Institut Universitaire Technologique de Blois

BUT Réseaux & Télécommunications

3 Pl. Jean Jaurès,

41000 Blois

RAPPORT DE R301

Sujet 1 - Mettre en œuvre un système de transmission

25/01/2025

Lelièvre Lylian, Coste Romain et Peltier Florian, étudiants R&T2

Sommaire

I. Introduction....3
II. Recherches....4
i Technologies actuelles de téléphonie mobile....4
ii Fréquences utilisées en téléphonie mobile pour chaque technologie....5
iii Types d'antennes utilisées (dans le portable ou en station de base)....6
iv Ordre de grandeur des gains d'une antenne de téléphone portable et de station de base....8
v Expression des pertes de puissances lors d'une propagation dans l'air....9
III. Schéma de la liaison et bilan de liaison pour un lien de téléphonie mobile standard....11
IV. Expérimentations....13
V. Bilan des liaisons....20
i Bilan des liaisons bande 7 en 4G....21
ii Bilan des liaisons bande 1 en 4G....22
VI. Conclusion....23
VII. Index des figures....24

I. Introduction

Dans ce rapport, nous allons explorer la mise en œuvre d'un système de transmission en téléphonie mobile. Nous commencerons par examiner les technologies actuelles, les fréquences utilisées et les types d'antennes, afin de poser les bases nécessaires à la compréhension des systèmes de communication. Ensuite, nous verrons comment un schéma de liaison peut être établi et comment un bilan de liaison est réalisé pour un lien standard de téléphonie mobile. Enfin, nous procéderons à des expérimentations pour mesurer et analyser les performances des antennes, notamment en 4G sur des numéros de bandes différentes, afin d'en tirer des conclusions sur la qualité des signaux transmis et les défis associés.

II. Recherches

i Technologies actuelles de téléphonie mobile

Les technologies actuelles de téléphonie mobile se distinguent par des générations successives, chacune apportant des améliorations en termes de débit, de couverture, de latence, et de fonctionnalités :

Premièrement, la 2G (GSM, GPRS, EDGE) a marqué le début de la transmission numérique de voix et de données, avec des débits limités à environ 9,6 kbps pour le GSM et jusqu'à 384 kbps pour EDGE.

Ensuite, la 3G (UMTS, HSPA) a permis une nette amélioration des performances, offrant des débits théoriques allant jusqu'à 42 Mbps avec le HSPA (High-Speed Packet Access).

L'apparition de la 4G (LTE, LTE-Advanced) a révolutionné les usages mobiles, permettant des débits de 100 Mbps en mobilité et jusqu'à 1 Gbps en stationnaire, grâce à des technologies avancées comme l'OFDM et les antennes MIMO.

Enfin, la 5G (NR - New Radio) est la dernière évolution, offrant des vitesses théoriques jusqu'à 10 Gbps et une latence très faible de 1 ms. Elle exploite des fréquences élevées, notamment les ondes millimétriques (24-100 GHz), et intègre des innovations comme le MIMO massif et les réseaux ultra-denses.

Quant à la 6G (projets futurs), bien qu'elle soit encore en phase de conception, elle promet des performances encore plus spectaculaires avec des vitesses théoriques atteignant 100 Gbps. Elle vise des applications avancées, notamment la réalité augmentée (RA) et la réalité virtuelle (RV) en temps réel, ouvrant la voie à une connectivité immersive et instantanée.

ii Fréquences utilisées en téléphonie mobile pour chaque technologie

La 2G (GSM) a marqué le début de la téléphonie numérique, utilisant des bandes de fréquences spécifiques selon les régions : 900 MHz et 1800 MHz en Europe et en Asie, tandis que l'Amérique adoptait les bandes 850 MHz et 1900 MHz.

Avec l'arrivée de la 3G, les fréquences utilisées variaient également selon les régions, incluant des bandes comme 850 MHz, 900 MHz et 1700/2100 MHz, permettant une amélioration significative des débits et de la couverture.

La 4G (LTE) a élargi les possibilités grâce à l'utilisation de bandes plus diversifiées, parmi lesquelles 700 MHz, 800 MHz, 1800 MHz et 2600 MHz, généralement situées entre 700 MHz et 3.8 GHz, offrant des vitesses beaucoup plus élevées.

