

Livret APP Composante Télécommunications

2022/2023



1 Rappel du contexte de l'APP

L'objectif général est de mesurer la qualité environnementale autour d'un usager.

Principaux cas d'utilisation

- Mesure de la qualité environnementale d'un poste de travail
- Mesure de la qualité environnementale dans des lieux publics
- Mesure du stress lié à l'environnement



2 Introduction

Dans la composante télécommunications de l'APP, on s'intéressera particulièrement au réseau permettant la communication des données entre les cartes (à concevoir dans la composante Electronique) et le site web (à développer dans la composante informatique).

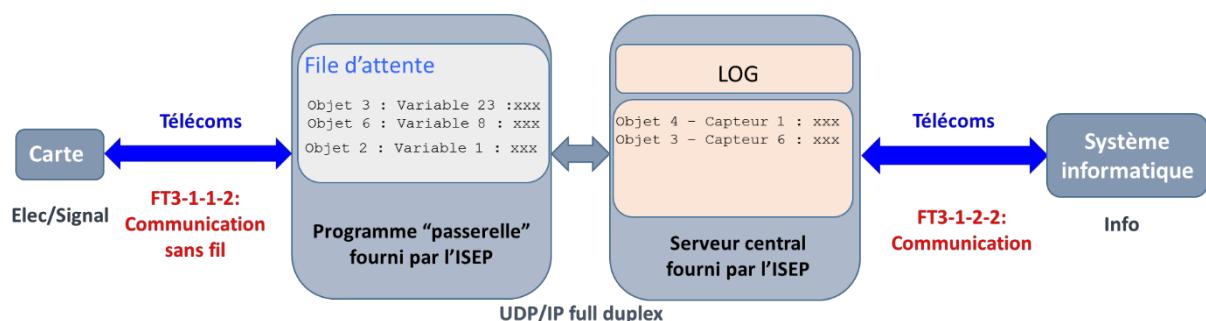


Figure 2.1 Contexte général de la mission

L'objectif de cette composante est de proposer des solutions aux fonctions indispensables du cahier des charges pour assurer la communication entre les cartes électroniques et la plateforme informatique. Votre mission est de fournir une recommandation sur les technologies ainsi que sur les équipements et le matériel à mettre en place pour assurer la connectivité entre les différents éléments du réseau.

Il est donc nécessaire de :

1. Identifier les éléments constituant le réseau ainsi que les différentes technologies de télécommunications utilisées,
2. Proposer un dimensionnement de ce réseau en évaluant le nombre de cartes électroniques à déployer sur une surface donnée dans un type d'environnement donné,
3. Proposer une possibilité d'interconnecter plusieurs réseaux.

3 Objectifs pédagogiques de la composante télécommunications

Les six compétences à acquérir lors de cette composante sont les suivantes :

1. **Bilan de liaison:** modèle d'affaiblissement, calcul de portée;
2. **Capacité d'un lien radio:** Calcul du rapport signal à bruit plus interférence, capacité de Shannon et efficacité spectrale;
3. **Radiofréquence et antennes:** caractéristiques des antennes et réglementation ;
4. **Test et validation:** mesures de puissances et débits;
5. **Vue systémique:** architecture générale d'un réseau;
6. **Déploiement d'un réseau:** dimensionnement et planification.

Ces compétences seront évaluées par groupe lors de l'APP et individuellement via un examen final. Le tuteur fera un retour via la fiche de compétences lors de chaque évaluation (individuelle ou par groupe).

4 Bureau d'études

L'objectif de ce bureau d'études est d'approfondir les notions fondamentales à savoir : les unités employées, la propagation radio, la forme de l'onde, les techniques d'accès et les antennes ;

Notions de base en Télécom

Le but de cette section est d'introduire les unités de télécommunications, la capacité de Shannon et les notions de base sur la bande passante et la fréquence porteuse.

4.1.1 Unités de Telecom

Definition 1 (Unités de telecom).

- La puissance en dBW est :

$$P(\text{dBW}) = 10 \log_{10} P(\text{W})$$

- La puissance en dBmW (ou en dBm tout court) est :

$$\begin{aligned} P(\text{dBmW}) &= 10 \log_{10} P(\text{mW}) \\ &= P(\text{dBW}) + 30. \end{aligned}$$

- En watt, la puissance reçue atténuée avec un coefficient de $\frac{1}{\alpha}$ est : $P_r(\text{W}) = \frac{1}{\alpha} P_t(\text{W})$.
En linéaire le coefficient de perte $\frac{1}{\alpha}$ est sans unité.
- La puissance reçue en dBm peut s'écrire :

$$P_r(\text{dBm}) = 10 \log_{10} P_r(\text{mW}) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\alpha} P_t(\text{mW}) \right) = P_t(\text{dBm}) - 10 \log_{10} \alpha.$$

- En échelle logarithmique, l'unité du facteur d'atténuation est le dB :

$$A(\text{dB}) = 10 \log_{10} (\alpha)$$

soit :

$$P_r(\text{dBW}) = P_t(\text{dBW}) - A(\text{dB}), \quad P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) - A(\text{dB}).$$

- Le rapport signal à bruit est un coefficient sans unité :

$$\text{SNR} = \frac{P_r(\text{W})}{P_{\text{bruit}}(\text{W})} = \frac{P_r(\text{mW})}{P_{\text{bruit}}(\text{mW})}.$$

- Le SNR est souvent exprimé en dB :

$$\text{SNR(dB)} = 10 \log_{10} (\text{SNR}) = P_r(\text{dBm}) - P_{\text{bruit}}(\text{dBm}) = P_r(\text{dBW}) - P_{\text{bruit}}(\text{dBW}).$$

dB: Gain

C'est un rapport entre deux puissances

Une valeur relative: $10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_e} \right)$

- 10 dB: Amplification de 10
- 20 dB: Amplification de 100
- 10 dB: Atténuation de 10
- 20 dB: Atténuation

dBm / dBw

Pour calculer des puissances: $P_{\text{dB}} = 10 \log_{10} (P_{\text{mw}})$

C'est une valeur absolue

$$\left\{ \begin{array}{l} 10 \text{ mw} \equiv 10 \text{ dBm} \\ 1 \text{ mw} \equiv 0 \text{ dBm} \\ 0.1 \text{ mw} \equiv -10 \text{ dBm} \end{array} \right.$$

Somme des dBs: $P_1(\text{dBm}) + P_2(\text{dBm})$
 $= 10 \log(P_1(\text{mw})) + 10 \log(P_2(\text{mw}))$

\neq $= 10 \log(P_1(\text{mw}) \times P_2(\text{mw}))$

Somme des puissances

Pour calculer la somme/moyenne
des puissances

- 1/ Conversion de dBm \rightarrow mW
- 2/ Calcul de la somme en mW
- 3/ Reconversion en dBm

$$\begin{aligned}
 dBW &= 10 \log_{10} W \\
 &= 10 \log_{10} 1000 \text{ mW} \\
 &= 30 \text{ dBm} \\
 dBW &= 10 \log_{10} \left(\frac{P}{I_W} \right)
 \end{aligned}$$

Convertir les unités suivantes :

- $P = 1 \text{ mW}$ en W ?, dBm ?, dBW ?

$$\begin{aligned}
 &= 10^{-3} \text{ W} \\
 &= 10 \log_{10} 10^{-3} \text{ dBW} = -30 \text{ dBW} \\
 &= 0 \text{ dBm}
 \end{aligned}$$

- $P = 1 \text{ W}$ en mW , dBW , dBm ?

$$\begin{aligned}
 &= 10^3 \text{ mW} \\
 &= 10 \log_{10} 1 \text{ dBW} = 0 \text{ dBW} \\
 &= 30 \text{ dBm}
 \end{aligned}$$

- $P = 21 \text{ dBm}$ en mW , W ?

$$\begin{aligned}
 &= 10^{\frac{P(\text{dBm})}{10}} \\
 &= 10^{2.1} \text{ mW} \\
 &= 10^{2.1} \times 10^{-3} \text{ W}
 \end{aligned}$$

- $P = -80 \text{ dBm}$ en mW , W ?

- Un signal atténué de 3 dB, coefficient de perte =?

$$\begin{aligned}
 A(\text{dB}) &= 10 \log_{10} (d) = 3 \\
 \Rightarrow d &= 10^{\frac{A(\text{dB})}{10}} \Rightarrow \frac{1}{d} = ?
 \end{aligned}$$

4.1.2 Bande passante et fréquence porteuse

Définition 2 (Bande passante et fréquence porteuse).

- Le signal possède deux représentations : temporelle et fréquentielle qui sont équivalentes vu que la puissance du signal reste la même avec les deux représentations.
- Le **spectre du signal** définit la variation de l'amplitude de la **transformée de Fourier** en fonction des fréquences.
- Pour un *signal pseudo-aléatoire*, la **densité spectrale de puissance** représente la répartition statistique de la puissance sur les fréquences.
- La **bande passante d'un signal** B est l'intervalle de fréquence dans laquelle la majorité de l'énergie du signal est contenue.
- Les signaux associés aux applications pratiques possèdent un spectre occupant *une bande autour de zéro* et sont dits **signaux en bande de base**.
- La **modulation** consiste à translater le spectre du signal en bande de base autour d'une fréquence dite **fréquence porteuse**.

