

Rapport de projet – SAE301

Par METZ Aloïs, BAHEMBERA Yannick, FERNANDEZ Esteban, BAZIRU
Andrei

Table des matières

1. Introduction et contexte technique	3
1.1 Définition et concept : C'est quoi la TNT ?	3
1.2 L'évolution technologique de l'analogique au numérique.....	4
2. Théorie du signal et Fonctionnement	5
2.1 Chaîne de transmission : comment ça fonctionne ?	5
2.2 Principe de modulation et transmission	7
3. L'environnement spectral	9
3.1 Les fréquences utilisées	9
3.2 Les contraintes techniques.....	11
4. La réception du signal	13
4.1 Les antennes de réception.....	13
4.2 Le traitement du signal	15
5. Simulation antenne type Yagi (diagramme de rayonnement, gain).....	16
5.1 Objectifs et présentation du logiciel	16
5.2 Diagramme de rayonnement sur différents angles	17
6. Test expérimentaux de la liaison TNT et analyse des performances.....	25
6.1 Présentation du contexte de mesure et paramètres étudiés.....	25
6.2 Analyse comparative des antennes de réception	25
6.3 Résultats de mesures sur antennes Yagi (antennes directives)	26
6.4 Résultats de mesures sur antenne plate omnidirectionnelle	28
6.5 Résultats sur antennes réseau étroites (Yagi de dimensions intermédiaires)	29
6.6 Mise en relation avec les simulations et diagrammes de rayonnement	30
6.7 Synthèse et lien avec le bilan de liaison	31
7. Bilan de liaison réseau TNT	32
7.1 Information de base	32
7.2 Conversion 68 dBμV en dbm	33
7.3 Calcul de l'affaiblissement	34
7.4 Pertes (Câblage)	35
7.5 Calcul puissance émise.....	35
7.6 Calcul puissance théorique + tableau bilan	36
Table des illustrations :	39

1. Introduction et contexte technique

1.1 Définition et concept : C'est quoi la TNT ?

La Télévision Numérique Terrestre (TNT) désigne un mode de diffusion de la télévision qui repose sur la transmission de signaux numériques par voie hertzienne, c'est-à-dire avec des ondes radio émises depuis des émetteurs terrestres vers les récepteurs des utilisateurs. Elle remplace progressivement la télévision analogique en offrant une meilleure efficacité spectrale et une qualité audiovisuelle supérieure.

Le principe de la TNT repose sur la diffusion « broadcast ». Dans ce mode de transmission, un même signal est émis simultanément vers un grand nombre de récepteurs, sans établissement de connexion individuelle avec chaque utilisateur. Ce fonctionnement est adapté à la télévision, dont l'objectif est de diffuser des contenus identiques à une grande audience en continu.

La transition vers la TNT a permis une amélioration de la qualité d'image et de son, avec le passage progressif de la définition standard vers la Haute Définition (HD), puis vers l'Ultra Haute Définition (UHD). Ces évolutions ont été possibles grâce à l'utilisation de normes de diffusion et de compression plus performantes.

La TNT s'appuie principalement sur la norme DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial), puis sur son évolution DVB-T2, qui optimise l'utilisation du spectre radioélectrique et améliore la robustesse face aux perturbations. Les flux audio et vidéo sont compressés à l'aide de codecs tels que MPEG-2, utilisé lors du lancement de la TNT, puis MPEG-4 AVC (H.264) et plus récemment HEVC (H.265), qui offrent un meilleur rapport qualité/débit. Ces techniques de compression permettent de transmettre davantage de chaînes tout en conservant une qualité élevée.

1.2 L'évolution technologique de l'analogique au numérique

La télévision analogique, utilisée pendant des décennies, reposait sur une transmission continue du signal audio et vidéo. Cette méthode présentait plusieurs limites, notamment la sensibilité élevée aux perturbations (le bruit, les interférences ou encore l'atténuation du signal) ainsi qu'une faible efficacité spectrale. En effet, chaque chaîne occupait une bande de fréquences importante, ce qui limitait fortement le nombre de programmes pouvant être diffusés simultanément.