Avec la 5G (NR), deux types de fréquences ont été introduits pour répondre aux différents besoins. Les bandes Sub-6 GHz, situées entre 3 GHz et 6 GHz (notamment 3.5 GHz, 2.6 GHz et 4.5 GHz), assurent une bonne couverture, tandis que les ondes millimétriques (comme 24 GHz, 28 GHz et 39 GHz) permettent d'atteindre des débits ultra-rapides dans des environnements très denses, comme les zones urbaines.

Pour la 6G, bien qu'elle soit encore en phase de conception, les recherches se tournent vers l'exploitation de bandes au-delà de 100 GHz, dans la gamme des ondes térahertz. Ces fréquences permettront des communications ultra-rapides et ouvriront la voie à des applications innovantes, comme la communication en temps réel entre des objets connectés à très haute densité.

Chaque génération s'est appuyée sur des bandes de fréquences spécifiques pour répondre aux besoins en connectivité, tout en adaptant les technologies à l'évolution des usages.

iii Types d'antennes utilisées (dans le portable ou en station de base)

Les antennes des appareils mobiles et des stations de base jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des réseaux de télécommunication modernes.

Dans les smartphones, on trouve principalement des antennes internes, intégrées à la coque de l'appareil. Ces antennes, souvent de type PIFA (Planar Inverted F Antenna) ou monopole, sont conçues pour maximiser les performances tout en étant discrètes et compactes. Certains modèles de smartphones plus avancés intègrent des antennes MIMO (Multiple Input Multiple Output), permettant d'exploiter plusieurs flux de données simultanés. Cela améliore significativement les débits, en particulier pour les réseaux LTE et 5G. Par ailleurs, les antennes modernes sont souvent repliées ou intégrées, optimisées pour s'adapter aux contraintes de taille des appareils tout en offrant une connectivité fiable.

Du côté des stations de base, plusieurs types d'antennes sont utilisées pour garantir une couverture réseau optimale. Les antennes directionnelles sont couramment employées pour concentrer le faisceau du signal vers des zones précises, comme les antennes sectorielles, qui couvrent des angles de 60° ou 120°, notamment dans les réseaux 4G et 5G. Les stations de base modernes exploitent aussi des antennes MIMO massives, qui permettent d'augmenter le nombre de connexions simultanées ainsi que la capacité globale du réseau.

Grace au beamforming (ou formation de faisceau) est une technologie utilisée dans les communications sans fil pour diriger de manière précise les signaux radio vers un utilisateur ou un groupe d'utilisateurs spécifique, au lieu de diffuser le signal dans toutes les directions comme le font les antennes omnidirectionnelles traditionnelles.

En combinant ces technologies dans les terminaux mobiles et les infrastructures réseau, les opérateurs assurent des communications rapides et adaptées aux besoins des utilisateurs.

iv Ordre de grandeur des gains d'une antenne de téléphone portable et de station de base

Les antennes jouent un rôle très important dans les performances des télécommunications, tant pour les téléphones portables que pour les stations de base, mais elles diffèrent largement en termes de gain et de conception.

Dans un téléphone portable, le gain de l'antenne est généralement modeste, se situant entre 0 dB et 3 dB. Cette valeur relativement basse reflète les contraintes liées à la taille compacte de l'appareil et à l'intégration de l'antenne dans un espace restreint. L'antenne est conçue pour fonctionner de manière omnidirectionnelle, c'est-à-dire qu'elle peut capter et émettre des signaux dans toutes les directions, ce qui est essentiel pour garantir une connectivité fiable dans divers environnements, mais limite le gain global.

En revanche, les antennes des stations de base affichent des gains bien plus élevés, généralement compris entre 10 dB et 20 dB, voire davantage pour certains types spécifiques. Ces antennes sont souvent directionnelles, comme les antennes sectorielles ou celles équipées de la technologie MIMO massif utilisé principalement pour la 4G LTE et surtout pour la 5G. Leur rôle est de concentrer l'énergie du signal dans des directions précises, augmentant ainsi la portée et la capacité du réseau. Cette caractéristique permet une couverture étendue et une meilleure efficacité spectrale, ce qui est essentiel pour prendre en charge un grand nombre d'utilisateurs simultanés et fournir des débits élevés.