- Pour extraire l'information au récepteur, le signal modulé doit être remis en bande de base en supprimant les oscillations induites par la fréquence porteuse. La remise du signal en bande de base au récepteur s'appelle **démodulation**.

Compléter par le mot convenable :

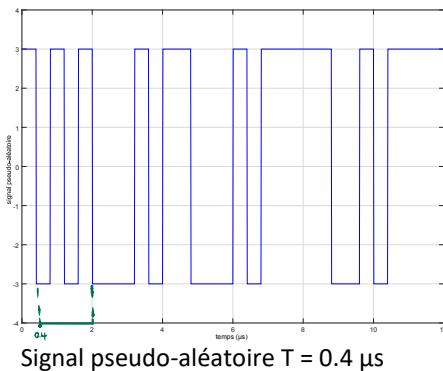
- Le spectre d'une voix aiguë est centré sur une fréquence plus (plus/moins/aussi) élevée que celui d'une voix grave, et la bande de fréquence occupée par la voix aiguë est aussi (plus/moins/aussi) large que celle d'une voix grave.
- Le spectre d'un signal haut débit occupe une bande de fréquence plus (plus/moins/aussi) large que le spectre d'un signal bas débit.
- En Ile de France, la radio RTL émet sur la fréquence porteuse 104.3 MHz. Sélectionner RTL sur un poste radio revient à effectuer un filtrage passe bande (passe haut/passe bas/passe bande) du signal. Le spectre du signal audio généré par le poste radio se trouve en bande de large (en bande de base / centré autour de la fréquence porteuse).

$$D = \frac{Q}{T}$$

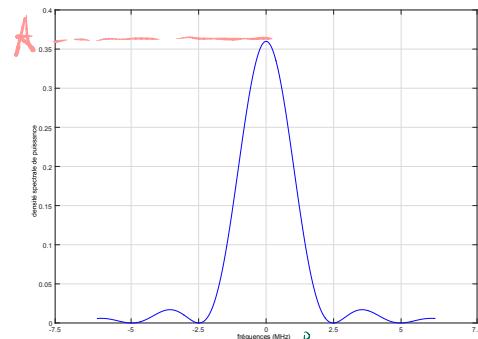
$$B = \frac{L}{T}$$

Un signal pseudo-aléatoire est illustré dans la Figure 4.1 :

伪随机



Signal pseudo-aléatoire $T = 0.4 \mu\text{s}$



Densité spectrale de puissance (f en MHz)

功率频谱密度

$$B = 5 \text{ MHz}$$

Figure 4.1 Signal pseudo-aléatoire

- Tracer sur la Figure 4.2 le spectre du signal modulé autour de la fréquence porteuse de 5 MHz.

$$\text{Débit} = \frac{\text{bits}}{\text{seconde}}$$

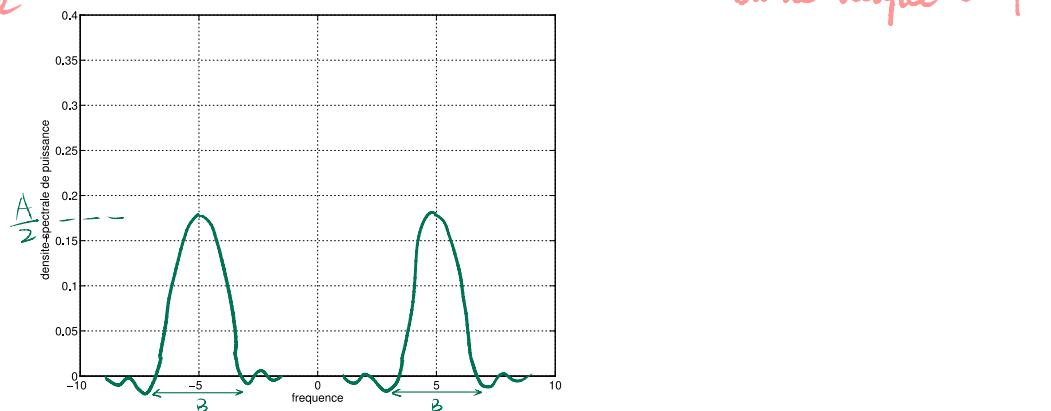


Figure 4.2 Spectre du signal modulé (f en MHz)

- Trouver la valeur de la bande passante du signal?

Quelles sont les valeurs distinctes véhiculées par le signal temporel de la Figure 4.1. Donner une représentation binaire à chacune de ces valeurs et déduire le débit.

4.1.3 Calcul du coefficient d'atténuation

衰減系数.

Définition 3 (Calcul des coefficients d'atténuation).

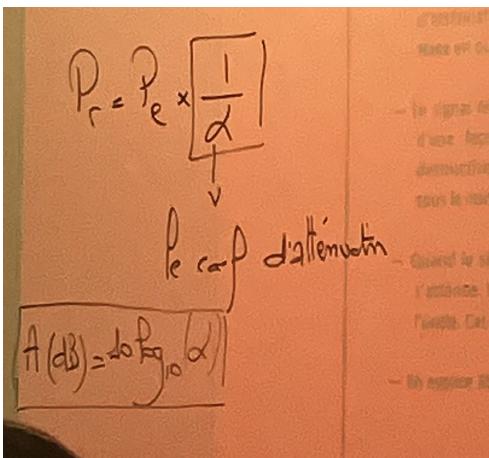
- Dans les transmissions sans fil, le coefficient d'atténuation dû au trajet dépend de la distance, de la fréquence, des hauteurs des antennes, du type du milieu (urbain, rural, suburbain).
- Il existe des modèles de propagation qui permettent de calculer ce coefficient d'atténuation. Les plus connus sont : le modèle d'**espace libre**, le modèle d'**Okumura Hata** en outdoor et le modèle **802.11** en indoor.
- Le signal émis sera transmis au récepteur via une infinité de trajets qui s'additionnent d'une façon **constructive** ou **destructive** d'une façon imprévisible. Les additions destructives contribuent à la disparition complète du signal. Ce phénomène est connu sous le nom de phénomène d'**évanouissement** ou **fading** en anglais.
- Quand le signal traverse les obstacles, une partie de son énergie lui est arrachée et il s'atténue. La taille de l'obstacle est comparée relativement par rapport à la longueur de l'onde. Cet effet est connu sous le nom d'**effet de masque** ou **shadowing** en anglais.
- En espace libre, la puissance reçue P_r en W s'écrit en fonction de la puissance P_e comme :

$$P_r = P_e \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

avec λ la longueur d'onde et d la distance entre l'émetteur et le récepteur.

- Montrer que le coefficient d'atténuation en dB peut s'écrire sous la forme :

$$A(\text{dB}) = 10 \log_{10} (\alpha)$$



$$P_r = \frac{1}{\alpha} P_e \Leftrightarrow \alpha = \frac{P_e}{P_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

$$A(\text{dB}) = 10 \log_{10} (\alpha) = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

$$\text{On sait que : } \lambda = \frac{c}{f} \text{ et } c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$A(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi f d}{c} \right)^2 = 20 \log_{10} (d_m) + 20 \log_{10} (f_{MHz}) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right)$$

$$\text{On a } d_m = d_{km} \times 10^3 \text{ et } f_{MHz} = f_{MHz} \times 10^6$$

$$A(\text{dB}) = 20 \log_{10} (d_{km} \times 10^3) + 20 \log_{10} (f_{MHz} \times 10^6) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right) \\ = 20 \log_{10} (d_{km}) + 60 + 20 \log_{10} (f_{MHz}) + 120 + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right)$$

Transmission indoor : En utilisant le modèle indoor de propagation indoor IEEE 802.11, le coefficient d'atténuation en dB est :

$$A_i(f, d) = \begin{cases} A_{EL}(d, f) & \text{si } d \leq d_s \\ A_{EL}(d, f) + 35 \log_{10} \left(\frac{d}{d_s} \right) & \text{si } d > d_s \end{cases}$$

avec d la distance entre l'émetteur et le récepteur.

