ENSEA

Beyond Engineering

ANTENNES – ESC

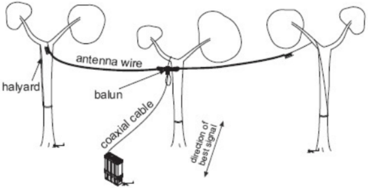
Cours 2: Propriétés générales des antennes

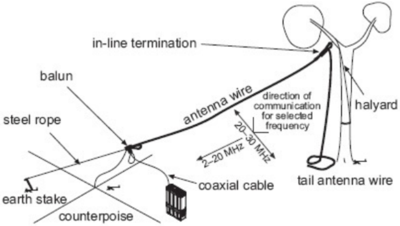
Alexis MARTIN

2025

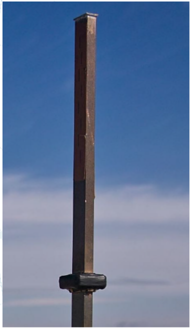
ENSEA
Beyond Engineering

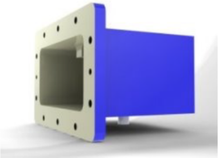
Exemples de technologies
Antennes filaires

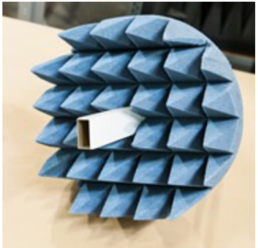




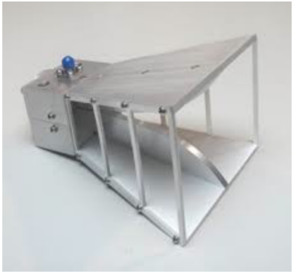
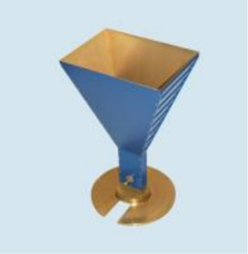
Exemples de technologies
Antennes à ouvertures: guides







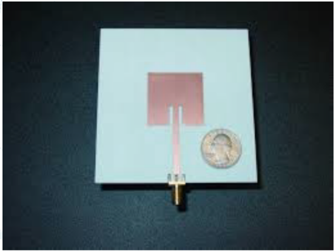
Exemples de technologies
Antennes à ouvertures: cornet

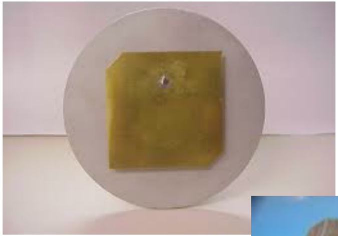



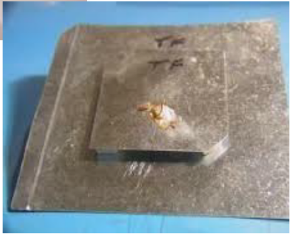
Exemples de technologies
Antennes à ouvertures: réflecteur (paraboles)

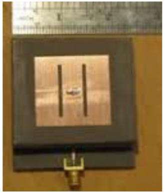
ENSEA
Beyond Engineering

Exemples de technologies
Antennes Patch

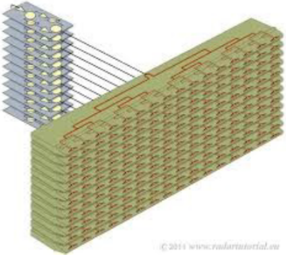


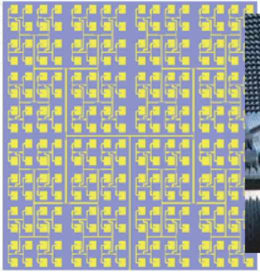






Exemples de technologies
Réseau d'antennes

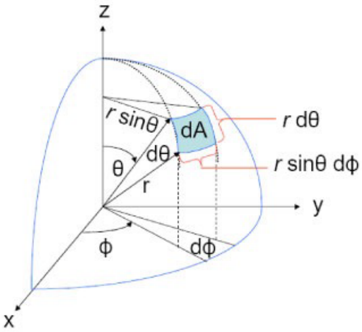




Angle solide

L'angle solide "*mesure*" l'étendue d'un cône:

$$d\Omega = \frac{dA}{dr} = \sin\theta d\theta d\varphi$$



Pour l'espace entier: $\Omega = 4\pi$ stéradians.
Pour un demi espace: $\Omega = 2\pi$ stéradians.