Cette différence de conception et de gain entre les antennes des téléphones portables et celles des stations de base illustre l'adaptation des technologies à leurs fonctions respectives : polyvalence d'un côté, puissance de l'autre.

v Expression des pertes de puissances lors d'une propagation dans l'air

Les pertes de puissance dans les communications sans fil sont principalement causées par la propagation des ondes électromagnétiques à travers l'air. Ces pertes peuvent être modélisées par la loi de propagation en espace libre, également connue sous le nom de loi de Friis. Cette loi établit que la perte de puissance dépend directement de la distance entre l'émetteur et le récepteur, ainsi que de la fréquence du signal.

La perte de propagation, notée α, est généralement exprimée en décibels (dB) et se calcule en fonction des paramètres suivants :

- d, la distance entre l'émetteur et le récepteur, mesurée en mètres.
- f, la fréquence du signal, mesurée en hertz (Hz).
- c, la vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide, soit environ

  3×10^8 m/s.

Dans ce modèle, les pertes augmentent proportionnellement avec la fréquence et la distance. Cela signifie qu'à mesure que le signal voyage sur une distance plus longue ou utilise une fréquence plus élevée (comme celles de la 5G ou des futurs réseaux 6G), la puissance reçue diminue considérablement.

En outre, les environnements complexes, tels que les zones urbaines ou celles comportant de nombreux obstacles, amplifient ces pertes. Dans de tels situations, des phénomènes tels que la diffraction et la réflexion viennent compliquer la propagation du signal. Ces effets ne peuvent pas être complètement expliqués par la simple loi de Friis et nécessitent l'utilisation de modèles de propagation plus avancés, comme le modèle de Hata ou celui d'Okumura. Ces modèles tiennent compte des caractéristiques environnementales, telles que la densité des bâtiments, la hauteur des antennes, et le terrain, pour estimer les pertes de manière plus précise.

Ainsi, bien que la propagation des ondes électromagnétiques suive des principes physiques fondamentaux, les environnements réels nécessitent des ajustements pour mieux comprendre et optimiser les performances des réseaux sans fil.

III. Schéma de la liaison et bilan de liaison pour un lien de téléphonie mobile standard

Voici un exemple de structure plus détaillée pour le schéma de la liaison :

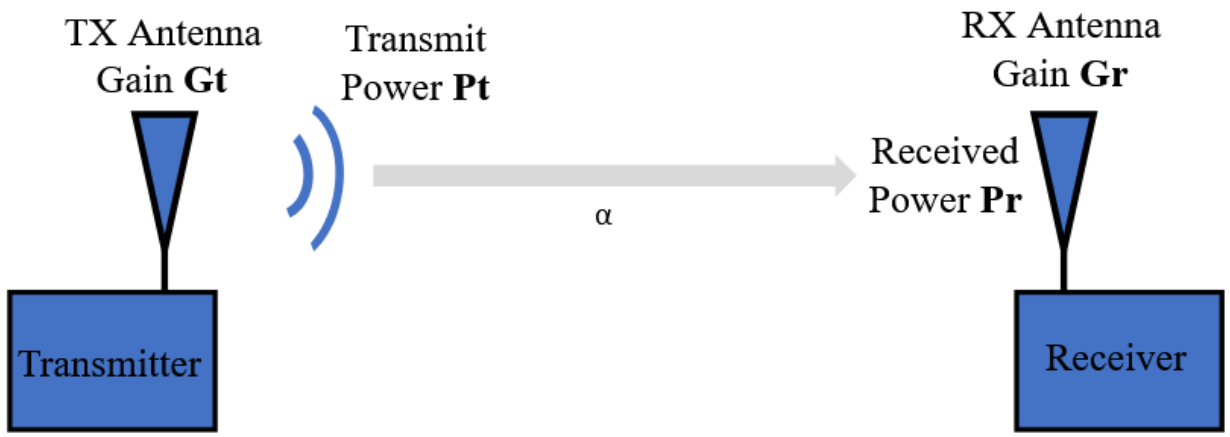


Figure 1: Schéma de bilan des liaisons

Cela représente l'ensemble du parcours du signal, de l'émetteur au réseau central, via les différents éléments du système.