Le passage à la télévision numérique s'est imposé afin de répondre à plusieurs enjeux techniques et économiques. L'un des principaux objectifs était d'optimiser l'utilisation du spectre de fréquence, une ressource limitée et très partagée. Grâce à la numérisation du signal et à la compression, il est désormais possible de transmettre plusieurs chaînes dans une seule bande de fréquences, appelée canal numérique. Ce regroupement de chaînes est appelé multiplex.

La qualité de réception constitue également un facteur important de cette évolution. Contrairement à l'analogique, où la dégradation de la réception se montrait par la détérioration progressive de l'image avec la neige ou les parasites, le numérique offre une réception plus stable. Tant que le signal est correctement reçu, l'image et le son restent de bonne qualité. En revanche, en dessous d'un certain seuil, la réception devient impossible.

Un autre avantage majeur du numérique est donc l'augmentation du nombre de chaînes disponibles mais aussi l'introduction de nouveaux services, tels que le guide électronique des programmes (EPG), le sous-titrage, les pistes audios multiples ou encore la diffusion en haute définition. Ces services étaient difficiles, à mettre en place avec la télévision analogique.

Enfin, la transition vers la TNT a eu un impact direct sur la gestion des fréquences. L'arrêt progressif de l'analogique a permis de libérer une partie du spectre pour être réattribuée à d'autres usages comme les réseaux mobiles 4G et 5G.

2. Théorie du signal et Fonctionnement

2.1 Chaîne de transmission : comment ça fonctionne ?

La diffusion de la TNT repose sur une chaîne de transmission numérique structurée en plusieurs étapes, permettant d'acheminer les contenus depuis le diffuseur jusqu'au récepteur. Cette chaîne assure l'efficacité de la transmission mais aussi la qualité du signal reçu.

La première étape est le codage source, également appelé compression. Les signaux audio et vidéo bruts génèrent un volume de données très important ce qui est incompatible avec une diffusion efficace sur le réseau hertzien. Des algorithmes de compression, tels que MPEG-2, MPEG-4 AVC (H.264) ou HEVC (H.265), sont utilisés afin de réduire le débit nécessaire tout en conservant une qualité acceptable. Cette compression repose sur l'élimination des redondances spatiales et temporelles dans l'image ainsi que sur des modèles psychoacoustiques (suppression des fréquences inaudibles) pour le son.

Une fois les flux audio et vidéo compressés, ceux-ci sont regroupés lors de l'étape de multiplexage. Le multiplexage consiste à assembler plusieurs chaînes de télévision, ainsi que leurs données associées (sous-titres, informations de service, guide des programmes) dans un seul flux de transport. Le principe peut être comparé à un « tuyau numérique » dans lequel circulent simultanément plusieurs programmes, chacun étant identifié par des informations spécifiques permettant au récepteur de les séparer.

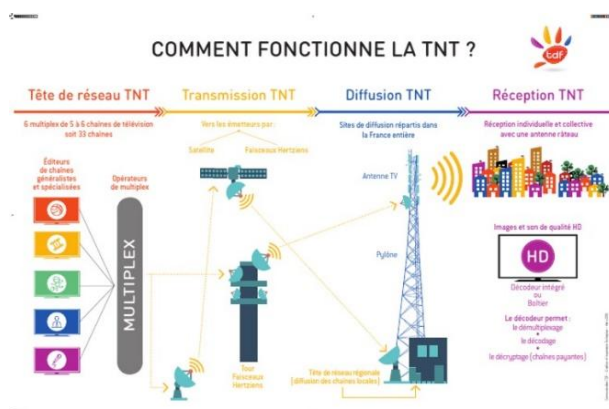


Figure 1 : Synoptique simplifié de la chaîne de diffusion DVB-T.

Plusieurs sources sont compressées puis multiplexées avant d'être modulées pour l'émission hertzienne.

Des données de signalisation sont ensuite ajoutée au flux de transport pour assurer le bon fonctionnement du système. Ces informations permettent notamment au téléviseur ou au décodeur d'identifier les chaînes, leurs caractéristiques techniques et les services associés. Elles jouent un rôle important dans l'automatisation de la recherche et de la mémorisation des chaînes par l'utilisateur.

