



Anne Claire LEPAGE
Enseignant-Chercheur à
Télécom ParisTech

Caractéristiques des antennes

Il existe 2 grandes familles
de caractéristiques pour une
antenne utilisée dans une
liaison spatiale :

- Les caractéristiques physiques
- Les caractéristiques radio-électriques



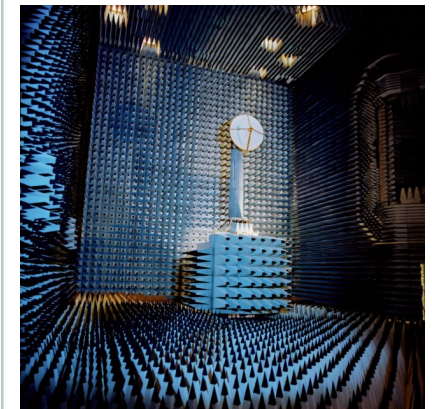
Les caractéristiques physiques

- ses **dimensions** et sa **masse** sont tout particulièrement critiques à bord d'un satellite ;
- ses **propriétés mécaniques** : par exemple, pour une station sol, sa résistance au vent...
- ses **propriétés thermiques** : les dimensions varient-elles lors des variations de température, surtout à bord du satellite où l'on peut constater des variations entre -120 et $+150^{\circ}\text{C}$ suivant l'éclairement ou non du soleil ?

Les caractéristiques radio-électriques

Les caractéristiques radioélectriques vont impacter les performances de la liaison spatiale :

- **L'impédance d'entrée** de l'antenne
- Son **diagramme de rayonnement** et son **gain**
- Sa **polarisation**



©CNES / Le Doaré Pascal, 1999
Antenne altimètre du satellite
Jason en essais dans le BCMA
(Base Compacte de Mesure d'Antenne)

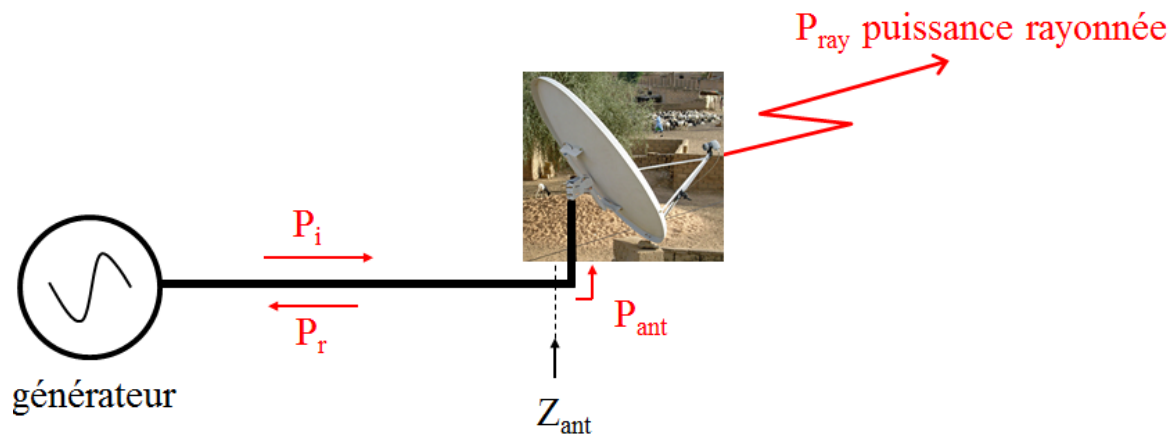


Figure 1 : Les différentes puissances dans la chaîne d'émission

1- L'impédance d'entrée de l'antenne

Prenons une antenne fonctionnant en émission : celle-ci est reliée à un générateur via une ligne de transmission, qui peut être par exemple un câble coaxial, un guide d'onde, ...

Quel est l'objectif d'une antenne à l'émission ?

⇒ Rayonner tout le signal envoyé par le générateur avec le minimum de pertes de puissance !

Pour cela, on doit s'intéresser au coefficient de réflexion du signal lorsqu'il arrive à l'entrée de l'antenne.

Considérons P_i , la puissance émise par le générateur et qui est transportée par la ligne de transmission jusqu'à l'antenne.

P_r est la puissance réfléchie par l'antenne à cause

du phénomène de désadaptation que nous abordons plus loin : **cette puissance est perdue.**

Il faut donc qu'elle soit minimale !

Idealement, P_r est nulle : l'antenne est alors parfaitement adaptée à la ligne de transmission.

