (Watt/Sté)} \\ P_A : \text{puissance de l'antenne (watt)} \end{array} \right.$$

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi R^2 \frac{P_{\text{Poynting}}(\theta, \varphi)}{P_A} \left\{ \begin{array}{l} P_{\text{Poynting}}(\theta, \varphi) : \text{puissance rayonnée par unité de surface (watt/m}^2\text{)} \\ P_A : \text{puissance de l'antenne (watt)} \end{array} \right.$$

Ou encore :

$$G_e(\theta, \varphi) = \eta \cdot \frac{\psi(\theta, \varphi)}{\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \psi(\theta, \varphi) \cos\theta \, d\theta \, d\varphi} \text{ et } \eta = 1 \text{ alors } G_e(\theta, \varphi) = D(\theta, \varphi) \quad (4)$$

Le gain de l'antenne G , est défini comme le rapport de son intensité maximale de rayonnement à l'intensité maximale de rayonnement d'une antenne de référence pour la même puissance à l'entrée.

1.2.7 Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)

La puissance isotrope rayonnée équivalente d'une antenne (**PIRE** ou **EIRP** en anglais) est un terme souvent utilisé en télécommunications (principalement dans les bilans de liaison) qui définit, dans la direction de rayonnement maximal, la puissance électrique qu'il faudrait apporter à une antenne isotrope pour obtenir la même puissance rayonnée dans cette direction. Elle est donnée par :

$$\text{PIRE} = G_e \cdot P_A = 4\pi d^2 \cdot P_{\text{poynting}} \quad (5)$$

1.3 Caractéristiques électriques des antennes

1.3.1 Modèle électrique et comportement fréquentiel

Une antenne rayonne efficacement sur une bande étroite de fréquence qui correspond à sa fréquence de résonance. Lorsqu'un signal excite une antenne, des charges sont mis en mouvement le long de l'antenne donnant naissance à un rayonnement. Tout cela peut être représenté par un circuit passif RLC équivalent montrant le comportement résonant qui varie avec la fréquence.

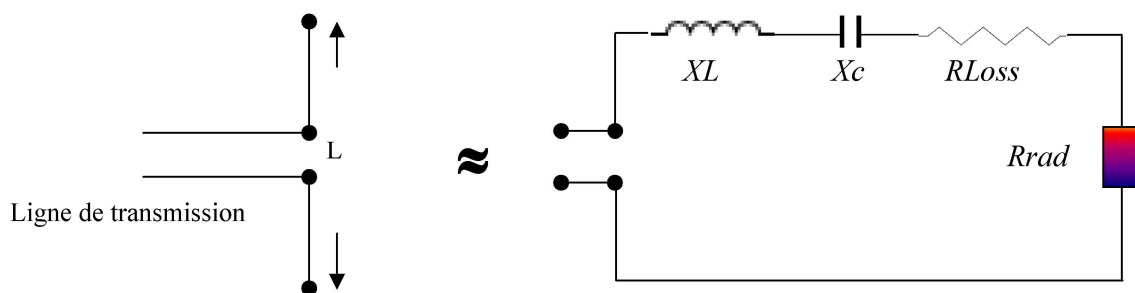


Fig. 3 : Modèle d'impédance complexe d'une antenne

$$\begin{aligned} Z_{in} &= R_{in} + jX_{in} \\ R_{in} &= R_{rad} + R_{Loss} \\ X_{in} &= X_C + X_L \end{aligned}$$

- L'inductance et la capacité sont liées à la longueur de l'antenne.
- En basse fréquence, l'inductance est négligeable et l'antenne stocke des charges.

- Pour les hautes fréquences, la capacité diminue alors que celui de l'inductance augmente et une partie de l'énergie est stockée sous forme d'énergie magnétique. A la fréquence de résonance, l'inductance et la capacité sont égales en intensité et leurs effets s'annulent.
- Si les pertes ohmiques sont négligeables, la puissance fournie à l'antenne est totalement rayonnée.

1.3.2 Adaptation et condition d'adaptation

Une antenne est reliée à la source par une ligne de transmission d'impédance caractéristique Z_c (en général, $Z_c = 50\Omega$). Pour assurer un transfert maximal de puissance entre l'alimentation et l'antenne, il est nécessaire d'assurer une adaptation d'impédance. L'adaptation permet d'annuler le coefficient de réflexion Γ_{in} ou S_{11} à l'entrée de l'antenne.

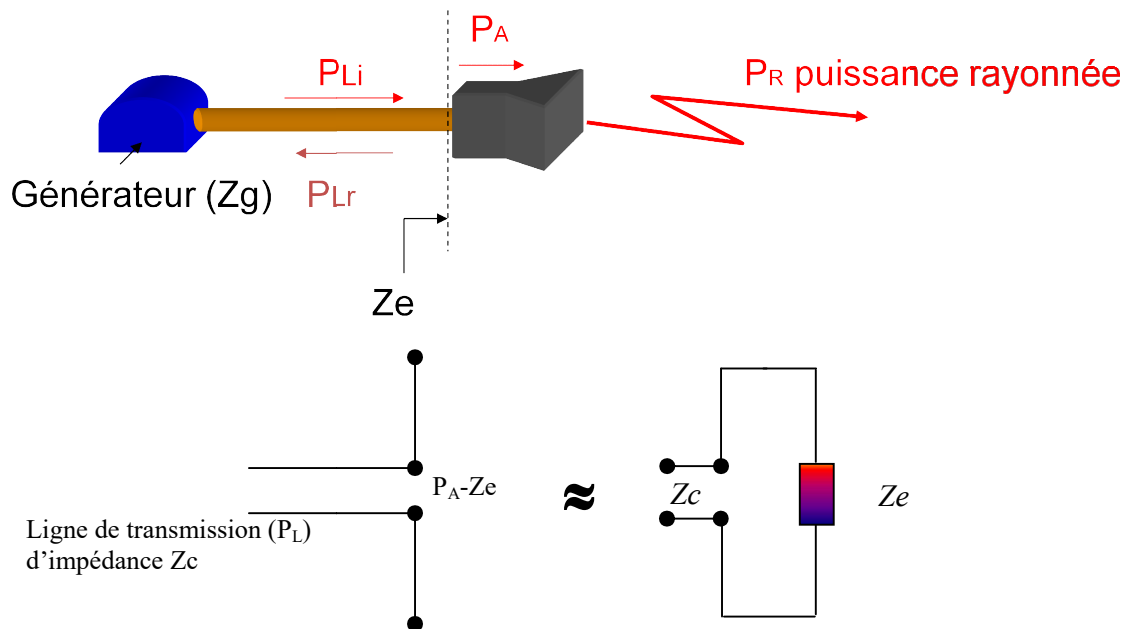


Fig. 4 : Adaptation Ligne- Antenne

$$P_A = P_L \cdot (1 - \Gamma^2)$$

$$S_{11} = \Gamma = (Z_e - Z_c) / (Z_e + Z_c)$$

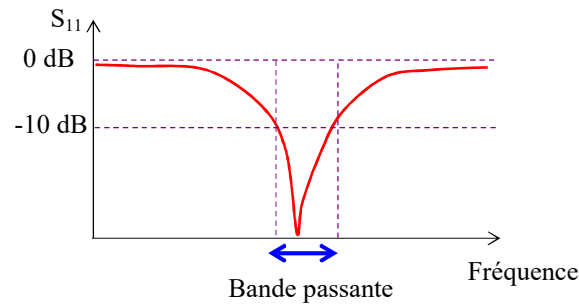
L'adaptation de l'antenne est caractérisée par le rapport d'onde stationnaire (ROS). Lorsqu'il y a désadaptation, la réflexion d'une partie de l'onde incidente et sa superposition avec l'onde incidente conduit à l'apparition d'une onde stationnaire dans la ligne qui relie l'antenne à la source.

$$ROS = (1 + \Gamma) / (1 - \Gamma)$$

1.3.3 Bande passante d'une antenne

La bande passante d'une antenne correspond à la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximal. La bande passante peut être définie en fonction du coefficient de réflexion S_{11} .

Un critère pour avoir un coefficient de réflexion inférieure à -10 dB ou -15 dB sur la bande passante.



La bande passante BW (bande passante à 3 dB de la valeur du champ) est liée au facteur de qualité Q du circuit RLC à la fréquence de résonance f_{res} . Le facteur de qualité est la quantité de résistance présente lors de la résonance (pour un circuit résonant série).

$$Q = f_{res}/BW = 2\pi \cdot f_{res} \cdot L_{ant}/R_{ant}$$

Une antenne qui a un fort facteur de qualité rayonne très efficacement à la fréquence de rayonnement sur une bande de fréquence très étroite.

1.4 Rayonnement du doublet électrique (Doublet de Hertz)

Un doublet électrique est un conducteur de longueur dl très inférieur à la longueur d'onde λ ($dl < \lambda/10$) du courant électrique qui le parcourt (Fig. V.1).

