IMT Atlantique
Dépt. Systèmes Réseaux, Cybersécurité
et Droit du numérique
Campus de Rennes

URL: **www.imt-atlantique.fr**

Collection des rapports de recherche d'IMT Atlantique (En ligne)
RR-2021-01-SRCD

Mobilité réseau robuste pour service de téléexpertise vétérinaire par lunettes connectées

Mohamed Lamine Koma[1,2,3]
Sébastien Assié[3]
Ahmed Bouabdallah[2]
Laëtitia Dorso[3]
Xavier Lagrange[2]
Georgios Papadopoulos[2]

[1]École Supérieure Polytechnique - Université Cheikh Anta Diop
[2]IMT Atlantique
[3]ONIRIS

Date de publication : juin 29, 2021
Version : 1.0

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Mobilité réseau robuste pour service de téléexpertise vétérinaire par lunettes connectées *

Mohamed Lamine Koma[1,2,3], Sébastien Assié[3], Ahmed Bouabdallah[2], Laëtitia Dorso[3], Xavier Lagrange[2], and Georgios Papadopoulos[2]

[1]École Supérieure Polytechnique, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal
[2]IMT Atlantique, Département SRCD, Campus de Rennes, France
[3]ONIRIS, Nantes, France

29 juin 2021

RÉSUMÉ Dans le cadre de ses activités de consultations, ONIRIS offre, via des lunettes connectées, une téléexpertise auprès des vétérinaires ruraux. Ce service donne au vétérinaire, lors de ses consultations, accès en temps réel voix et vidéo à un expert situé dans son lieu de travail devant son ordinateur afin de guider le vétérinaire dans son intervention. Le lieu d'exercice de ces praticiens se situe majoritairement dans les exploitations agricoles en milieu rural généralement caractérisé par une couverture réseau très aléatoire. De plus, dans les exploitations agricoles, les bâtiments d'élevage en tôle métallique font souvent obstacle à la propagation radio. Un tel contexte géographique et architectural peut devenir rédhibitoire pour le déploiement, l'usage effectif et l'adoption par les vétérinaires, de services comme la téléexpertise. Dans ce travail, une solution simple d'utilisation nécessitant un minimum de manipulations par les vétérinaires, est proposée pour permettre à ces derniers, de pouvoir communiquer sans interruption et avec une qualité de son et d'image nettement améliorée lors de leurs interventions en milieu rural. Dans un premier temps, une étude en laboratoire est menée pour étudier les différentes situations de pertes de connectivité. Différentes solutions techniques sont développées en prenant en compte les différents cas de figure que peuvent rencontrer les vétérinaires lors de leurs interventions en milieu rural. Ces solutions sont évaluées par des séries de tests en situation opérationnelle, obéissant au format de l'épidémiologie descriptive dans des exploitations en Loire Atlantique et dans le Maine et Loire, sélectionnées pour leurs connectivités réseaux défaillantes. Les expérimentations montrent que dans toutes les exploitations visitées, quel que soit le niveau de couverture de la zone, quel que soit le type de bâtiment où se fait le test, les solutions proposées compensent la mauvaise connectivité et permettent au praticien de réaliser correctement ses opérations.

*Ce rapport est une version synthétique et remaniée du mémoire de stage de Master de M. Mohamed Lamine KOMA. Le stage réalisé de septembre 2020 à février 2021 dans les laboratoires d'IMT Atlantique et de ONIRIS, a été financé dans le cadre du projet inter-établissements *MoJiTo* soutenu par IMT Atlantique et ONIRIS que nous remercions.

TABLE DES MATIÈRES

1 Introduction 5
2 Analyses préliminaires 6
2.1 Contraintes techniques du service de téléexpertise 6
2.2 Les cas d'usage du service de téléexpertise 7
2.2.1 Cas d'usage 0 : Vétérinaire sous bonne couverture 4G 7
2.2.2 Cas d'usage 1 : Vétérinaire sous bonne couverture 4G dans un bâtiment faisant office de cage de Faraday 7
2.2.3 Cas d'usage 2 : Vétérinaire sous mauvaise couverture 4G . . . 7
2.2.4 Cas d'usage 3 : Vétérinaire sous mauvaise couverture 4G dans un bâtiment faisant office de cage de Faraday 7
2.3 Principe des solutions pour renforcer la connectivité réseau 7
2.4 Plateforme d'expérimentation 8
2.4.1 Passerelle 4G/Wifi 8
2.4.2 Antenne à gain 9
2.4.3 Banc de test 4G Amarisoft de IMT Atlantique 10
2.4.4 Outils d'analyse de performance réseau Iperf3 et OpenSignal . 12
3 Expérimentations en laboratoire 12
3.1 Test du cas d'usage 0 12
3.1.1 Performances du réseau 13
3.1.2 Évaluation du service XpertEye™ 13
3.2 Test du cas d'usage 1 15
3.2.1 Performances du réseau 16
3.2.2 Évaluation du service XpertEye™ 16
3.3 Test du cas d'usage 2 17
3.3.1 Performances du réseau 19
3.3.2 Évaluation du service XpertEye™ 19
3.4 Test du cas d'usage 3 20
3.4.1 Performances du réseau 21
3.4.2 Évaluation du service XpertEye™ 22
3.5 Synthèse 23
4 Expérimentations en situation réelle 23
4.1 Matériels et méthodes 23
4.1.1 Choix des bâtiments d'élevage 23
4.1.2 Déroulé de la visite et collecte de données 23
4.2 Classification des exploitation et des bâtiments 24
4.2.1 Puissance reçue du signal de référence 24
4.2.2 Classification des exploitation selon le seuil exigé par le constructeur 24
4.2.3 Classification des bâtiments selon le type de matériel de construction 24
4.3 Choix de solution en fonction du débit atteint 25
4.4 Effet des matériaux de construction sur la propagation du signal en interne 25
4.5 Résultats obtenus dans les exploitation visitées 25
4.5.1 Performances réseaux du smartphone dans les exploitation . . 25
4.5.2 Performance des antennes utilisées dans les exploitation exploitation 26
4.5.3 Sélection des cas d'études et résultats obtenus 28
4.5.4 Effet des matériaux de construction sur la propagation du signal à l'intérieur des bâtiments 33
4.6 Discussion et conclusion 35
5 Conclusion 36

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1 Principe de déroulement d'une consultation en milieu rural . 5
FIGURE 2 Solution dans le cas où le bâtiment est dans une zone avec une bonne couverture . . . 8
FIGURE 3 Solution dans le cas où le bâtiment est dans une zone avec une mauvaise couverture . . . 8
FIGURE 4 Routeur Teltonika RUT 240 . . . 9
FIGURE 5 Antenne Yagi . . . 9
FIGURE 6 Schéma de principe de la solution proposée . . . 10
FIGURE 7 Antenne YAGI sur perche télescopique contrôlée par micro-contrôleur . . . 10
FIGURE 8 Architecture du réseau LTE Amarys de IMT Atlantique . . . 11
FIGURE 9 Maquette du cas de test de référence . . . 13
FIGURE 10 Débit UL et DL lors du service XpertEye™ . . . 14
FIGURE 11 Latence UL pour le cas de test de référence . . . 14
FIGURE 12 Latence DL pour le cas de test de référence . . . 14
FIGURE 13 Gigue UL pour le cas de test de référence . . . 15
FIGURE 14 Gigue DL pour le cas de test de référence . . . 15
FIGURE 15 Maquette du cas de test 1 avec une bonne couverture réseau et la présence d'une cage de Faraday . . . 16
FIGURE 16 Débit UL / DL du service XpertEye™ pour le cas de test 1 . . . 17
FIGURE 17 Maquette du cas de test 2 . . . 18
FIGURE 18 Maquette du cas de test 3 . . . 21
FIGURE 19 Débit Uplink atteint dans les exploitation choisies . . . 29
FIGURE 20 Débit Downlink atteint dans les exploitation choisies . . . 30
FIGURE 21 Variation RSRP entre téléphone et routeur avec antenne d'origine . . . 30
FIGURE 22 Variation RSRP entre Téléphone et routeur + Antenne YAGI . 31
FIGURE 23 Variation RSRP entre téléphone et routeur + antenne omni-directionnelle . . . 31
FIGURE 24 Variation RSRP entre les différentes antennes utilisées sur le routeur . . . 32
FIGURE 25 Débit Downlink atteint dans les exploitation de test . . . 32
FIGURE 26 Débit Uplink atteint dans les exploitation de test . . . 33
FIGURE 27 Variation du RSCP dans les bâtiments de catégorie 2 . . . 34
FIGURE 28 Variation du RSCP dans les bâtiments de catégorie 1 . . . 35

LISTE DES TABLEAUX

TABLE 1 Ports et protocoles de transport utilisés par le service XpertEye™ 6
TABLE 2 Qualité du signal reçu en fonction du niveau de réception . . 12
TABLE 3 Résultats des tests de performance du réseau dans le cas de test référence 13
TABLE 4 Intensité du signal 4G reçu 15
TABLE 5 Tableau récapitulatif de l'usage du réseau par le service XpertEye™ 15
TABLE 6 Résultats des tests de performance du réseau dans le cas de test 1 16
TABLE 7 Tableau récapitulatif de l'usage du réseau par le service XpertEye™ 17
TABLE 8 Qualité du signal 4G reçu 17
TABLE 9 Niveau de réception avec 30dB d'atténuation dans le cas de test 2 18
TABLE 10 Qualité du signal avec 20dB d'atténuation dans le cas de test 2 18
TABLE 11 Performances réseaux pour le cas de test 2 19
TABLE 12 Utilisation du réseau par le service XpertEye™ dans le cas de test 2 19
TABLE 13 Comparaison entre l'antenne d'origine et l'antenne Yagi dans le cas de test 2 20
TABLE 14 Qualité de réception avec 20dB d'atténuation dans le cas de test 3 21
TABLE 15 Performances du réseau pour le cas de test 3 21
TABLE 16 Usage du réseau par le service XpertEye™ dans le cas de test 3 22
TABLE 17 Comparaison entre l'antenne d'origine et l'antenne Yagi dans le cas de test 3 22
TABLE 18 Niveau signal 3G en fonction du RSCP 24
TABLE 19 Résultat des tests effectués avec le téléphone 26
TABLE 20 Première partie des résultat des tests effectués avec les différentes antennes 27
TABLE 21 Seconde partie des résultat des tests effectués avec les différentes antennes 28
TABLE 22 Échantillon de tests 28
TABLE 23 Résultats des tests effectués avec les antennes 29

1 INTRODUCTION

Faisant partie des cinq actes de télémédecine, la téléexpertise a pour but de permettre à un professionnel de santé de solliciter l'avis d'un ou plusieurs professionnels médicaux en raison de leurs formations ou de leurs compétences sur la base des informations médicales liées à la prise en charge d'un patient. Chez les vétérinaires, elle représente l'apport scientifique d'un autre vétérinaire ayant des connaissances spécifiques dans un domaine relevant de l'acte vétérinaire, par exemple l'interprétation d'image médicale. Le vétérinaire traitant fait appel à un consultant, qui aura pour rôle d'intervenir sur demande du praticien qui apporte ses soins habituellement à un animal. Cette intervention ponctuelle est portée à la connaissance du client, qui y consent. Le vétérinaire consultant peut exercer son activité soit à son propre domicile professionnel d'exercice, soit à celui du ou des confrères ayant fait appel à ses services comme le stipule l'article R 242-58 [1] du Code de déontologie. La téléexpertise repose totalement sur la disponibilité des ressources informatiques et il est indispensable de dispoer d'une infrastructure réseau pour son application.

Dans le cadre de ses activités de consultations, ONIRIS offre, via des lunettes connectées, une téléexpertise auprès des vétérinaires ruraux. Ce service donne au vétérinaire, lors de ses consultations, accès en temps réel voix et vidéo à un expert situé dans son lieu de travail devant son ordinateur afin de guider le vétérinaire dans son intervention. Le dispositif permet aussi la prise de photos et l'expert peut utiliser un pointeur qui sera visible au niveau de l'écran des lunettes du vétérinaire pour pointer sur certains organes de l'animal lors de l'intervention. Un exemple d'intervention dans une exploitation pourra se présenter comme suit : lors d'une consultation de routine le vétérinaire remarque une anomalie chez une des vaches et n'ayant pas d'expérience sur ce qu'il voit, il demande l'avis d'un expert grâce aux lunettes connectées qui lui permettront de partager son champ de vision en temps réel avec ce dernier. La figure suivante illustre le principe de déroulement d'une consultation.

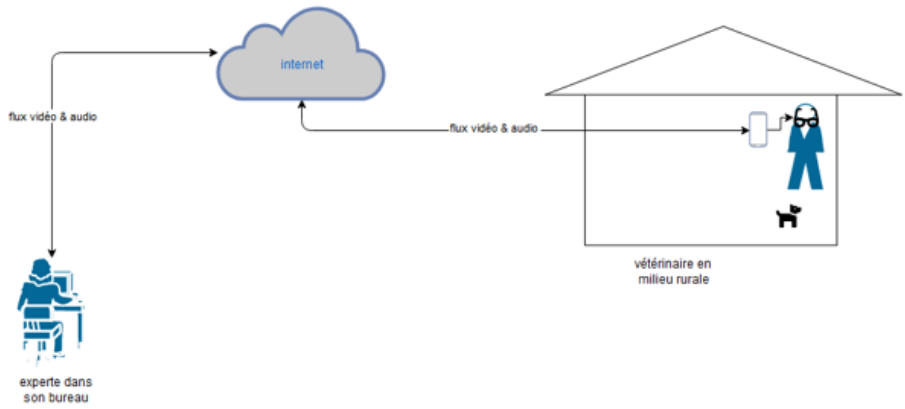


FIGURE 1 – Principe de déroulement d'une consultation en milieu rural

Le lieu d'exercice de ces praticiens se situe majoritairement dans les exploitations agricoles en milieu rural généralement caractérisé par une couverture réseau très aléatoire. Les smartphones 4G peuvent offrir un très bon débit de connexion mais seulement en cas de bonne couverture mobile. Or les antennes des opérateurs ne couvrent pas l'intégralité du territoire et les zones rurales sont souvent mal couvertes. De plus, les ondes électromagnétiques émises par les antennes des opérateurs sont soumises à divers phénomènes au cours de leurs propagations dans le

1. https ://www.legifrance.gouv.fr/codes/id/LEGIARTI000030361056/2015-03-16/

milieu : la réflexion et la diffraction en sont des exemples [1]. Dans les exploitations agricoles, les bâtiments d'élevage en tôle métallique font souvent obstacle à la propagation radio. Un tel contexte géographique et architectural peut devenir rédhibitoire pour le déploiement, l'usage effectif et l'adoption par les vétérinaires, de services comme la téléexpertise.

