

# LES ANTENNES - BILAN DE LIAISON



## Compétences visées:

- Connaître le principe de fonctionnement d'une antenne et le lien entre la longueur d'onde de l'onde et la longueur de l'antenne.
- Savoir exploiter la documentation d'une antenne afin de déterminer ses caractéristiques : impédance d'entrée, directivité, angle d'ouverture, gain en dBi et polarisation.
- Savoir déterminer la puissance isotrope rayonnée équivalente (P.I.R.E).
- Effectuer un bilan de liaison, la formule de Friis étant donnée (en W ou en dBm)

## Table des matières

<b>I</b>	<b>Principe de fonctionnement d'une antenne</b>	<b>3</b>
A	Le rôle des antennes . . . . .	3
B	Les ondes électromagnétiques . . . . .	3
B-1	Propriétés des ondes électromagnétiques . . . . .	3
B-2	Structure d'une onde électromagnétique plane progressive . . . . .	5
B-3	Polarisation d'une onde électromagnétique . . . . .	5
<b>II</b>	<b>Caractéristiques techniques d'une antenne</b>	<b>7</b>
A	Impédance d'une antenne . . . . .	7
B	Directivité . . . . .	7
B-1	Diagramme de rayonnement . . . . .	8
B-2	Antenne isotrope . . . . .	8
B-3	Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente (PIRE) . . . . .	12
<b>III</b>	<b>Bilan de liaison</b>	<b>14</b>

# I Principe de fonctionnement d'une antenne

## A Le rôle des antennes

### 📄 Définition : Conversion électrique/electromagnétique

Une antenne convertit **un signal électrique** en **onde électromagnétique**, ou inversement.

### 🔄 Propriété : Sens de conversion

Une antenne peut être utilisée dans les deux sens :

- Conversion **électrique** → **électromagnétique**, lors de **l'émission**.
- Conversion **électromagnétique** → **électrique**, lors de la **réception**.

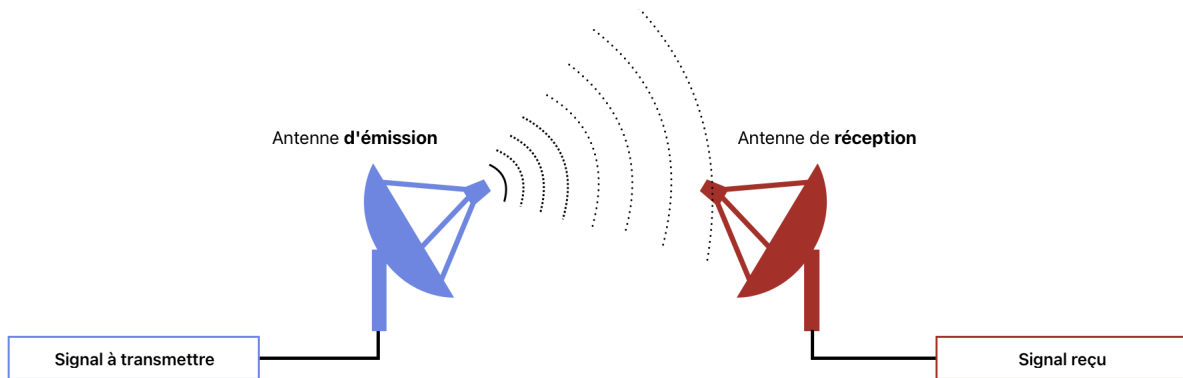


FIGURE 1 – Schéma de principe de fonctionnement d'une antenne

## B Les ondes électromagnétiques

### B-1 Propriétés des ondes électromagnétiques

#### 🔄 Propriété : Propagation des ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques se propagent dans le vide et dans certains milieux matériels. Leur célérité dans le vide est :

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

#### 🔄 Propriété : Lien entre fréquence, vitesse et longueur d'onde

La relation entre la fréquence  $f$ , la longueur d'onde  $\lambda$  et la célérité  $c$  est :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

**Rappel**

La longueur d'onde correspond à la distance parcouru par l'onde durant une période.

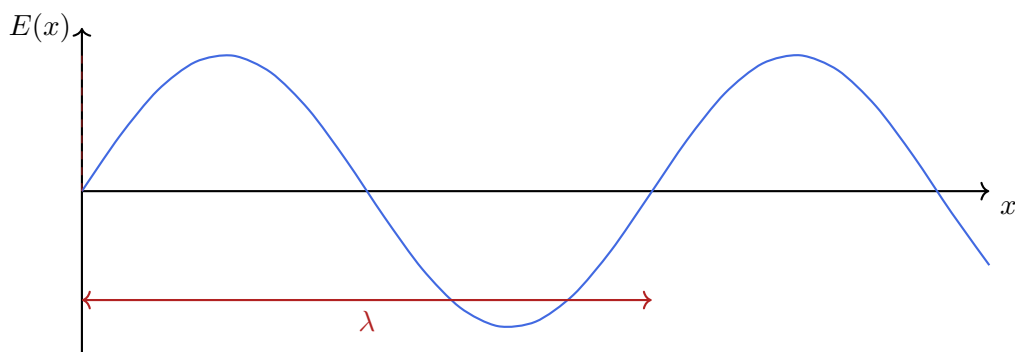


FIGURE 2 – Longueur d'onde d'une onde sinusoïdale

**Définition : Spectre électromagnétique**

Vous trouverez ci-contre, le **spectre électromagnétique** qui regroupe toutes les ondes électromagnétiques classées selon leur fréquence (ou leur longueur d'onde) :

- ondes radio
- micro-ondes
- infrarouge
- lumière visible
- ultraviolet
- rayons X
- rayons gamma