- Dans un milieu résidentiel, $d_s = 5m$. Si $d > d_s$, montrer qu'en bande ISM 2.4 GHz :

$$A_i(f, d) = 15.5 + 55 \log_{10} d_m$$

- Calculer en dB et en échelle linéaire l'atténuation pour $d = 30m$.

$$\begin{aligned} A_i(f, d) &= 32.4 + 20 \log_{10} (d_{km}) + 20 \log_{10} (f_{MHz}) + 35 \log_{10} \left(\frac{d}{d_s} \right) \\ &= 32.4 + 20 \log_{10} (2400) + 35 \log_{10} (d_m) + (-35 \log_{10} (d_{sm}) + 20 \log_{10} (d_{km})) \end{aligned}$$

$$d_{km} = d_m \times 10^3 \text{ et } d_s = 5m$$

$$\begin{aligned} A_i(f, d) &= 32.4 + 20 \log_{10} (2400) - 35 \log_{10} (5) + 35 \log_{10} (d_m) + 20 \log_{10} (d_m \times 10^{-3}) \\ &= 32.4 + 20 \log_{10} (2400) - 35 \log_{10} (5) - 60 + 55 \log_{10} (d_m) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_i(f, d) &= 15.5 + 55 \log_{10} (d_m) \rightarrow 30m \\ \text{En } d_s : A_i(f, d) &= 15.5 + 55 \log_{10} (30) \\ &= 96.7 \text{ dB.} \end{aligned}$$

$$\text{En linéaire : } A(d_s) = 10 \log_{10} (\alpha)$$

$$A(\text{dB}) = 10 \log_{10} (\alpha)$$

$$\alpha = 10^{\frac{A(\text{dB})}{20}}$$

$$= 10^{9.67}$$

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{10^{9.67}} = \frac{10^0}{10^{9.67}}$$

$$= 10^{-9.67}$$

Transmission outdoor : Ce type d'environnement est souvent décrit par le modèle de Cost-Hata (voir la page 12 de « Modèles de propagation » sur Moodle). Les valeurs typiques de la hauteur d'une station de base sont $h_b = 30 \text{ m}$ et celle du mobile est de $h_m = 1.5\text{m}$

- Montrer que le coefficient d'affaiblissement en outdoor dans une zone urbaine s'écrit suivant le modèle d'Okumura Hata avec $f = 2.6 \text{ GHz}$ comme :

$$A_{Hata}(d) = 144 + 35 \log_{10} d_{km}$$

$$A = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10} h_b + (44.9 - 6.55 \log h_m) \log(d) - a(h_m) + C_m$$

avec f en MHz, d en km, h_m et h_b en m

$$\left\{ \begin{array}{l} a(h_m) = 3.2 [\log(11.75 h_m)]^2 - 4.97 \text{ pour } f \geq 400 \text{ MHz} \\ C_m = 0 \end{array} \right.$$

parce que m est en zone Urbains.

Transmission guidée (fibre optique ou un câble) : Sur un support de transmission, l'atténuation s'exprime en dB/km. Une valeur typique de l'atténuation sur une fibre optique est de 0.1 dB/km.

- Trouver le facteur d'atténuation en dB et en linéaire si le récepteur se trouve à 30 km de l'émetteur.

$$\text{atténuation}_{\text{tot}} = \text{atténuation}/\text{km} \times \text{nbre de km}$$

$$= 0.1 \times 30$$

$$= 3 \text{ dB}$$

En linéaires $A(\text{dB}) = 10 \log_{10}(\alpha) \Leftrightarrow \alpha = 10^{A/10}$

$$\frac{1}{\alpha} = 10^{-0.3}$$

4.1.4 Calcul du rapport Signal à Interférence Plus Bruit

Definition 4 (Bilan de liaison).

- A l'émetteur, la Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente (PIRE) est
PIRE [dBm] = Puissance de transmission [dBm] – Pertes dans les câbles et connecteurs [dB] + Gain de l'antenne [dBi]

- La puissance du signal atténué :

$$P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) + \text{Gains(dB)} - \text{Pertes(dB)}$$

- Le rapport du signal atténué à l'interférence plus le bruit ou en anglais **Signal to Interference and Noise** (SINR) s'écrit :

$$\text{SINR} = \frac{P_r(\text{mW})}{P_{\text{bruit}}(\text{mW}) + P_{\text{int}}(\text{mW})}$$

avec P_{bruit} la puissance du bruit en mW et P_{int} la puissance des interférents en mW.

- Au récepteur, le signal sera atténué et bruité. La puissance du bruit thermique en Watt est :

$$P_{\text{bruit}}(\text{W}) = KTB$$

avec K la constante de Boltzman ($K = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$), $T = 290 \text{ K}$ la température en Kelvin et B est la bande passante du signal en Hz.

- La puissance du bruit en dBm est :

$$P_{\text{bruit}}(\text{dBm}) = -174 \text{ dBm} + 10 \log_{10} B(\text{Hz})$$

$$1^{\circ}/A_2(\text{dB}) = 15.5 + 55 \log_{10}(d_m)$$

$$= 15.5 + 55 \log_{10}(30)$$

• Compléter le texte suivant :

$$A_2 = 96 \text{ dB}$$

$$2^{\circ}/A_2(\text{dB})$$

$$= 10 \log_{10}(d) = 96$$

$$\frac{1}{\alpha} = 10^{-9.6}$$

$$3^{\circ}/$$

$$P_r = \frac{1}{\alpha} P_e$$

$$P_r = 10^{-9.6} \times 0.5 \text{ mW}$$

4.1.5 Débit et efficacité spectrale

$$5^{\circ}/ P_I(\text{mW}) = 10 \quad P_I(\text{dBm}) / 10$$

$$P_I = 10^{-9} \text{ mW}$$

Pour une liaison Bluetooth Low Energy opérant en bande ISM avec une fréquence porteuse $f_0 = 2.4$

GHz entre un émetteur et récepteur situé à une distance $d = 30 \text{ m}$, l'affaiblissement en indoor

exprimé en dB est 96, soit sans unité $10^{-9.6}$. La puissance de l'émetteur est de 0.5mW,

la puissance reçue en mW est $0.5 \times 10^{-9.6}$ soit en dBm -99. Les interférents sont

estimés à -90 dBm soit en mW 10^{-9} . La bande de transmission en Bluetooth est de 2 MHz,

le bruit thermique en mW est alors 8×10^{-12} . Le rapport signal à bruit plus interférence sans

unité est 0.12 soit en dB -9.2.

$$4^{\circ}/ P_r(\text{dBm}) = 10 \log_{10}(P_{\text{mW}})$$

$$P_r(\text{dBm}) = -99$$

$$7^{\circ}/$$

$$\text{SINR} = \frac{P_r(\text{mW})}{P_b(\text{mW}) + P_I(\text{mW})}$$

$$\Leftrightarrow \text{SINR} = 0.12$$

$$8^{\circ}/ \text{SINR}(\text{dB})$$

$$= -10 \log_{10}(0.12)$$

$$= -9.2$$

Definition 5 (Débit et efficacité spectrale).

- Le **débit** d'un système de Télécom est défini par le nombre des bits envoyés pendant une seconde bits/s.
- Le débit transmis ne doit pas dépasser la capacité de Shannon du lien radio.
- Le débit théorique maximal pouvant être transmis sur un canal Gaussien bruité est donné par la **capacité de Shannon** :

$$C(\text{b/s}) = B \times \log_2(1 + \text{SINR})$$

avec SINR le rapport du signal à bruit plus interférence à la réception sans unité et PAS celui en dB et B est la largeur de la bande du signal émis en Hz.

- L'**efficacité spectrale** est le débit normalisé par la bande passante et elle est exprimée en bit/s/Hz.

- Compléter le texte suivant :

Dans l'exemple précédent avec une communication Bluetooth Low Energy, la capacité de Shannon est

alors 0.32 Mbps. Un débit cible de 0.5 Mbps correspond à une efficacité spectrale de 0.25 b/s/Hz

L'envoi d'un débit cible de 0.5 Mbps s'effectue (sans/avec) avec coupure de communication.

$$1^{\circ}/ C = B \times \log_2(1 + \text{SINR})$$

$$2^{\circ}/ \text{Eff. spec} = \frac{D}{B} = \frac{0.5 \times 10^6}{2 \times 10^6} = 0.25 \text{ b/s/Hz}$$