La formule du bilan de liaison permet d'estimer la puissance du signal reçue (Pr) par un récepteur, en fonction de la puissance transmise (Pt), des gains des antennes (Gt)pour l'antenne de transmission et Gr pour celle de réception, et des pertes dues à la propagation.

Formule

$Pr=Pt+Gt+Gr- \alpha$

Description des termes

1. Pr (Puissance reçue) :
    - La puissance du signal captée par l'antenne réceptrice. Elle est mesurée en dBm ou en watts.
2. Pt (Puissance transmise) :
    - La puissance du signal émise par l'émetteur. Elle est également mesurée en dBm ou watts.
3. Gt (Gain de l'antenne de transmission) :
    - Le gain de l'antenne émettrice. Un gain élevé améliore la directivité du signal et augmente l'intensité dans une direction spécifique. Exprimé en dB.
4. Gr (Gain de l'antenne de réception) :
    - Le gain de l'antenne réceptrice, qui augmente la capacité de capter les signaux dans certaines directions. Exprimé en dB.
5. α (Pertes en espace libre) :
    - Les pertes dues à la propagation du signal dans l'espace libre. Ces pertes augmentent avec la distance entre l'émetteur et le récepteur, et dépendent de la fréquence. Elles sont calculées comme : $\alpha=20\log10(d)+20\log10(f)+20\log10(4\pi/c)$ où d est la distance (m), f est la fréquence (Hz), et c est la vitesse de la lumière.

IV. Expérimentations

Nous avons mesuré la puissance reçue sur un Iphone 12 mini pour un abonnement 4G: nous avons obtenu -83dBm sur la bande 7 qui après recherche, se trouve dans la bande de fréquence 2600MHz.

Le network PLMN correspond au fournisseur d'accès Orange.

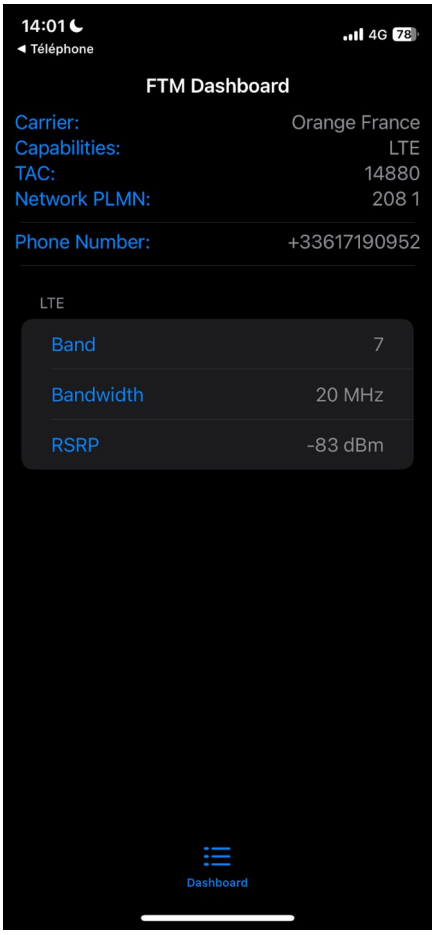


Figure 2: Mesure de la puissance 4G Iphone

On se servira plus tard de ces mesures concernant la puissance reçu par le téléphone avec la bande 7 pour le bilan des liaisons.

Nous reproduisons la même chose sur un autre téléphone mais cette fois pour la 5G.