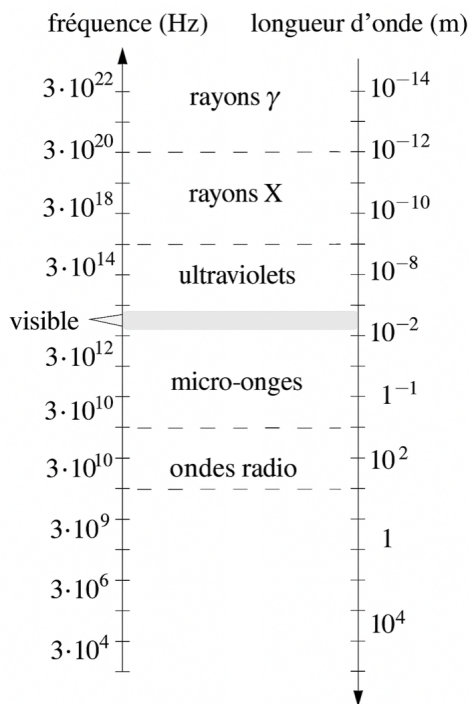
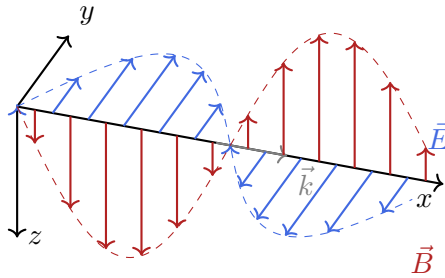


FIGURE 3 – Spectre électromagnétique - Dunod PC/PC\*

**B-2 Structure d'une onde électromagnétique plane progressive**

**Définition : Structure OEMPP**

Une onde électromagnétique plane progressive est constituée de deux champs vectoriels sinusoïdaux : un champ électrique  $\vec{E}$  et un champ magnétique  $\vec{B}$ , orthogonaux entre eux et à la direction de propagation.



**B-3 Polarisation d'une onde électromagnétique**

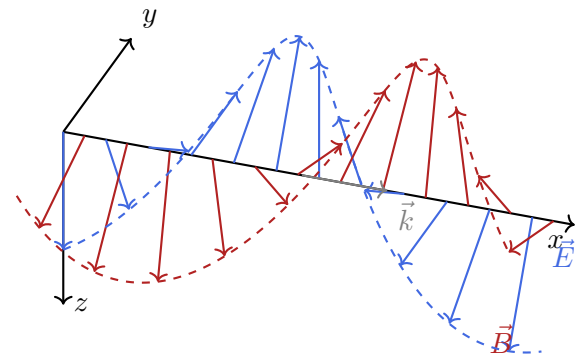
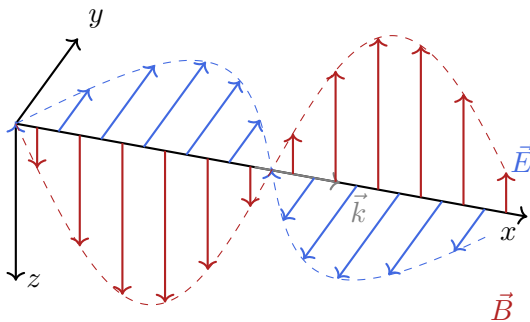
**Définition : Polarisation**

La polarisation d'une onde électromagnétique décrit l'évolution du vecteur champ électrique  $\vec{E}$  dans le temps.

**Propriété : Polarisation rectiligne et circulaire**

La **Polarisation rectiligne** :  $\vec{E}$  reste dans une direction fixe.

La **Polarisation circulaire** : l'extrémité de  $\vec{E}$  varie et décrit un cercle.



**Attention : Compatibilité de polarisation entre antennes**

Pour qu'une communication par onde électromagnétique soit efficace, il est essentiel que l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice soient de même polarisation. Si ce n'est pas le cas, une partie, voire la totalité de la puissance transmise est perdue.


 Remarque

C'est pourquoi les antennes dites "râteau" (antennes Yagi que l'on trouve sur les toits) sont souvent orientées selon une direction bien précise : elles sont conçues pour recevoir des ondes rectilignement polarisées. Leur géométrie (alignement d'éléments parallèles) est en lien direct avec cette polarisation.

Les antennes satellites, comme les paraboles, utilisent souvent une polarisation circulaire. Cela permet d'éviter les pertes dues à une mauvaise orientation de l'antenne réceptrice. En effet, si l'onde est circulairement polarisée, peu importe l'orientation de l'antenne réceptrice (tant qu'elle est adaptée à la polarisation circulaire droite ou gauche), la puissance reçue reste constante.

 Propriété : Dimension des antennes

La taille d'une antenne est généralement **proportionnelle à la moitié de la longueur d'onde** pour être efficace.

 Exercice 1 **Choix des antennes pour différents signaux (★)**

Soit deux fréquences très différentes :  $f_1 = 100 \text{ kHz}$  (radio AM) et  $f_2 = 5 \text{ GHz}$  (WiFi).

- Q1** Calculer la longueur d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  correspondant à ces fréquences.
- Q2** En déduire la taille approximative des antennes efficaces ( $\lambda/2$ ) pour ces deux fréquences.
- Q3** Expliquer pourquoi les antennes utilisées pour la radio AM sont beaucoup plus grandes que celles pour le WiFi.

 Exercice 2 **Antennes Radio ? (★★)**

Pour transmettre la radio, on pourrait envisager d'émettre des signaux électromagnétiques ayant les mêmes fréquences que les sons audibles (audiofréquences), entre 20 Hz et 20 kHz.