P_{ant} est la puissance qui est injectée dans l'antenne. Donc $P_{ant} = P_i - P_r$

Attention : P_{ant} n'est pas exactement la puissance qui est rayonnée par l'antenne ! En effet, il peut y avoir des pertes sur l'antenne à cause des conducteurs métalliques non parfaits, etc....

La puissance rayonnée est donc $P_{ray} \leq P_{ant}$!

Aller plus loin

Comment calculer la puissance réfléchie P_r ?

A l'extrémité de la ligne de transmission, l'antenne est considérée, pour le signal, comme une impédance Z_{ant} qui peut être complexe. D'après la théorie des lignes de transmission, le coefficient de réflexion Γ_{ant} à l'endroit où se trouve l'impédance Z_{ant} dépend de l'impédance caractéristique Z_c de la ligne de transmission et s'exprime comme

$$\Gamma_{ant} = \frac{Z_{ant} - Z_c}{Z_{ant} + Z_c} \text{ ainsi } \frac{P_r}{P_i} = |\Gamma_{ant}|^2$$

On peut donc en déduire la puissance réfléchie par l'antenne P_r .

NB : Γ_{ant} peut être complexe.

Comment obtenir une puissance réfléchie nulle ?

Lorsque l'antenne a une impédance Z_{ant} égale à l'impédance caractéristique de la ligne de transmission Z_c , alors $\Gamma_{ant} = 0$! C'est le cas idéal ! La puissance réfléchie est nulle et la totalité de la puissance du générateur est transmise à l'antenne !

Mais comme Γ_{ant} dépend de la fréquence du signal envoyé par le générateur, on ne peut pas obtenir la condition $\Gamma_{ant} = 0$ sur toute la bande de fréquence du signal transmis...mais on essaie de minimiser la réflexion en jouant sur la géométrie de l'antenne ou en insérant à l'entrée de l'antenne un **circuit d'adaptation**.

Remarque : Γ_{ant} peut être noté S_{11} .

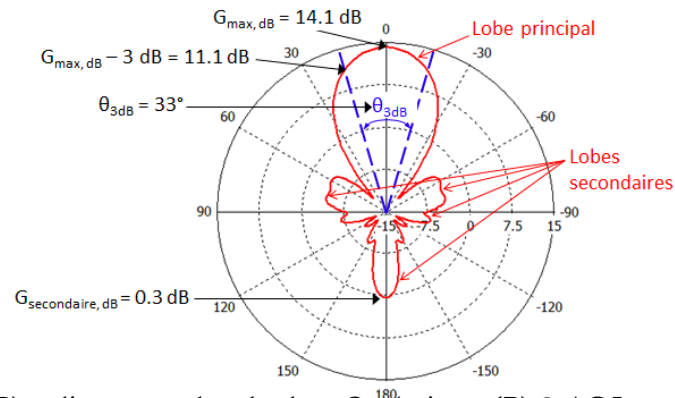
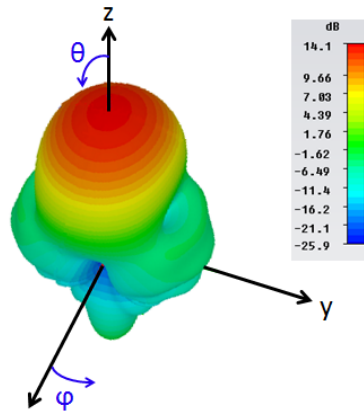


Figure 2 : Diagrammes de rayonnement 3D (gain en dB) et diagramme dans le plan yOz (gain en dB) © AC Lepage - 2015

2- Le diagramme de rayonnement

Nous avons défini précédemment la puissance rayonnée par l'antenne P_{ray} .

Mais comment cette puissance est-elle répartie dans l'espace ?

Pour certaines antennes, par exemple, les antennes à réflecteur parabolique, la puissance est concentrée dans une certaine plage angulaire, plus ou moins grande : ces antennes sont dites **directives**. On les trouve sur les satellites mais aussi au sol. Elles nécessitent un pointage vers le destinataire de la liaison.

En revanche, les antennes **omnidirectionnelles** rayonnent de la même façon dans un plan de l'espace. Elles ne nécessitent pas de pointage

particulier, et sont utilisées, par exemple, sur les terminaux de téléphonie mobile par satellites (ou sur votre smartphone).

On décrit la répartition de la puissance d'une antenne dans l'espace grâce au diagramme de rayonnement.