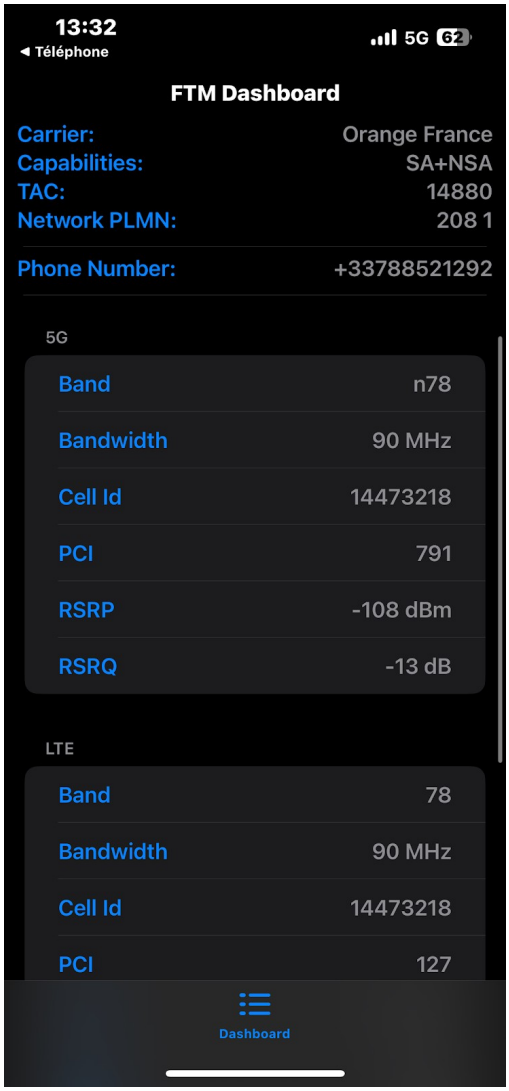


Figure 3: Mesure de la puissance 5G Iphone

Le network PLMN correspond aussi au fournisseur d'accès Orange.

Nous allons maintenant mesuré la puissance d'émission lors d'un appel téléphonique à l'aide d'un analyseur de spectre. Nous paramétrons tout d'abord l'intervalle fréquentiel dans lequel se trouve le téléphone appelant, il se situe autour de 2600MHz. Nous choisissons donc nous placer dans l'intervalle 2515MHz à 2700MHz.

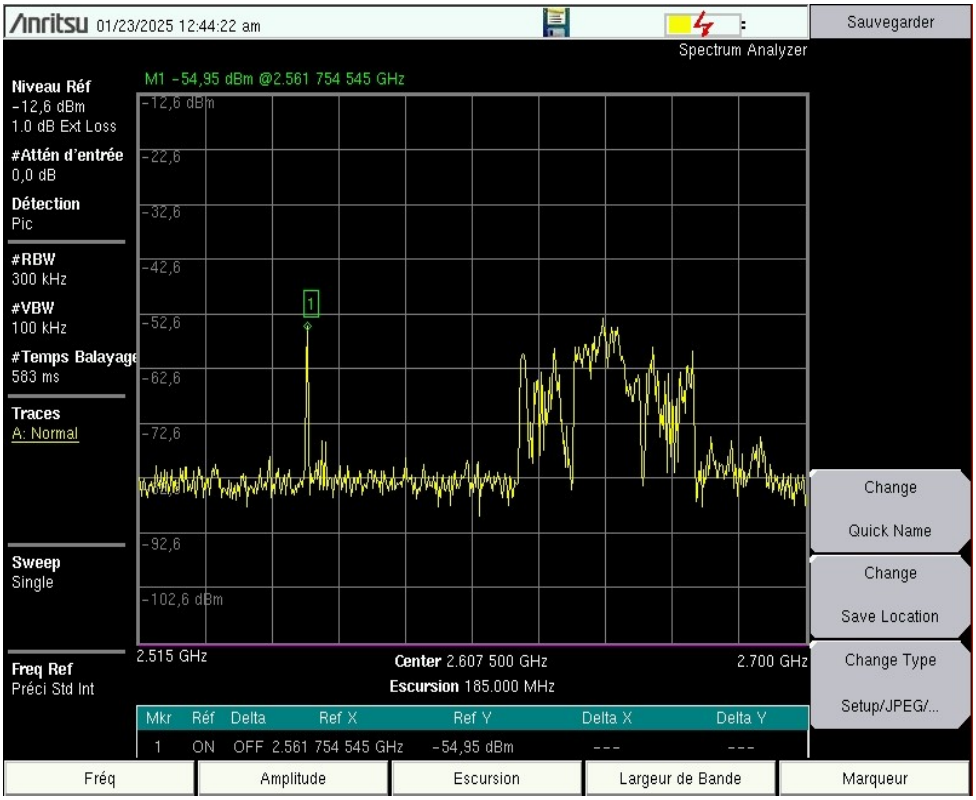


Figure 4: Puissance d'émission d'un appel téléphonique autour de 2600MHz

Cette image est la détection par une antenne placée sur l'analyseur de spectre d'un signal émis par l'appel d'un téléphone sur un canal précis qui est le 7, on peut y retrouver la fréquence précise qui est de 2562MHz ainsi que la puissance reçue de -54,95 dBm.