- Q1** Calculer les longueurs d'ondes dans l'air (assimilable au vide) de telles ondes électromagnétiques et montrer que la taille des antennes serait irréalisable.
- Q2** On transforme alors ces signaux par un procédé appelé modulation en fréquence (FM), qui leur donne des fréquences beaucoup plus élevées, entre 87,5 MHz et 108 MHz. Calculer les longueurs d'ondes dans l'air des ondes radio FM, et en déduire l'ordre de grandeur de la taille des antennes nécessaires.

## II Caractéristiques techniques d'une antenne

### A Impédance d'une antenne

#### Propriété : Impédance d'une antenne

L'impédance d'une antenne est **sa principale caractéristique électrique** et s'exprime généralement en ohms ( $\Omega$ ).

- Elle dépend de la fréquence du signal transmis ou reçu.
- Pour maximiser le transfert de puissance et éviter les ondes réfléchies, il faut **adapter l'impédance** de l'antenne à celle du câble coaxial et du générateur.
- Une mauvaise adaptation cause des pertes et des perturbations du signal.

### B Directivité

#### Définition : Directivité

La directivité d'une antenne caractérise la façon dont cette antenne concentre le rayonnement dans certaines directions de l'espace.

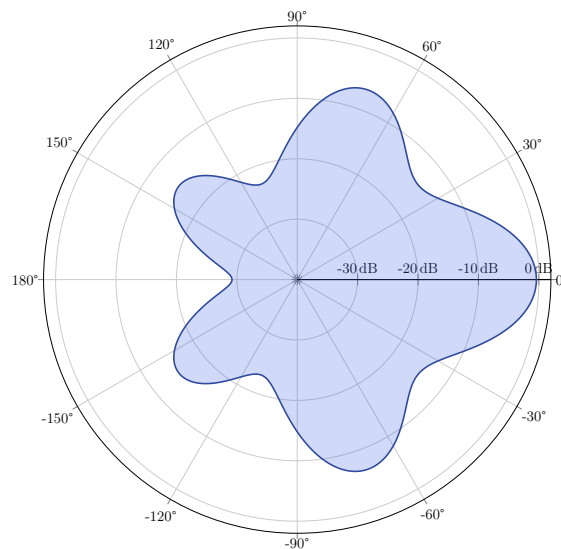
#### Remarque

Pour visualiser les directions dans lesquelles les antennes émettent/rayonnent, on trace son **diagramme de rayonnement**.

## B-1 Diagramme de rayonnement

### 📖 Définition : Diagramme de rayonnement

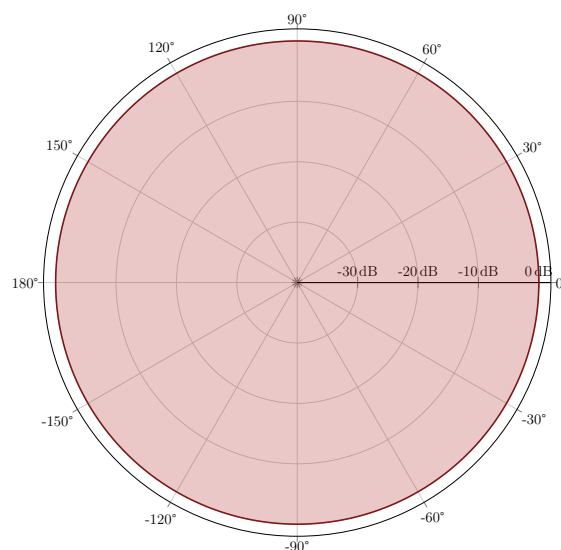
Le diagramme de rayonnement représente la répartition spatiale de la puissance émise par une antenne, en fonction des angles de direction. Il permet de visualiser la directivité et l'angle d'ouverture du faisceau principal.