Le domaine de la téléphonie mobile a connu un essor important durant ces dix dernières années avec l'évolution de la qualité des signaux passant de la 2G à la 5G. En France le niveau de couverture (population) en 4G est estimé à près de 97,25% tous opérateurs confondus. Les trois premiers opérateurs historiques, à savoir Orange, Bouygues et SFR, sont en tête avec une couverture de 99% et FREE avec une couverture de 92%. Ces quatre opérateurs ont à ce jour occupé, sur les 53 750 sites 4G autorisés par l'Agence Nationale des Fréquences, 47 977 sites qui sont déjà en service au 1er Septembre 2020. Mais la couverture totale du territoire par le réseau 4G n'est pas encore effective car selon l'ARCEP elle varie de 80% chez Free à 88% chez Orange. Les exploitations visitées par les vétérinaires utilisant les services d'ONIRIS, sont principalement dans la région des Pays de la Loire et dans le sud de l'Ille-et-Vilaine. Une carte interactive est disponible sur *monréseaumobile.fr* qui permet de connaitre le niveau de couverture en fonction de l'opérateur utilisé dans une zone donnée.

L'objectif de ce travail est de proposer une solution simple d'utilisation et avec un minimum de manipulations pour les vétérinaires, qui va permettre à ces derniers, de pouvoir communiquer sans interruption et avec une qualité de son et d'image nettement améliorée lors de leurs interventions en milieu rural. Une étude en laboratoire est menée pour étudier les différentes situations de pertes de connectivité. Différentes solutions techniques sont développées en prenant en compte les différents cas de figure que peuvent rencontrer les vétérinaires lors de leurs interventions en milieu rural. Ces solutions sont évaluées par des séries de tests en situation opérationnelle, obéissant au format de l'épidémiologie descriptive dans des exploitations sélectionnées pour leurs connectivités réseaux défaillantes.

2 ANALYSES PRÉLIMINAIRES

2.1 Contraintes techniques du service de téléexpertise

Le service de téléexpertise s'appuie sur la solution XpertEye™ développée par la société AMA basée à Rennes et spécialisée dans le développement de solutions de collaboration à distance sur objets connectés. XpertEye™ consiste en un kit constitué principalement d'une paire de lunettes connectées VUZIX et d'un smartphone utilisable sur réseau mobile avec un abonnement 4G ou via un réseau sans fil wifi a/b/g/n. Les échanges multimédias s'appuient sur WebRTC avec la configuration indiquée au tableau 1 :

Application	Protocoles	Ports
Serveurs de mise à jour et de support à distance via VPN SSL	TLS	443
Serveur de temps NTP	UDP	123
Serveur STUN	TCP	5349
URL de l'interface examinateur	TLS	443
Flux audio et vidéo	UDP	40000 à 60000

TABLE 1 – Ports et protocoles de transport utilisés par le service XpertEye™

Afin de bénéficier de l'ensemble des fonctionnalités de la solution XpertEye™, il est recommandé de satisfaire les exigences suivantes :

— Bande passante Vidéo : 400Kbps minimum, 1Mbps conseillé

— Bande passante Audio : 100Kbps conseillé
— Navigateur Web : Dernière version de Google ChromeTM (64 ou supérieure) pour accéder à la solution et profiter de l'ensemble de ses fonctionnalités.
— Résolution de l'écran : La résolution supportée par le navigateur Internet pour une expérience utilisateur optimale est de 1280x720 ou supérieure. L'encodage de la vidéo se fait par le navigateur avec le codec vidéo VP8 (WebRTC standard).
— Webcam et micro : Pour une qualité de son optimale et une confidentialité accrue, l'utilisation d'un casque avec micro est conseillée [2].

2.2 Les cas d'usage du service de téléexpertise

Lors de ces interventions, le vétérinaire peut se retrouver dans différentes situations de couverture réseau et peut être amené à faires des consultations dans des bâtiments aux architectures diverses et variées, qui sont construits avec des matériaux plus ou moins favorables à la propagation des ondes.

2.2.1 Cas d'usage 0 : Vétérinaire sous bonne couverture 4G

Dans ce cas de figure, le vétérinaire se trouve dans une zone où il n'y pas de problème de couverture réseau 4G et la consultation se déroule hors des bâtiments. C'est le cas de figure de référence où il n'y a pas de problème de communication entre le vétérinaire et l'expert.

2.2.2 Cas d'usage 1 : Vétérinaire sous bonne couverture 4G dans un bâtiment faisant office de cage de Faraday

Le vétérinaire, dans une zone avec une bonne couverture 4G, devra effectuer ses consultations dans les bâtiments. Ces bâtiments parfois en métal peuvent perturber la propagation des ondes émises par les antennes des opérateurs et se comportent dans le pire des cas comme des cages de Faraday. Par conséquent nous avons un risque de perte partielle voire totale de connectivité et une dégradation en conséquence de la qualité de la communication.

2.2.3 Cas d'usage 2 : Vétérinaire sous mauvaise couverture 4G

La zone d'intervention peut être sous mauvaise couverture réseau 4G. Ce cas d'usage est caractérisé par une difficulté à se connecter à internet et à atteindre des débits de connexion acceptables pour effectuer une communication entre le vétérinaire avec le smartphone XpertEye et l'expert via le réseau de l'opérateur.

2.2.4 Cas d'usage 3 : Vétérinaire sous mauvaise couverture 4G dans un bâtiment faisant office de cage de Faraday

En plus d'une difficulté d'accéder à internet via le réseau de l'opérateur, la consultation devra se dérouler dans les bâtiments dont les caractéristiques rendent plus difficile l'accès à internet avec l'équipement d'XpertEye™. Ce cas d'usage est clairement une combinaison des cas 1 et 2.

2.3 Principe des solutions pour renforcer la connectivité réseau

La perte de connectivité dans le cas 1 peut être en principe intégralement compensée par l'introduction d'une passerelle 4G/wifi localisée physiquement sur le seuil de le bâtiments.

La mauvaise couverture réseau 4G pourrait être relativement améliorée par l'introduction d'une antenne offrant des qualités de réception optimale et surélevée par

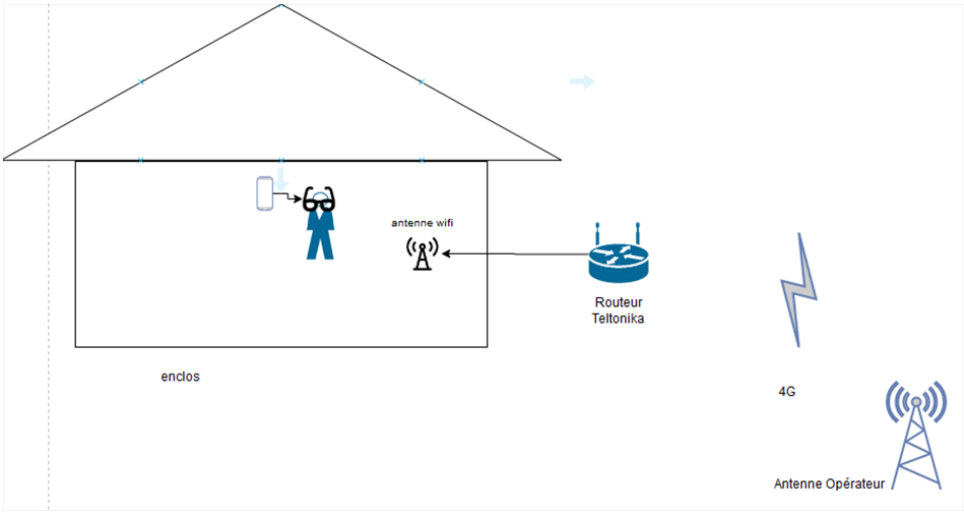


FIGURE 2 – Solution dans le cas où le bâtiment est dans une zone avec une bonne couverture

rapport au niveau du sol. Ce dernier point repose sur l'observation empirique que la réceptivité est souvent supérieure à quelques mètres au-dessus du sol.

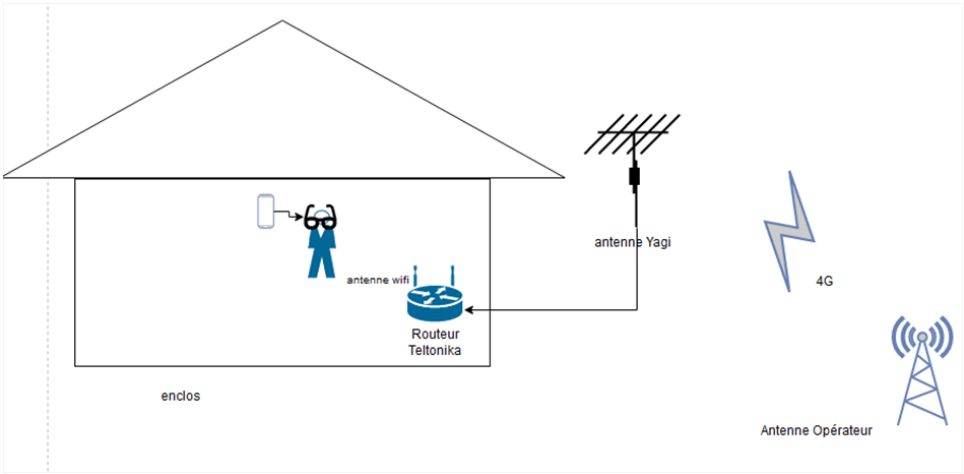


FIGURE 3 – Solution dans le cas où le bâtiment est dans une zone avec une mauvaise couverture

2.4 Plateforme d'expérimentation

2.4.1 Passerelle 4G/Wifi

Le choix s'est porté sur l'équipement Teltonika model RUT240 [2] qui est un routeur 4G doté d'un noyau Linux. Il comporte deux ports Ethernet, un logement pour une carte Sim de taille macro, trois antennes détachables dont deux mobiles et une wifi.

2. https ://picclick.fr/Teltonika-RUT240-SDK-Support-324165060744.html

FIGURE 4 – Routeur Teltonika RUT 240

2.4.2 *Antenne à gain*

L'antenne Yagi [3] extérieure a été sélectionnée. Elle a une capacité bi-bande 806-960/1710-2170MHz bi-bande 7/9dBi et est fournie avec un câble RG58 10m avec connecteur mâle SMA, qui fonctionne dans les différents cas suivants :

— Bande GSM / CDMA 800/850/900MHz
— Bande AWS 1.7/2.1 GHz
— BandeDCS 1800MHz
— Bande 1900MHz de service de communication personnelle (PCS)
— Applications de bande WCDMA 2100MHz.[3]

FIGURE 5 – Antenne Yagi

La figure suivante représente le schéma de principe de la solution choisie.

3. https://www.amazon.fr/ANYCALL-Directionnelle-Directionnel-Cellulaire-Amplificateur/dp/B078BMDLBV/ref=sr_1_5?dchild=1&keywords=antenne+yagi&qid=1623859520&sr=8-5

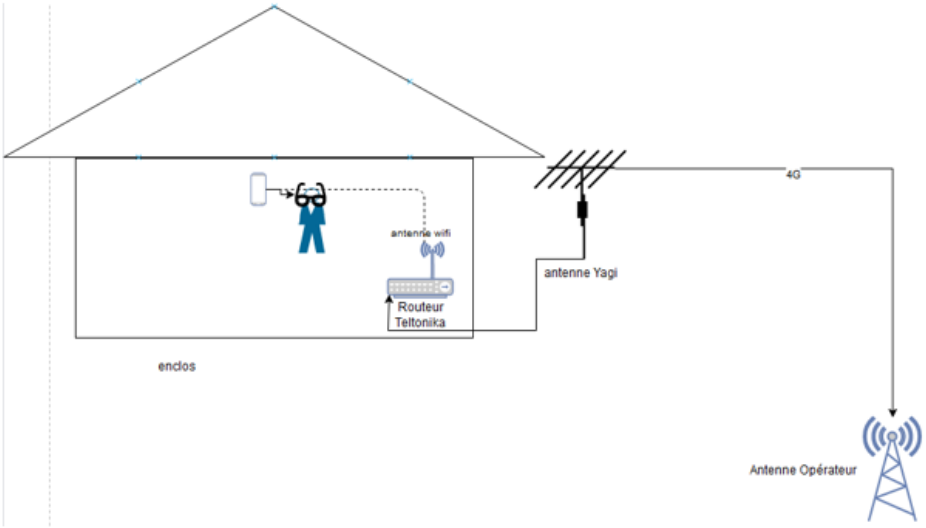


FIGURE 6 – Schéma de principe de la solution proposée

Pour simplifier l'utilisation de l'antenne, un système d'orientation automatique vers la direction où la réception du signal 4G est la meilleure, est ajouté. Il nécessite deux servomoteurs reliés à un microcontrôleur ESP8266 : l'un gère la rotation sur 180° sur le plan horizontal et l'autre gère l'élévation de l'antenne. Les informations issues de l'interface d'administration du routeur sur la qualité du signal associé à la position de l'antenne, permettent de mettre en place un algorithme de permutation qui garde à chaque fois la plus grande valeur du RSRP (Reference Signal Received Power) entre deux positions de l'antenne. A la fin du balayage à 180° le microcontrôleur replace l'antenne à la position où la valeur du RSRP était la plus élevée lors du balayage et se fixe sur cette position jusqu'à ce que l'on redémarre le dispositif. La figure suivante est une représentation du dispositif mis au point pour la recherche automatique de la meilleure position de réception du signal 4G.