ENSEA
Beyond Engineering

Puissance émise par stéradian

Soit un cône dont le sommet est l'antenne d'émission. La puissance émise dans ce cône peut être mesurée. Cette puissance est indépendante de la distance à l'origine.

La puissance émise est conservée à l'intérieur d'un cône "centré" sur l'antenne.

Ceci est dû au fait qu'à grande distance, les champs émis varient en $1/r$.

On peut alors définir $U(\theta, \varphi)$ la puissance émise par unité d'angle solide. Unité: W/strd

$$\boxed{U(\theta, \varphi) = \frac{dP}{d\Omega} = \frac{r^2 ||\vec{E}(r, \theta, \varphi)||^2}{2\eta}}$$

ENSEA
Beyond Engineering

Caractéristique de rayonnement

La caractéristique de rayonnement, $r(\theta, \varphi)$ est la puissance émise par stéradian, normalisée par rapport à son niveau max:

$$\boxed{r(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{\max}}}$$

Par conséquent: $r_{\max} = 1$

La valeur de r peut aussi être indiquée en dB:

$$\boxed{r_{dB}(\theta, \varphi) = 10 \log_{10} r_{lin}}$$

ENSEA
Beyond Engineering

Représentation de $r(\theta, \varphi)$

Une direction, pointant du côté des $z > 0$ peut être représentée par 2 quantités:

Soit θ et φ
Soit u_x et u_y

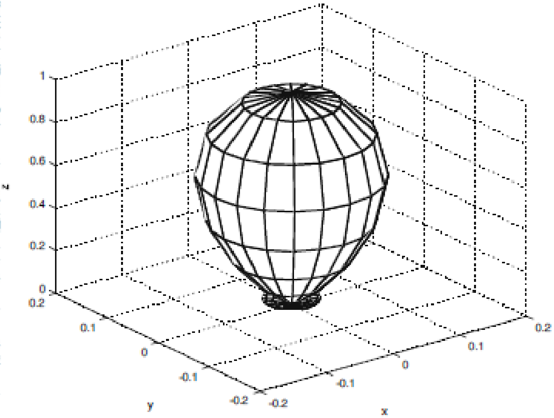
$$u_x = \sin(\theta)\cos(\varphi)$$
$$u_y = \sin(\theta)\sin(\varphi)$$

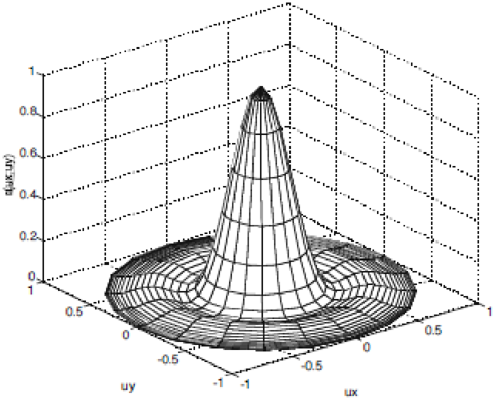
D'où les différentes représentations graphique possibles, qui peuvent être combinées avec une représentation de $r(\theta, \varphi)$.