$$\begin{cases} B = 2 \text{ MHz} \\ \text{SINR} = 0.12 \end{cases}$$

$$3^{\circ}/ \text{Débit cible} = 0.5 \text{ Mb/s}$$

$$\text{Débit théorique max} = 0.32 \text{ Mb/s}$$

$$C = 0.32 \text{ Mb/s}$$

Le spectre électromagnétique

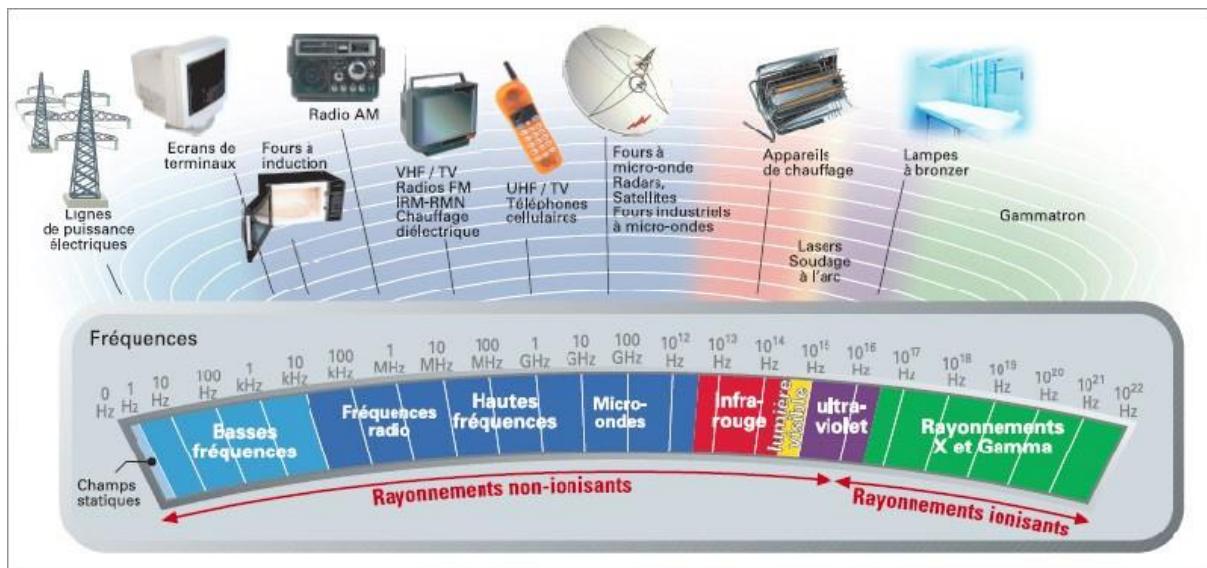


Figure 4.3 Le spectre électromagnétique

- Qui gère le spectre électromagnétique au niveau international? en Europe? en France? Citez trois affectataires du spectre électromagnétique en France?

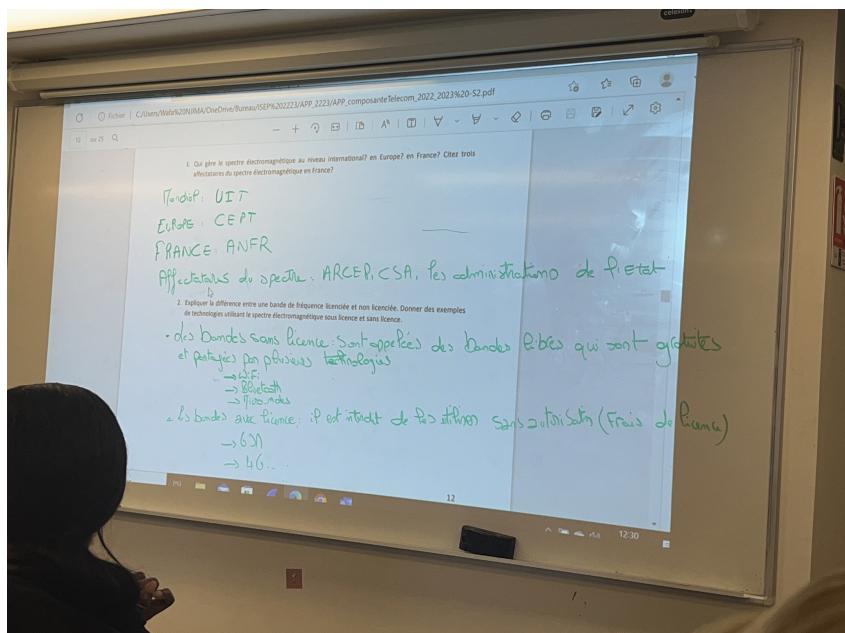
Mondial : UIT

Europe : CEPT

France : ANFR

affectataires du spectre :
ARCEP, CSA,
les administration de l'état

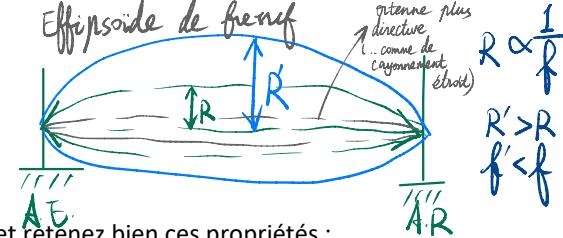
- Expliquer la différence entre une bande de fréquence licenciée et non licenciée. Donner des exemples de technologies utilisant le spectre électromagnétique sous licence et sans licence.



EL:

$$A_{\text{eff}}(df) = 32 + 20 \log_{10}(d_{\text{km}}) + 20 \log(f_{\text{MHz}})$$

$$P_r(\text{dBm}) = P_e(\text{dBm}) - A(\text{dB})$$

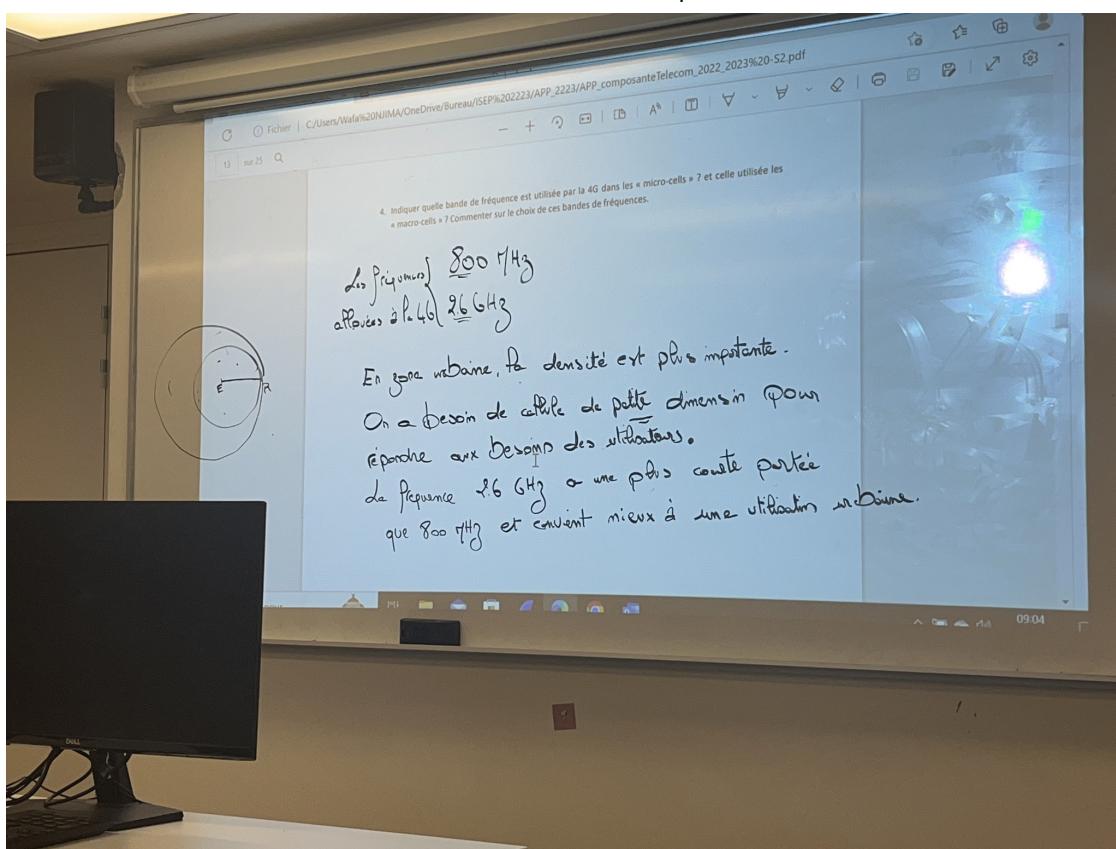


3. Propriétés des fréquences radio - Compléter et retenez bien ces propriétés :

- Plus la fréquence de la porteuse est élevée, plus l'affaiblissement de l'onde radio est élévé (élévé/faible) et plus la portée de l'onde est courte (courte/élévée).
- Plus la fréquence de la porteuse est élevée, plus la directivité de l'onde radio est élévée (élévée/faible).
- Plus la fréquence de la porteuse est élevée, plus la taille de l'antenne est petite (grande/petite).
- Plus la bande réservée sur le spectre exploité sous licence est large, le coût sera élévé (élévé/faible) et le débit est élévé (élévé/faible).

$$C(\text{Gb/s}) = B \times \log_2(1 + \text{SINR})$$

4. Indiquer quelle bande de fréquence est utilisée par la 4G dans les « micro-cells » ? et celle utilisée les « macro-cells » ? Commenter sur le choix de ces bandes de fréquences.