FIGURE 7 – Antenne YAGI sur perche télescopique contrôlée par microcontrôleur

2.4.3 *Banc de test 4G Amarisoft de IMT Atlantique*

L'architecture logique de la plateforme Amarisoft, est constituée de deux parties : le cœur de réseau EPC (Evolved PacketsCore) et la partie E-UTRAN. L'e-NodeB (Evolved NodeB) représente la station de base. Dans cette architecture on retrouve les quatre éléments du cœur de réseau qui sont :

— Le S-GW (Serving Gateway)

— Le MME (Mobility Management Equipement)
— Le HSS (Home Subscriber Server)
— Le P-GW (Paquet Data Network Gateway)

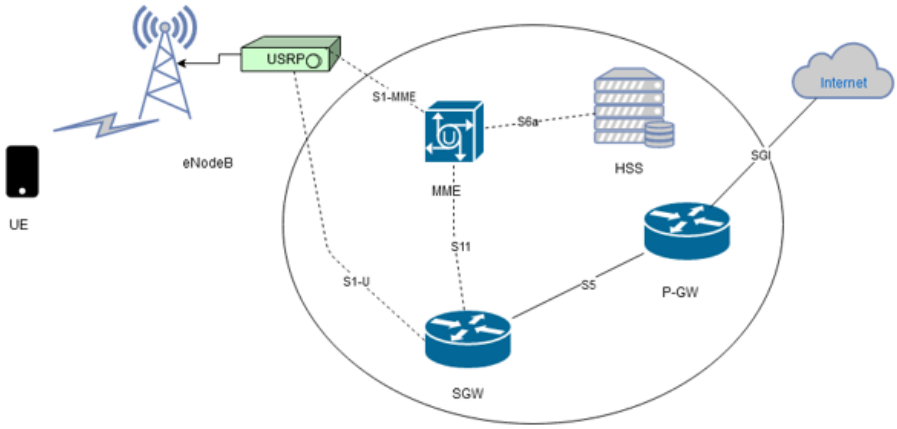


FIGURE 8 – Architecture du réseau LTE Amarys de IMT Atlantique

Le réseau LTE est configuré selon les paramètres suivants :

— EARFCN = 300. Il identifie de manière unique la bande LTE et la fréquence porteuse
— Bandwidth = 25 : 5Mhz (largeur de la bande). On dispose de 25 Ressources Blocs qui peuvent transmettre 25*84 symboles * 6 bits en 0,5 ms soient 12600 bits transmis en 0,5 ms. Le débit théorique est 25,2 Mbits/s [4]
— Qualité de la connectivité en fonction des signaux reçus
    — Dans la norme LTE, le RSRP est la mesure normalisée de la puissance du signal reçu par le terminal. Il peut varier entre -44dBm et -140dBm
    — o Le RSSI est une mesure interne au terminal qui, avec le RSRP, permet de calculer le RSRQ. Le RSSI a une valeur plus élevée de 20 à 30 dB que le RSRP, selon la largeur de la bande utilisée (5 à 20 Mhz) et quelques autres paramètres.Donc un RSSI inférieur à -50 /-60 dBm peut être comme optimal pour un terminal LTE
    — o Le tableau 4 ci-dessous permet d'apprécier la qualité du signal reçu en fonctions des paramètres précédents [5] :

4. http ://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/2013/08/27/rsrp-et-rsrq-2eme-definition/

RSRP (dBm)	**RSRQ** (dB)	**SNR** (dB)	**Evaluation**	**Connectivité prévue**
-84 et plus	-5	12,5	Excellent	Bonne vitesse de connexion sans perte de paquets
-85 à -102	-5 à -9	10 à 12	Bien	Bonne vitesse de connexion sans perte de paquets
-103 à -111	-9 à -12	10 à 7	Juste	Une bonne connexion, latence plus longue et débit de donnée correct
-112 et moins	-12	7	Médiocre	Nette diminution de la vitesse de connexion, latence beaucoup plus longue et des déconnexions régulières

TABLE 2 – Qualité du signal reçu en fonction du niveau de réception

2.4.4 Outils d'analyse de performance réseau Iperf3 et OpenSignal

Iperf3 est un outil de test de débit actif pour mesurer la bande passante maximale atteignable sur les réseaux IP. Iperf3 permet de modifier de nombreux paramètres tels que les durées, les buffers, les protocoles (TCP, UDP, SCTP, avec IPv4 et IPv6). Pour chaque test, il donne la bande passante, les pertes de paquets et d'autres informations.

- TCP et SCTP
  - Mesure de la bande passante (débit) sur une ou plusieurs connexions TCP en parallèle.
  - Taille de la MSS/MTU réelle
  - Modification de la taille de la fenêtre TCP (Rwin)
- UDP
  - Le client peut créer des flux UDP avec un débit spécifié
  - Mesure la perte de paquets (en nombre de paquets et en pourcentage) [6]

L'application OpenSignal permet aux utilisateurs de trouver le meilleur signal téléphonique, mesure la force du signal, la vitesse et la fiabilité des données, et permetd'afficher les réseaux Wi-Fi à proximité. Les utilisateurs de l'application partagent des informations avec OpenSignal, qui sont utilisées dans leurs cartes indépendantes de couverture de l'opérateur et du service NetworkRank. OpenSignal-NetworkRank est un service intégré à l'application comparant les performances de différents opérateurs cellulaires dans des régions particulières. Le service fait partie de leurs cartes de transporteurs, qui sont codées par couleur pour montrer les zones de signal de téléphone portable fortes et faibles. Les informations utilisées sont fournies par les utilisateurs de l'application OpenSignal.[7]

3 EXPÉRIMENTATIONS EN LABORATOIRE

3.1 Test du cas d'usage 0

La figure ci-dessous illustre le test mené.

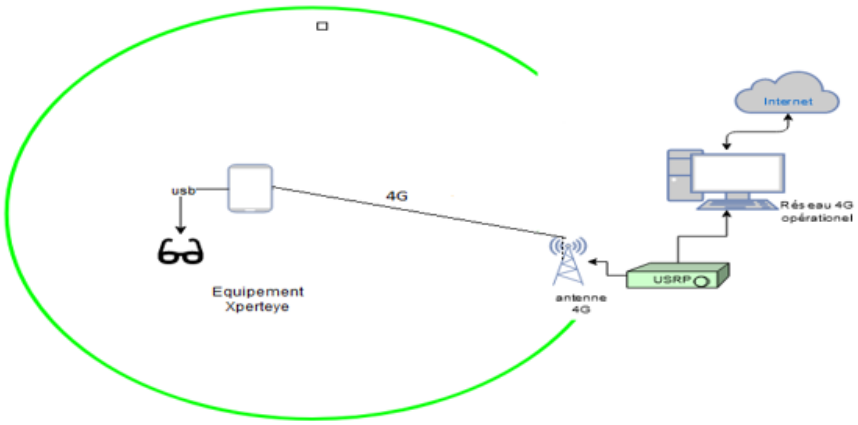


FIGURE 9 – Maquette du cas de test de référence

3.1.1 *Performances du réseau*

Les tests de débit avec Iperf consistent à envoyer un flux de données sur le réseau et, en fonction du taux d'erreur reçu, à en déduire la capacité maximale pouvant être transmise sur le réseau en Uplink (UL) comme en Downlink (DL) durant un temps donné. En plus du débit en UL et en DL, le taux de perte peut aussi être déterminé.

Situation de test	**Débit**	**Gigue**	**Taux de perte** (sur 5 tests)
1e cas en UL	7 Mbps	15.75 oms	1: 0% / 2: 0% / 3: 0% / 4: 0% / 5: 0%
2e cas en UL	8 Mbps	14.372 ms	1: 0% / 2: 0% / 3: 0% / 4: 0% / 5: 0%
3e cas en UL	9 Mbps	13.090 ms	1: 3% / 2: 66% / 3: 47% / 4: 67% / 5: 64%
1e cas en DL	16 Mbps	5.448 ms	1: 0% / 2: 0% / 3: 0% / 4: 0% / 5: 0%
2e cas en DL	17 Mbps	5.321 ms	1: 0% / 2: 0% / 3: 0.039% / 4: 0% / 5: 0%
3e cas en DL	18 Mbps	5.038 ms	1: 0.8% / 2: 0.84% / 3: 0.69% / 4: 1.7% / 5: 1.7%

TABLE 3 – Résultats des tests de performance du réseau dans le cas de test référence

3.1.2 *Évaluation du service XpertEye™*

Cette évaluation est réalisée par l'appel d'un utilisateur distant via la plateforme au cours duquel différentes mesures sont faites.

— Débit UL / Débit DL

Le débit UL se situe autour de 3Mbps tandis que le débit DL est autour de 2Mbps. Ces débits peuvent varier en fonction des données transmises (par exemple la caméra est immobilisée sur un objet fixe).

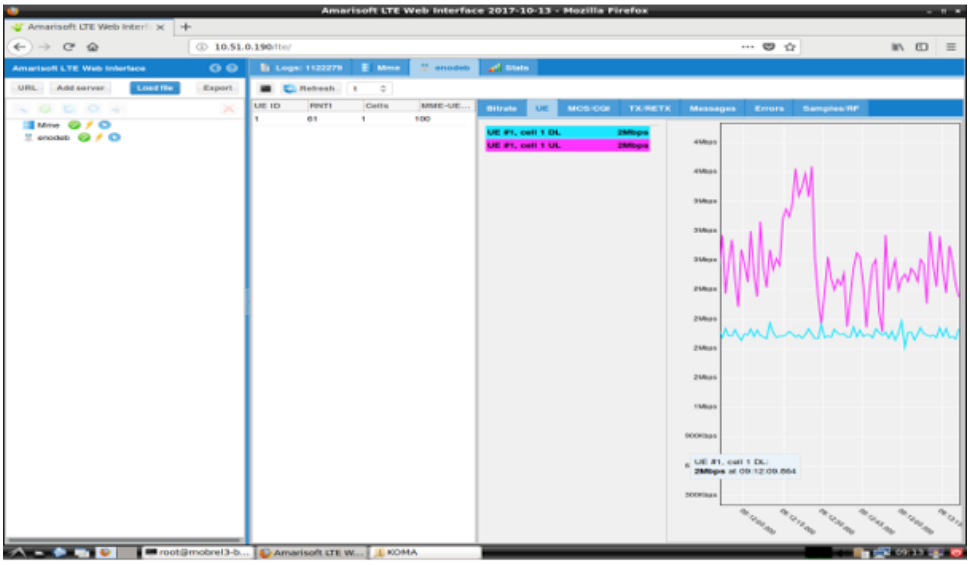


FIGURE 10 – Débit UL et DL lors du service XpertEye™

Ces résultats sont issus de la page d'administration de la plateforme, qui permet de visualiser en temps réel, le débit montant et descendant sur le réseau.

— Latence (UE → MME)

La latence est le temps mis par un paquet pour parcourir la distance entre la source et la destination dans un réseau. Elle est donnée par la commande ping entre l'adresse IP de la source dans notre cas le téléphone XpertEye™ et l'adresse IP de destinationc'est-à-dire celuidu MME.

```
--- 10.51.0.190 ping statistics ---
100 packets transmitted, 100 received, 0% packet loss, time 99127ms
rtt min/avg/max/mdev = 15.122/34.929/533.528/50.742 ms
sailfish:/ $
```

FIGURE 11 – Latence UL pour le cas de test de référence

La valeur moyenne de la latence qui est de 34,929 ms.

— Latence (UE ← MME)

La même mesure est faite mais du MME vers l'UE. La latence moyenne est de 33,586 ms.

```
--- 192.168.3.2 ping statistics ---
100 packets transmitted, 100 received, 0% packet loss, time 99137ms
rtt min/avg/max/mdev = 14.253/33.586/342.867/32.272 ms
mobrel@mobrel3-backhaul:~/src/amarisoft/lteenb-linux-2017-10-13$
```

FIGURE 12 – Latence DL pour le cas de test de référence

— Gigue (UE ← MME)

La gigue est définie comme la variation de la latence. IPERF permet de mesurer la gigue lors du service de téléexpertise en faisant un test en UDP. A partir du serveur IPERF installé sur la machine qui sert de cœur de réseau, un flux de données est envoyé vers le mobile XpertEye™ sur lequel le client Iperf est installé. La valeur obtenue est de 3.708 ms.

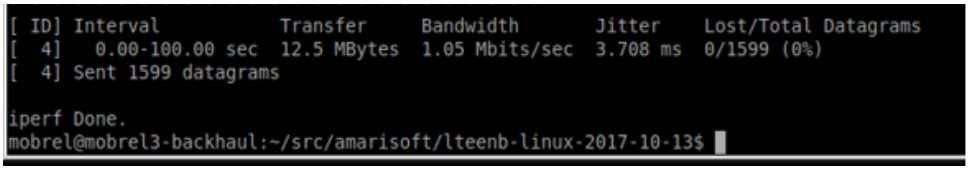


FIGURE 13 – Gigue UL pour le cas de test de référence

— Gigue (UE → MME)

Dans le sens inverse la gigue obtenue est de 9.058 ms.

FIGURE 14 – Gigue DL pour le cas de test de référence

— Mesure du RSRP et du RSRQ.

Qualité du signal 4G	Évaluation
RSRP = -76 dBm	Bonne qualité de réception
RSRQ = -3 dBm	Communication fluide sans perturbation majeure

TABLE 4 – Intensité du signal 4G reçu

Un tableau récapitulatif des différentes mesures réalisées lors du service XpertEye™ sur le réseau est donné ci-dessous.