Quelle est la grandeur tracée sur un diagramme de rayonnement ?

Ca dépend ! En général, la directivité ou le gain ! Définissons d'abord la directivité.

Les angles (θ , φ)

La géométrie d'une antenne est généralement définie à l'aide des coordonnées cartésiennes (x , y , z). Pour décrire son diagramme de rayonnement, on utilise plutôt les angles des coordonnées sphériques (θ , φ) comme le montre la figure de gauche. θ est repéré par rapport à l'axe Oz et φ se trouve dans le plan xOy et est repéré par rapport à l'axe Ox.

Diagrammes 3D et 2D

On peut tracer le diagramme de rayonnement en 3 dimensions afin de visualiser la direction dans laquelle l'antenne va rayonner le plus de puissance (dans notre exemple, il s'agit de l'axe Oz).

On peut également représenter des plans de coupe en 2D (ici, le plan yOz).

Les définitions

La densité surfacique de puissance

La densité surfacique de puissance $U(r, \theta, \varphi)$ est la **puissance rayonnée par unité de surface** (exprimée en W/m^2) dans la direction (θ, φ) et à la distance r de l'antenne.

L'antenne isotrope

Une antenne isotrope rayonne de la même façon dans toutes les directions de l'espace ! Il n'est pas possible de concevoir une telle antenne mais celle-ci sert de référence.

Sa densité surfacique de puissance $U_{iso}(r)$ ne dépend alors que de r et de la puissance totale rayonnée P_{ant} définie dans le chapitre 1 :

$U_{iso}(r) = P_{ant} / (4\pi r^2)$ en supposant qu'il n'y ait pas de pertes sur l'antenne isotrope ($P_{iso, ant} = P_{iso, ray}$).

La **directivité d'une antenne** dans la direction (θ, φ) est le rapport entre la densité de puissance surfacique $U(r, \theta, \varphi)$ rayonnée par l'antenne dans cette direction à la distance r et la densité de puissance qui serait rayonnée par une antenne isotrope rayonnant la même puissance totale P_{ant} .

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(r, \theta, \varphi)}{U_{iso}(r)} = \frac{U(r, \theta, \varphi)}{P_{ant} / 4\pi r^2}$$

La directivité n'a pas d'unité.

En général, on l'exprime en décibels :

$$D(\theta, \varphi)_{dB} = 20 \log D(\theta, \varphi)$$

NB: si la directivité est supérieure à 1 (ou 0 dB) dans certaines directions, c'est-à-dire qu'elle rayonne plus que l'antenne isotrope, elle est nécessairement inférieure à 1 dans d'autres directions, puisque la puissance totale rayonnée est la même pour ces deux antennes.

Quelle est la différence entre directivité et gain ?

Le gain $G(\theta, \varphi)$ dans la direction (θ, φ) est une grandeur proche de la directivité.

Il est défini comme : $G(\theta, \varphi) = \eta D(\theta, \varphi)$

η est l'**efficacité** de l'antenne : c'est un chiffre compris entre 0 et 1 qui reflète les pertes présentes sur l'antenne (c'est la différence entre P_{ant} et P_{ray} vue au chapitre 1 : $P_{ray} = \eta P_{ant}$).

Plus η est proche de 1, plus la puissance injectée dans l'antenne est rayonnée, donc plus l'antenne est efficace !

Pour une antenne parabolique, une valeur typique est $\eta = 0.65$.

Finalement, quels sont les paramètres importants pour le rayonnement ?

- la **valeur du gain maximum** : c'est cette valeur que vous avez utilisée dans le bilan de liaison en semaine 4.

- l'**ouverture à 3 dB**, θ_{3dB} , ou ouverture à mi-puissance : c'est la plage angulaire définie sur un diagramme en 2D dans laquelle le gain (ou la directivité) vaut $G_{dB} \geq G_{max, dB} - 3$ (ou $G = G_{max}/2$ si on ne travaille pas en dB).

En général, plus θ_{3dB} est faible, plus le gain maximal est important, mais plus le pointage devrait faire appel à des techniques élaborées !

- Le niveau des lobes secondaires

Plus le gain des lobes secondaires est important, plus l'antenne envoie de la puissance dans des directions indésirables, par exemple vers le satellite voisin de celui qui est visé : cela pose des problèmes d'interférences qui sont une préoccupation majeure des opérateurs de flottes de satellites. Le niveau des lobes secondaires est donc très critique pour les stations sol !