Nous pouvons considérer que le doublet représente un élément d'antenne.

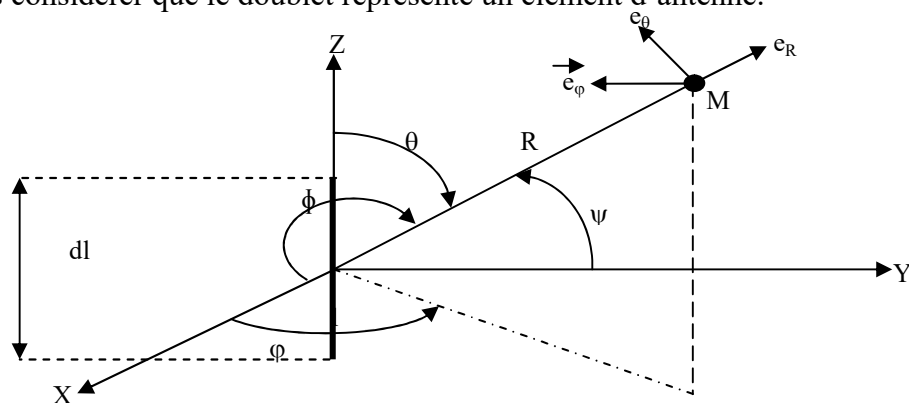


Fig. 5 : Rayonnement d'un doublet électrique

Dans ce paragraphe, nous allons calculer le champ rayonné au point **M** par le doublet électrique. Pour cela, on fait appel aux équations de Maxwell.

1.4.1 Equations de Maxwell pour le calcul du champ électromagnétique

Nous considérons l'équation de Maxwell-Gauss magnétique :

$\text{Div.}\vec{B} = 0 \Rightarrow \vec{B} = \text{Rot } \vec{A}$ où \vec{A} représente un potentiel vecteur ou potentiel retardé
Alors :

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} = \frac{1}{\mu} \text{Rot } \vec{A} \quad (6)$$

En utilisant l'équation de Maxwell-Faraday :

$$\text{Rot}\vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} = -\text{Rot}\left(\frac{d\vec{A}}{dt}\right) \Rightarrow \text{Rot}\left(\vec{E} + \frac{d\vec{A}}{dt}\right) = \mathbf{0} \Rightarrow \vec{E} + \frac{d\vec{A}}{dt} = -\text{grad}.v$$

où v représente le potentiel scalaire ou potentiel de Lorentz

Alors :

$$\vec{E} = -\text{grad}.v - \frac{d\vec{A}}{dt} \quad (7)$$

1.4.2 Calcul de v et de \vec{A}

Une charge ponctuelle ρ crée un potentiel scalaire à une distance R . Dans un volume élémentaire, ce potentiel est donné par :

$$v = \frac{1}{4.\pi\varepsilon} \cdot \frac{\rho\left(t - \frac{R}{V_p}\right)}{R} d\tau \quad (8)$$

Où V_p : représente la vitesse de propagation ou vitesse de phase (m/s)

Un courant I circulant dans un conducteur crée un potentiel vecteur à une distance R , Dans un volume élémentaire, ce potentiel est donné par :

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4.\pi} \cdot \frac{\vec{I}\left(t - \frac{R}{V_p}\right)}{R} d\tau \quad (9)$$

1.4.3 Calcul du champ \vec{E} et \vec{H} dans le cas du doublet électrique

En remplaçant les équations (V.8) et (V.9) dans les équations (V.6) et (V.7), on aura les expressions de \vec{E} et \vec{H} .

En champ lointain (zone de Fraunhofer) : cela suppose que $1/R^2$ tend vers zéro, alors :

$$\text{Champ électrique rayonné par un doublet : } \vec{E} = \frac{j.Z_0.\vec{I}.dz.\sin\theta}{2\lambda R} \cdot e^{-j\beta R} \cdot \vec{e}_\theta \quad (10)$$

$$\text{Champ magnétique rayonné par un doublet : } \vec{H} = \frac{j.\vec{I}.dz.\sin\theta}{2\lambda R} \cdot e^{-j\beta R} \cdot \vec{e}_\varphi \quad (11)$$

1.4.4 Fonction caractéristique du doublet

Elle est donnée par le rapport du champ sur le champ max :

$$F(\theta) = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{E}|_{\max}} = \sin\theta \text{ avec } -\pi/2 \leq \theta \leq +\pi/2 \quad (12)$$

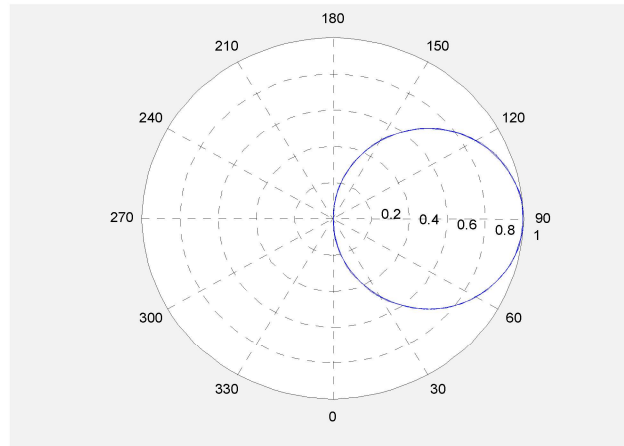


Fig. 6 : Digramme de rayonnement d'un doublet électrique ($F(\theta)$ en coordonnées polaires)

1.4.5 Puissance de rayonnement du doublet

Nous avons déjà donné l'expression de la puissance rayonnée par unité de surface qui en faite celle donnée par le vecteur Poynting :

$$P_{\text{Poynting}}(\theta, \varphi) = \left| \frac{1}{2} \vec{E} \wedge \vec{H}^* \right| = \frac{1}{2} |\vec{E}| |\vec{H}| = \frac{1}{2} \frac{E^2(\theta, \varphi)}{Z_0} \quad (13)$$

Z_0 : représente l'impédance du vide ($120\pi \Omega$)

Dans le cas du doublet électrique $E(\theta, \varphi) = E(\theta)$

La puissance totale rayonnée (dans tout l'espace) sera donnée par :

$$P_R = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{+\pi} \frac{E^2(\theta)}{Z_0} dS \quad \text{avec } dS = 2\pi R^2 \sin(\theta) d\theta \quad (14)$$

En remplaçant l'expression (V.13) dans l'expression (V.14), on aura :

$$P_R = 80\pi^2 \left(\frac{dl}{\lambda} \right)^2 I_{\text{eff}}^2 \quad (15)$$

1.4.6 Résistance de rayonnement du doublet

A partir de l'expression (V.15), en déduit l'expression de la résistance de rayonnement :

$$R_R = 80\pi^2 \left(\frac{dl}{\lambda} \right)^2 \quad (16)$$

La résistance de rayonnement représente les pertes de l'information contenue dans le courant électrique qui circule dans le doublet électrique. C'est ce phénomène qui est responsable sur le rayonnement des antennes.

Caractéristiques de rayonnement

Caractéristiques	L'expression mathématique	Antenne isotrope	Doublet élémentaire
Fonction caractéristique	$F(\theta, \varphi) = \frac{R \cdot E(R, \theta, \varphi) }{60I_M}$	1	$\sin \theta$
Densité de puissance rayonnée (W/m ²)	$\bar{P}(r) = \frac{E_{\text{eff}}^2}{120\pi}$	$\frac{30 \cdot I_{\text{eff}}^2}{\pi \cdot R^2}$	$\frac{30\pi \cdot dl^2 \cdot \sin(\theta) ^2}{\lambda^2 \cdot R^2} I_{\text{eff}}^2$
Intensité de rayonnement (W/strad)	$U(\theta, \varphi) = \frac{30 \cdot I_{\text{eff}}^2}{\pi} F^2(\theta, \varphi)$	$\frac{30 \cdot I_{\text{eff}}^2}{\pi}$	$\frac{30\pi \cdot dl^2 \cdot \sin(\theta) ^2}{\lambda^2} I_{\text{eff}}^2$
Puissance rayonnée (W)	$P_r = \int_{\Omega} U(\theta, \varphi) d\Omega$	$120 \cdot I_{\text{eff}}^2$	$\frac{80\pi^2 \cdot dl^2}{\lambda^2} I_{\text{eff}}^2$
Résistance de rayonnement (Ω)	$R_r = \frac{P_r}{I_{\text{eff}}^2}$ $= \frac{30}{\pi} \int_{\Omega} F^2(\theta, \varphi) d\Omega$	120 Ω	$\frac{80\pi^2 \cdot dl^2}{\lambda^2}$
Gain absolu (Directivité)	$G = 120 \frac{F^2(\theta, \varphi)}{R_r}$	1	$1,5 \sin^2 \theta$
Hauteur effective (m)	$h_e = \frac{\lambda}{\pi} F(\theta_0, \varphi_0)$	$\frac{\pi}{\lambda}$	dl

Chapitre 2

Antennes filaires

2.1 Antenne

Une antenne est un conducteur parcouru par un courant électrique, rayonne de l'énergie électromagnétique (La loi de Coulomb associée à la loi de Biot-Savard), donc une transformation d'une onde guidée en une onde se propageant dans l'espace : définition typique d'une antenne.