ENSEA
Beyond Engineering

Représentation de $r(\theta, \varphi)$

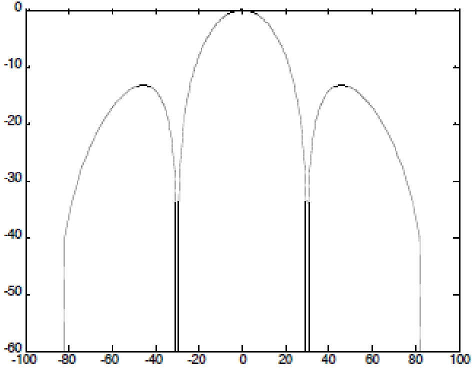
En coordonnées u_x, u_y, en 3D:

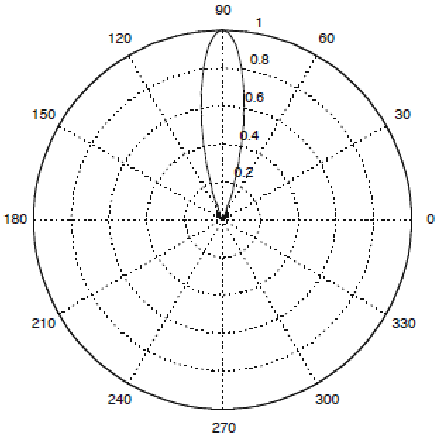




Représentation de $r(\theta, \varphi)$

En coordonnées θ, φ:

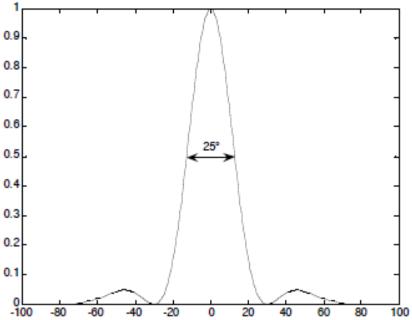




Angle d'ouverture à mi-puissance

La mi-puissance correspond à $r_{lin} = 0.5$, ou encore $r_{dB} = -3$

Cet angle est aussi appelé "angle d'ouverture à -3dB"



Angle solide d'ouverture

Cette notion est moins utilisée, mais peut être très “parlante” :

$$\Omega_{ouv} = \int\int_{espace} r(\theta,\varphi) d\Omega = \int_{\varphi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi} r(\theta,\varphi)\sin(\theta) d\theta d\varphi$$

Pour une antenne “omni-directionnelle”, appelée aussi “source isotrope” :

$$\Omega_{ouv} = 4\pi$$

Angle solide d'ouverture

Pour une antenne avec un seul lobe principal et un faible niveau de lobes secondaires, assimilée à une ouverture à éclairement gaussien, en notant θ_H et θ_E, les angles d'ouverture dans 2 plans perpendiculaires entre eux:

$$\boxed{\Omega \approx \frac{\pi}{\ln 2} \sin \frac{\theta_H}{2} \sin \frac{\theta_E}{2}}$$

Cette approximation est à privilégier pour une antenne **à faible niveau de lobes secondaires**

Si θ_H et θ_E sont très petits, on a une approximation encore plus simple:

$$\boxed{\Omega \approx \frac{\pi}{\ln 2} \sin \frac{\theta_H}{2} \sin \frac{\theta_E}{2} \approx \frac{\pi}{4 \ln 2} \theta_H \theta_E \approx \theta_H^{rad} \theta_E^{rad}}$$

ENSEA
Beyond Engineering

Directivité

La directivité “mesure” le caractère “pointu” du diagramme de rayonnement.

$$\boxed{D = \frac{U_{\max}}{U_{moyen}} = \frac{4\pi}{\int\int_{espace} r(\theta,\varphi)d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_{ouv}}}$$

$$\boxed{D \geq 1}$$

Pour une antenne omni-directionnelle: D = 1

ENSEA
Beyond Engineering

Directivité

Pour une antenne avec un faible niveau de lobes secondaires, et en l'absence de "rayonnement arrière" :

$$\boxed{D \approx \frac{4\ln 2}{\sin\frac{\theta_H}{2}\sin\frac{\theta_E}{2}}}$$