9 passerelles / Équipement

9 canaux

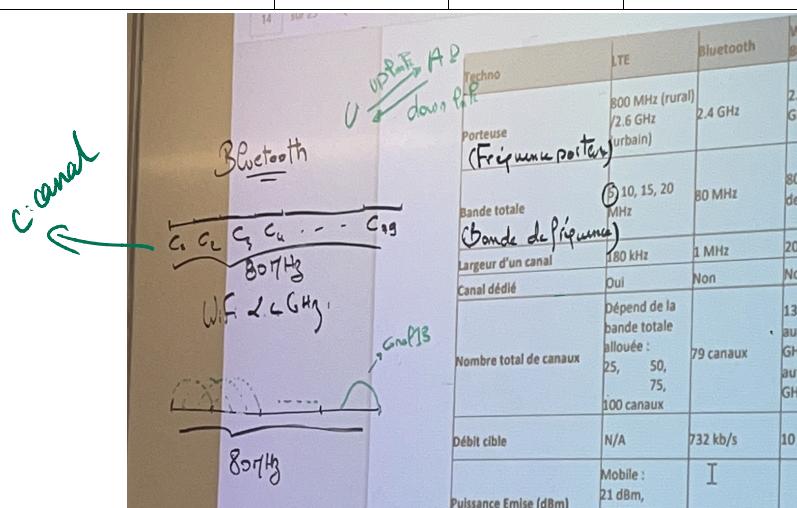
Technologies de transmission

Compléter la table suivante :

P₁, P₂, ..., P₂

Équipement ^{fonctionne} l'envie / des données sur un canal donné

Techno	LTE	Bluetooth	Wi-Fi 801.11n	Câble	Fibre optique
Porteuse ^{载波} <u>fréquence porteuse</u>	800 MHz (rural) /2.6 GHz (urbain)	2.4 GHz	2.4 GHz/ 5 GHz	Souple : 1 – 12 GHz, rigide > 60 GHz)	~ THz
F_{min} + $5MHz$	F_{max}				
<u>Bande totale</u> <u>bande de fréquence</u>	5, 10, 15, 20 MHz	80 MHz	80 MHz (autour de 2.4 GHz)	12 à 60 MHz suivant le diamètre du câble	Infinie
<u>Largeur d'un canal</u>	180 kHz	1 MHz	20 MHz	4 kHz	-
<u>Canal dédié</u>	Oui	Non	Non	Oui	Oui
<u>Nombre total de canaux</u>	Dépend de la bande totale allouée : 25, 50, 75, 100 canaux	79 canaux	13 canaux autour de 2.4 GHz et 19 autour de 5 GHz	2700 to 10800 channels	N/A
<u>Débit cible</u>	N/A	732 kb/s	10 à 70 Mb/s	34 à 140 Mb/s	~ Tb/s
<u>Puissance Emise (dBm)</u> <u>发射功率</u>	Mobile : 21 dBm, Station : 46 dBm	$P_e(dBm) = -3 dBm \downarrow 0 dBm$	$P_e(dBm) = 10 dBm \text{ pour } 2.4 GHz \text{ et } < 30 dBm \text{ pour } 5 GHz$	$P_e(dBm)$ entre 30 dBm et 40 dBm	30 dBm à 40 dBm
<u>Puissance Emise (W, mW)</u> <u>80 kHz</u>	Mobile : $10^{2.1} mW = 10^{2.1} \times 10^{-3} W$	0.5 à 1 mW	10 mW pour 2.4 GHz et < 1 W pour 5 GHz	1 W à 10 W	1 W à 10 W
<u>Distance maximale</u> <u>Sensibilité (dBm)</u> <u>接收灵敏度</u> <u>P_r(distance) = sensibilité</u> <u>P_r(distance) = sensibilité</u> <u>= P_e(dBm) A(dB)</u>	-102 dBm en uplink	-80 dBm	-90 à -75 dBm (en fonction du débit)		
<u>Atténuation de distance</u>	Okumura Hata	Modèle IEEE 802.11	Modèle IEEE 802.11	10 dB/km	0.1 à 3 dB/km
<u>Portée maximale</u>				2 à 9 km	50 km



Pour les câbles:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pour } d_{\max} = 2 : A_{\text{tot}}(dB) = A/\text{Km} \times n \text{ bloc/Km} \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad = 10 \times 2 \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad = 20 dB \\ \text{Pour } d_{\max} = 9 : \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad A_{\text{tot}}(dB) = 90 dB \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{\max} = 2 : \text{Sensibilité (dBm)} = P_e(dBm) - A_{\text{tot}}(dB) \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad = 30 - 20 \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad = -10 dBm \end{array} \right.$$

$$d_{\max} = 9 : \text{Sensibilité (dBm)} = 30 - 90 \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad = -60 dBm$$

Pour La Fibre

$d_{\max} = 50 \text{ km}$

$$A_{\text{tot}} = A/\text{km} \times n \text{ bloc/km} \\ = 50 \times 0,1 = 5 \text{ dB}$$

Sensibilité:

$$\text{Puissance} - A_{\text{tot}} = 30 - 5 \\ = 25 \text{ dBm}$$

$d_{\max} = 50 \text{ km}$

$$A_{\text{total}} = 3 \times 50 = 150 \text{ dB}$$

Sensibilité

$$40 - 150 = -110 \text{ dBm}$$

Pour LTE:

$$A(dB) = 141 + 35 \log_{10}(d_{\text{km}})$$

$$P_e = -21 \text{ dBm}$$

$$\text{Sensibilité} = P_r(d=d_{\max}) = -102$$

$$\underline{P_r(dBm)} = P_e(dBm) - A(dB)$$

$$A(dB) = P_e(dBm) - P_r(dBm)$$

$$141 + 35 \log_{10}(d_{\text{km}}) = -21 + 102 = 123$$

$$\log_{10}(d_{\text{km}}) = \frac{123 - 141}{35} = 123$$

Pour Bluetooth:

$$A(dB) = 15.5 + 55 \log(d_m)$$

$$P_e = -3 \text{ dBm}$$

$$\text{Sensibilité} = P_r(d=d_{\max}) = -80 \text{ dBm}$$

$$\boxed{P_r(dBm) = P_e(dBm) - A(dB)}$$

$$A(dB) = P_e(dBm) - P_r(dBm)$$

$$\text{Pour } d = d_{\max}, P_r = \text{Sensibilité}$$

$$15.5 + 55 \log(d_m) = -3 + 8 = 22 \text{ dB}$$

$$\log(d_m) = \frac{22 - 15.5}{55}$$

Bande totale

Largeur d'un canal

Canal dédié

Nombre total de canaux

Débit cible

Puissance Emise (dBm)

Puissance Emise (W)

Sensibilité (dBm)

Atténuation de distance

Portée

Antennes

Définition 6 (Diagramme de rayonnement, angle d'ouverture et tilt).

- Le **diagramme de rayonnement** ou **antenna radiation pattern** en anglais indique la distribution angulaire du rayonnement d'antenne. L'antenne émet son maximum d'énergie dans un axe privilégié dit **boresight** en anglais.
- En télécommunications, l'**ouverture** d'une antenne dit **aperture** ou **half-power angle** en anglais correspond à l'angle où la puissance émise par l'antenne est **supérieure à la moitié de la puissance rayonnée maximale**.

4.1.6 Diagramme de rayonnement d'une antenne

Le diagramme de rayonnement (DDR) d'une antenne (antenna pattern) émettant à $P_e = 20$ W est donné dans la Figure 4.4. Les Figure 4.4(e) et Figure 4.4(f) illustrent les DDR horizontal et vertical en fonction des angles θ = azimut et $\Phi = \frac{\pi}{2}$ – élévation.