Utilisation du réseau par le service XpertEye™	
Débit UL	3 Mbps
Débit DL	2 Mbps
Latence UE → MME	34.9 ms
Latence UE ← MME	33.5 ms
Gigue UE → MME	9.058 ms
Gigue UE ← MME	3.7 ms

TABLE 5 – Tableau récapitulatif de l'usage du réseau par le service XpertEye™

3.2 Test du cas d'usage 1

Dans ce cas, la couverture réseau est correcte mais il y a la présence d'une cage de Faraday qui est une enceinte qui empêche l'entrée ou la sortie d'ondes. Elle est utilisée pour isoler un milieu des ondes radios. Pour le test, le dispositif XpertEye™ est mis dans la cage de Faraday qui est hermétiquement fermée. Pour que le mobile XpertEye™ puisse accéder à internet, l'antenne wifi du routeur Teltonika est insérée dans la cage de Faraday grâce à un fil qui relie le routeur et la cage de Faraday. La figure suivante illustre ce test.

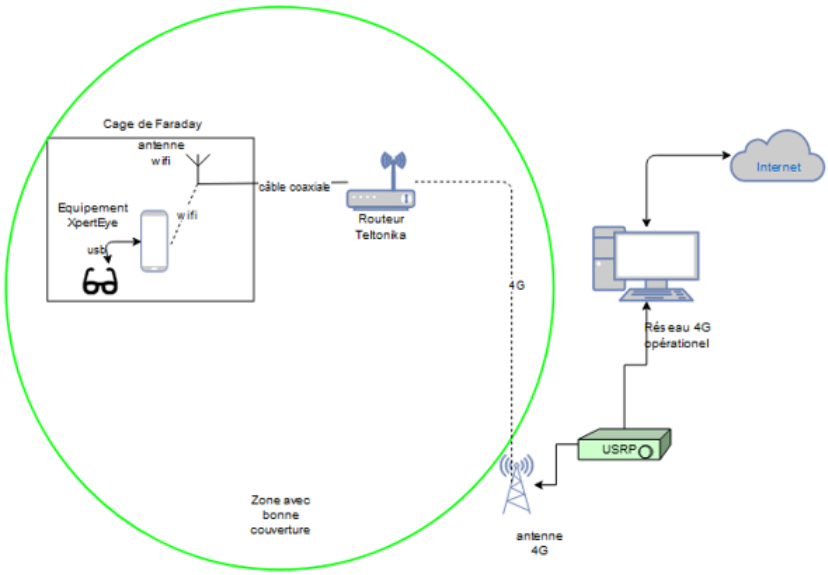


FIGURE 15 – Maquette du cas de test 1 avec une bonne couverture réseau et la présence d'une cage de Faraday

Le câble coaxial est utilisé pour connecter le routeur à l'antenne wifi qui se trouve dans la cage de Faraday. Le routeur Teltonika, à l'extérieur de la cage de Faraday, se connecte au réseau 4G opérationnel. Le téléphone XpertEye™ se connecte sur le réseau wifi à l'intérieur de la cage de Faraday.

3.2.1 *Performances du réseau*

Situation de test	**Débit**	**Gigue**	**Taux de perte** (sur 5 tests)
1e cas en UL	7 Mbps	12.195 ms	1: 0% | 2: 0% | 3: 0% | 4: 0.44% | 5: 0%
2e cas en UL	8 Mbps	11.870 ms	1: 0.17% | 2: 0% | 3: 0.42% | 4: 23% | 5: 0%
3e cas en UL	9 Mbps	14.954 ms	1: 1.1% | 2: 7.8% | 3: 21% | 4: 3.7% | 5: 16%
1e cas en DL	16 Mbps	5.295 ms	1: 0% | 2: 0% | 3: 0% | 4: 0% | 5: 0%
2e cas en DL	17 Mbps	5.393 ms	1: 0% | 2: 0% | 3: 0% | 4: 0% | 5: 0.077%
3e cas en DL	18 Mbps	8.406 ms	1: 0.69% | 2: 0.77% | 3: 0.69% | 4: 0.69% | 5: 0.73%

TABLE 6 – Résultats des tests de performance du réseau dans le cas de test 1

3.2.2 *Évaluation du service XpertEye™*

Les débits UL/DL peuvent atteindre 2Mbps.

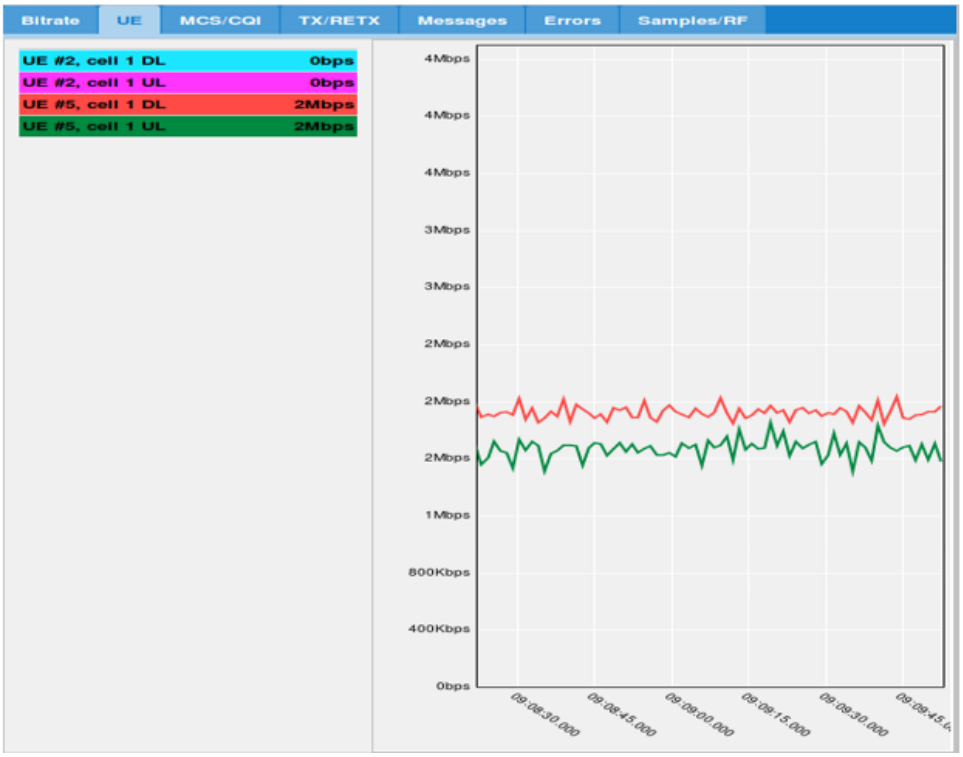


FIGURE 16 – Débit UL / DL du service XpertEye™ pour le cas de test 1

Utilisation du réseau par le service XpertEye™	
Débit UL	2Mbps
Débit DL	2Mbps
Latence	38ms
Gigue UE → MME	10,502ms
Gigue UE ← MME	3,62ms

TABLE 7 – Tableau récapitulatif de l'usage du réseau par le service XpertEye™

Qualité du signal 4G	Évaluation
RSRP = -86 dBm	Bonne vitesse de connexion sans perte
RSRQ = -4 dB	
SNIR = 28.7 dB	

TABLE 8 – Qualité du signal 4G reçu

3.3 Test du cas d'usage 2

Ce cas de test suppose que le signal reçu par le routeur est trop faible pour garantir une connexion stable permettant d'effectuer le service XpertEye™. Il s'agit alors d'y pallier en utilisant une antenne avec un gain plus important. L'antenne dirigée en direction de l'antenne émettrice doit permettre en principe d'avoir une meilleure qualité de signal par rapport à l'antenne d'origine. Le schéma ci-dessous illustre le test réalisé.

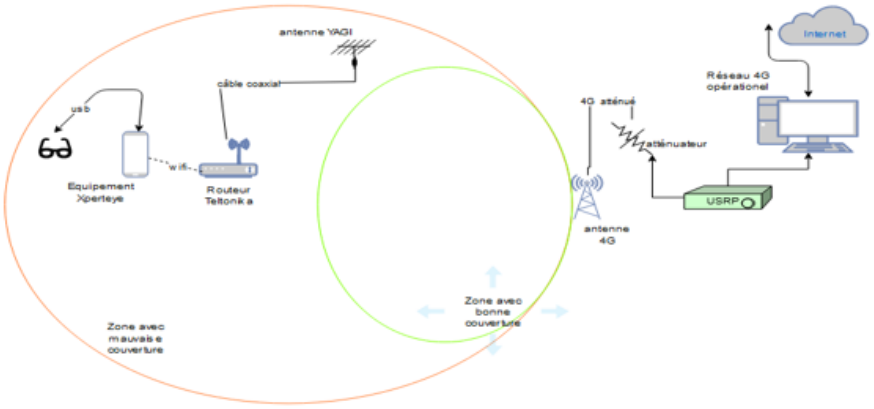


FIGURE 17 – Maquette du cas de test 2

Pour concrétiser la mauvaise couverture, d'une part un atténuateur de signal a été ajouté et d'autre part l'antenne réceptricea été mise à l'autre bout de la salle de test. L'atténuateur est placé entre l'USRP et l'antenne 4G. Le tableau suivant représente les résultats obtenus.

Atténuations	**Informations sur le réseau**	**Résultats Speed test (OpenSignal)**
30dB (antenne d'origine du routeur)	RSRP = -140dBm RSRQ = -3dB SNIR = -6.3dB	UL/DL= N/A Ping = N/A Gigue = N/A
30dB (antenne Yagi)	RSRP = -120dBm RSRQ = -14dB SNIR = -5.1	UL = 1.2Mbps DL = 0.7Mbps Ping = 369ms Gigue = 29ms

TABLE 9 – Niveau de réception avec 30dB d'atténuation dans le cas de test 2

On constate qu'avec ces paramètres, l'antenne d'origine du routeur Teltonika ne permet pas une connexion au réseau Amarys. Par contre, avec l'antenne Yagi, même si le signal reçu est médiocre, on reste connecté sur le réseau Amarys. Les performances demeurent cependant non satisfaisantes pour la mise en service d'une communication optimale entre le vétérinaire et l'expert. Avec une atténuation de 20dB du signal émis par le réseau Amarys, l'antenne YAGI est placée au fond de la salle, soit à 4 mètres de l'antenne émettrice. Les informations suivantes sont obtenues à partir de la page d'administration du routeur.

Qualité du signal 4G	**Évaluation**
RSRP = -107dBm	Bonne qualité de connexion, latence plus longue et débit acceptable
RSRQ = -10dBm	
SNIR = 6.7 dB	

TABLE 10 – Qualité du signal avec 20dB d'atténuation dans le cas de test 2

3.3.1 Performances du réseau

Situation de test	Débit	Gigue	Taux de perte (sur 5 tests)
1e Cas en UL	7Mbps	13.105 ms	1: 0% / 2: 0% / 3: 0% / 4: 0% / 5: 0%
2e Cas en UL	8 Mbps	13.957 ms	1: 0.54% / 2: 0.086% / 3: 0.52% / 4: 0.45% / 5: 2.1%
3e cas en UL	9Mbps	11.757 ms	1: 12% / 2: 12% / 3: 6.7% / 4: 18% / 5: 9%
1e cas en DL	3 Mbps	17.799 ms	1: 0% / 2: 0% / 3: 0.43% / 4: 0% / 5: 1.3%
2e cas en DL	4 Mbps	21.643 ms	1: 1.6% / 2: 0% / 3: 0.82% / 4: 0.82% / 5: 2.4%
3e cas en DL	5 Mbps	24.684 ms	1: 8.8% / 2: 19% / 3: 23% / 4: 0% / 5: 9.7%

TABLE 11 – Performances réseaux pour le cas de test 2

3.3.2 Évaluation du service XpertEye™

Utilisation du réseau par le service XpertEye™	
Débit UL	Environ 2 Mbps
Débit DL	Environ 2 Mbps
Latence	55,075 ms
Gigue UE → MME	21,758 ms
Gigue UE ← MME	18,186 ms

TABLE 12 – Utilisation du réseau par le service XpertEye™ dans le cas de test 2

Le service XpertEye™ est réalisé avec un paramétrage identique avec l'antenne d'origine du routeur Teltonika. Il est constaté une dégradation progressive de la qualité de la vidéo par contre le son n'est pas très affecté. Les débits UL et DL sont très instables et situés autour de 500 kbps et la communication n'a pas pu être maintenue plus de 3 minutes. Par contre avec l'antenne Yagi, les débits UL et DL atteints sont bien plus élevés de l'ordre de 2 Mbps durant 10 minutes. Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus avec les antennes d'origine du routeur et l'antenne YAGI.

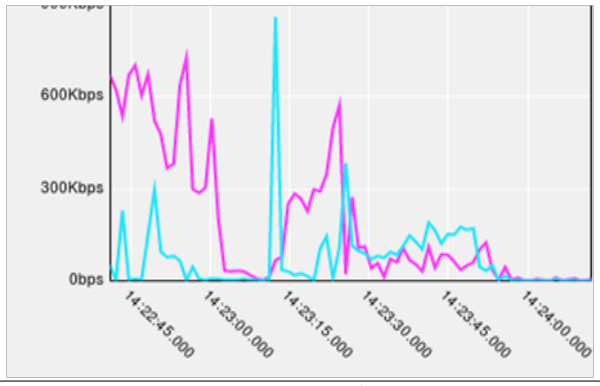
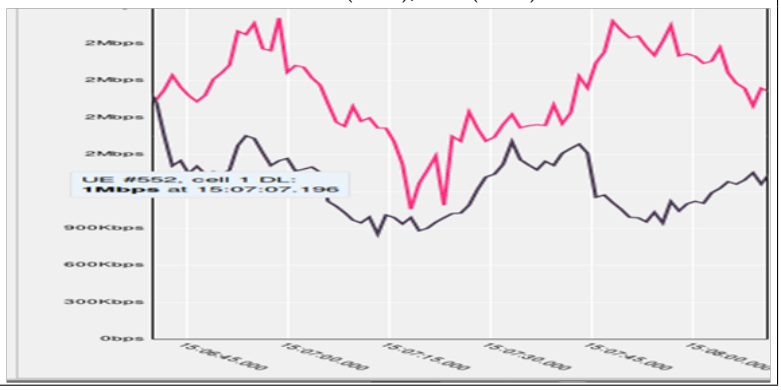
Atténuations	XpertEye™
20 dB (antenne d'origine du routeur)	RSRP = -119 dBm SNIR = 0.7 dB RSRQ = -12 dB Débit UL (rose), DL (bleu) 
20 dB (antenne Yagi)	RSRP = -107 dBm RSRQ = -8 dB SNIR = 0.7 dB Débit UL (rose), DL (bleu) 

TABLE 13 – Comparaison entre l'antenne d'origine et l'antenne Yagi dans le cas de test 2

Sous des mêmes conditions de test, le routeur avec ses antennes d'origine n'arrive pas à maintenir la connexion tandis que l'antenne Yagi permet d'augmenter la capacité de réception du signal 4G par le routeur Teltonika RUT240.