L'élément le plus petit du point de vue dimension, c'est le doublet électrique. Un ensemble infini de doublets électriques constitué une antenne.

L'analyse du rayonnement d'une antenne peut se faire en découpant l'antenne en dipôle élémentaire et en sommant leur contribution.

2.2 Antenne isolée dans l'espace (Antenne Asymétrique)

Soit une antenne de longueur L parcourue par un courant dont l'expression est donnée par : $I(z)=I_M \cdot \sin[\beta(L-z)]$, β est la constante de propagation

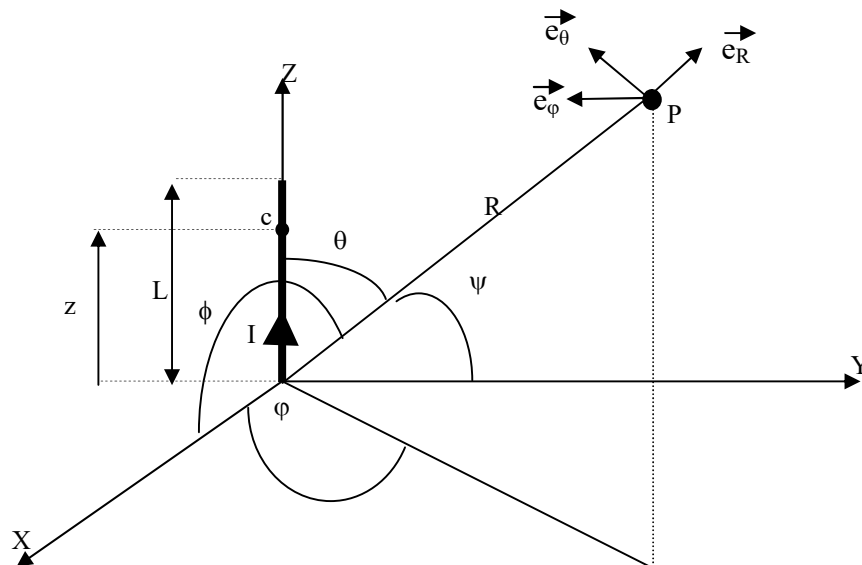


Fig. 1 : Antenne filaire isolée dans l'espace

Le dipôle élémentaire est placé au point c (la cote), l'intégration de plusieurs dipôles donne le champ rayonné par l'antenne de longueur L :

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi) = -\frac{j60\pi}{\lambda R} \sin \theta \cdot e^{j(\omega t - \beta R)} \left[\int_0^L I(z) e^{j\beta z \cos \theta} \cdot dz \right] \cdot \vec{e}_\theta \quad (1)$$

$$\text{On obtient : } E(r, \theta, \varphi) = - \left[\frac{j60I_M}{R} \left(\frac{1}{\sin \theta} \right) \cdot \left(e^{j\beta L \cos \theta} - j \sin(\beta L) \cos \theta - \cos(\beta L) \right) e^{j(\omega t - \beta R)} \right] \vec{e}_\theta \quad (2)$$

Remarque

1/- Antenne asymétrique, demi-onde (\sim accordée) : $L = n \cdot \lambda/2$; $n = 2m + 1$

2/- Antenne asymétrique, onde entière : $L = n \cdot \lambda/2$; $n = 2m$

3/- Antenne symétrique, demi-onde $l = n \cdot \lambda/4$; $n = 2m + 1$; $L = 2l$

4/- Antenne symétrique, onde entière : $l = n \cdot \lambda/2$; $n = 2m + 1$; $L = 2l$

Cas particulier :

Pour $L = \lambda/2$:

$$\vec{E} = -j \cdot \frac{60 \cdot I_M \cdot e^{j\omega t}}{R} \cdot \frac{\cos \left[\frac{\pi}{2} \cos \theta \right]}{\sin \theta} \cdot e^{-j\beta \cdot R} \cdot \vec{e}_\theta \quad (3)$$

Pour $L = \lambda$:

$$\vec{E} = -j \cdot \frac{60 \cdot I_M \cdot e^{j\omega t}}{R} \cdot \frac{\sin \left[\pi \cdot \cos \theta \right]}{\sin \theta} \cdot e^{-j\beta \cdot R} \cdot \vec{e}_\theta \quad (4)$$

2.2.1 Fonction caractéristique de l'antenne isolée

Elle est donnée par le rapport entre le champ et le champ maximum.

$$F(\theta) = \frac{\cos \left[\frac{\pi}{2} \cos \theta \right]}{\sin \theta} \quad \text{si } L = \lambda/2 \quad (5)$$

$$F(\theta) = \frac{\sin \left[\pi \cdot \cos \theta \right]}{\sin \theta} \quad \text{si } L = \lambda \quad (6)$$

2.3 Antenne Dipôle demi-onde ($L = \lambda/2$) alimentée au milieu (Antenne Symétrique)

Soit une antenne de longueur L parcourue par un courant dont l'expression est donnée par :

$I = I_M \cdot \sin[\beta(L-z)]$, β est la constante de propagation.

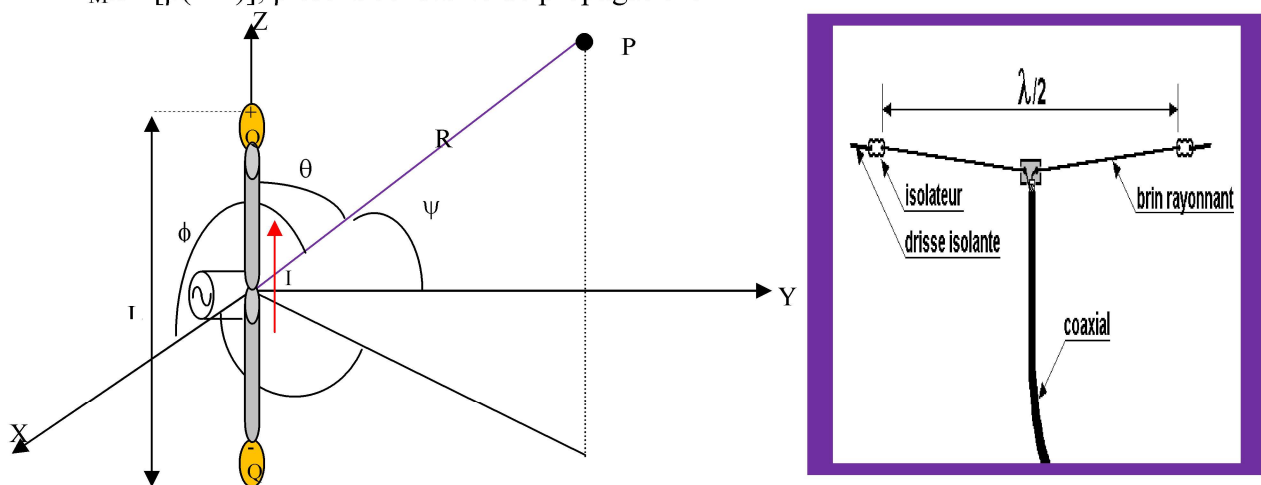


Fig. 2 : Antenne Dipôle demi-onde

Le champ électrique est donné par l'expression suivante :

$$\vec{E} = -j \cdot \frac{60 \cdot I_M \cdot e^{j\omega t}}{R} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\beta L}{2} \cdot \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{\beta L}{2}\right)}{\sin\theta} \cdot e^{-j\beta \cdot R} \cdot \vec{e}_\theta \quad (7)$$

$$F(\theta, \psi) = \frac{\cos\left[\frac{\pi}{2} \cos\theta\right]}{\sin\theta} \quad (8)$$

Pour $L = \lambda/2$ (même expressions que celle de l'antenne isolée (demi-onde)) :

Pour $L = \lambda$:

$$F(\theta, \psi) = \left| \frac{\cos[\pi \cos\theta] + 1}{\sin\theta} \right| \quad (9)$$

Antenne verticale, au-dessus du sol : $h=1+d$: $F(\theta, \psi) = F_i(\theta, \psi) \cdot |2 \cdot \cos(\beta h \cos\theta)|$

Exemples de Diagrammes de rayonnement ($F(\pi/2-\theta)$):