## B-2 Antenne isotrope

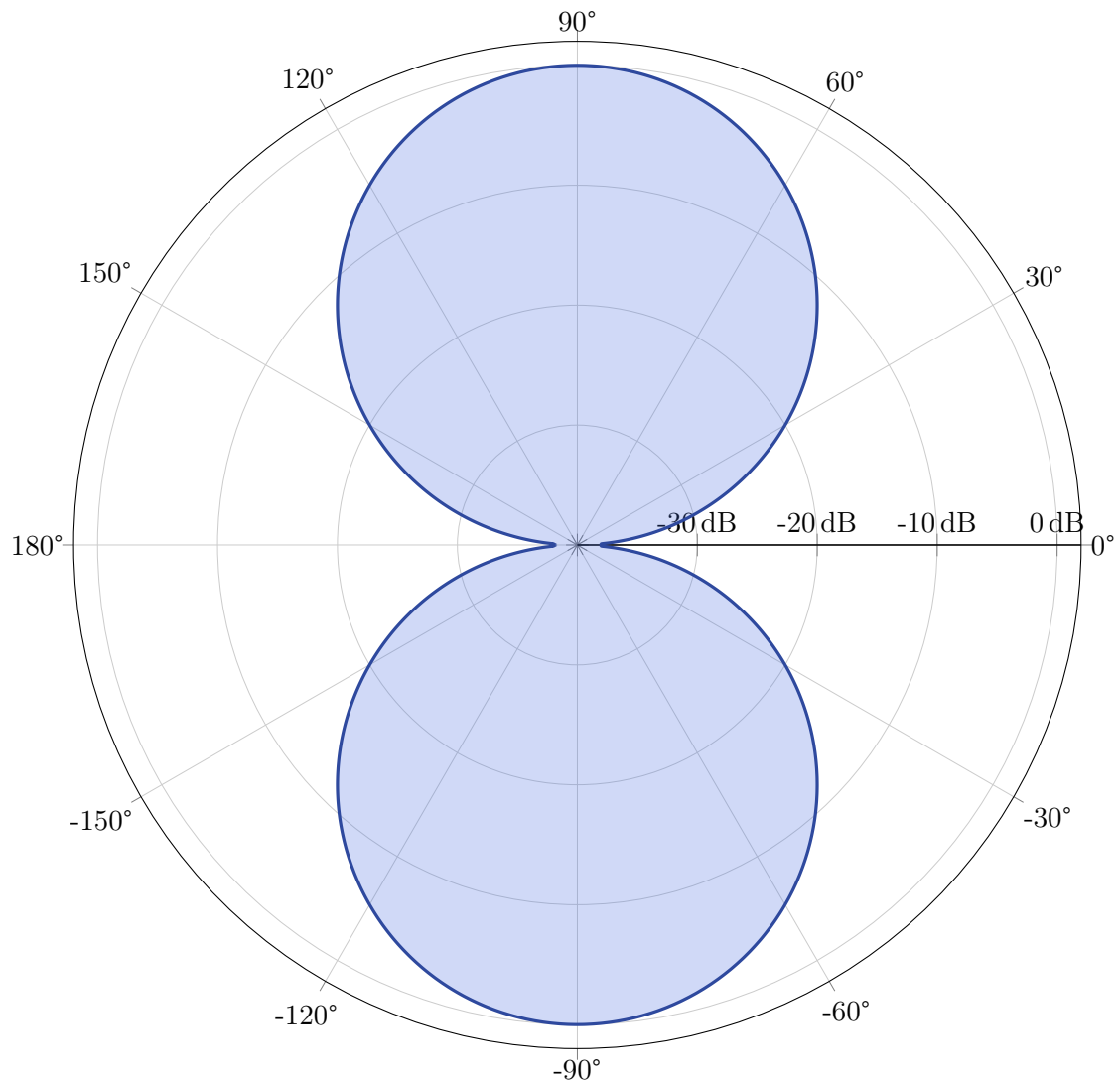
### 📖 Définition : Antenne isotrope

Une antenne isotrope est une antenne théorique qui rayonne uniformément dans toutes les directions de l'espace (forme d'une sphère). Elle est utilisée comme référence pour mesurer la directivité et le gain des antennes réelles.