3.4 Test du cas d'usage 3

La figure ci-dessous représente l'architecture utilisée dans le test.

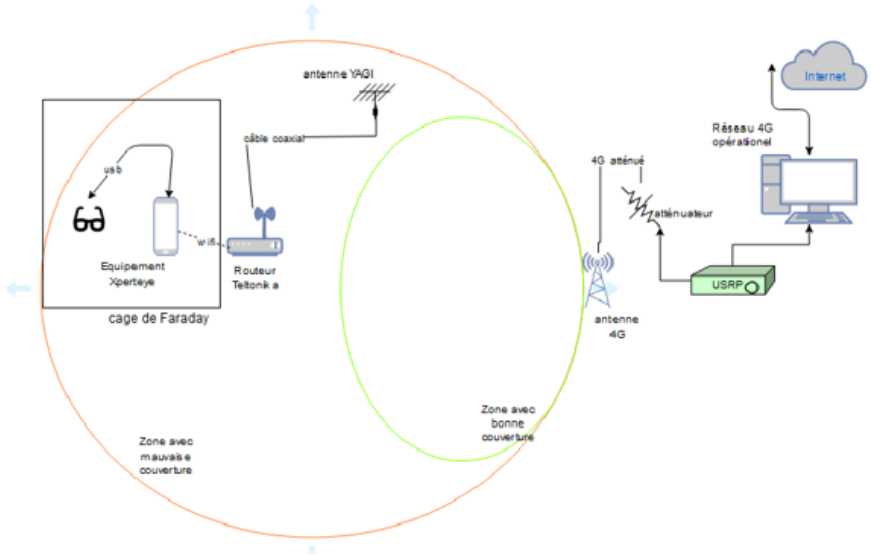


FIGURE 18 – Maquette du cas de test 3

Les mesures sont réalisées dans les conditions suivantes : la distance entre l'émetteur et le récepteur est d'environ 4m avec une atténuation du signal 4G émis, de 20dB. Le smartphone XpertEye™, les lunettes connectées et l'antenne wifi du routeur Teltonika sont dans la cage de Faraday. Les données recueillies sur l'interface d'administration du routeur Teltonika nous indiquent l'état du signal reçu par le routeur ; elles sont rappelées dans le tableau ci-dessous :

Qualité du signal reçu par le routeur (20db d'atténuation)	**Évaluation**
RSRP = -106 dBm	Bonne qualité de connexion, latence plus longue et débit acceptable
RSRQ = -7 dBm	
SNIR = 5,7 dB	

TABLE 14 – Qualité de réception avec 20dB d'atténuation dans le cas de test 3

3.4.1 *Performances du réseau*

Situation de test	**Débit**	**Gigue**	**Taux de perte** (sur 5 tests)
1e Cas en UL	7 Mbps	17,977 ms	1: 0% ; 2: 0% ; 3: 0,5% ; 4: 0% ; 5: 0,39%
2e Cas en UL	8 Mbps	16,478 ms	1: 5,7% ; 2: 12% ; 3: 4,8% ; 4: 6,7% ; 5: 0,085%
3e cas en UL	9Mbps	18.925 ms	1: 8,9% ; 2: 7,2% ; 3: 8,3% ; 4: 20% ; 5: 19%
1e cas en DL	4 Mbps	27.916 ms	1: 0% ; 2: 0% ; 3: 0% ; 4: 0% ; 5: 0%
2e cas en DL	5 Mbps	28.300 ms	1: 0% ; 2: 0% ; 3: 12% ; 4: 14% ; 5: 6%
3e cas en DL	5 Mbps	24.684 ms	1: 31% ; 2: 29% ; 3: 25% ; 4: 34% ; 5: 30%

TABLE 15 – Performances du réseau pour le cas de test 3

3.4.2 *Évaluation du service XpertEye™*

Utilisation du réseau par le service XpertEye™	
Débit UL	Environ 3 Mbps
Débit DL	Environ 2 Mbps
Latence	40,217 ms
Gigue UE → MME	8,649 ms
Gigue UE ← MME	20,633 ms

Table 16 – Usage du réseau par le service XpertEye™ dans le cas de test 3

Avec une configuration identique, les tests avec l'antenne d'origine sont réalisés pour estimer le gain apporté par l'antenne Yagi.

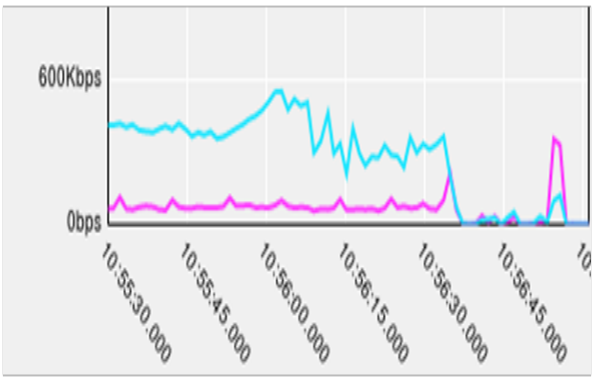
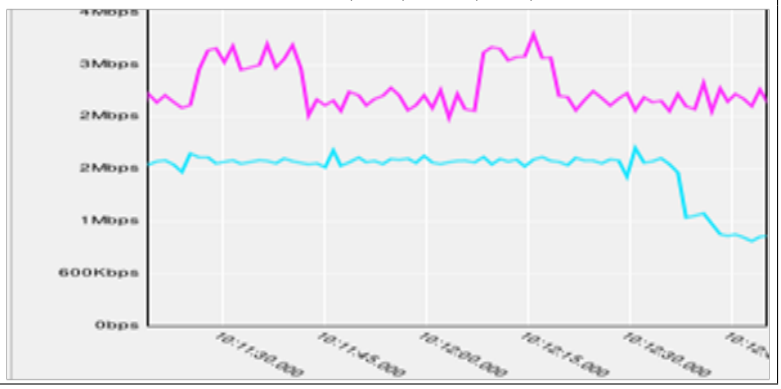
Atténuations	XpertEye™
20 dB (antenne d'origine du routeur)	RSRP = -115 dBm SNIR = -2,9 dB RSRQ = -12 dB Débit UL (rose), DL (bleu) 
20 dB (antenne Yagi)	RSRP = -106 dBm SNIR = 5,7 dB RSRQ = -7 dB Débit UL (rose), DL (bleu) 

Table 17 – Comparaison entre l'antenne d'origine et l'antenne Yagi dans le cas de test 3

Avec l'antenne d'origine du routeur, la communication est parfois maintenue un certain temps mais sans vidéo : soit l'écran reste noir soit l'image reste figée. Avec l'antenne Yagi, il n'y a pas eu de problème lié à la connexion lors de la communication.

3.5 Synthèse

L'étude en laboratoire des différents cas de figure qu'un vétérinaire pourrait rencontrer au cours de ses déplacements chez les exploitants agricoles fait apparaître que dans les cas d'une connexion réseau n'autorisant pas une réalisation correcte du service XpertEye™, les solutions préconisées permettent de rétablir une connectivité réseau permettant une exécution du service XpertEye™ en mode nominal ou en mode dégradé avec perte de la vidéo.

4 EXPÉRIMENTATIONS EN SITUATION RÉELLE

4.1 Matériels et méthodes

4.1.1 Choix des bâtiments d'élevage

Une vingtaine d'exploitations a été choisie pour la mise en situation réelle des solutions proposées. Certaines de ces exploitation sont caractérisées par des bâtiments qui ne sont pas propices à la propagation des ondes, d'autre se situent dans des zones où l'accès à une connexion stable reste pour lors un réel défi.

4.1.2 Déroulé de la visite et collecte de données

Un vétérinaire accompagne chacune des visites réalisées dans les exploitation. Le déroulement est le suivant : durant la prise de contact avec le propriétaire de l' exploitation, l'intérêt du projet est expliqué. Le propriétaire de l' exploitation donne des indications sur la qualité de ses communications à l'intérieur comme à l'extérieur de ses bâtiments. Il désigne l'endroit où les communications passent le moins bien, cet endroit est utilisé pour effectuer les tests.

Dans chaque exploitation, des mesures sont réalisées pour déterminer la qualité du signal reçu par le smartphone à l'extérieur du bâtiment. Le contact est établi avec ONIRIS et un balayage est effectué avec le téléphone debout et accroupi, l'utilisateur qui est au niveau d'ONIRIS prend en photo deux points fixés par le vétérinaire dans l' exploitation, le premier en position debout et le second en position accroupie. Après cette communication, une série de mesures est réalisé pour définir quantitativement la qualité du signal. Ces mesures consistent en la valeur du RSRP accompagnée d'un test sur les débits de téléversement/téléchargement, du recueil de la valeur de la latence et finalement d'un test sur la qualité et la vitesse de chargement d'une vidéo. Ce même procédé est répété à l'intérieur du bâtiment à environ 15 mètres de l'entrée. Les solutions sont ensuite déployées :

— Le routeur avec ses antennes d'origine : dans ce cas de figure le smartphone est connecté au réseau wifi du routeur lui-même connecté au réseau de l'opérateur à travers la carte SIM. Les mêmes tests sont repris avec le routeur et le même procédé est réalisé pour mesurer l'expérience utilisateur.

— Le routeur connecté à l'antenne YAGI : cette antenne étant directionnelle, pour qu'elle soit efficace, elle doit pointer vers la direction de rayonnement de l'antenne émettrice.

— Le routeur connecté à l'antenne omnidirectionnelle : nul besoin de l'orienter car elle reçoit de toute part le signal émis par l'antenne de l'opérateur. Elle a un gain plus important que les antennes d'origine du routeur.

4.2 Classification des exploitation et des bâtiments

4.2.1 *Puissance reçue du signal de référence*

La première valeur à déterminer avec les équipements décrits ci-dessus, est le RSRP qui constitue une valeur moyenne de la puissance reçue du signal de référence émise par la station de base. Il peut arriver qu'en fonction de la zone, la connexion 4G ne soit pas possible, dans ce cas la valeur recueillie est le RSCP (Received Signal Code Power). Le RSCP qui est l'équivalent du RSRP en 3G, permet de qualifier la qualité de la connectivité. Le tableau [5] ci-dessous représente les intervalles de valeurs de RSCP et leur appréciation en termes de qualité de connexion.

Couleur	Intervalle RSCP	Appréciation
	Supérieur à -60 dBm	Très bonne qualité de réception
	De -60 dBm à -75 dBm	Bonne qualité de réception
	De -75 dBm à -85 dBm	Qualité de réception moyenne
	De -85 dBm à -95 dBm	Signal faible, risque de déconnexion
	Inférieur à -95 dBm	Mauvais signal

TABLE 18 – Niveau signal 3G en fonction du RSCP

4.2.2 *Classification des exploitation selon le seuil exigé par le constructeur*

Pour assurer une bonne qualité de communication, le constructeur a fixé un ensemble de prérequis à respecter : concernant le débit pour une communication il faudrait un débit minimal de 400Kbps mais il est conseillé d'avoir un débit de 1 Mbps pour une bonne qualité de communication. La classification s'est faite en couleur donc :

— Le jaune représente les exploitation ou les prérequis réseaux sont respectés

— l'orange représente les exploitation dans lesquelles le débit obtenu était compris entre le débit minimum 400 Kbps exigé et le débit recommandé 1 Mbps.

— Le rouge représente les exploitation dans lesquelles les prérequis réseaux n'étaient pas respectés c'est-à-dire que le débit atteint était inférieur à 400 Kbps.

4.2.3 *Classification des bâtiments selon le type de matériel de construction*

Dans les exploitation visitées, les bâtiments d'élevages bovins sont construits avec les matériaux suivant :

— Pour le bardage, nous avons principalement du bois seul ou avec du parpaing, de la tôle avec ou sans maçonnerie.

— La charpente est souvent constituée de bois ou de métal.

— Le toit des bâtiments d'élevage est généralement constitué de tôle, de fibrociment ou de tuile.

De plus certains bâtiments sont plutôt ouverts sur la longueur avec un filet brise vent et d'autres sont complétement fermés.

— Le type de matériaux utilisé pour la construction des bâtiments peut influer négativement sur la propagation du signal à l'intérieur de ces bâtiments. De ce point de vu, on peut déduire que les bâtiments semi-ouverts sont mieux traversés par les ondes lorsque l' exploitation se situe dans une zone avec une bonne couverture. On peut ainsi classifier les types de bâtiments rencontrés en trois catégories en fonction de leurs architectures et des matériaux de construction utilisés :

5. https://www.researchgate.net/figure/Colour-and-Signal-Strength-Indication-of-RSCP_tbl1_281204716

  - Nous avons la première catégorie qui représente les bâtiments dont le bardage est en béton armé, ancienne construction en pierre ou en parpaing avec des toits en fibrociment ou en métal.
  - La seconde catégorie représente les bâtiments fermés dont le bardage est fait en bois seul ou avec un mur en ciment d'une hauteur de 2,5 mètres et dont le toit est en fibrociment ou en métal.
  - Et enfin la troisième catégorie qui représente les bâtiments ouverts dont le bardage est fait en bois seul ou en tôle avec de la maçonnerie et dont le toit est en fibrociment ou en métal.
- Le relief de la zone est aussi un élément à prendre en compte car il peut aussi être un frein à la propagation des ondes. Sachant que chez les opérateurs, les zones rurales ne sont pas des zones à couvrir en priorité, les petits villages situés dans des zones en basses altitudes sont souvent dépourvus d'une connectivité 4G et par endroit on n'arrive même pas à avoir un accès au réseau de l'opérateur.