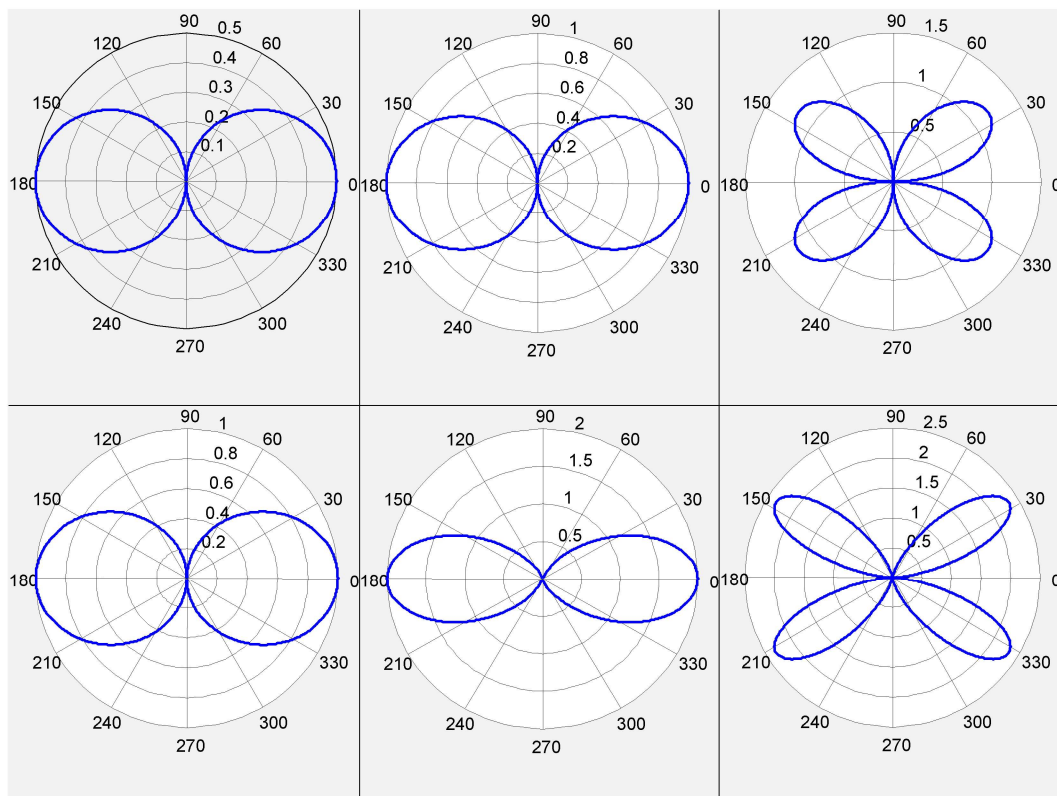


Fig. 3 : Haut/ antennes asymétriques ($L=\lambda/4, \lambda/2, \lambda$)
Bas/ dipôle symétrique ($L=\lambda/2, \lambda, 2\lambda$)

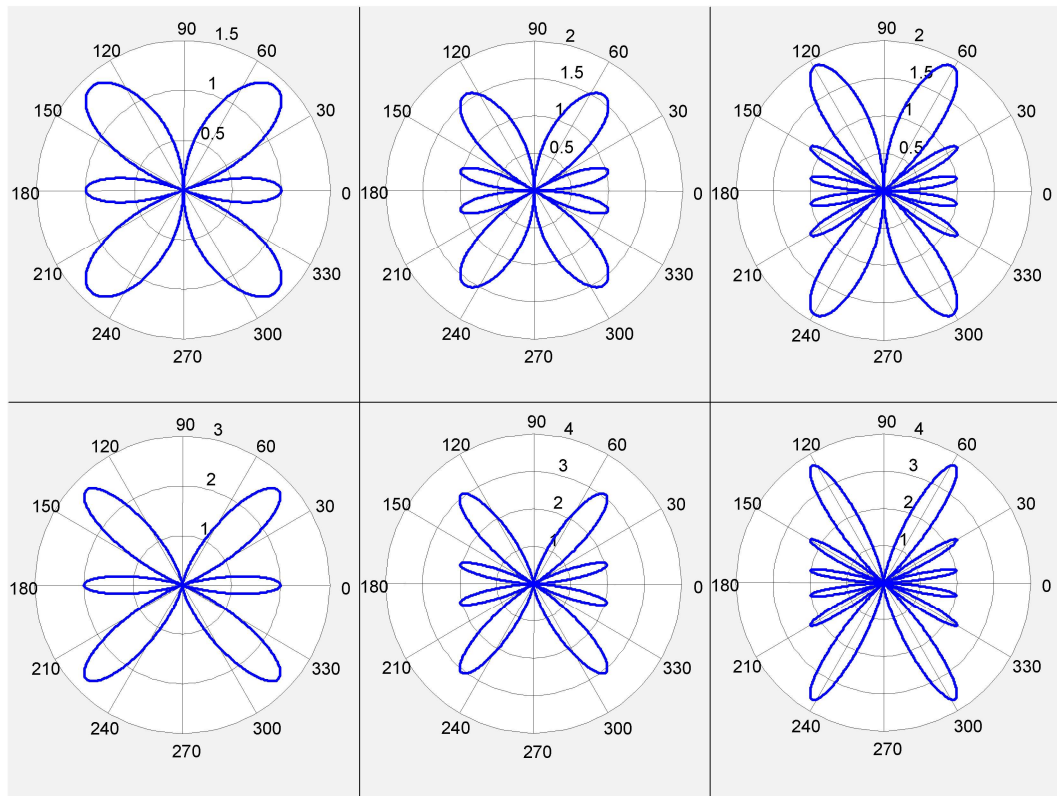


Fig. 4 : Haut/ antennes asymétriques ($l=1,5\lambda, 2\lambda, 3\lambda$)
 Bas/ dipôle symétrique ($L=3\lambda, 4\lambda, 6\lambda$)

2.4 Antenne filaires à ondes progressives

Soit une antenne dans une position horizontale.

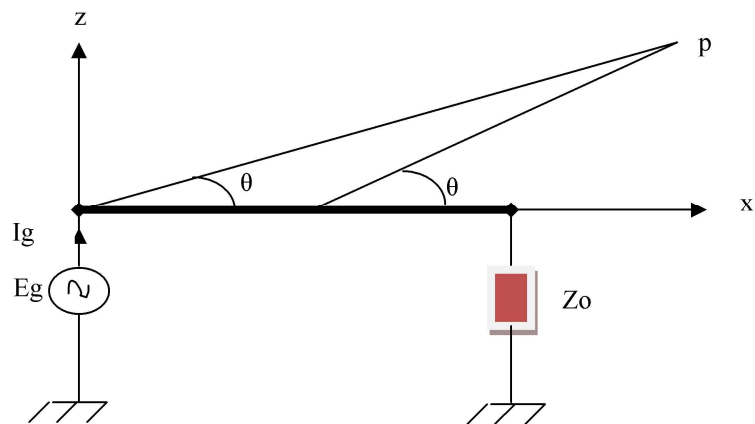


Fig. 5 : Antenne filaire à onde progressive.

Le courant I_g relatif à une distribution exponentielle :

$$I_g = I_o \cdot e^{j(\omega t - \beta \cdot R)} \quad (10)$$

Le champ rayonné par cette antenne est donnée par cette expression :

$$F(\theta) = \frac{\sin \theta}{1 - \cos \theta} \cdot \sin \left(\frac{\beta \cdot L}{2} (1 - \cos \theta) \right) \quad (11)$$

2.4 Antenne en V

C'est l'association de deux brins en V, comme il est illustré dans la figure suivante :

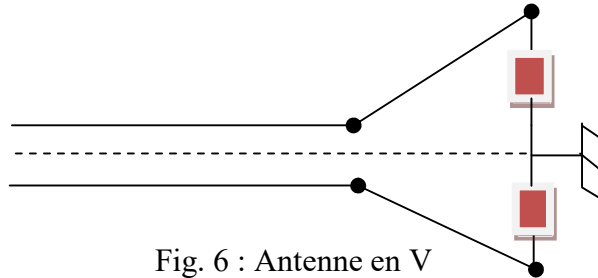


Fig. 6 : Antenne en V

On obtient un champ deux fois plus intense par rapport à celle d'une antenne filaire simple.

2.5 Antenne Losange

C'est l'association de deux antennes en V, comme il est illustré dans la figure suivante :

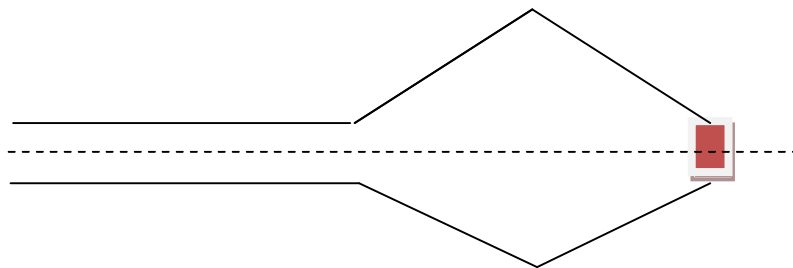


Fig. 7 : Antenne losange.

On obtient un champ encore deux fois plus intense par rapport à celle d'une antenne en V.