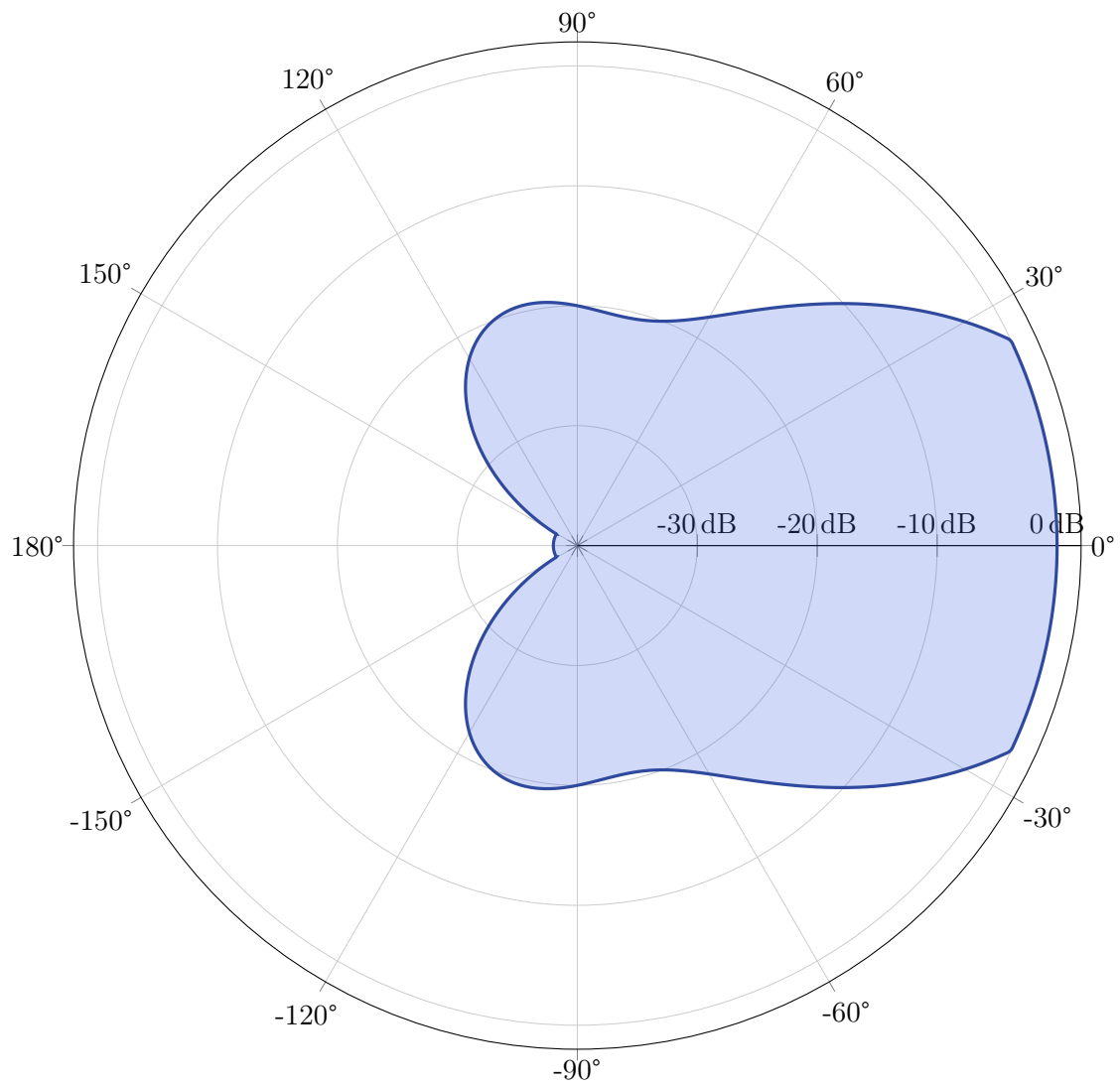


**Propriété : Angle d'ouverture**

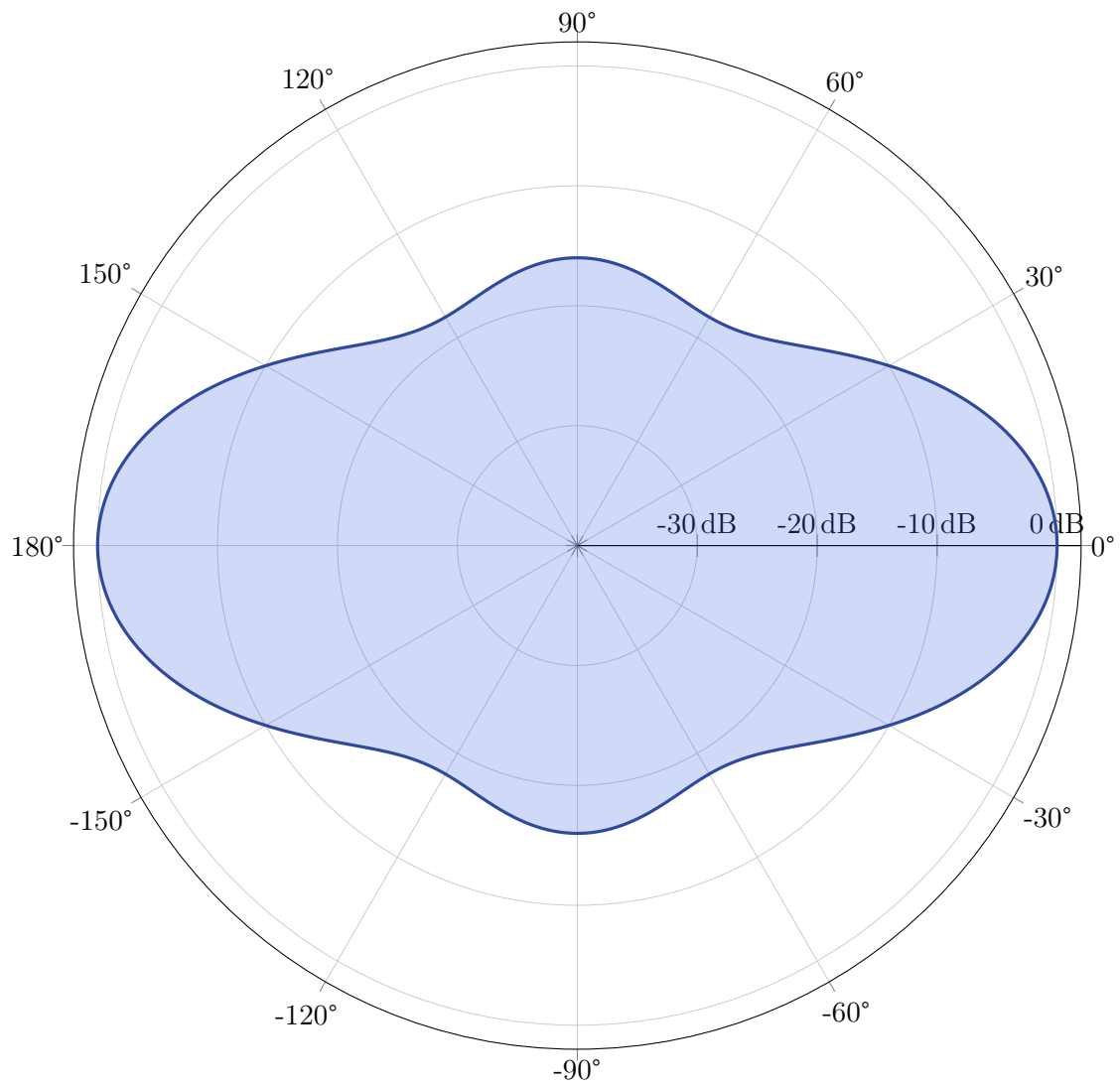
On appelle angle d'ouverture l'angle dans lequel le gain de l'antenne reste supérieur à  $G_{max} - 3 \text{ dB}$ .

**Exercice 3 Antenne 1 (★ ★)**

- Q1** Quelle est la (ou les) valeur maximale du gain observée sur ce diagramme ?
- Q2** À quel angle  $\theta$  se situe ce (ou ces) maximum ?
- Q3** Estimer l'angle d'ouverture à -3 dB.
- Q4** Quelle est l'atténuation en dB pour  $\theta = 30^\circ$  ?

**Exercice 4** Antenne 2 (★ ★)

- Q1** Identifier le lobe principal et les lobes secondaires.
- Q2** Déterminer l'angle à -3 dB du lobe principal.
- Q3** Estimer le niveau relatif des lobes secondaires par rapport au lobe principal (*il faut comparer le maximum du lobe principal au maximum des lobes secondaires*).
- Q4** Quelle est l'atténuation pour  $\theta = 120^\circ$  ?

**Exercice 5** Antenne 3 (★ ★)

- Q1** Identifier si l'antenne est quasi isotrope ou directionnelle.
- Q2** Déterminer le gain maximum et l'angle où il se situe.
- Q3** Tracer ou indiquer les points -3 dB sur le diagramme.
- Q4** Pour  $\theta = 60$ , quelle est l'atténuation ?