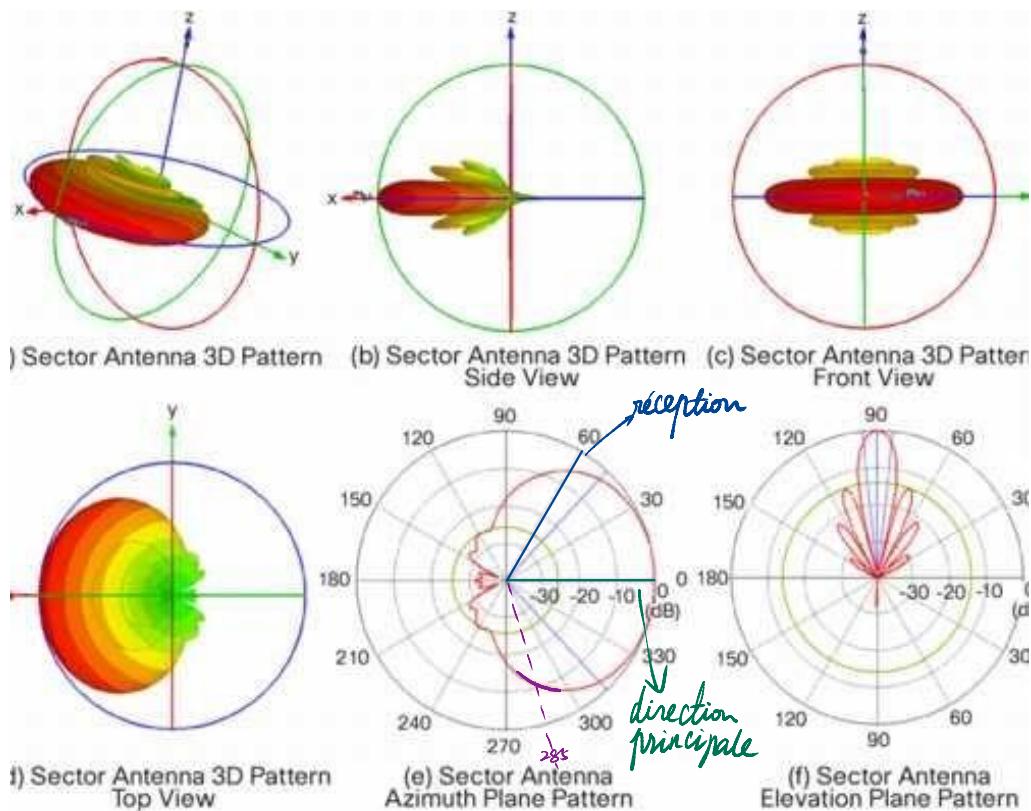
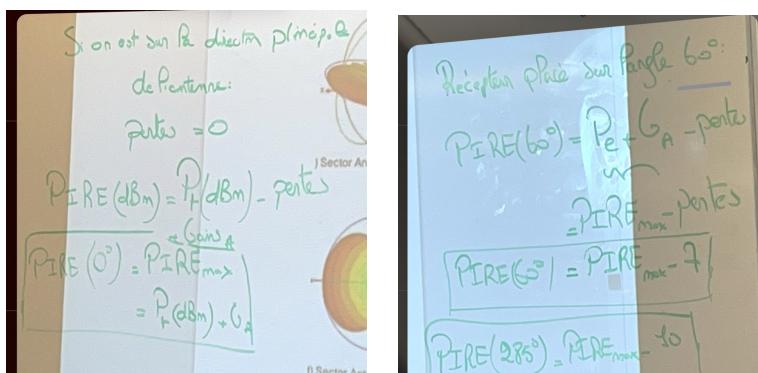
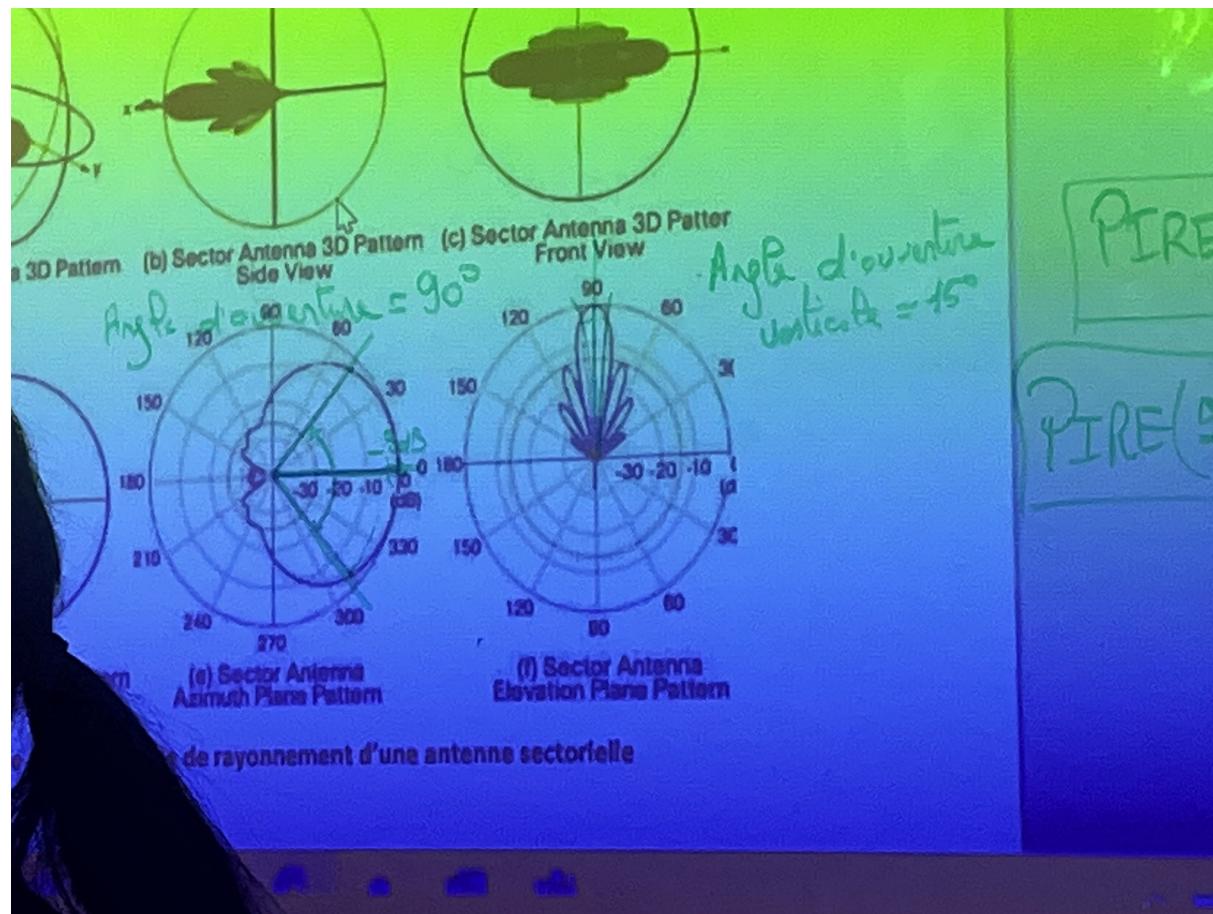


Figure 4.4 Diagramme de rayonnement d'une antenne sectorielle





PIRE
 PIRE(2)

天线水平&垂直打开角度

- Trouver les angles d'ouverture horizontale et verticale de cette antenne.

$$\text{Angle d'ouverture Horizontale} = [-45^\circ, +45^\circ] = 90^\circ$$

-3dB -3dB

$$\text{Angle d'ouverture verticale} = [82.5^\circ, 97.5^\circ] = 15^\circ$$

-3dB -3dB

L'antenne sectorielle est illustrée dans la Figure 4.5 :

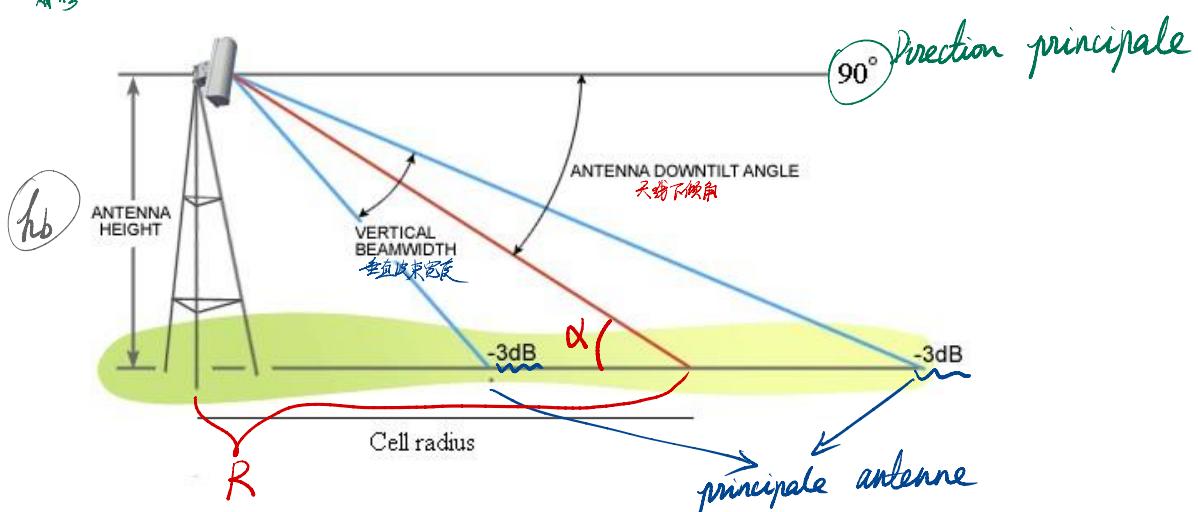


Figure 4.5 Antenne sectorielle

- Indiquer l'angle d'inclinaison vertical i.e. le downtilt permettant d'assurer une radiation optimale du lobe principal pour une cellule de rayon $R = 1 \text{ km}$ et une hauteur de pylône de $hb = 30\text{m}$.

$$\begin{cases} hb = 1 \text{ km} \\ R = 30 \text{ m} \end{cases} \quad \tan \alpha = \frac{hb}{R} = \frac{30}{1000} \quad \alpha = 1.72^\circ$$

4.1.7 Exposition aux champs radiofréquences

Definition 7 (Champs électrique et magnétique tolérés).

- L'ANFR définit des recommandations sur la bande 10 MHz - 300 GHz en se basant sur un Taux d'Absorption Spécifique (TAS) pouvant être toléré par le corps humain, TAS ≤ 0.08 Watt/Kg.
- Un périmètre de sécurité doit être respecté autour des stations de base fixes. En dehors du périmètre de sécurité :

$$\sum_{f_i} \left(\frac{E_i}{E_\ell(f_i)} \right)^2 \leq 1$$

avec $E_\ell(f_i)$ est la valeur du champ électrique toléré.