Chapitre 3

Réseau d'antennes

3.1 Réseau d'antenne uniforme

C'est l'association de plusieurs antennes identiques, régulièrement espacées et alimentées par la même source de courant (Fig. 1).

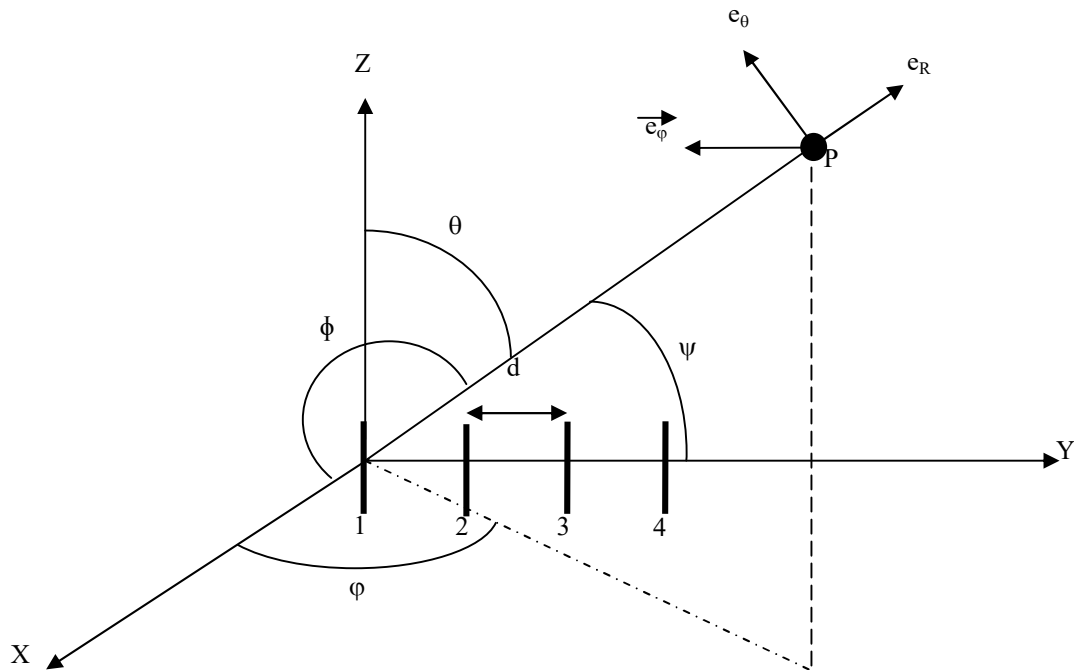


Fig. 1 : Réseau d'antennes identiques

Le champ total: $\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4 + \dots + \vec{E}_n = \vec{E}_1 \cdot [1 + e^{jSy} + e^{2jSy} + e^{3jSy} + \dots + e^{(n-1)jSy}] = \vec{E}_1 \cdot \frac{1 - e^{jnSy}}{1 - e^{jSy}}$

C'est la somme d'une suite géométrique d'ordre n et de raison e^{jSy}

Avec $Sy = \beta \cdot d \cdot \cos\psi = \beta \cdot d \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi$

Après développement :

$$\vec{E}_T = \vec{E}_1 \cdot e^{j(n-1)/2 \cdot Sy} \left[\frac{\sin\left(n \frac{Sy}{2}\right)}{\sin\left(\frac{Sy}{2}\right)} \right] \quad (1)$$

La fonction caractéristique :

$$f(\theta, \phi) = f(E_1) \left[\frac{\sin\left(n \frac{Sy}{2}\right)}{\sin\left(\frac{Sy}{2}\right)} \right] \quad (2)$$

Où $f(E_1)$: la fonction caractéristique de l'antenne isolée dans l'espace.

3.2 Réseau non uniforme

C'est l'association de plusieurs antennes alimentées par de sources de courants différentes (Fig. 2).

1^{er} Cas : Nombre impair de sources

Répartition d'antennes suivant l'axe des z. L'antenne centrale d'amplitude A_0 sur l'axe des z

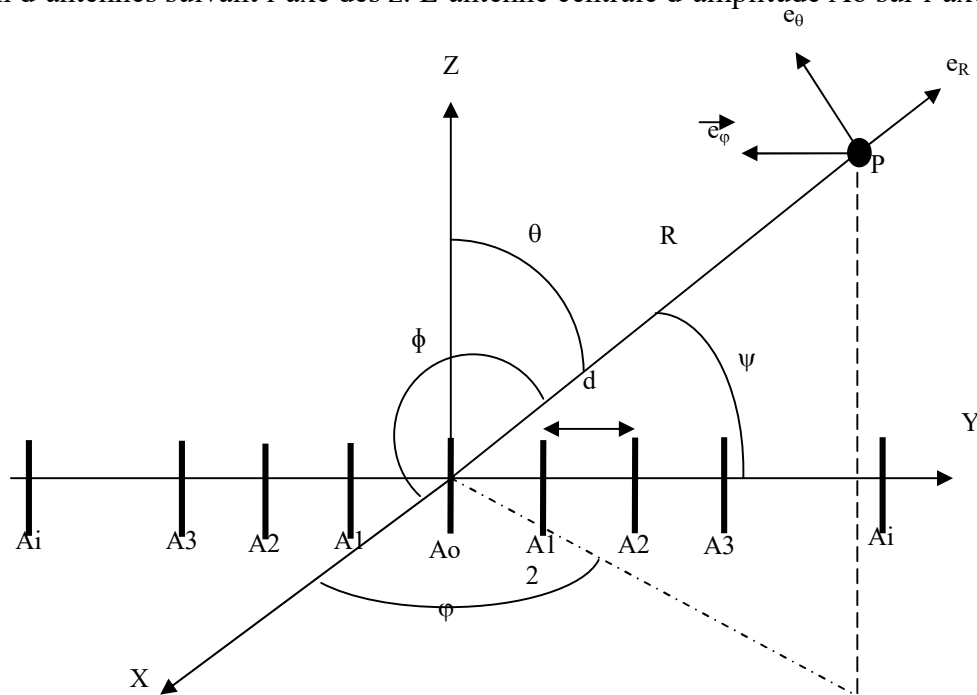


Fig. 2 : Réseau non-uniforme d'antennes (nombre impair d'antennes)

Les deux sources A_1 : $E_1 = A_1(e^{-jS_y} + e^{+jS_y}) = 2 \cdot A_1 \cos(2 \cdot S_y/2)$

Les deux sources A_2 : $E_2 = A_2(e^{-j2S_y} + e^{+j2S_y}) = 2 \cdot A_2 \cos(4 \cdot S_y/2)$

Les deux sources A_3 : $E_3 = A_3(e^{-j3S_y} + e^{+j3S_y}) = 2 \cdot A_3 \cos(6 \cdot S_y/2)$

⋮

Les deux sources A_i : $E_i = A_i(e^{-j(i)S_y} + e^{+j(i)S_y}) = 2 \cdot A_i \cos(2 \cdot i \cdot S_y/2)$

Avec $n = 2 \cdot i + 1 \rightarrow i = (n-1)/2$

Donc le champ total :

$$E_T = E_0 + E_1 + E_2 + E_3 \dots + E_i$$

$$E_T = 2 \cdot [A_0 + A_1 \cos(2 \cdot S_y/2) + A_2 \cos(4 \cdot S_y/2) + A_3 \cos(6 \cdot S_y/2) + \dots + A_{(n-1)/2} \cdot \cos((n-1) \cdot S_y/2)] \quad (3)$$

1^{er} Cas : Nombre paire de sources

Répartition d'antennes suivant l'axe des z. L'antenne centrale d'amplitude A_0 (fictive)

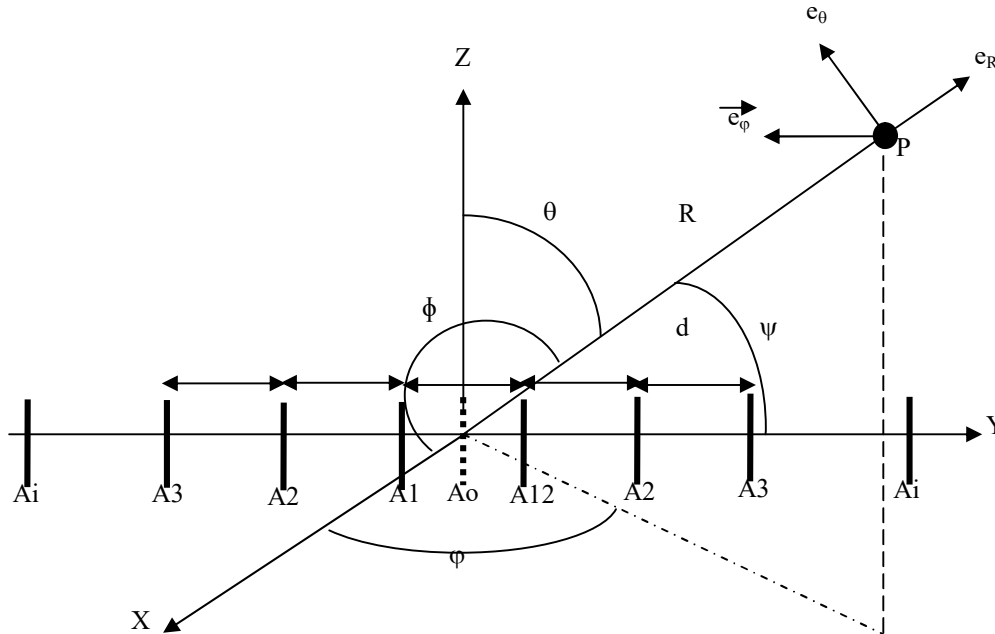


Fig. 3 : Réseau non-uniforme d'antennes (nombre paire d'antennes)