Approximation si l'antenne est assez directive:

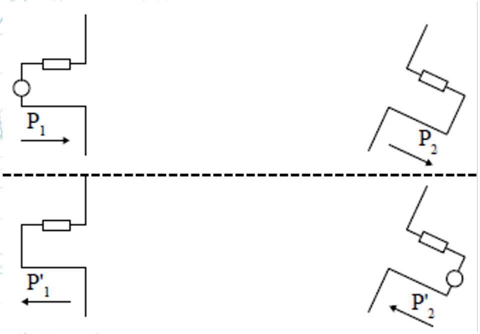
$$\boxed{D \approx \frac{36400}{\theta_H^\circ \theta_E^\circ}}$$

ENSEA
Beyond Engineering

Directivité & Réciprocité

$$D_{dB} = 10\log_{10} D_{lin}$$

Une liaison entre 2 antennes est réciproque:

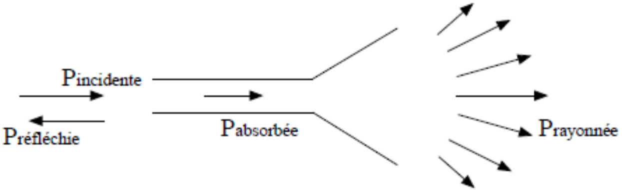


La propriété de *réciprocité* est toujours vraie:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2'}{P_1'}$$

ENSEA
Beyond Engineering

Efficacité d'une antenne



La très grande majorité des antennes ont un rendement très proche de 1, ce qui revient à dire que la puissance totale rayonnée est égale à la puissance absorbée par l'antenne.

Seules les petites antennes (petites devant la longueur d'onde) font exception. Elles ont généralement un très mauvais rendement.

L'habitude est désormais de nommer cette grandeur *efficacité d'une antenne*

$$\alpha = \frac{P_{ray}}{P_{abs}} = \text{efficacité}$$

ENSEA
Beyond Engineering

Gain d'une antenne

Le gain d'une antenne permet de calculer la puissance (par unité d'angle solide) dans la direction du maximum, à partir de la puissance absorbée par l'antenne.

$$\boxed{G = \frac{U_{\max}}{\left(\frac{P_{abs}}{4\pi}\right)}}$$

$$\boxed{G_{dB} = 10\log_{10} G_{lin}}$$

On trouve aussi souvent la notion de "Gain réalisé" :

$$\boxed{G_{realized} = \frac{U_{\max}}{\left(\frac{P_{incidente}}{4\pi}\right)}}$$

$$\boxed{G_{realized} = \left(1 - ||\Gamma||^2\right)\, G}$$

ENSEA
Beyond Engineering

Relation Gain – Directivité

$$D = \frac{U_{\max}}{\left(\frac{P_{ray}}{4\pi}\right)}$$

On a donc:

$$G = \alpha \ D$$

Le gain d'une antenne, et sa directivité ont donc généralement des valeurs très proches.

Ces valeurs sont identiques pour une efficacité de 100 %.

Surface de captation

Cette notion s'applique à une antenne utilisée en réception. Cette valeur est équivalent à la valeur de la "surface effective" d'un capteur, en optique.

Soit $I(W/m^2)$, l'intensité de l'onde éclairant l'antenne.
Soit $P_{available}$, la puissance disponible aux bornes de l'antenne.
Soit α, l'efficacité.
La surface de captation S_c de l'antenne est donnée par:

$$S_c = \frac{P_{available}}{\alpha I}$$

On montre aussi que l'on a la relation suivante entre S_c et D:

$$\boxed{S_c = \frac{\lambda^2}{4\pi} D}$$

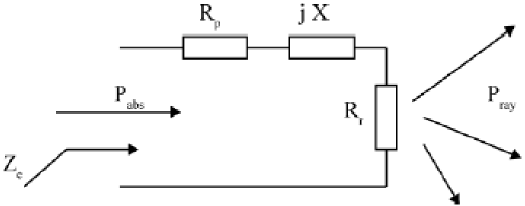
ENSEA
Beyond Engineering

Résistance de rayonnement

Soit I_{RMS}, la valeur efficace du courant à l'entrée de l'antenne. La résistance de rayonnement est définie par:

$$\boxed{R_r = \frac{P_{ray}}{I_{RMS}^2}}$$

Schéma électrique équivalent à l'entrée de l'antenne:



Résistance de rayonnement

La puissance totale rayonnée P_{ray} est donnée par:

$$P_{ray} = \int\int_{espace} U(\theta, \varphi) d\Omega = R_r.I_{RMS}^2$$

R_p est la résistance de pertes de l'antenne (pertes par effet Joule, ou pertes diélectriques)

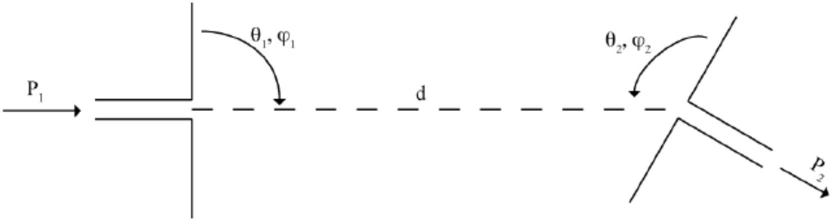
jX est la partie réactive de l'impédance de l'antenne, nécessairement présente, et qui sera étudiée ultérieurement.

L'efficacité est donnée par:

$$\alpha = \frac{R_r}{R_r + R_p}$$

ENSEA
Beyond Engineering

Bilan de liaison



Soit une liaison entre 2 antennes. Chaque antenne "pointe" vers l'autre dans la direction repérée par θ_i, φ_i.

On note P_2 la puissance reçue et P_1 la puissance émise, et l'on suppose que les antennes sont parfaitement adaptées. Alors:

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = G_1.G_2.\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2.r_1(\theta_1,\varphi_1).r_2(\theta_2,\varphi_2).\rho_p}$$

ENSEA
Beyond Engineering

Bilan de liaison

$r_1(\theta_1, \varphi_1)$ et $r_2(\theta_2, \varphi_2)$ sont les caractéristiques de rayonnement des antennes (coefficient positifs inférieurs ou égaux à 1)
ρ_p est le facteur de polarisation. Ce coefficient est aussi un coefficient positif inférieur ou égal à 1.
Le cas le plus favorable, que l'on choisit autant que possible, est celui où chaque antenne "pointe" vers l'autre, avec $\rho_p = 1$

Dans ce cas:

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = G_1.G_2.\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2}$$

Cette formule est appelée "*Formule de Friis*"

Cas d'antennes désadaptées

Dans le cas où les antennes sont désadaptées, la formule précédente devient de façon évidente:

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = G_1.G_2.\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 (1 - ||\Gamma_1||)^2.(1 - ||\Gamma_2||)^2}$$

Ou alors, en faisant apparaître les "gains réalisés" :

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = G_{r1}.G_{r2}.\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2}$$

ENSEA
Beyond Engineering

Désadaptation correspondant à un T.O.S. de 2

Définition du taux d'Ondes Stationnaires:

$$T.O.S. = \frac{1 + ||\Gamma||}{1 - ||\Gamma||}$$

On a par exemple pour $||\Gamma|| = \frac{1}{3}$, soit $||\Gamma||_{dB} = -9.54$ dB, soit un $T.O.S. = 2$:

$$(1 - ||\Gamma||)^2 = -0.51\ dB$$

Un T.O.S. de 2 se traduit donc par une perte en transmission de 0,5 dB.

Un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB (T.O.S. = 2) est souvent considéré comme suffisant pour une antenne.