Antenne côté opérateur

Nous avons à notre disposition une antenne 4G avec un bande de fréquence dans l'intervalle 740 MHz et 2700MHz. Ces informations sont fournies directement sur l'antenne comme illustrée sur l'image ci-dessous.

Dans un premier temps nous allons vérifier si la bande de fréquence est bien respectée et si elle est partagée en plusieurs sous-bandes de fréquence.

Puis dans un second temps, nous allons définir la longueur de câble entre l'antenne et notre analyseur d'antenne.



Figure 5: Fiche technique antenne 4G salle 400

Le gain de cette antenne se situe dans l'intervalle 4 à 6 dB. Nous avons retrouver ces informations sur es-france.com sur le lien ci -dessous.

Lien documentation de l'antenne 4G : https://www.es-france.com/12702-antenne-de-station-de-base-omnidirectionnelle-multibande-740-960-1710-2700-mhz-ma-wo7402700-5.html?srsltid=AfmBOopX_xMVHmg4TUFK2O2ObBq7B3zlY6Tndgew659cU5cmFsTd3m9G

Nous avons tout d'abord calibrer l'analyseur d'antenne avec différents embouts que nous plaçons en entrée de l'analyseur, cela va simuler un circuit ouvert, un circuit fermé et enfin un circuit chargé.



Figure 6: Embouts pour calibrer l'analyseur d'antenne

Sur l'image ci-dessous, nous observons une valeur Ref Ampl en fonction de la fréquence. Plus la valeur est proche de 1 plus la réflexion du signal est faible, donc il y aura moins de perte encourue par le signal. Nous voyons qu'il y a deux bandes fréquentielles qui apparaissent, nous les avons encadrées par les curseurs.

Entre le curseur 1 et 2 il y a la première bande qui représente l'intervalle 0,735 -1,1 GHz et la deuxième bande passante est de 1,7-2,7 GHz. Il y a donc deux bandes passante dans l'intervalle 740 MHz-2700 MHz.

Entre les curseurs 2 et 3, la réflexion du signal est très élevée, donc dans l'intervalle 1,1 - 1,7 GHz il y aura une forte perte dû à la réflexion du signal dans le câble. C'est pour cela que cette bande passante n'est pas allouée dans l'utilisation des antennes 4G. Soit le signal obtenu jusqu'à l'antenne est optimal de 0,735 -1,1 GHz et 1,7-2,7 GHz dans le câble de l'opérateur jusqu'à l'antenne.

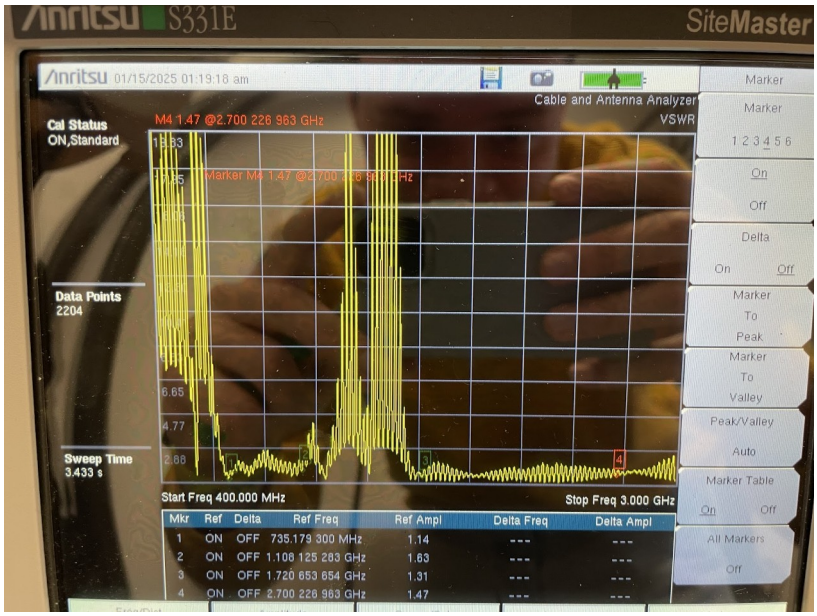


Figure 7: Analyse réflexion du signal dans le câble en fonction de la fréquence - Antenne vers Analyseur d'antenne