Enfin, le flux de transport est préparé pour l'étape de transmission, où il sera modulé et émis sur le canal hertzien. Cette préparation inclut les mécanismes visant à améliorer la robustesse du signal, comme l'ajout de codes de correction d'erreurs, afin de limiter les pertes de données lors de la propagation du signal dans l'environnement réel.

2.2 Principe de modulation et transmission

Une fois le flux de transport préparé, compressé et multiplexé, il doit être transmis sur le canal hertzien. Pour cela, le signal numérique est converti en un signal adapté à la propagation par ondes radio grâce au procédé appelé modulation. La modulation consiste à faire varier certaines caractéristiques d'une onde porteuse (amplitude, phase ou fréquence) en fonction des données numériques à transmettre.

Dans le cadre de la TNT, la modulation utilisée repose principalement sur la technique COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Cette méthode consiste à diviser le flux de données en un grand nombre de sous-porteuses orthogonales, chacune transportant une partie de l'information. L'intérêt majeur du COFDM est sa robustesse face aux phénomènes de propagation, tels que les échos et les interférences particulièrement présents en milieu urbain.

Chaque sous-porteuse est modulée selon un schéma de modulation numérique, généralement de type QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Plusieurs niveaux de modulation peuvent être utilisés, comme la QPSK, la 16-QAM ou la 64-QAM. Plus l'ordre de la modulation est élevé, plus la quan



Chaque point représente un symbole reçu. La concentration des points permet de visualiser la qualité du signal. Un nuage dispersé indiquerait du bruit ou des erreurs de transmission.

Figure 2 : Exemple d'analyse de constellation sur mesureur de champ.

tité d'informations transmises par symbole est importante, ce qui augmente le débit binaire. Cependant, les modulations d'ordre élevé sont beaucoup plus sensibles au bruit et nécessitent une meilleure qualité de réception.

Afin d'optimiser le rapport entre le débit et la fiabilité, la TNT intègre également des mécanismes de correction d'erreurs. Ces codes permettent au récepteur de détecter et de corriger certaines erreurs survenues lors de la transmission

Le choix des paramètres de modulation dépend des contraintes de diffusion, notamment la zone de couverture et la qualité de réception souhaitée. Ces paramètres permettent d'adapter la transmission aux conditions de la zone de transmission, en privilégiant soit la portée du signal, soit le nombre de chaînes diffusées.

3. L'environnement spectral

3.1 Les fréquences utilisées

La TNT exploite des bandes de fréquences spécifiques du spectre de fréquence, principalement situées dans la bande UHF (Ultra High Frequency). En France et dans la majorité des pays européens, la TNT est diffusée dans des canaux dont la largeur est généralement de 8 MHz. Chaque canal peut accueillir un multiplex transportant donc plusieurs chaînes grâce aux techniques de compression et de multiplexage numériques vu précédemment.

Historiquement, la TNT utilisait une large partie de la bande UHF, comprise approximativement entre 470 MHz et 862 MHz. Cependant, l'évolution des besoins en télécommunications mobiles a forcé une réorganisation de ce spectre. Une partie des fréquences autrefois attribuées à la télévision a été réaffectée aux réseaux mobiles haut débit, notamment la 4G puis la 5G, afin de répondre à la croissance des usages liés à l'Internet mobile, passant donc aujourd'hui à une bande UHF 470-694 MHz.

Cette cohabitation entre la TNT et les réseaux mobiles impose des contraintes techniques importantes. Les signaux 4G et 5G, émis à proximité des bandes utilisées par la TNT, peuvent provoquer des interférences pouvant dégrader la qualité de réception. Pour limiter ces perturbations, des mesures ont été mises en place, telles que l'utilisation de filtres LTE au niveau des installations de réception et l'adaptation des plans de fréquences par les autorités de régulation.

Par ailleurs, la gestion des fréquences de la TNT repose sur une coordination nationale et internationale afin d'éviter les brouillages entre émetteurs, notamment dans les zones frontalières. Cette planification permet d'optimiser la couverture du territoire tout en assurant une utilisation efficace et équitable du spectre.