4.3 Choix de solution en fonction du débit atteint

Le débit peut être influencé par une mauvaise couverture ou bien par la présence de matériaux non propices à la propagation des ondes. Dans le premier cas, l'antenne YAGI permet de résoudre ce problème. En effet elle a un gain plus important que les autres antennes et le fait qu'elle soit à 3 mètres du sol permet d'avoir une meilleure réception du signal. Lorsqu'on est dans le cas où le bâtiment dans lequel on effectue la manipulation est bloquant pour les ondes et qu'on est dans une zone bien couverte, le fait de mettre le routeur à l'extérieur et de mettre l'antenne wifi à l'intérieur permet d'accéder à internet et de se mettre en contact avec ONIRIS.

4.4 Effet des matériaux de construction sur la propagation du signal en interne

Lors de nos visites, nous avons eu à faire nos tests dans des bâtiments qui étaient :

- Bloquant pour la propagation des ondes c'est-à-dire qu'à l'intérieur de ces bâtiments nous avions une grande différence entre la valeur du RSRP en interne et parfois ils nous étaient impossible de nous connecter sur le réseau de l'opérateur.
- Et d'autre part des bâtiments dans lesquels il n'y avait pas une grande différence entre la valeur du RSRP en externe et en interne

4.5 Résultats obtenus dans les exploitation visitées

4.5.1 Performances réseaux du smartphone dans les exploitation

Les performances réseaux recueillies au niveau de chaque exploitation ont permis d'éditer le tableau suivant dans lequel figurent la valeur du RSRP obtenu en interne et en externe, le débit Uplink, le débit Downlink et la latence.

Qualitatif réseau Bouygues lorsqu'on utilise directement le téléphone								
	RSRP (en dBm)		Débit DL (en Mbps)		Débit UL (en Mbps)		Latence (en ms)	
Exp	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int
Exp1	-102	-104	6,95M	6,91	4,83	5,09	48,5	N/A
Exp2	-102	-102	30,73	13.02	10.47	2,35M	45,34	58,49
Exp3	-113	-115	26.08	20.8	5.57	1.55	38.8	40.6
Exp4	-112	-116	8.18	3.94	0.7	0.48	32.16	42.88
Exp5	-114d	-106	2.78	8.04	0.45	0.70	40.2	42
Exp6	-106	-98	3.95	4.98	2.72	6.57	39.9	34.8
Exp7	-106	-109d	4.6M	5.37M	2.59	7.83	29.6	29.8
Exp8	-107	-108	5.35M	5.78	0.9	0.39	31.4	45.2
Exp9	-97	-109	7.6	3.01	10.8	0.5	28.4	34
Exp10	-122	-115	2.26	4.01	0.20	0.45	42.75	38.2
Exp11	3G/-113	3G/-105	2.56	0.1	0.52	0	39.2	111
Exp12	-108	-108	7.22	13.7	2.04	0.76M	32	42.2
Exp13	3G/-95	N/A	6.91	N/A	0.75	N/A	41.4	N/A
Exp14	-98	-110	10.85	5.23	6.61	3.26	35.5	34.8
Exp15	3G/-101d	3G/-91	0.83	10.07	0.022	3.25	127	34.4
Exp16	-97	-98	15.72	10.73	3.62	7.8	36.8	37
Exp17	3G/-95	3G/-103	4.29	1.43	0.72	0.11	42.6	59.4
Exp18	-118	-118	0.63	5.58M	0	0.12	50	63.4
Exp19	-110	-105	13.8	19.34	1.75	2.55	40.2	38.2
Exp20	-112	-123	6.31	1.18	0.92	0.05	40.4	43.3

TABLE 19 – Résultat des tests effectués avec le téléphone

Dans 45% des exploitation, les débits sont supérieurs au seuil imposé pour une utilisation optimale des lunettes connectées. Dans 20% des exploitations, avec des débits Uplink inférieurs au seuil recommandé pour une bonne communication, une communication avec ONIRIS a néanmoins pu être réalisée. Des difficultés de communication ont persisté dans 35% des exploitation restantes. Colorié en rouge, elles représentent les exploitation dans lesquelles il n'est pas possible d'établir une connexion avec ONIRIS directement avec le smartphone.

4.5.2 Performance des antennes utilisées dans les exploitation exploitation

Dans chacune de ces exploitation, le routeur avec les différentes antennes a aussi été utilisé. Le tableau suivant montre les résultats obtenus à l'issu des tests quantitatifs réalisés avec les différentes antennes.

Exploitation	Combinaison routeur/antenne	RSRP (en dBm)	Débit UL (en Mbps)	Débit DL (en Mbps)	Latence (en ms)
Exp1	Routeur + AO	-101	14.55	5.47	N/A
	Routeur + AY	-111	4.84	1.85	N/A
	Routeur + AOm	N/A	N/A	N/A	N/A
Exp2	Routeur + AO	-105	7.4	2.08	51
	Routeur + AY	99	5.92	14.28	42.2
	Routeur + AOm	-106	8.92	8.16	43.6
Exp3	Routeur + AO	-111	3.38	0.17	111
	Routeur + AY	-109	14.26	1.73	41.94
	Routeur + AOm	-104	12.34	2.08	32.34
Exp4	Routeur + AO	-108	4.45	0.54	66,2
	Routeur + AY	-101	9.39	5.62	34.25
	Routeur + AOm	-109	5.35	3.22	33
Exp5	Routeur + AO	-104	5.91	0.61	78.38
	Routeur + AY	-96	2.31	11.6	44
	Routeur + AOm	-100	8.86	4.52	51.4
Exp6	Routeur + AO	-102	5.39	3.43	39.2
	Routeur + AY	-95	3.49	7.30	50
	Routeur + AOm	-97	4.95	7.58	49.2
Exp7	Routeur + AO	-105	5.40	3.06	41.2
	Routeur + AY	-97	4.04	4.77	42
	Routeur + AOm	-93	5.70	10.93	50.4
Exp8	Routeur + AO	-107	4.48	0.74	42.6
	Routeur + AY	-92	4.23	9.09	44.6
	Routeur + AOm	-97	6.19	4.60	46.2
Exp9	Routeur + AO	-114	4.42	1.46	43.4
	Routeur + AY	-95	7.04	14.04	41
	Routeur + AOm	-105	3.8	1.12	42.8
Exp10	Routeur + AO	-117	2.52	0.76	38.54
	Routeur + AY	-101	8.76	7.16	42.4
	Routeur + AOm	-113	3.28	1.53	76.8
Exp11	Routeur + AO	-117	0.93	0.2	118
	Routeur + AY	-107	4.73	4.64	41.4
	Routeur + AOm	-104	7.04	3.28	46.6
Exp12	Routeur + AO	-108	9.90	4.09	37
	Routeur + AY	-94	7.42	7.86	43
	Routeur + AOm	-102	4.10	2.77	44.2
Exp13	Routeur + AO	3G -89	3.07	1.84	44
	Routeur + AY	-98	9.63	9.16	46.4
	Routeur + AOm	-107	1.74	1.06	49.6
Exp14	Routeur + AO	-109	4.84	2.13	42.4
	Routeur + AY	-96	15.49	14.36	44
	Routeur + AOm	-104	8.06	5.66	43.4
Exp15	Routeur + AO	-109	10.79	2.42	46
	Routeur + AY	-105	4.11	2.92	59.2
	Routeur + AOm	-107	2.87	0.86	60.4

TABLE 20 – Première partie des résultat des tests effectués avec les différentes antennes

Exploitation	Combinaison routeur/antenne	RSRP (en dBm)	Débit UL (en Mbps)	Débit DL (en Mbps)	Latence (en ms)
Exp16	Routeur + AO	-94	16.72	6.27	39.4
	Routeur + AY	-87	16.53	15.74	44.4
	Routeur + AOm	N/A	N/A	N/A	N/A
Exp17	Routeur + AO	-122	1.46	0.41	56.4
	Routeur + AY	-104	5.38	2.61	47.2
	Routeur + AOm	-95	4.71	2.34	41
Exp18	Routeur + AO	3G -102	1.34	0.128	99
	Routeur + AY	-111	3.67	4.11	37.7
	Routeur + AOm	-116	4.55	0.73	36.4
Exp19	Routeur + AO	-102	6.35	4.42	34.2
	Routeur + AY	-107	9.51	4.64	47.8
	Routeur + AOm	-106	9.15	2.02	45.4
Exp20	Routeur + AO	-116	1.72	0.46	58.8
	Routeur + AY	-106	3.45	1.06	52
	Routeur + AOm	-110	3.92	0.99	56.4

TABLE 21 – Seconde partie des résultat des tests effectués avec les différentes antennes

4.5.3 Sélection des cas d'études et résultats obtenus

La partie qui suit concerne les exploitation dans lesquelles les prérequis réseaux ne sont pas respectés et à partir desquelles il n'était pas possible de joindre ONIRIS avec le smartphone connecté au réseau de l'opérateur. Ce choix est motivé par le souhait d'éprouver les solutions proposées dans les cas de figure présentant la connectivité réseau la plus affaiblie. Le groupe d' exploitation servant d'échantillon d'étude, est représenté dans le tableau suivant :

	RSRP (en dBm)		Débit DL (en Mbps)		Débit UL (en Mbps)		Latence (en ms)	
Exp	**Ext**	**Int**	**Ext**	**Int**	**Ext**	**Int**	**Ext**	**Int**
Exp11	3G/-113	3G/-105	2.56	0.1	0.52	0	39.2	111
Exp13	3G/-95	N/A	6.91	N/A	0.75	N/A	41.4	N/A
Exp17	3G/-95	3G/-103	4.29	1.43	0.72	0.11	42.6	59.4
Exp18	-118	-118	0.63	5.58	0	0.12	50	63.4
Exp20	-112	-123	6.31	1.18	0.92	0.05	40.4	43.3

TABLE 22 – Échantillon de tests

Dans chacune de ces exploitation, les différentes antennes ont été testées lors des tentatives de contact avec ONIRIS pour apprécier la qualité de la communication lorsqu'elle est établie. Les résultats obtenus sont répertoriés dans le tableau ci-dessous avec la valeur du signal reçu avec chaque antenne, le débit Uplink (envoi de donnée sur le réseau), le débit Downlink (téléchargement) et la latence.

Exploitation	Combinaison routeur/antenne	RSRP (en dBm)	Débit UL (en Mbps)	Débit DL (en Mbps)	Latence (en ms)
Exp11	Routeur + AO	-117	0.93	0.2	118
	Routeur + AY	-107	4.73	4.64	41.4
	Routeur + AOm	-104	7.04	3.28	46.6
Exp13	Routeur + AO	3G -89	3.07	1.84	44
	Routeur + AY	-98	9.63	9.16	46.4
	Routeur + AOm	-107	1.74	1.06	49.6
Exp17	Routeur + AO	-122	1.46	0.41	56.4
	Routeur + AY	-104	5.38	2.61	47.2
	Routeur + AOm	-95	4.71	2.34	41
Exp18	Routeur + AO	3G -102	1.34	0.128	99
	Routeur + AY	-111	3.67	4.11	37.7
	Routeur + AOm	-116	4.55	0.73	36.4
Exp20	Routeur + AO	-116	1.72	0.46	58.8
	Routeur + AY	-106	3.45	1.06	52
	Routeur + AOm	-110	3.92	0.99	56.4

TABLE 23 – Résultats des tests effectués avec les antennes

La figure suivante montre le débit Uplink atteint dans les cinq exploitation lorsque le smartphone est directement connecté au réseau de l'opérateur.

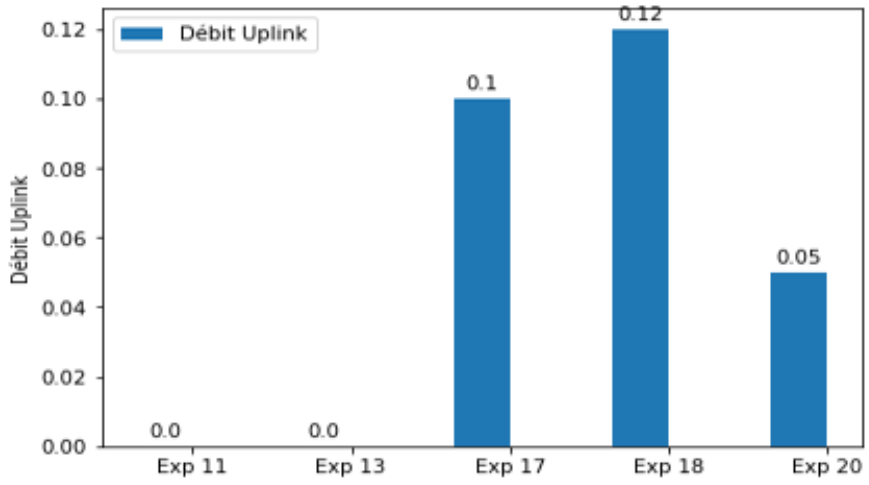


FIGURE 19 – Débit Uplink atteint dans les exploitation choisies

Comme le montre le graphique le débit Uplink maximum atteint dans ces cinq exploitation est de 0.12Mbps qui est inférieur au seuil défini par le constructeur pour une bonne communication.