Sur l'image ci-dessous, nous observons Ref Ampl en fonction de la distance. De 0 cm à 20 cm il y a un petit pic qui apparaît dû au connecteur entre le câble et l'analyseur d'antenne. De 0,20 mètre à 4,95 mètres la valeur de Ref Ampl est entre 1 et 1,02 ce qui veut dire que la réflexion du signal est très faible, donc il circule bien. Après 5 mètres, le signal ne circule plus car nous obtenons des valeurs approchant les 1,4. On en déduit que la longueur du câble est d'environ 5 mètres



Figure 8: Analyse réflexion du signal dans le câble en fonction de la distance

V. Bilan des liaisons

Nous avons donc toutes les caractéristiques de l'antenne 4G, nous allons faire un bilan de liaison entre un téléphone et cette antenne.

Nous avons le gain de l'antenne qui se situe entre 4 à 6 dB sachant que cette antenne se situe sur le château d'eau à une distance de 320 mètres. Nous allons prendre en gain 5dB pour l'antenne.

Voici notre schéma sur lequel nous nous sommes basé pour faire le bilan des liaisons :

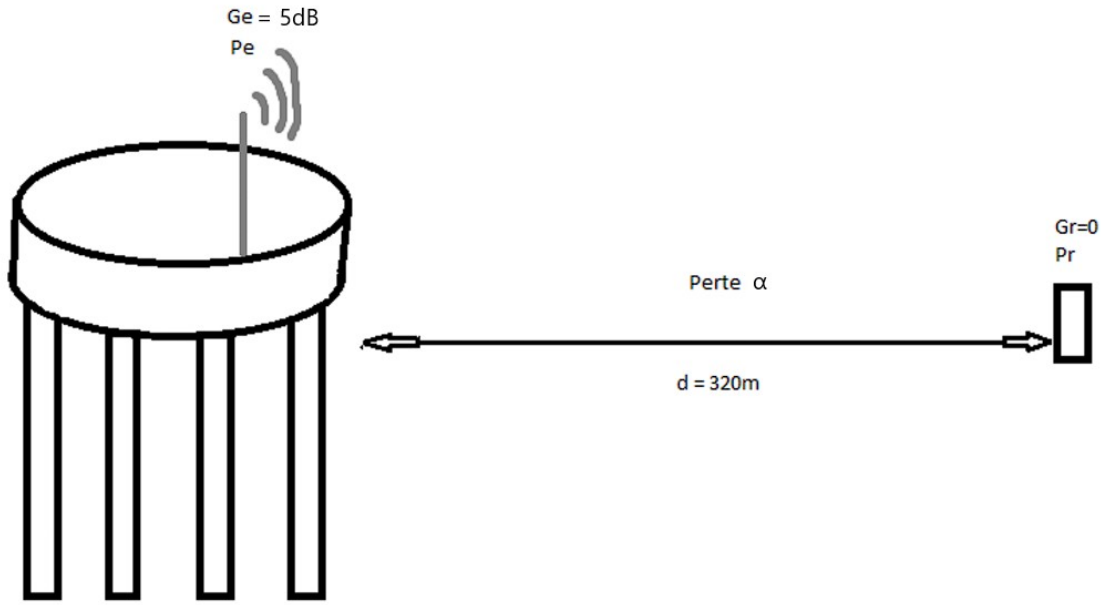


Figure 9: Schéma des bilans des liaisons

i Bilan des liaisons bande 7 en 4G

Le téléphone est placé sur la bande 7 à 2562MHz.