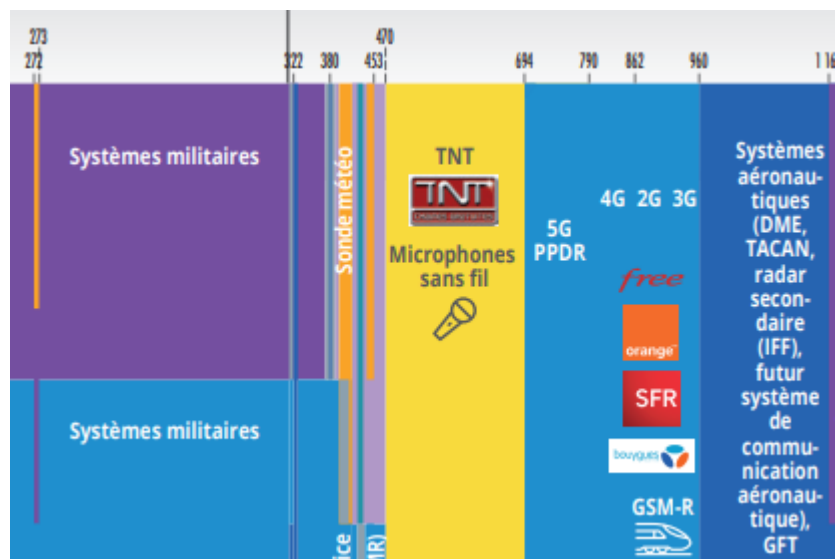


Figure 3 : Allocation du spectre des fréquences UHF.

On distingue la bande TNT (en jaune, 470-694 MHz) adjacente aux bandes de fréquence attribuées aux opérateurs mobiles (4G/5G). Cette proximité explique la nécessité de filtres LTE

3.2 Les contraintes techniques

La diffusion de la TNT est soumise à plusieurs contraintes techniques liées à la propagation des ondes radio et aux caractéristiques de l'environnement. Ces contraintes influencent directement la qualité de réception du signal et la zone de couverture des émetteurs.

L'une des principales contraintes est la zone de couverture. La portée d'un émetteur TNT dépend de sa puissance, de la hauteur de l'antenne d'émission et de la fréquence utilisée. Les ondes UHF, bien qu'adaptées à la diffusion TV, sont très sensibles aux obstacles naturels et artificiels tels que les reliefs, les bâtiments ou la végétation. Ces éléments peuvent provoquer des zones d'ombre où la réception devient difficile, voire impossible.

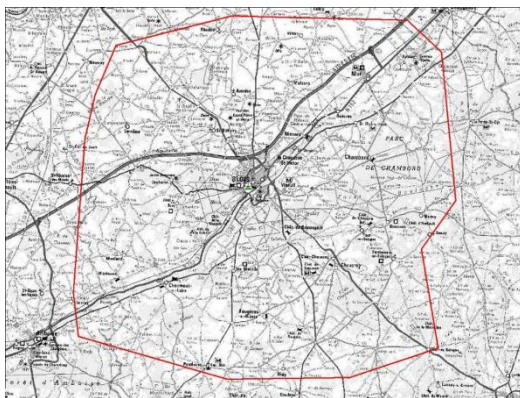


Figure 4 : Carte de couverture théorique de l'émetteur de Blois.

La ligne rouge délimite la zone de service où le niveau de champ est suffisant pour une réception stable, compte tenu de la topographie locale.

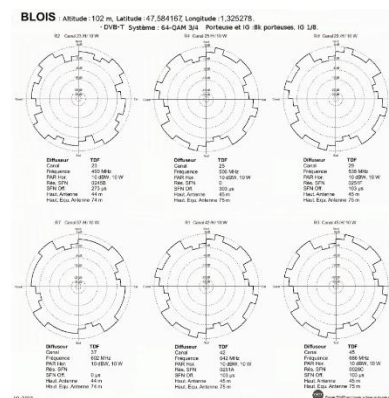


Figure 5 : Fiche technique et diagrammes de rayonnement de l'émetteur de Blois.

Ce document détaille les paramètres influençant la couverture vue ci-dessus. On note que les diagrammes de rayonnement sont omnidirectionnels (circulaires), diffusant le signal uniformément autour du pylône.

L'atténuation du signal constitue également un facteur important. Plus la distance entre l'émetteur et le récepteur augmente, plus la puissance du signal diminue. Cette atténuation est aussi accentuée par les obstacles traversés par l'onde et par les conditions environnementales. En réception numérique, une

atténuation excessive peut provoquer des coupures d'image et de son, en raison du seuil minimal de réception nécessaire au décodage du signal.