Les deux sources A_1 : $E_1 = A_1(e^{-j1/2.S_y} + e^{+j1/2.S_y}) = 2 \cdot A_1 \cos(S_y/2)$

Les deux sources A_2 : $E_2 = A_2(e^{-j3/2.S_y} + e^{+j3/2.S_y}) = 2 \cdot A_2 \cos(3.S_y/2)$

Les deux sources A_3 : $E_3 = A_3(e^{-j5/2.S_y} + e^{+j5/2.S_y}) = 2 \cdot A_3 \cos(5.S_y/2)$

⋮
⋮
⋮
⋮
⋮
⋮

Les deux sources A_i : $E_i = A_i(e^{-j(i)S_y} + e^{+j(i)S_y}) = 2 \cdot A_i \cos(2i.S_y)$

Avec $n=2.i+2 \rightarrow i=(n-2)/2$

Donc le champ total :

$E_T = E_0 + E_1 + E_2 + E_3 \dots + E_i$

$$E_T = 2 \cdot [A_1 \cos(2.S_y/2) + A_2 \cos(4.S_y/2) + A_3 \cos(6.S_y/2) + \dots + A_{(n-1)/2} \cos((n-1).S_y/2)] \quad (4)$$

3.3 Rideau d'antennes

Soit la structure rayonnante suivante, constituée de plusieurs antennes régulièrement espacés.

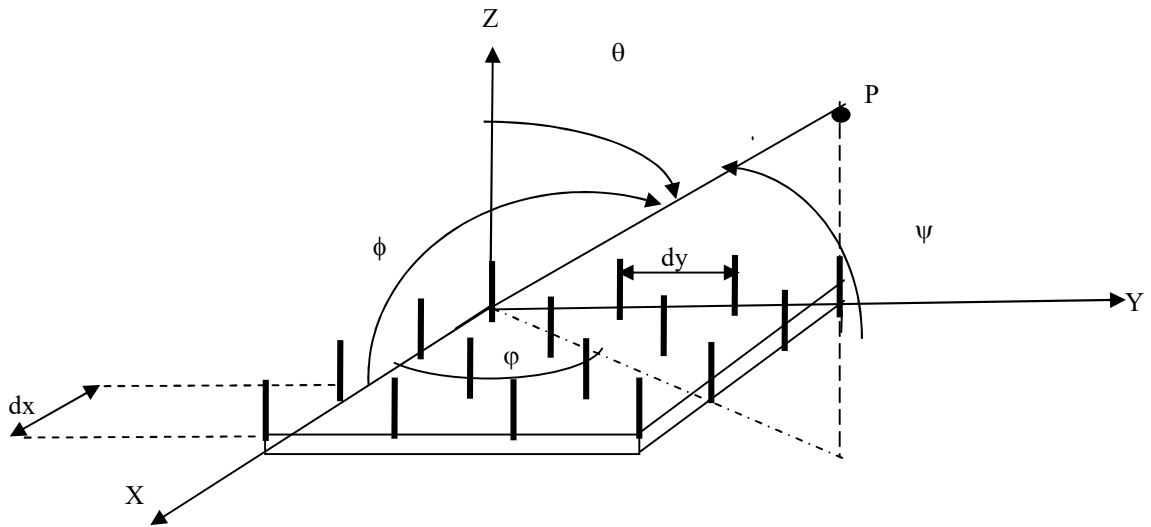


Fig. 4 : Rideau d'antennes

Le champ total : $\vec{E}_T = \vec{E}_1 \cdot [1 + e^{jSy} + e^{2jSy} + e^{3jSy}] [1 + e^{jSx} + e^{2jSx} + e^{3jSx}] = \vec{E}_1 \cdot \frac{1 - e^{j4Sy}}{1 - e^{jSy}} \cdot \frac{1 - e^{j4Sx}}{1 - e^{jSx}}$

C'est la somme d'une suite géométrique à deux termes :

Le 1^{er} d'ordre 4 et de raison e^{jSy}

Le 2^{ème} d'ordre 4 et de raison e^{jSx}

Avec $Sx = \beta \cdot dx \cdot \cos\phi = \beta \cdot dx \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi$ et $Sy = \beta \cdot dy \cdot \cos\psi = \beta \cdot dy \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi$

Après développement :

$$\vec{E}_T = \vec{E}_1 \cdot e^{j3/2 \cdot Sx} \cdot e^{j3/2 \cdot Sy} \left[\frac{\sin\left(4 \cdot \frac{Sx}{2}\right)}{\sin\left(\frac{Sx}{2}\right)} \cdot \frac{\sin\left(4 \cdot \frac{Sy}{2}\right)}{\sin\left(\frac{Sy}{2}\right)} \right] \quad (5)$$

La fonction caractéristique :

$$f(\theta, \phi) = f(E_1) \left[\frac{\sin\left(4 \cdot \frac{Sx}{2}\right)}{\sin\left(\frac{Sx}{2}\right)} \cdot \frac{\sin\left(4 \cdot \frac{Sy}{2}\right)}{\sin\left(\frac{Sy}{2}\right)} \right] \quad (6)$$

Où $f(E_1)$: la fonction caractéristique de l'antenne isolée dans l'espace.

Chapitre 4

Rayonnement des ouvertures planes

4.1 Principe

On trouve les ouvertures rayonnantes dans les trous percés dans les guides d'ondes. Ainsi un réflecteur parabolique constitue une ouverture rayonnante fonctionnant en mode de réflexion. Le principe de Huygens considère que le champ rayonné en un point P peut être vu comme la superposition des rayonnements des sources secondaires réparties sur l'ouverture (principe de la géométrie optique).

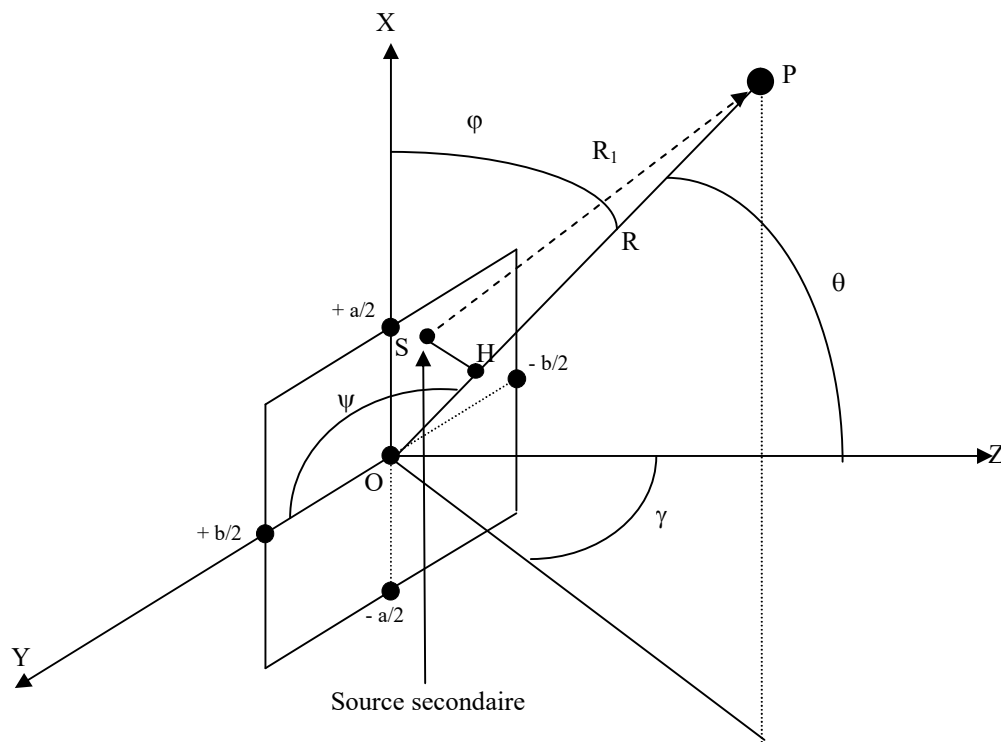


Fig. 1 : Ouverture rayonnante plane rectangulaire

On calcule d'abord la composante du champ rayonné d'une ouverture plane en s'inspirant de la formule de Kottler.