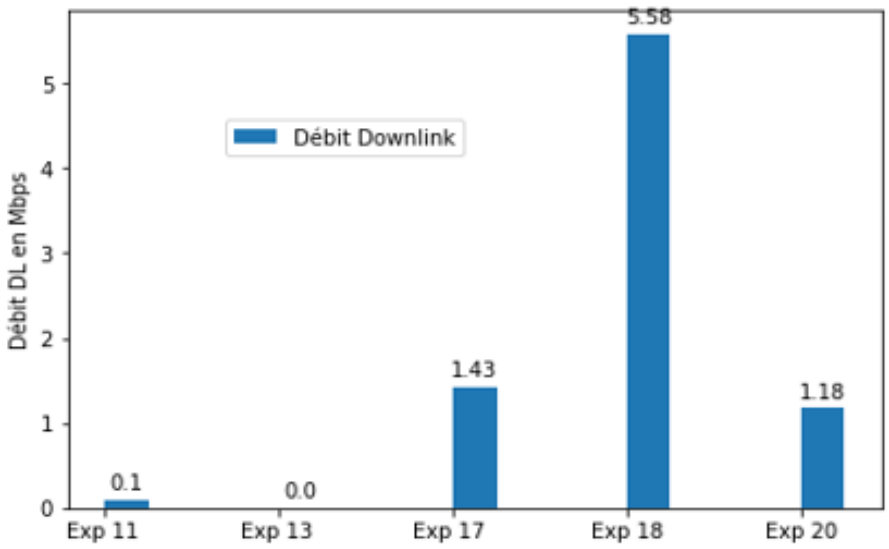


FIGURE 20 – Débit Downlink atteint dans les exploitation choisies

Le débit Downlink est parfois supérieur au seuil imposé. A noter l'importance du débit Uplink qui correspond à la capacité de transmission du flux vidéo du vétérinaire vers le réseau.

La figure suivante montre les différentes valeurs du RSRP obtenues avec l'antenne d'origine du routeur :

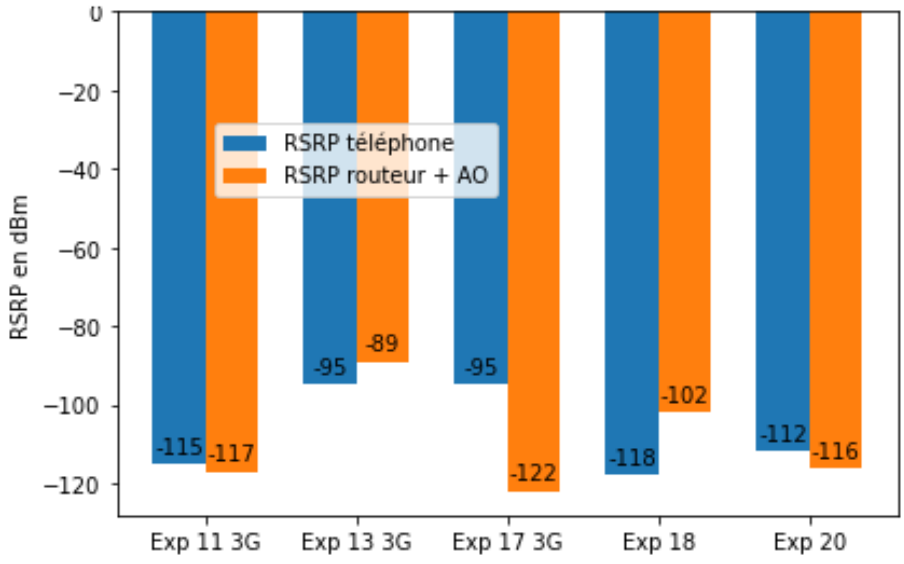


FIGURE 21 – Variation RSRP entre téléphone et routeur avec antenne d'origine

Lorsque le routeur est utilisé avec ses antennes d'origine, une amélioration de la valeur du RSRP ou du RSCP dans certaines exploitation, est observée. Cette amélioration est due au fait que les antennes du routeur sont plus sensibles que l'antenne incorporée dans le smartphone. Il faut garder à l'esprit que les mesures avec le smartphone dans les exploitation 11, 13 et 17 s'appuyaient sur un réseau 3G, ainsi la valeur représentée sur le graphique représente dans ces cas la valeur du RSCP à la différence des exploitation 18 et 20 pour lesquelles il s'agit de la valeur du

RSRP représentée par la barre orange lorsque le routeur est utilisé avec ses antennes d'origine. A noter que dans le cas des exploitation 13 et 17, la communication avec ONIRIS en étant connecté en 3G a été possible, ce qui n'avait pas pu être réalisé avec le smartphone connecté directement au réseau de l'opérateur.

Une comparaison identique mais avec le routeur connecté à l'antenne YAGI, est donnée ci-dessous :

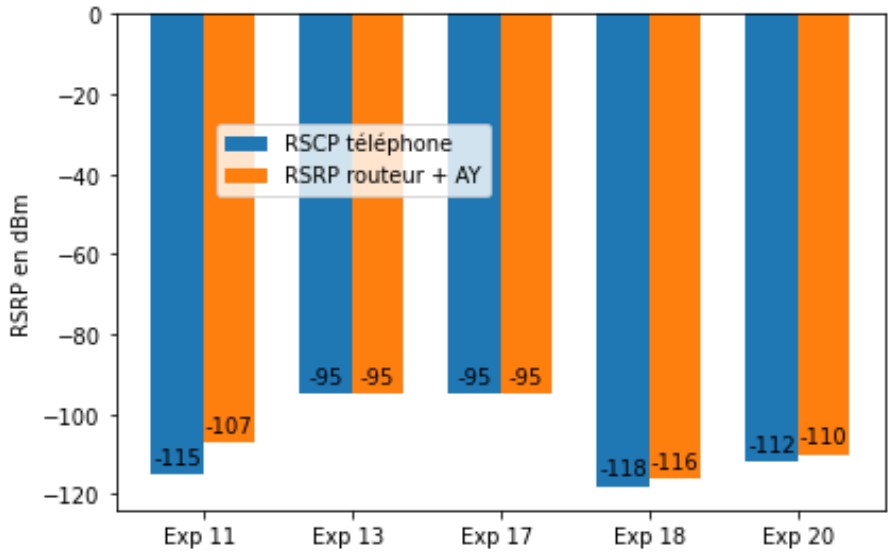


FIGURE 22 – Variation RSRP entre Téléphone et routeur + Antenne YAGI

On note toujours que le smartphone est connecté en 3G et que les valeurs sur le graphique sont les valeurs du RSCP. Avec l'antenne YAGI, la différence est bien plus visible. En effet l'antenne YAGI est une antenne à gain pouvant ajouter jusqu'à 10dBm de gain au signal reçu dans la plupart des exploitation. Elle a permis de garantir une bonne communication dans toutes les exploitation visitées.

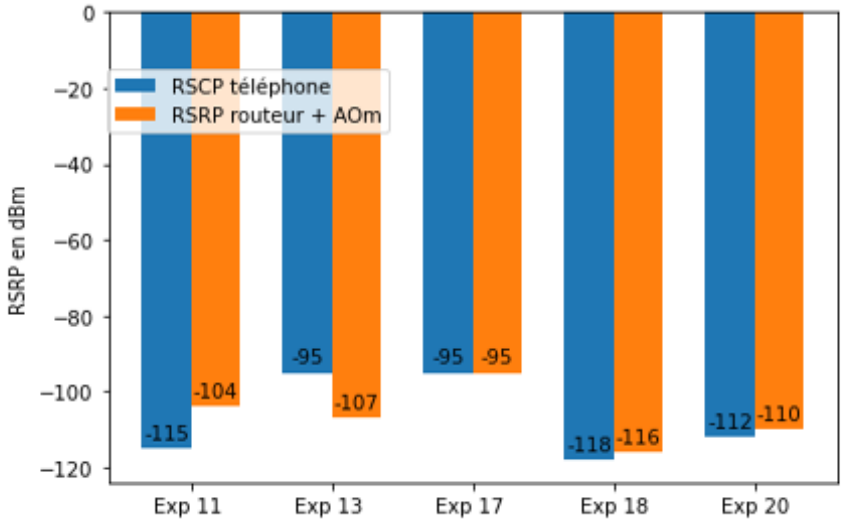


FIGURE 23 – Variation RSRP entre téléphone et routeur + antenne omnidirectionnelle

l'antenne omnidirectionnelle améliore aussi le signal comparativement au téléphone. En effet, avec cette dernière, une communication avec ONIRIS a pu être établie alors que cela s'était avéré impossible avec le téléphone et le routeur avec son antenne d'origine.

Une figure comparative permet de voir, laquelle parmi les trois antennes, est celle qui permet d'avoir la meilleure valeur de RSRP dans les cinq exploitation choisies pour leurs connectivités défaillantes.

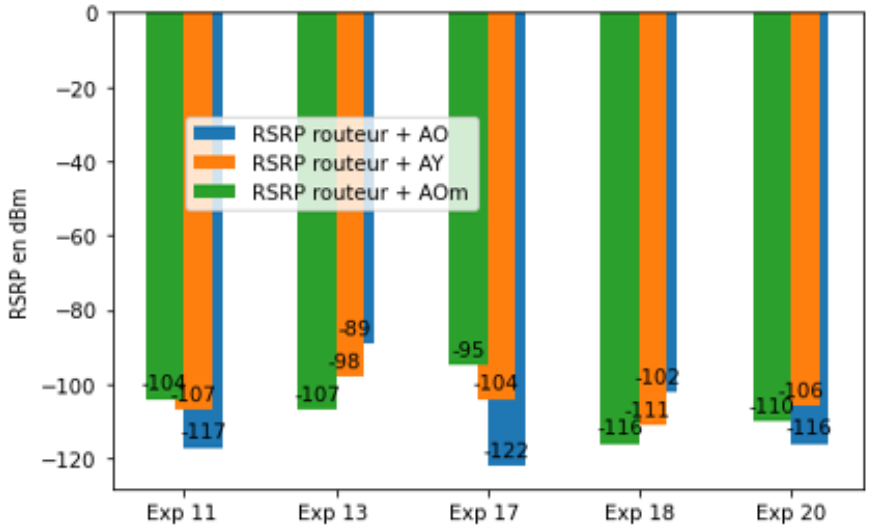


FIGURE 24 – Variation RSRP entre les différentes antennes utilisées sur le routeur

Dans les exploitation 13 et 18, le routeur avec ses antennes d'origine sont en 3G. l'antenne YAGI et l'antenne omnidirectionnelle permettent de garantir une connexion 4G et de meilleures valeurs du RSRP. Dans toutes ces exploitation, une communication sans interruption entre le vétérinaire et ONIRIS, a pu être assurée avec ces deux antennes. Il faut aussi noter que la valeur du RSRP dépend de la zone où l'on se trouve notamment si elle est à basse altitude et mal couverte. Dans ce cas les pertes de connexion sont bien plus importantes. l' exploitation à Méré Le Breuil Sous Argenton 79150 ARGENTONNAY en constitue un bon exemple. Cette exploitation a une partie de ses bâtiments sur une zone à basse altitude où aucun signal de l'opérateur Bouygues Télécoms n'est disponible. Une autre partie de ces bâtiments est située plus en hauteur. Dans cette seconde partie de l' exploitation, la connexion réseau peut s'établir mais il est impossible d'effectuer le service XpertEye™ sans passer par l'une des solutions proposées.

La figure suivante représente le débit atteint dans ces exploitation avec chacune des antennes utilisées :

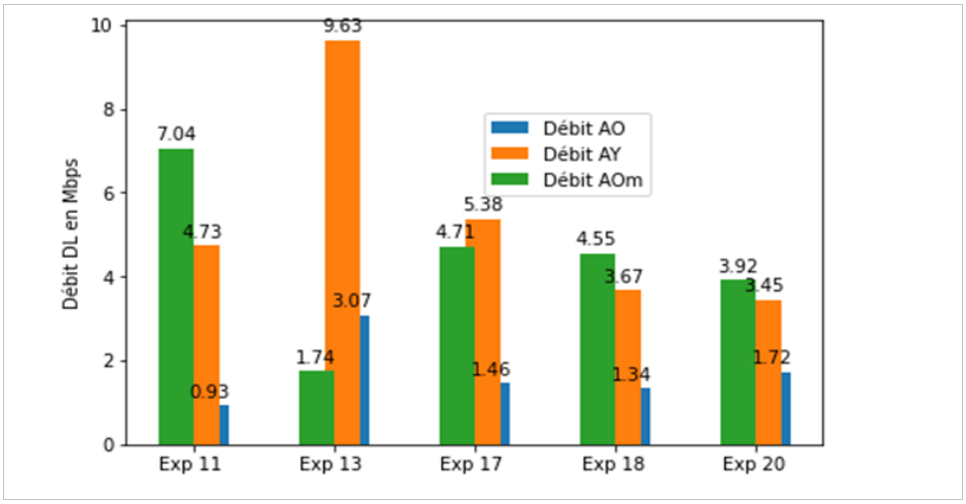


FIGURE 25 – Débit Downlink atteint dans les exploitation de test

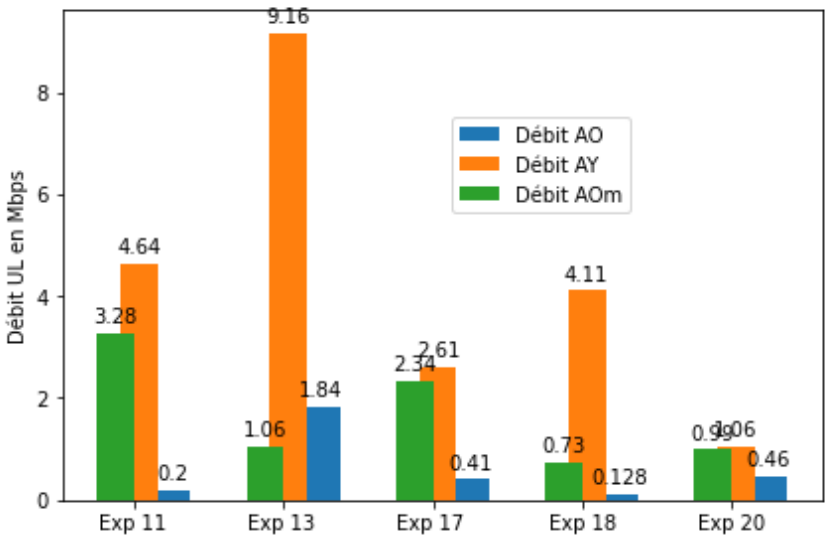


FIGURE 26 – Débit Uplink atteint dans les exploitation de test

Ces tableaux permettent de constater que dans le pire des scénarios, l'antenne YAGI permet d'avoir le débit minimal requis exigé par le constructeur pour une bonne qualité de communication.