ENSEA
Beyond Engineering

Polarisation circulaire

La somme de 2 ondes polarisées perpendiculairement entre elles, de même amplitude, et déphasées de $\pi/2$ donne une onde à polarisation circulaire:

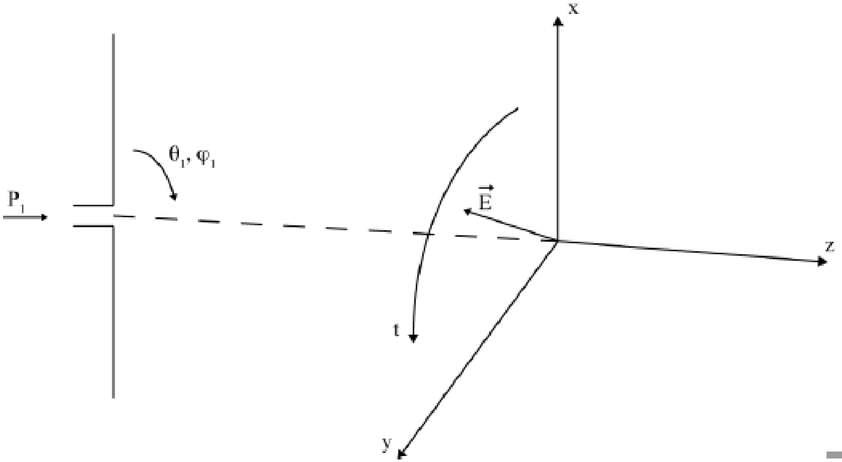
$$\boxed{\vec{E} = E_0 \left(\cos(\omega t)\vec{e_x} + \sin(\omega t)\vec{e_y}\right)}$$

La direction du champ électrique tourne en fonction du temps, à la fréquence de l'onde.
Dans le cas précis, si la composante en phase du champ est portée par Ox, alors la composante en quadrature (de phase) est portée par Oy.

ENSEA
Beyond Engineering

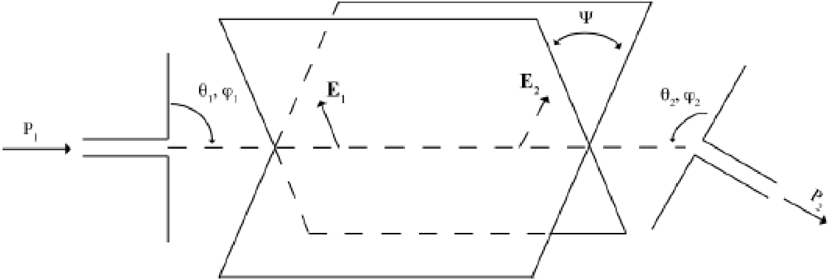
Polarisation circulaire

Si, en un point donné, la composante sur y est en retard de $\pi/2$ sur la composante sur x, alors le champ électrique tourne comme indiqué sur la figure, et l'on est en **polarisation circulaire droite**:



Coefficient de polarisation (polarisation linéaire)

Cas de 2 antennes à polarisation linéaire:



E_1 et E_2 conservent la même direction, tout le long de la ligne qui relie les 2 antennes. Dans ce cas, si on note Ψ, l'angle entre les 2 plans de polarisation des antennes:

$$\boxed{\rho_p = \cos^2(\Psi)}$$

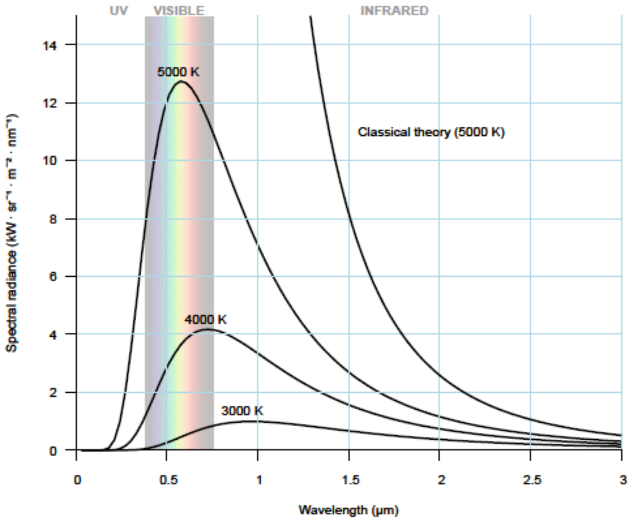
Coefficient de polarisation (polarisation circulaire)

Pour une onde à polarisation circulaire, les composantes en phase et en quadrature sont (géométriquement) perpendiculaires entre elles.