Le tableau suivant donne les valeurs de champ électrique et magnétique tolérés par le corps humain en fonction de la fréquence :

Fréquence	Champ Electrique	Champ Magnétique	Densité de puissance
Radio FM	28 V/m	0.073 A/m	2 W/m ²
900 - 1800 MHz	41 - 58 V/m	0.1 - 0.15 A/m	4.5 - 9 W/m ²
2.1 - 300 GHz	61 V/m	0.16 A/m	10 W/m ²

TABLE 1 – Champs électrique et magnétique tolérés [ANFR]

Dans l'espace libre, en considérant des conditions idéales de propagation (espace libre), que le champ électrique en V/m est lié à la puissance d'émission P_e en W par la relation :

$$E = \sqrt{\frac{P_e G_e Z_0}{4\pi d^2}}$$

avec G_e le gain de l'antenne sans unité, Z_0 est l'impédance du vide $Z_0 = 377\Omega$.

Une antenne panneau de gain égal à 18 dB est placée sur le toit d'un immeuble. Il s'agit d'une antenne tri-bande GSM 900/1800 - UMTS 2100. La puissance d'émission est limitée à 20 W.

- Trouver le périmètre de sécurité face à l'antenne.

$$\sum \left(\frac{1}{E_p(f_i)} \right)^2 = \frac{1}{61^2} + \frac{1}{41^2} + \frac{1}{58^2}$$

$$\frac{P_e(w) \times G_e(\text{sans unité}) Z(\text{ohm})}{4\pi d} \times \sqrt{\frac{1}{61^2} + \frac{1}{41^2} + \frac{1}{58^2}} \leq d$$

$$\frac{P_e G_e Z_0}{4\pi d} \leq$$

$$G_e(\text{sans unité}) = 10^{18 \text{dB}/10} = 10^{1.8}$$

$$P_e = 20 \text{W}$$

$$Z_0 = 377 \Omega$$

$$d \geq 6.6 \text{m}$$

5 Travail à faire :

Chaque équipe rend à son tuteur, un compte-rendu détaillé des solutions proposées aux problèmes posés dans le DM (voir énoncé sur Moodle).

NB : Le DM doit être un PDF dont le nom doit suivre le format suivant : " [GXY]-DM" (X : numéro du groupe, Y : indique l'équipe).

Date limite : le 28 février 2023

6 Planification et dimensionnement du réseau objets¹-passerelles² et passerelles-serveur central

On commence par la planification d'un réseau indoor en considérant un seul centre qui appartient à la société INFINITE MEASURES. On suppose que tous les centres ont la même superficie, les mêmes caractéristiques ainsi que les mêmes conditions de propagation.

Cette partie est dédiée à la connexion des cartes électroniques (objets) à la passerelle ainsi qu'à la connexion des passerelles avec le serveur central. De nombreuses technologies sans fil basse consommation peuvent être utilisées dans ce type de réseau. Dans le cadre de ce projet, nous allons privilégier deux technologies : Bluetooth et Wi-Fi.

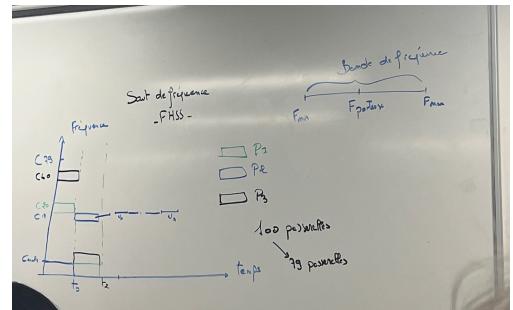
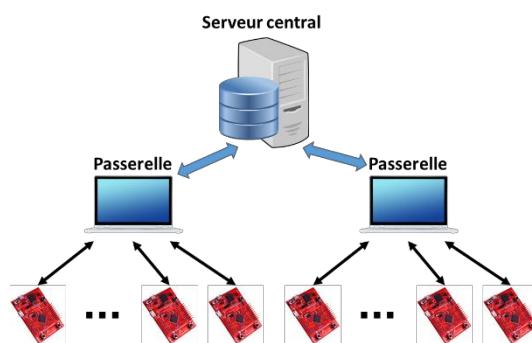
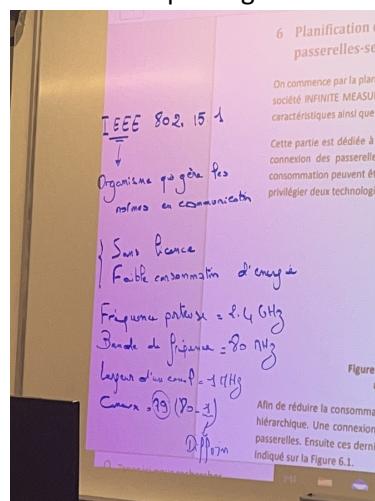


Figure 6.1 Connexion hiérarchisée utilisée dans un centre appartenant à la société INFINITE MEASURES

Afin de réduire la consommation énergétique des objets, nous proposons d'utiliser une architecture hiérarchique. Une connexion Bluetooth est utilisée entre, d'une part les objets, et d'autre part les passerelles. Ensuite ces dernières communiquent avec le serveur via un point d'accès Wi-Fi, comme indiqué sur la Figure 6.1.

Travail à faire : Communication objets-passerelles par Bluetooth

La société INFINITE MEASURES souhaite déployer **35 objets** sur une surface de 400 m² (20mx20m). Chaque objet doit communiquer avec une passerelle.

1. Indiquer théoriquement le nombre maximal d'objets qu'une passerelle peut simultanément gérer ([voir sur Moodle le document Wi-Fi vs. Bluetooth](#)).
2. En-déduire le nombre minimal de passerelles nécessaires pour transmettre les flux de données des objets au serveur central.

La manipulation suivante consiste à analyser un signal Bluetooth en utilisant une connexion entre deux équipements : un objet (un smartphone) et une passerelle (PC portable). La passerelle joue le rôle de l'émetteur et l'objet est le récepteur.

3. Effectuer l'appairage entre les deux équipements³

¹ Un smartphone sera considéré comme « objet ».

² Un PC portable joue le rôle de la « passerelle ».

³ Il faut désactiver Airdrop pour les équipements Apple.

4. Choisir un fichier audio ou vidéo volumineux. Indiquer la taille du fichier choisi ;
5. Transférer ce fichier d'un équipement à l'autre. Noter le débit de données utiles. Faire varier la position relative des deux équipements et noter le débit ainsi que le temps de transfert ;
6. Tracer la courbe du débit utile en fonction de la distance.

Chaque passerelle doit assurer une couverture Bluetooth dans un cercle de rayon de 3 m avec un débit cible d'au moins 100 Kbits/s pour chacun des objets.

7. Déterminer par mesure le nombre réel d'objets connectés en simultané à une passerelle. Pour ce faire, mesurer le débit moyen⁴ entre une passerelle et un objet à une distance de 3 m. On suppose que ce débit total sera uniformément distribué sur le nombre d'objets connectés.
8. En-déduire le nombre réel de passerelles nécessaires pour couvrir les 35 objets.
9. Calculer la puissance d'émission réduite de la passerelle permettant d'assurer le débit total pour ses objets à une portée de 3 m. A quelle classe de Bluetooth doivent appartenir le module radio utilisé ? On considère une puissance d'interférence de -90 dBm.
10. Dans le schéma d'architecture du réseau, indiquer la position de chaque passerelle avec ses objets. On veillera à éviter les interférences avec les passerelles voisines.

Travail à faire : Communication passerelles-serveur central via Wi-Fi

Dans cette architecture hiérarchique, les passerelles vont communiquer avec le serveur central via Wi-Fi.

Remarque : Pour réaliser les mesures et test suivants, utiliser Apple Wireless Diagnostics si vous disposez d'un ordinateur portable Mac (voir sur Moodle la démarche à suivre). Sinon, installer l'application **NetSpot** sur votre PC.

Noter que contrairement à la version gratuite de NetSpot, l'outil Apple Wireless Diagnostics est plus complet et fournit toutes les informations requises.

Dans un premier temps, nous allons déterminer le nombre de points d'accès Wi-Fi à déployer pour assurer un débit (link data rate) cible de 250 Mb/s pour chacune des passerelles distribuées sur la surface des 400 m².

1. Déterminer par mesure⁵ la puissance reçue moyenne (notée RSSI : Received Signal Strength Indicator) nécessaire pour assurer ce débit.
2. Pour éviter les interférences, on réduit la PIRE du point d'accès à 5 dBm. Calculer la portée maximale correspondant à un débit de 250 Mbits/s.
3. Déterminer le nombre total des points d'accès nécessaires pour couvrir la surface des 400 m²?
4. Optimiser le nombre de points d'accès nécessaire à déployer dans notre cas d'utilisation et expliquer pourquoi.