$$\text{C'est à dire: } E = \frac{je^{-j\beta R}}{\lambda R} \cdot \int_{-a/2}^{+a/2} \int_{-b/2}^{+b/2} E(x, y) e^{j\beta(x \cos \phi + y \cos \psi)} dx dy \quad (1)$$

Le déphasage entre le champ rayonné par la source S et la source O est :

$$\phi_s = \beta \cdot OH = \beta \cdot (x \cdot \cos \phi + y \cdot \cos \psi)$$

$OH = R - R_1$: Etant la différence entre la portée du champ O et celle du champ S

Eclairement uniforme $E(x, y) = E_0 = \text{Cste}$

Après développement :

$$E = \frac{j e^{-j\beta R}}{\lambda R} E_0 \cdot a \cdot b \cdot \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \cos\varphi\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot b \cdot \cos\psi\right)}{\frac{\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \cos\varphi \quad \frac{\pi}{\lambda} \cdot b \cdot \cos\psi} \right] \quad (2)$$

4.2 Paramètres caractéristiques de l'ouverture

A- Fonction caractéristique :

Elle est donnée par le rapport du champ sur le champ max :

$$F(\varphi, \psi) = \frac{|E|}{|E|_{\max}} = \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \cos\varphi\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot b \cdot \cos\psi\right)}{\frac{\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \cos\varphi \quad \frac{\pi}{\lambda} \cdot b \cdot \cos\psi} \right] \quad (3)$$

Dans le plan vertical (Plan E /XOZ) : $\psi = \pi/2 \rightarrow \cos\psi = \sin\theta$

$$F(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sin\theta\right)}{\frac{\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sin\theta} \quad (4)$$

Dans le plan horizontal (Plan H /YOZ) : $\varphi = \pi/2 \rightarrow \cos\varphi = \sin\theta$

$$F(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot b \cdot \sin\theta\right)}{\frac{\pi}{\lambda} \cdot b \cdot \sin\theta} \quad (5)$$

B- Le maximum du champ rayonné :

Pour $(\pi/\lambda)a \cdot \sin\theta = 0 \rightarrow \sin\theta = 0 \rightarrow \theta_{\max} = 0$

Pour $(\pi/\lambda)b \cdot \sin\theta = 0 \rightarrow \sin\theta = 0 \rightarrow \theta_{\max} = 0$

Cela correspond à :

$$|E|_{\max} = \frac{E_0 \cdot a \cdot b}{\lambda R} \quad (\text{dans le Plan E}) \quad (6)$$

$$|E|_{\max} = \frac{E_0 \cdot a \cdot b}{\lambda R} \quad (\text{dans le Plan H})$$

C- Les minimums du champ rayonné :

Pour $\sin(\pi/\lambda a \cdot \sin\theta) = 0 \rightarrow (\pi/\lambda)a \cdot \sin\theta = n \cdot \pi \rightarrow \theta_{\min} = \text{Arcsin}(n\lambda/a)$

Pour $\sin(\pi/\lambda b \cdot \sin\theta) = 0 \rightarrow (\pi/\lambda)b \cdot \sin\theta = n \cdot \pi \rightarrow \theta_{\min} = \text{Arcsin}(n\lambda/b)$

1^{er} min : $\theta_{1\min} = \text{Arcsin}(\lambda/a) = 57^\circ(\lambda/a)$ (Plan E)

1^{er} min : $\theta_{1\min} = \text{Arcsin}(\lambda/b) = 57^\circ(\lambda/b)$ (Plan H)

D- Le champ à 3dB :

Obtenu lorsque :

$$F(\theta) = \frac{|E|}{|E|_{\max}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

$$\theta_m = \text{Arcsin}(\lambda/a) = 51^\circ (\lambda/a) \text{ (Plan E)}$$

$$\theta_m = \text{Arcsin}(\lambda/b) = 51^\circ (\lambda/b) \text{ (Plan H)}$$

E- Diagramme de rayonnement :

Dans le plan vertical :

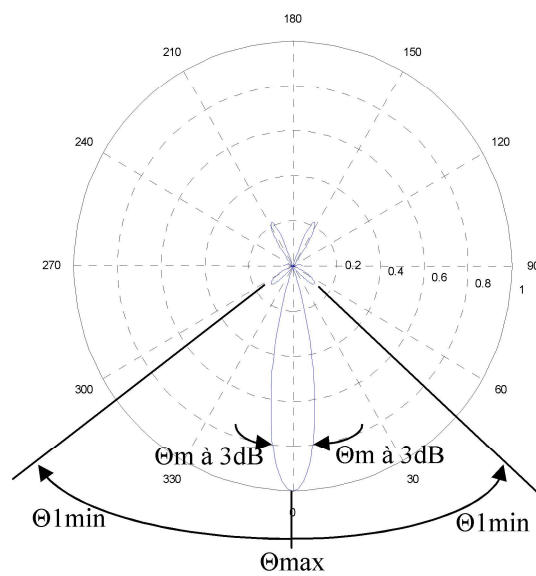


Fig. 2 : Diagramme de rayonnement dans le plan vertical

4.3 Ouvertures circulaires

On retrouve les ouvertures circulaires dans de nombreux projecteurs d'ondes tels que le réflecteur parabolique, cornet conique etc...

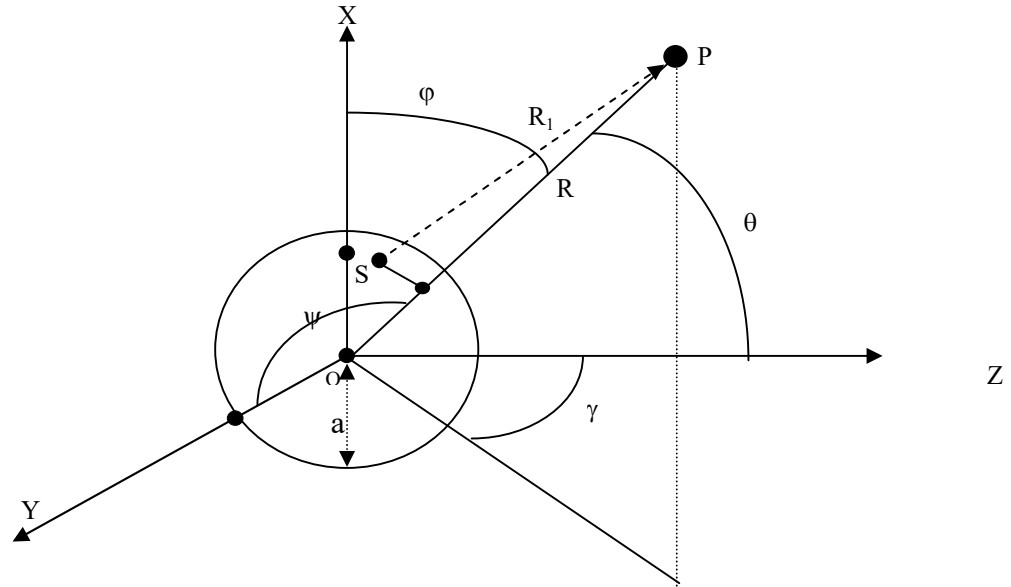


Fig. 3 : Ouverture rayonnante plane circulaire

La composante du champ dans ce cas est donnée par :

$$E = \frac{je^{-j\beta R}}{\lambda R} \iint_s E(x, y) \cdot e^{j\beta \cdot (x \cos \phi + y \cos \psi)} dx \cdot dy$$

Dans ce cas, x et y sont dépendants : $x^2 + y^2 = a^2 \rightarrow x = \pm (a^2 - y^2)^{1/2}$

$$E = \frac{je^{-j\beta R}}{\lambda R} \cdot E_0 \int_{-a}^{+a} \left[\int_{-\sqrt{a^2 - y^2}}^{+\sqrt{a^2 - y^2}} dy \right] e^{j\beta \cdot x \sin \theta} dx \quad (8)$$

On pose $x = a \cdot u \rightarrow dx = a \cdot du$ et $m = \beta \cdot a \sin \theta$

Après développement (dans le plan E) :

$$E = \frac{je^{-j\beta R}}{\lambda R} \cdot 2 \cdot a^2 E_0 \int_{-1}^{+1} \underbrace{\sqrt{1 - u^2} \cdot e^{jmu}}_{\pi \frac{J_1(m)}{m}} du \quad (9)$$

$J_1(m)$: Fonction de Bessel de m d'ordre 1.

La fonction caractéristique est donnée par :

$$F(\theta) = 2 \cdot \frac{J_1(m)}{m} \quad (10)$$

Chapitre 5

Les antennes planaires

5.1 Antenne imprimée ou patch

Les antennes imprimées ou microruban, ou « patch » en anglais sont des structures planaires. L'antenne est réalisée par gravure d'un circuit imprimé très réduit. Elles sont utilisées dans de nombreuses applications (VHF, UHF, etc...).