- Cas de 2 antennes à polarisation circulaire droite: $\rho_P = 1$
- Cas de 2 antennes à polarisation circulaire gauche: $\rho_P = 1$
- Une droite et une gauche: $\rho_P = 0$
- Une antenne à polarisation linéaire et une antenne à polarisation circulaire: $\rho_P = \frac{1}{2}$

ENSEA
Beyond Engineering

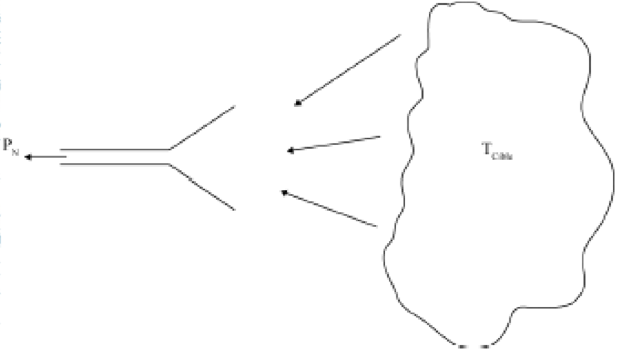
Rayonnement de corps noirs



ENSEA
Beyond Engineering

Bruit reçu par une antenne

Soit une antenne, totalement entourée d'une “cible”, à la température T_{cible}:



La puissance de bruit reçue est donnée par:

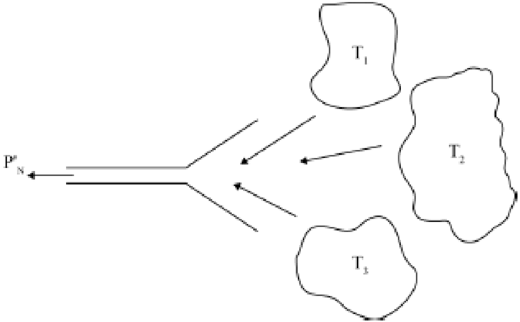
$$\boxed{P_{bruit} = k.T_{cible}.\Delta f}$$

(On est du côté droit de la figure précédente, où le bruit thermique est proportionnel à la température)

ENSEA
Beyond Engineering

Bruit reçu par une antenne

Si l'antenne est entourée de plusieurs objets à des températures différentes:



La puissance de bruit reçue est donnée par:

$$P'_N = k.T_A.\Delta f$$

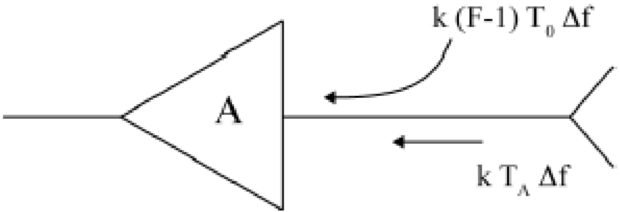
où T_A représente une "température de bruit moyennée".

Pour une antenne terrestre très directive pointée vers un satellite, T_A est très faible:

$$T_A \approx 10\ K$$

Bruit reçu par une antenne

Avec un pré-amplificateur connecté à l'antenne:



F étant le facteur de bruit du pré-amplificateur, et T_0 la température de référence (en général 290 K)

Température totale de bruit ramenée à l'entrée:

$$\boxed{T_{\text{totale ramenée}} = T_A + (F-1).T_0}$$