⁴ Le débit moyen doit être calculé sur **au moins 4 mesures**. Les mesures doivent se faire avec les mêmes équipements et le même fichier.

⁵ Répéter cette mesure avec le même point d'accès Wi-Fi au moins 4 fois puis calculer la moyenne de la puissance. Attention, les mesures sont données en dBm.

5. Compléter le schéma d'architecture en indiquant la position (les positions) de ce point d'accès (de ces points d'accès).

L'objectif de la partie suivante est d'étudier la planification radio des points d'accès Wi-Fi de l'ISEP :

1. Choisir un trajet et suivre un parcours à l'intérieur de l'ISEP : en longeant le couloir de l'étage, entre les étages, dans le parc autour de l'ISEP. Noter en chaque point de ce parcours :
 - Identifiant du réseau (SSID)
 - Adresse MAC⁶ du point d'accès,
 - Canal Wi-Fi,
 - Fréquence porteuse,
 - Largeur de la bande passante du Wi-Fi,
 - Version du Wi-Fi.
2. Indiquer si tous les points d'accès de l'ISEP sont configurés sur le même canal et expliquer pourquoi.

Pour l'architecture de votre réseau, indiquez sur le schéma la planification fréquentielle, en indiquant le canal de fréquence associé à chaque point d'accès, que vous recommandez tout en citant les avantages et les inconvénients de la planification choisie. Avec une légende, indiquez sur le même schéma la technologie et le débit pour chaque lien de ce réseau.

Travail à faire : Comparaison de Wi-Fi et Bluetooth avec des technologies alternatives

En plus de Wi-Fi/Bluetooth, identifiez quatre ou cinq technologies sans fil courte portée alternatives.

1. Comparer ces technologies en termes de :
 - Largeur de la bande passante
 - Débit
 - Portée
 - Nombre maximal de connexions possibles en simultané
 - Coût
2. Conclure sur la pertinence du choix des technologies Wi-Fi et Bluetooth.

NB 1 : Pour Wi-Fi et Bluetooth, utilisez le document « WiFi vs. Bluetooth » disponible sur Moodle.

NB 2 : On cherche à comparer le WiFi et le Bluetooth avec d'autres technologies alternatives et pas comparer le Bluetooth et le WiFi entre eux.

Livrable

Chaque équipe remet un rappor t technique sur l'architecture de ce réseau sur Moodle, **le 12 mars 2023 au plus tard.**

⁶ Attention : Il faut relever le BSSID (Basic Service Set Identifiers)

NB 1 : Eviter le format question/réponse.

NB 2 : Le livrable doit être un PDF dont le nom doit suivre le format suivant : " [GXY]-Livrable_1" (X : numéro du groupe, Y : indique l'équipe).

NB3 : Vous devez mentionner qui a fait quoi.

$$\Pr = Pe + GA - A \frac{dB_m}{dB_w}$$
$$P_{IRE} = Pe + GA - R_r$$
$$= (\Pr - GA + A) + GA$$
$$P_{IRE} = R_r + A$$
$$\downarrow$$
$$RSSI$$
$$P_{IRE} = \underbrace{P_{IRZ}}_{mW} * \underbrace{\Pr}_{mW}$$

$$P_{IRZ} = Pe + GA$$
$$Pe = P_{IRZ} - GA$$
$$\downarrow$$
$$? \text{ théorique}$$

7 Connexion entre Administrateur- serveur web et connexion entre plusieurs centres

La dernière partie de votre mission est dédiée aux connexions longues portées, filaires et sans fil. Les connexions sans fils interviennent entre l'Administrateur et le serveur web car la connexion Wi-Fi étudiée précédemment n'est généralement pas appropriée. Et les connexions filaires assurent la connexion entre plusieurs sites déployée par l'entreprise.

Travail à faire : Connexion entre l'Administrateur et le serveur web

La société INFINITE MEASURES souhaite offrir plus de flexibilité à l'Administrateur en termes de mobilité permettant ainsi un accès permanent au réseau.

1. Indiquer quelle technologie pourrait être utilisée pour ce faire ;
2. Indiquer pour la puissance maximale des émetteurs mobiles et fixes, le débit maximal atteint (les valeurs théoriques) ;
3. Sur le site internet : <http://www.cartoradio.fr/>, repérer les stations de base à l'entour de votre position ;
4. Vérifier les propriétés des antennes et en particulier celle à laquelle le smartphone de l'Administrateur pourrait être connecté ;
5. En considérant une seule technologie, calculer le rayon de la zone de sécurité (**voir sur Moodle le document ANFR-Guide_Périmètres_de_Sécurité, page 7**) en considérant que le gain de l'antenne est donné par :

$$G_A(\theta)[dB] = G_{max}[dB] - \min\left(12\left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}}\right)^2, 20\right)$$

Avec

- $G_{max}[dB] = 17$ dB est le gain maximal de l'antenne,
- $\theta_{3dB} = 70^\circ$ correspond à la moitié de l'angle d'ouverture.

6. Sur Android, installer sur votre Smartphone (Android) l'application « NetMonster ». Sur iphone, composer et appeler le numéro *3001#12345#* :
 - Mesurer le niveau de puissance reçue (RSSI) et indiquer la fréquence porteuse.
 - Calculer la PIRE de la station de base. En déduire la puissance d'émission.

NB : La puissance calculée correspond à un RB « Ressource Block ». Pour déterminer la PIRE de la station de base il faudra multiplier par le nombre de RBs :

Bande (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Nombre de RB	6	15	25	50	75	100

Travail à faire : Fibre optique et câbles

La société INFINITE MEASURES souhaite aussi relier plusieurs centres à l'aide d'une **connexion filaire haut débit**. On suppose que tous les centres ont les mêmes caractéristiques et les mêmes conditions de propagation.

1. Quelles sont les solutions possibles pour avoir une connexion filaire haut débit ?
2. Comparer les propriétés des câbles coaxiaux, la fibre multimode à saut d'indice, la fibre multimode à gradient d'indice et la fibre monomode en termes de bande passante, affaiblissement, portée maximale, débit et puissance émise.

NB 1 : Voici un lien qui contient quelques informations utiles concernant la fibre optique et qui pourra vous aider :

<https://community.fs.com/blog/single-mode-cabling-cost-vs-multimode-cabling-cost.html>

NB 2 : Concernant les câbles coaxiaux, vous pouvez utiliser les valeurs données dans le tableau de technologies du BE.

3. Pour des liaisons de longues distances, déterminer s'il faut privilégier les câbles coaxiaux, les fibres à saut d'indice, à gradient d'indice ou les fibres monomodes. Justifier votre réponse ;
4. En considérant le débit total de **1Gb/s**, pour chaque type de connexion trouver le rapport signal à bruit théorique nécessaire pour garantir ce débit. Déduire le RSSI nécessaire sur une fibre optique et sur un câble ;
5. Calculer la portée des 3 types de fibre optique et celle du câble ;
6. En considérant une distance entre deux centres de 50 km, indiquer s'il y a besoin d'utiliser des répéteurs intermédiaires.

A la fin de cette partie, vous devez pouvoir évaluer la solution de dimensionnement que vous avez adoptée : technologie(s) de communication adoptée(s), coût, avantages, limitations. Vous pouvez ainsi compléter le schéma d'architecture générale.

Livrable final :

Chaque équipe rend à son tuteur (sur Moodle) le 26 mars au plus tard, un **rapport final qui fait la synthèse du travail réalisé dans les sections 6 et 7**. Ce rapport doit comprendre les éléments suivants :

- Une introduction ;
- Les spécifications techniques du réseau : nombre de cartes à déployer, les débits cibles, les contraintes énergétiques, l'emplacement des objets et des passerelles, etc. ;
- L'architecture générale du réseau d'un centre ;
- Planification et dimensionnement du réseau : mise à jour de schéma d'architecture.
- Les spécifications du réseau sans fil longue portée assurant l'interconnexion des centres INFINITE MEASURES ;
- Les spécifications du réseau filaire (câbles, fibre optique) : nombre de répéteurs, atténuations, débits, etc. ;

- Schéma d'architecture global en considérant 2 centres avec tous les détails concernant les connexions courtes et longues portées ;
- Le coût détaillé de votre solution (carte, passerelle, point d'accès, répéteur, ...)
- Adaptation au projet APP : Est-ce que le scénario de communication souhaité par INFINITE MEASURES est adapté à votre projet ? Dans le cas contraire, donnez un schéma d'architecture représentatif qui pourra être déployé dans votre cas d'usage.
- Une conclusion

NB 1 : Le travail réalisé dans la section 6 doit être corrigé selon le retour du tuteur sur le premier livrable pour bien rédiger le livrable final.

NB 2 : Eviter le format question/réponse.

NB 3 : Le livrable doit être un PDF dont le nom doit suivre le format suivant : " 2023-[GXY]-Livrable_final" (X : numéro du groupe, Y : indique l'équipe).