Nous calculons tout d'abord la perte de signal due à la distance qui sépare notre téléphone et l'antenne. La distance est de 320 mètres, soit nous avons une perte de $\alpha = 20\log(\frac{4\pi d}{\lambda})$ sachant que $\lambda = \frac{c}{f}$ avec $c = 3*10^8 m/s$

Soit $\lambda = \frac{3*10^8}{2562*10^8} = 1,18*10^{-3} m$

Donc $\alpha = 20\log(\frac{\pi \times 320}{1,18*10^{-3}}) = 118,6 dB$

La formule de la puissance reçue se calcul de cette manière :

$Pr_{dBm} = Pe_{dBm} + Ge_{dB} - \alpha_{dB} + Gr_{dB}$

avec Pr_{dBm} = -83dBm, Ge_{dB} = 5dB, α_{dB} = 118,6dB et Gr_{dB} = 0dB

Soit la puissance émise de l'antenne est de :

$Pe_{dBm} = Pr_{dBm} - Ge_{dB} + \alpha_{dB} - Gr_{dB}$

Pe_{dBm} = -83dBm – 5dB + 118,6dB + 0

Donc Pe_{dBm} = 30,6 dBm.

Nous passons ensuite cette puissance en Watt, ce qui nous fait :

$PeW = 10^{\frac{30,6}{10}} \times 1 \times 10^{-3}$

$PeWatt = 1,15 W$

Nous obtenons donc une puissance d'émission de l'antenne placé sur le château d'eau de 1,15W. Le signal reçu est suffisamment fort pour assurer une bonne qualité de communication.

ii Bilan des liaisons bande 1 en 4G

Nous recalculons la perte encouru par la distance avec la 4G sur la bande 1 qui a une fréquence de 2,1 GHz.

On sait que $\alpha = 20\log(\frac{4\pi d}{\lambda})$ sachant que $\lambda = \frac{c}{f}$ avec $c = 3*10^8$

Soit $\lambda = \frac{3*10^8}{2{,}1*10^9} = 1{,}43*10^{-1}\, m$

Donc $\alpha = 20\log(\frac{\pi \times 320}{1{,}43*10^{-1}}) = 76{,}9\, dB$

La perte due à la distance entre l'antenne et le téléphone est de 76,9dB.

Nous recalculons la puissance émise de l'antenne vers le téléphone qui est :

$Pe_{dBm} = Pr_{dBm} - Ge_{dB} + \alpha_{dB} - Gr_{dB}$

avec $Pr_{dBm} = -74dBm$, $Ge_{dB} = 5dB$, $\alpha_{dB} = 76{,}9dB$ et $Gr_{dB} = 0dB$

Soit la puissance émise de l'antenne est de :

$Pe_{dBm} = Pr_{dBm} - Ge_{dB} + \alpha_{dB} - Gr_{dB}$

$Pe_{dBm} = -74dBm - 5dB + 76{,}9dB + 0$

$Pe_{dBm} = -2{,}1\ dBm$

Nous passons ensuite cette puissance en Watt, ce qui nous fait :

$PeW = 10^{\frac{-2{,}1}{10}} \times 1 \times 10^{-3}$

$PeW = 620\,\mu W$

La puissance pour le signal reçu est insuffisant, ce qui pourrait mener à une mauvaise qualité de communication, des coupures de signal, ou une faible vitesse de transmission.

VI. Conclusion

Pour conclure, nous avons pu mettre en lumière les principes essentiels et les contraintes techniques liés à la transmission des signaux dans les réseaux mobiles. À travers les expérimentations, nous avons observé que les performances des antennes et la qualité des communications dépendent fortement de facteurs tels que la puissance émise, les gains des antennes et les pertes liées à la propagation. Nous avons également constaté que les différences de fréquences utilisées en 4G influent sur la qualité du signal. Ces analyses nous permettent de mieux comprendre les défis actuels et d'imaginer les améliorations à envisager pour répondre aux besoins des futures technologies comme la 6G.

VII. Index des figures

Figure 1: Schéma de bilan des liaisons.....9
Figure 2: Mesure de la puissance 4G Iphone.....11
Figure 3: Mesure de la puissance 5G Iphone.....12
Figure 4: Puissance d'émission d'un appel téléphonique autour de 2600MHz. .13
Figure 5: Fiche technique antenne 4G salle 400.....14
Figure 6: Embouts pour calibrer l'analyseur d'antenne.....15
Figure 7: Analyse réflexion du signal dans le câble en fonction de la fréquence - Antenne vers Analyseur d'antenne.....16
Figure 8: Analyse réflexion du signal dans le câble en fonction de la distance. 17
Figure 9: Schéma des bilans des liaisons.....18