4.5.4 *Effet des matériaux de construction sur la propagation du signal à l'intérieur des bâtiments*

La plupart des matériaux utilisés pour la construction des bâtiments ne bloque pas totalement la propagation des ondes à l'intérieur des bâtiments. En effet il existe une faible différence entre la valeur du RSRP en externe et celle obtenue en interne dans certaines exploitation situées dans des zones où le contact avec ONIRIS avec le smartphone est immédiat. Ces bâtiments sont construits en parpaing, bois pour le bardage avec des toits en métal ou en fibrociment comme le montre le graphique qui suit :

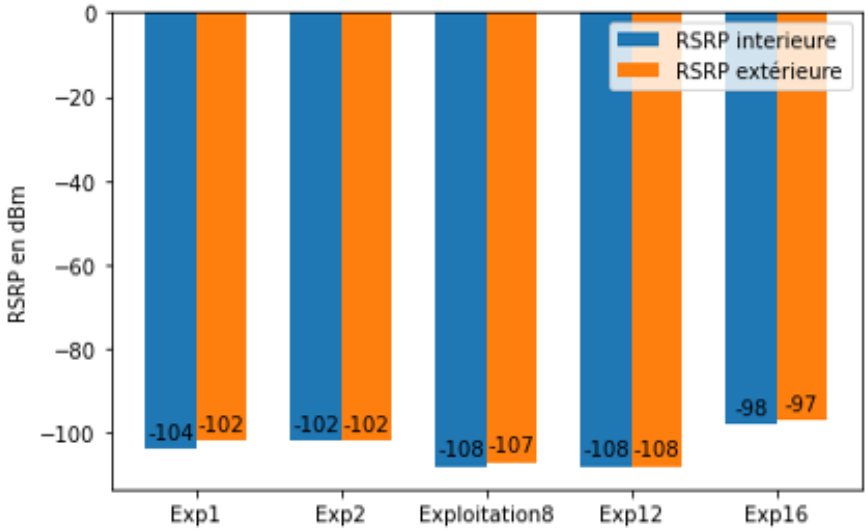


FIGURE 27 – Variation du RSCP dans les bâtiments de catégorie 2

Dans cinq exploitation dans lesquelles il n'y a pas de problème majeur de connectivité, la valeur du RSRP est mesurée au niveau du téléphone en externe comme à l'intérieur des bâtiments. La plus grande différence de cette valeur obtenue est de l'ordre de 2 dBm. Donc les bâtiments de catégorie 2 ne sont pas bloquant pour la propagation des ondes.

Néanmoins il existe quelques bâtimentsqui sont bloquant : ce sont les bâtiments construits avec des murs en pierre très épais. Dans ces bâtiments, pour la plupart du temps il n'est pas possible de se connecter sur le réseau de l'opérateur.

Pour pallier à ce problème, l'une des solutions proposées peut être utilisée en tenant compte du niveau de couverture de la zone.

En mettant à l'extérieur du bâtiment l'antenne mobile du routeur qui est reliée par un fil à ce dernier, dans la pièce dans laquelle les tests sont réalisés, le smartphone se connecte au réseau wifi du routeur. Si ce bâtiment se situe dans une zone mal couverte le mieux est d'utiliser le routeur placé dans la pièce où se font les mesures et de le connecter à l'antenne YAGI situé à l'extérieur et qui permet d'améliorer la qualité du signal reçu. Le graphique qui suit montre la différence de la valeur du RSRP entre le téléphone lorsqu'on est dans un bâtiment qui reproduit l'effet cage de Faraday.

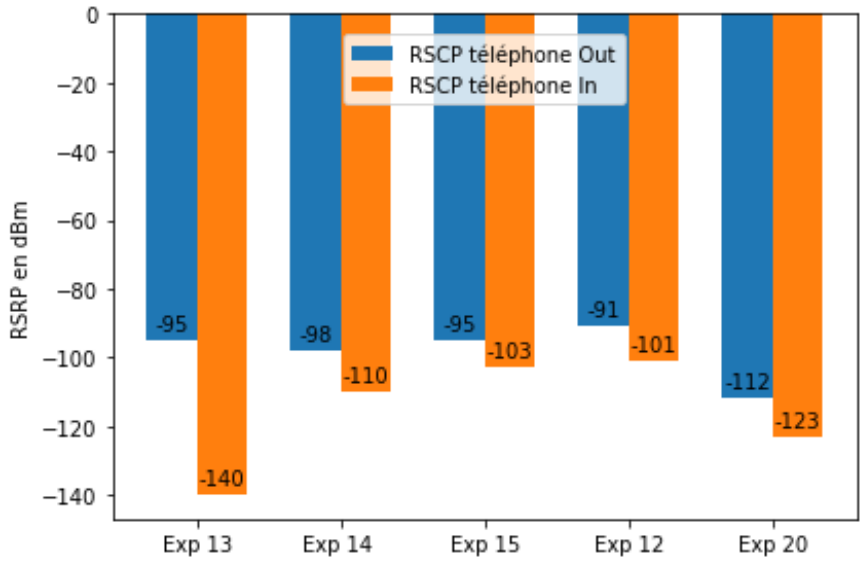


FIGURE 28 – Variation du RSCP dans les bâtiments de catégorie 1

Dans l' exploitation 13, à l'intérieur du bâtiment il n'y a aucun signal. Il est matérialisé avec la valeur -140 dBm. Dans toutes ces exploitation, excepté l' exploitation 20, le réseau utilisé est de type 3G. Les bâtiments de la catégorie 1 sont plus bloquants pour la propagation des ondes que ceux de catégorie 2.

4.6 Discussion et conclusion

l'échantillon de test cumule l'ensemble des difficultés de connectivité rencontrées au cours des déplacements dans les exploitation qui se concrétisent par un débit insuffisant pour établir une communication avec ONIRIS. Ces exploitation ont deux caractéristiques : elles se trouvent dans des zones avec une qualité médiocre de réception du signal et de plus elles sont caractérisées par des bâtiments de catégorie 1 qui ne sont pas propices à la propagation des ondes.

Les solutions proposées ont permis d'améliorer la qualité du signal reçu, et le débit de connexion rendant possible l'établissement de communications avec ONIRIS. **Parmi ces solutions, l'antenne YAGI s'est la plus démarquée car dans toutes les exploitation, elle a permis d'avoir une communication de qualité.**

l'antenne YAGI a permis d'avoir de meilleures performances réseau car c'est une antenne à gain posée sur une perche d'une hauteur de 3 mètres. Pour faciliter la tâche du vétérinaire, lorsqu'il arrive dans une exploitation et qu'il se rend compte qu'il a des problèmes à communiquer dans le bâtiment, le mieux pour lui sera de déployer la solution avec l'antenne YAGI et de se connecter sur le réseau wifi du routeur Teltonika et ainsi faire sa consultation sans problème de connexion par la suite.

Néanmoins, les autres solutions ont aussi été utiles dans des zones ou le problème de connectivité n'était dû qu'à la structure des bâtiments qui sont bloquants pour la propagation des ondes. Dans ces cas de figure, le fait de mettre le routeur à l'extérieur et de mettre l'antenne wifi à l'intérieur des bâtiments permet au smartphone de se connecter au réseau wifi du routeur.

En résumé le vétérinaire devra faire un travail en amont avant de se rendre sur l'exploitation. Il peut avec la carte interactive disponible sur *cartoradio.fr* [6] vérifier la présence d'antennes de son opérateur dans la zone et peut même connaitre la

6. www.cartoradio.fr

distance qui le sépare de ces antennes. Il peut aussi demander au propriétaire de l' exploitation la nature des matériaux utilisés pour la construction de ses bâtiments. Avec toutes ces informations en sa possession, il sera en mesure de choisir la solution avec laquelle il se déplacera.

Les solutions proposées ont été testées dans différentes situations, dans des zones avec une bonne couverture et dans d'autres où la connexion sur le réseau de l'opérateur est impossible. Certains bâtiments reproduisaient l'effet cage de Faraday en bloquant la propagation des ondes et d'autres avaient un effet atténuateur de signal. Dans les deux cas, ces problèmes ont pu être contournés pour utiliser le service offert par XpertEye™ avec les lunettes connectées.

Finalement, dans toutes les exploitation visitées, quel que soit le niveau de couverture de la zone, quel que soit le type de bâtiment où se fait le test, le routeur connecté à l'antenne YAGI permet d'effectuer le service XpertEye™ sans perte de connexion avec l'utilisateur distant.

5 CONCLUSION

La télémédecine pourrait être un bon moyen d'aider les jeunes vétérinaires à mieux s'intégrer dans leurs nouveaux environnements de travail. En effet elle leur permet d'avoir l'assistance d'un expert sur des situations pouvant être compliquées pour eux car étant débutants dans le métier (par exemple réaliser une autopsie). Les solutions proposées dans ce document peuvent leur être utiles dans des zones mal couvertes, ce qui est souvent le cas dans les exploitations agricoles, leur lieu d'interventions, mais aussi elles permettent d'améliorer la connectivité à l'intérieur des bâtiments. Dans la phase d'expérimentation en laboratoire, il a été constaté que lorsque l'antenne du routeur est mise à l'extérieur de la cage de Faraday, que le routeur et le smartphone sont à l'intérieur de la cage de Faraday, il est possible de se connecter à internet et d'effectuer sans problème la service XpertEye™. De plus avec l'atténuateur utilisé pour simuler une faible émission du signal, l'antenne YAGI a pu améliorer pour une bonne communication avec l'équipement XpertEye™.

Il a été aussi constaté en situation réelle que l'antenne YAGI et l'antenne omnidirectionnelle améliorent le signal et permettent d'atteindre des débits assez importants en Uplink et en Downlink comparativement au débit obtenu lorsque le smartphone est directement connecté au réseau de l'opérateur dans les zones mal couvertes. De plus même en présence d'un bâtiment qui a des propriétés similaires à celles d'une cage de Faraday, le fait de mettre l'antenne dehors et de se connecter au réseau wifi du routeur qui se trouve à l'intérieur du bâtiment permet de supprimer cet effet cage de Faraday. La qualité de l'image offerte par la caméra des lunettes peut être acceptable pour des interventions de type autopsie (durée d'une heure, caméra visant un point fixe qui ne bouge pas). Mais les vétérinaires impliqués dans ces expérimentations, envisagent aussi d'utiliser des caméras pour effectuer des visites pour des étudiants qui resteraient en salle de classe. Il faudrait prévoir alors l'utilisation d'une caméra avec un champ de vision plus large et une qualité d'image plus nette. L'utilisation de ce type de caméra nécessitera des débits plus importants pour une bonne qualité de la communication car envoyer flux d'image en 4K UHD nécessite plus de débit qu'envoyer un flux d'image en HD.

Un autre problème a aussi été identifié : les bâtiments ont des dimensions assez grandes (50 à 100 m) et la longueur du câble qui relie l'antenne au routeur est de 10 m. Rallonger ce câble pourrait créer une perte de puissance du signal reçu par le routeur et ainsi réduire le débit de transmission des données.

Enfin on notera qu'il existe toujours des zones blanches en France, zones où les solutions proposées ne peuvent être déployées. Mais avec l'arrivée de la 5G et le « New Deal » de l'ARCEP qui vise à généraliser l'utilisation de la 4G sur l'ensemble des réseaux mobiles, 500 zones ont été identifiées pour améliorer la connexion dans ces zones grâce à la 4G fixe qui permet d'apporter du haut débit.

RÉFÉRENCES

[1] Quelques aspects de la propagation des ondes radioélectriques
Bernard Démoulin.
https://doi.org/10.4000/tem.1447

[2] MANUEL UTILISATEUR XPERTEYE™ ADVANCED V4.3
https://www.ama.bzh/ .

[3] ORPEY 7/9dBi Yagi Antenne Large Bande Directionnelle Antenne SMA Mâle Directionnel Téléphone Cellulaire Signal Amplificateur Amplificateur Modem RG58 10 m Câble
https://www.amazon.fr/ANYCALL-Directionnelle-Directionnel-Cellulaire-Amplificateur/dp/B078BMDLBV/ref=sr_1_5?dchild=1&keywords=antenne+yagi&qid=1623235352&sr=8-5.

[4] LTE Core NetworkVersion : 2017-10-13.

[5] Les réseaux de mobiles 4G et 5G
Frédéric Launay
http://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/2013/08/27/rsrp-et-rsrq-2eme-definition

[6] iPerf - The ultimate speed test tool for TCP, UDP and SCTP
https://iperf.fr/

[7] OpenSignal
https://www.opensignal.com/

OUR WORLDWIDE PARTNERS UNIVERSITIES - DOUBLE DEGREE AGREEMENTS

3 CAMPUS, 1 SITE

IMT Atlantique Bretagne–Pays de la Loire – **http://www.imt-atlantique.fr/**

Campus de Brest
Technopôle Brest-Iroise
CS 83818
29238 Brest Cedex 3
France
T +33 (0)2 29 00 11 11
F +33 (0)2 29 00 10 00

Campus de Nantes
4, rue Alfred Kastler
CS 20722
44307 Nantes Cedex 3
France
T +33 (0)2 51 85 81 00
F +33 (0)2 99 12 70 08

Campus de Rennes
2, rue de la Châtaigneraie
CS 17607
35576 Cesson Sévigné Cedex
France
T +33 (0)2 99 12 70 00
F +33 (0)2 51 85 81 99

Site de Toulouse
10, avenue Édouard Belin
BP 44004
31028 Toulouse Cedex 04
France
T +33 (0)5 61 33 83 65

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

IMT Atlantique, 2021

ISSN : 2740-6482