### B-3 Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente (PIRE)

#### 📖 Définition : PIRE

La PIRE est la puissance qu'une antenne isotrope devrait émettre pour produire dans une direction donnée la même intensité de champ qu'une antenne réelle.

$$\text{PIRE} = P_0 \times G$$

où

- $P_0$  est la puissance réellement émise par l'antenne,
- $G$  est le gain de l'antenne dans la direction considérée (sans unité).

En décibels, cela s'écrit :

$$\text{PIRE}_{\text{dBm}} = P_0^{\text{dBm}} + G_{\text{dBi}}$$

#### ⚠ Attention : Conversion mW en dB

On passe de l'expression en milliwatt à l'expression en décibel à partir de la relation du niveau de puissance :

$$P_{\text{dBm}} = 10 \times \log\left(\frac{P_{\text{mW}}}{1_{\text{mW}}}\right)$$

#### ✎ Exercice 6 Application directe (★)

**Q1** Calculer la PIRE d'une antenne de gain 12 dBi alimentée par une puissance  $P_e$  de 5 mW.

#### ✎ Exercice 7 Calcul de PIRE dans un bilan de liaison - BTS CIEL 2025 (★)

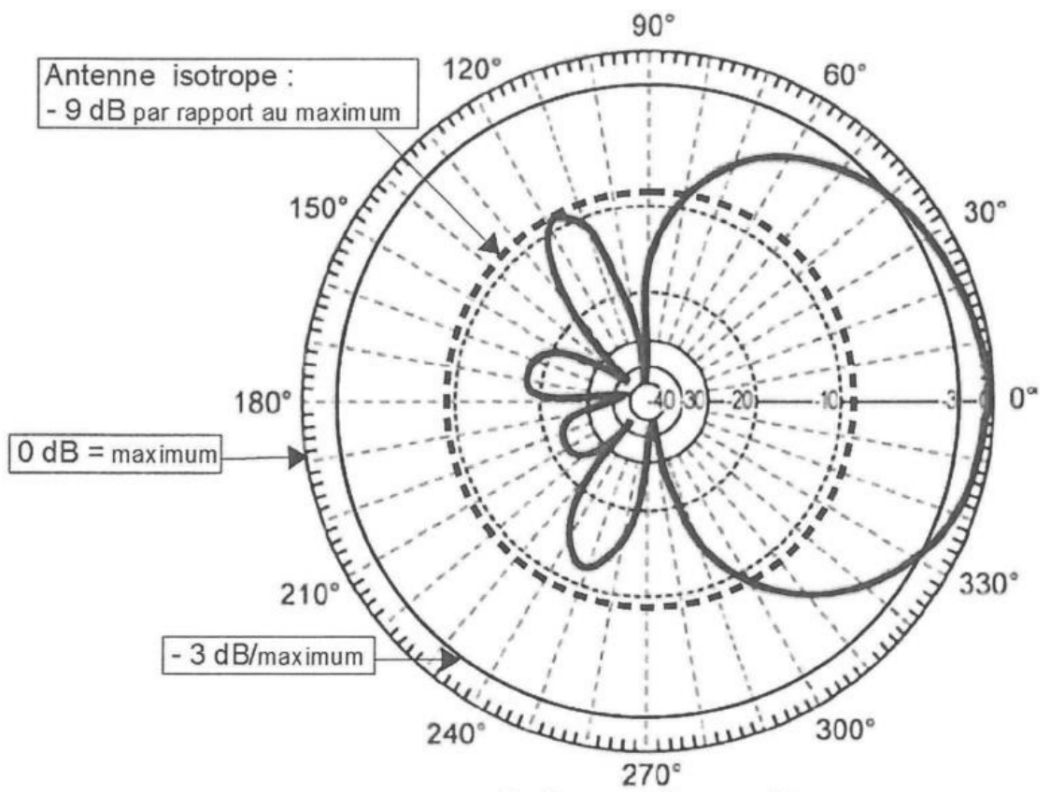
Le module émetteur émet un signal de puissance noté  $P_e$  d'une puissance de 25 mW autour de la fréquence de 868 MHz imposée.

**Q1** Calculer le niveau de puissance en dBm noté  $P_e$  émis par le module émetteur.

Electrical Data	
Frequency Range (MHz)	868 MHz
Peak Gain †	2dBi
Typical VSWR*	<2.5:1
Polarisation	Vertical
Pattern	Omni-directional
Impedance	50Ω
Max input power (W)	20

- Q2 Relever sur la documentation ci-dessus le gain  $G_e$  de l'antenne émettrice.
- Q3 Montrer que la PIRE est de 16 dBm.

**Exercice 8** Antenne intégrée directive (★★)



- Q1 Déterminer la valeur de l'angle d'ouverture  $\theta$  de cette antenne. On justifiera ses mesures par des constructions graphiques soignées.
- Q2 Représenter en rouge sur la figure le diagramme de rayonnement de l'antenne isotrope.
- Q3 Calculer la PIRE en DBm de cette antenne alimentée par une puissance  $P_e = 65mW$ .

### III Bilan de liaison

#### Définition : Bilan de liaison

Le bilan de liaison permet d'estimer la puissance reçue  $P_r$  à partir de la puissance émise  $P_t$ , des gains des antennes et des pertes sur le trajet.

$$P_r = P_t \times G_t \times G_r \times \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \times L$$

avec :

- $P_t$  : puissance émise par l'antenne émettrice,
- $G_t, G_r$  : gains respectifs des antennes émettrice et réceptrice,
- $\lambda$  : longueur d'onde,
- $d$  : distance entre les antennes,
- $L$  : pertes diverses (câbles, obstacles, etc., avec  $0 < L \leq 1$ ).