Application immédiate :

D'après la figure 2 :

- Le gain maximum est $G_{max, dB} = 14.1$ dB

- L'ouverture à 3 dB est $\theta_{3dB} = 33^\circ$

- Le niveau du 1^{er} lobe secondaire est de 0.3 dB.

Il y a donc un écart de 13.8 dB entre le gain maximum et le gain du 1^{er} lobe secondaire.

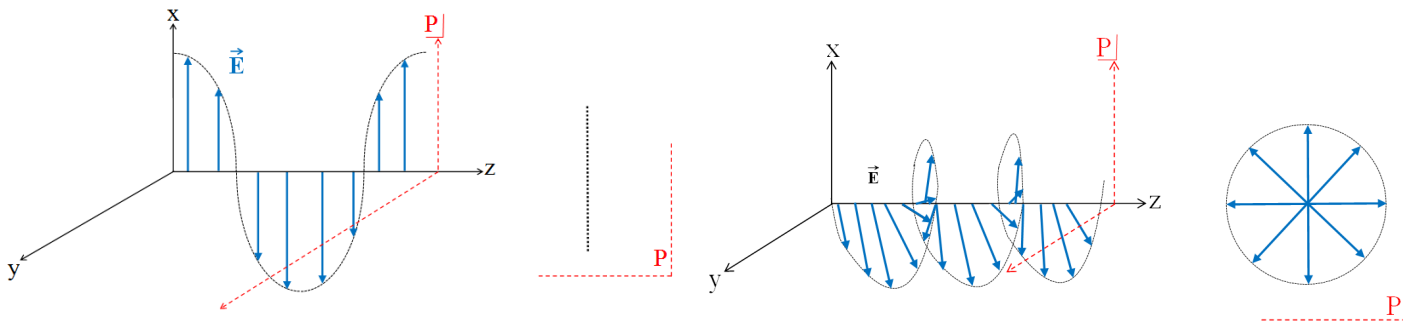


Figure 3 : Polarisation rectiligne ou linéaire et polarisation circulaire
© X. Begaud - 2015

3- La polarisation

Une antenne émet une onde électromagnétique qui est décrite par 3 vecteurs :

- $\mathbf{k}$, le vecteur d'onde qui est colinéaire à la direction de propagation
- $\mathbf{E}$, le vecteur champ électrique
- $\mathbf{H}$, le vecteur champ magnétique

La polarisation d'une antenne est en fait la polarisation de l'onde émise par celle-ci. On la définit en s'intéressant à la façon dont se propage le vecteur $\mathbf{E}$.

Polarisation rectiligne ou linéaire :

La polarisation de l'onde est dite rectiligne ou linéaire lorsque le champ électrique $\mathbf{E}$ se propage en maintenant une direction constante dans le temps

Polarisation circulaire :

La polarisation de l'onde est dite circulaire lorsque le champ électrique $\mathbf{E}$ décrit une hélice à section droite circulaire au cours du temps. Si on projette l'extrémité de $\mathbf{E}$ sur un plan orthogonal (cf Figure 3), on obtient un cercle. Ce cercle peut être décrit en fonction du temps dans un sens ou dans l'autre : on parle alors de polarisation circulaire droite ou gauche.

Polarisation elliptique :

Dans ce cas, l'extrémité du vecteur $\mathbf{E}$ décrit une ellipse lorsque de sa projection dans un plan orthogonal à la propagation. Comme pour la polarisation circulaire, on distingue la polarisation elliptique droite et gauche.

Aller plus loin

La polarisation des signaux utilisés dans une liaison spatiale

La plupart des signaux utilisés dans une liaison spatiale ont une **polarisation circulaire**.

En effet, la traversée de l'atmosphère (ionosphère, nuages de glace et couches de pluie), peut induire une rotation de polarisation d'un angle α . Pour une polarisation circulaire, cette rotation n'aura pas d'effet.

En revanche, pour une polarisation rectiligne, la direction du champ $\mathbf{E}$ tourne de l'angle α . Au niveau de l'antenne de réception, la puissance du signal injecté dans l'antenne sera alors plus faible qu'attendue, voire nulle si $\alpha = 90^\circ$.

Les signaux à polarisation linéaire pour une liaison spatiale sont uniquement utilisés en bande Ku (bande des signaux de diffusion TV) car les effets de l'atmosphère sont limités et peuvent être compensés à ces fréquences (entre 10 et 15 GHz environ).