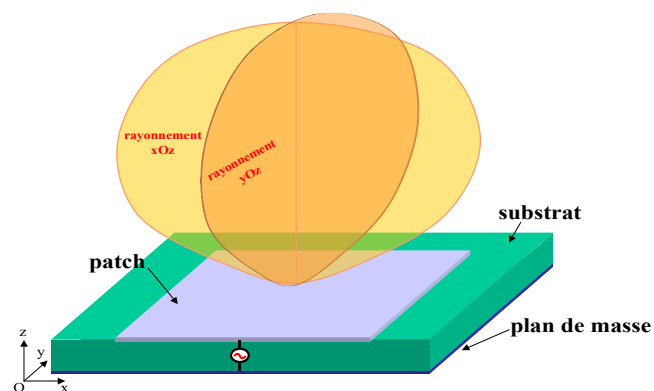
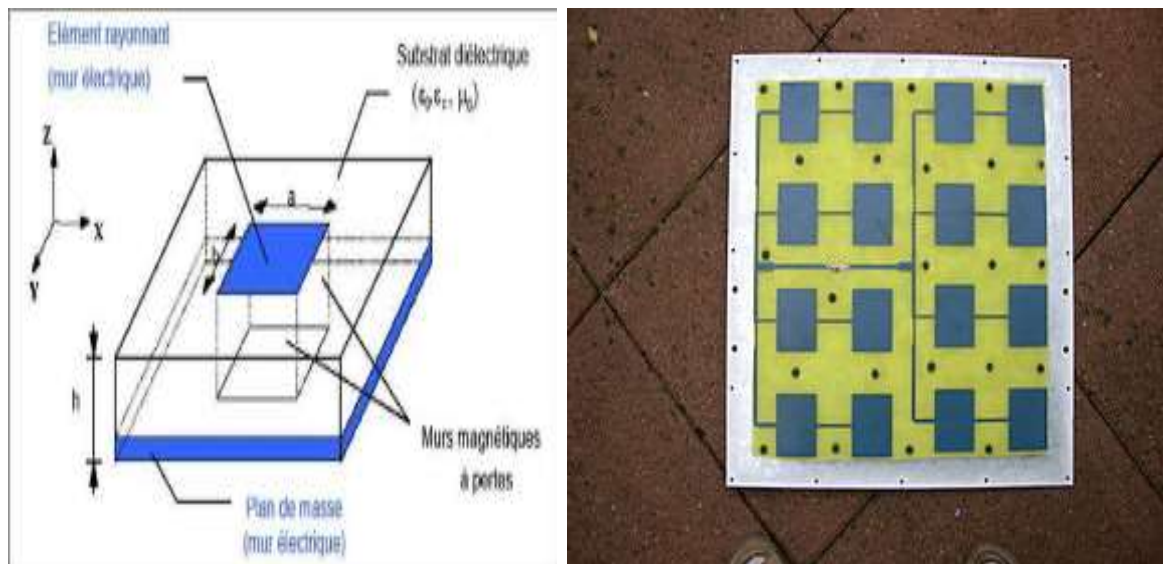
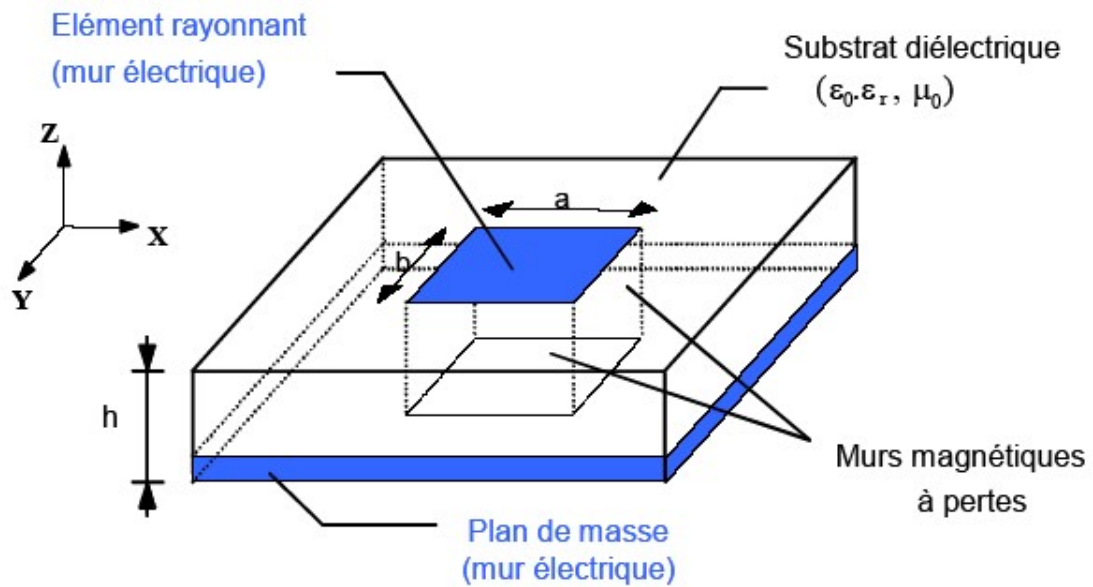


Fig. 1 : Antenne imprimée

* **Principe de fonctionnement** : Cavité à fuites



* **Les expressions associées** :

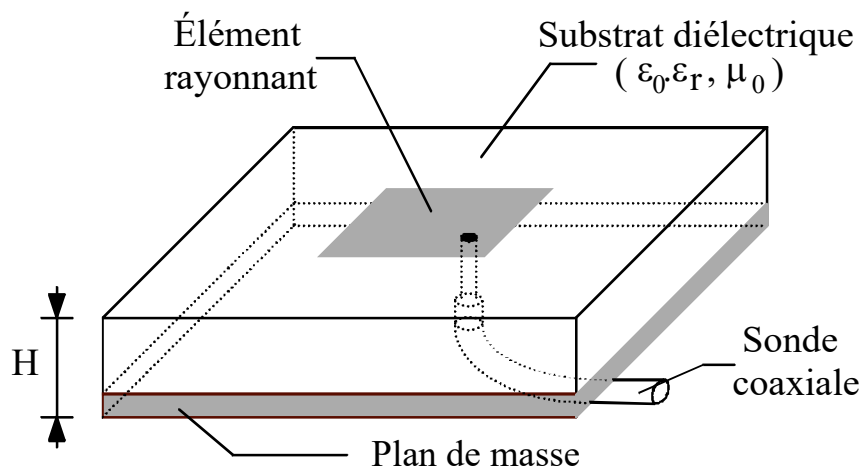
- Champ électrique :

$$E_z(x, y) = E_0 \cos\left(\frac{m\pi}{L} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{l} y\right)$$

- Fréquence de fonctionnement :

$$f_{mn0} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2}$$

* **Systèmes d'alimentations** : Par sonde coaxiale



* **Mise en réseau d'antennes :**

On peut utiliser le regroupement pour augmenter le gain d'une antenne.

A partir d'une antenne élémentaire directive, la multiplication par deux du nombre d'élément augmente la directivité par deux.

Patch seul : 6 dBi de gain

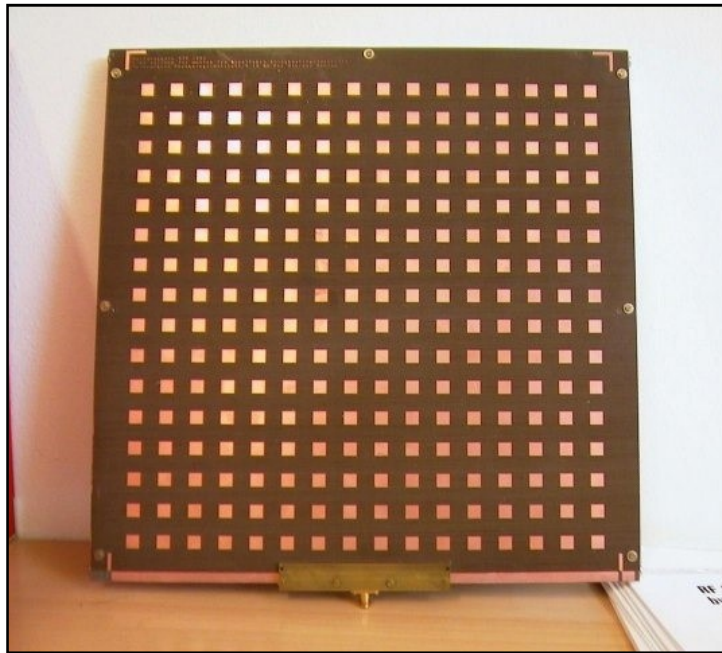


Fig. 2 : Exemple de la mise en réseau d'antennes