Cette formule s'appuie sur le modèle de propagation en espace libre.

#### Exercice 9 **Emetteur radio** (★)

Un émetteur radio transmet une puissance  $P_t = 10 \text{ W}$  avec une antenne dont le gain est  $G_t = 10$  (en valeur absolue). La station réceptrice possède une antenne avec un gain  $G_r = 5$ .

La distance entre les deux antennes est  $d = 2 \text{ km}$ , la fréquence est  $f = 900 \text{ MHz}$ , et les pertes sont négligeables.

**Q1** Calculez la longueur d'onde  $\lambda$ .

**Q2** Calculez la puissance reçue  $P_r$  en utilisant la formule de Friis :

$$P_r = P_t \times G_t \times G_r \times \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \times L$$

**Q3** Exprimez la puissance reçue en dBm.


**Q4** Si la distance entre les antennes double, quelle sera la nouvelle puissance reçue  $P'_r$  ?

**Q5** Si le gain de l'antenne réceptrice est multiplié par 2, quelle est la nouvelle puissance reçue  $P''_r$  ?

**Q6** Quelle serait la distance maximale  $d_{\text{max}}$  pour que la puissance reçue reste supérieure à  $1 \text{ mW}$  ?

#### Rappel

La vitesse des ondes radios est égale à la vitesse de la lumière.

 Exercice 10 Bilan de liaison - *BTS SN 2018* (★ ★)

## Partie C. Bilan de liaison des modulations LoRa

### Problématique : vérification des performances annoncées d'une modulation LoRa

La portée d'une modulation FSK est d'un kilomètre maximum.

Un technicien cherche à déterminer la portée des modules utilisant la modulation LoRa de fréquence porteuse  $f_p$ , valant 869,525 MHz. Il dispose d'antennes adaptées pour le Wifi dont le gain, exprimé en dBi, est défini par  $G_i = -185,6 + 20 \cdot \log(f)$ , avec  $f$  en Hz.

**Q51.** Calculer le gain d'antenne  $G_i$  à la fréquence d'utilisation  $f_p$

Le technicien utilise un module de puissance d'émission  $P_e$  qui vaut 20 dBm.

Le bilan de liaison et les gains d'antenne, pour une distance de propagation  $d$  de 100 m, sont donnés sur le document réponses page DR-SP4.

En milieu urbain, l'équation de propagation donne le gain dû à la propagation  $G_{p,opa} = -40 \cdot \log(d) - 4$  avec  $d$  distance en mètres.

**Q52.** Calculer le gain noté  $G_{propa}$  dû à la propagation, la puissance captée par l'antenne de réception, notée  $P_{captée}$ , et la puissance reçue, notée  $P_{reçue}$ , en vous aidant du bilan de liaison puis indiquer leurs valeurs respectives sur le document réponses page DR-SP4.

Un extrait de la documentation du module LoRa utilisé est donné ci-dessous :

- Fréquences : 865-870 MHz
- Débit RF : de 180 à 10 000 bps
- Modulation : CSS (LORA)
- Puissance de sortie 14/20 dBm
- Sensibilité : -142 dBm
- Liaison radio : 161 dB
- Portée jusqu'à 25 km



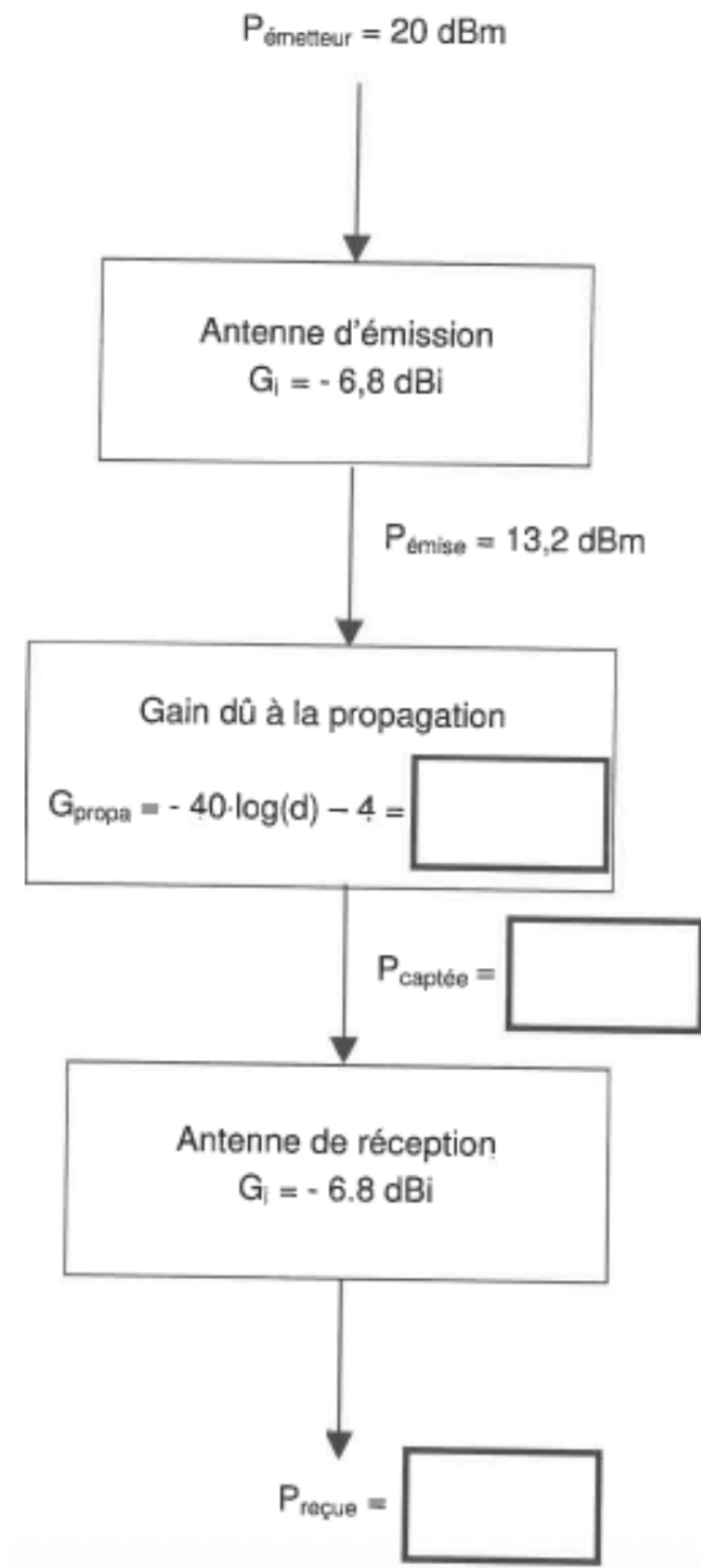
La sensibilité d'un récepteur correspond à la puissance minimale reçue assurant une bonne réception. Elle est notée  $P_{reçue\ min}$ .

**Q53.** Donner la valeur de la puissance minimale reçue  $P_{reçue\ min}$ .

**Q54.** Déterminer la portée théorique, notée  $d_{max}$ , de la liaison LoRa.

La portée de la liaison LoRa est de l'ordre de 4 km.

**Q55.** Comparer la portée théorique à la portée d'une liaison FSK.





## Exercice 11

Détection d'avion - *BTS SNIR 2019* (★ ★ ★)**Partie C: Localisation de l'avion.**

Les informations de géolocalisation par GPS sont actuellement envoyées par un module Sigfox. Cette transmission utilise la totalité des 12 octets disponibles dans le protocole de Sigfox. Afin de libérer des octets pour transmettre les mesures de température et d'humidité, une solution envisagée est d'utiliser le service de géolocalisation intégré de Sigfox, basé sur le RSSI (Received Signal Strength Indicator).

**Problématique : Étude de la performance de la géolocalisation par un serveur RSSI.**

Le service de géolocalisation basé sur le RSSI, mesure la puissance d'un signal reçue par l'antenne Sigfox afin d'estimer la distance, notée  $d$ , entre l'émetteur et le récepteur.

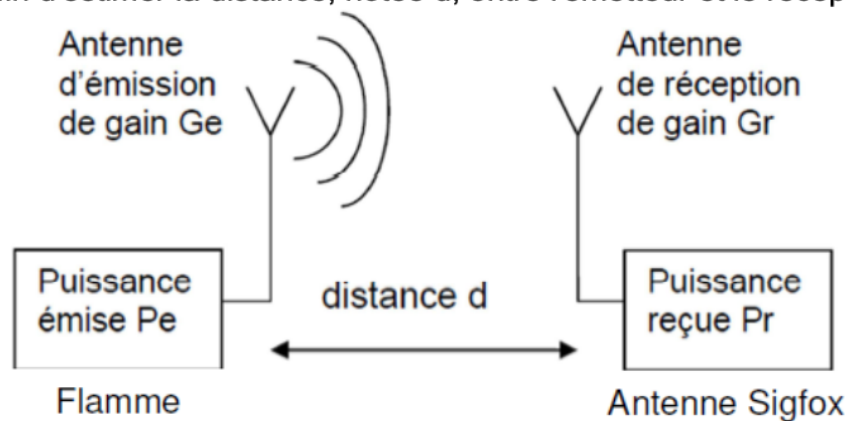


Figure 22

Le RSSI est la différence entre la puissance du signal  $P_r$  reçue au niveau de l'antenne et une puissance de référence  $P_{ref}$  :

$$RSSI = P_r - P_{ref}$$

La puissance reçue  $P_r$  au niveau d'une antenne Sigfox peut être liée à la puissance de l'antenne émettrice  $P_e$  par l'équation de Friis:

$$P_r = P_e + G_r + G_e + 20 \cdot \log\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right) - 20 \cdot \log(d) \text{ avec :}$$

RSSI en dBm : puissance du signal reçu par rapport à  $P_{ref}$ .

$P_{ref}$  en dBm : puissance de référence pour le RSSI

$P_r$  en dBm : le niveau de puissance reçue par l'antenne réceptrice.

$P_e$  en dBm : le niveau de puissance du signal émis par l'antenne émettrice.

$G_r$  en dBi : gain de l'antenne réceptrice.

$G_e$  en dBi : gain de l'antenne émettrice.

$\lambda$  en m : longueur d'onde des ondes électromagnétiques.

$d$  en m : distance entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice.

**Q45** Donner l'expression littérale de la constante  $K$ , en fonction  $P_e$ ,  $G_r$ ,  $G_e$ ,  $\lambda$  et  $P_{ref}$ , sachant que le RSSI peut se mettre sous la forme :

$$RSSI = K - 20 \cdot \log(d)$$

Des mesures ont démontré que la relation définissant le RSSI est légèrement différente de celle attendue théoriquement. Par conséquent, pour la suite du sujet la relation liant le RSSI et la distance de localisation sera :

$$RSSI = - 55,0 - 25 \cdot \log(d)$$

**Q46** Calculer la distance à laquelle se trouve l'antenne réceptrice si le RSSI vaut  $-155$  dBm.