Les interférences représentent une autre contrainte majeure. Elles peuvent être causées par d'autres émetteurs utilisant des fréquences proches, par des équipements électroniques mal protégés ou par les réseaux mobiles 4G/5G situés dans des bandes adjacentes. Ces perturbations peuvent dégrader le rapport signal sur bruit et affecter la stabilité de la réception.

Enfin, la qualité de la réception dépend fortement des antennes utilisées. Leur orientation, leur hauteur, leur directivité et leur adaptation aux fréquences de la TNT jouent un rôle essentiel. Une installation mal réglée ou inadaptée peut amplifier les effets des contraintes précédemment évoquées et nuire à la qualité du signal reçu.

4. La réception du signal

4.1 Les antennes de réception

La réception du signal TNT repose sur l'utilisation d'antennes adaptées aux fréquences UHF et aux conditions de propagation du signal. Le rôle principal de l'antenne est de capter les ondes électromagnétiques émises par les émetteurs TNT et de les convertir en un signal électrique exploitable.

Parmi les antennes les plus couramment utilisées pour la réception de la TNT, on retrouve les antennes Yagi et les antennes panneau. L'antenne Yagi est une antenne directive composée de plusieurs éléments métalliques (dipôle, réflecteur et directeurs). Sa directivité lui permet de concentrer la réception dans une direction précise, ce qui améliore le gain et limite la réception des interférences provenant d'autres directions. Plus le nombre d'éléments est élevé, plus le gain et la directivité de l'antenne sont importants.

Dans le cadre de la réalisation de ce rapport, deux antennes Yagi de dimensions différentes ont été utilisées : une antenne de grande taille et une antenne de taille moyenne. Cette configuration a permis de comparer leurs performances respectives, notamment en termes de gain, de directivité et de stabilité de réception. L'antenne Yagi de grande taille, disposant d'un nombre plus important d'éléments, offre en général un gain supérieur et une meilleure sélection directionnelle, tandis que l'antenne de taille moyenne présente un compromis intéressant entre encombrement et efficacité.

Une antenne panneau a également été employée lors des expérimentations. Ce type d'antenne se distingue par son format compact et sa directivité. L'antenne panneau est souvent utilisée dans des environnements urbains ou en intérieur, dans des situations où l'esthétique et la facilité d'installation sont des critères importants. Bien que son gain soit généralement inférieur à celui d'une antenne Yagi de grande taille, elle peut offrir des résultats satisfaisants lorsque le niveau de signal est suffisant.

Les analyses réalisées à partir de ces différentes antennes ont permis d'observer l'influence de la directivité, du gain et de la taille de l'antenne sur la qualité de réception du signal TNT.



Figure 8 : Grande antenne Yagi utilisée pour ce rapport



Figure 7 : Petite antenne Yagi utilisée pour ce rapport



Figure 6 : Antenne panneau utilisée pour ce rapport

4.2 Le traitement du signal

Après sa capture par l'antenne de réception, le signal de la TNT doit être traité afin de garantir une réception correcte et stable par le téléviseur ou le décodeur. Cette étape est importante pour la qualité finale de l'image et du son.

Le gain de l'antenne constitue un premier paramètre essentiel. Il correspond à la capacité de l'antenne à amplifier le signal reçu dans une direction donnée. Un gain suffisant permet de compenser l'atténuation du signal, notamment dans les zones éloignées de l'émetteur. Cependant, un gain trop élevé peut également amplifier le bruit et les interférences, ce qui nécessite un réglage adapté à l'environnement de réception.

La directivité influence également le traitement du signal. Les antennes directives, comme les antennes Yagi, permettent de privilégier la réception du signal provenant de l'émetteur ciblé tout en réduisant l'impact des signaux parasites. À l'inverse, les antennes moins directives, comme les antennes panneau, offrent une réception plus tolérante à l'orientation, mais avec un gain généralement plus faible.

L'adaptation d'impédance entre l'antenne, le câble coaxial et le récepteur est un autre facteur important. Une mauvaise adaptation peut engendrer des pertes par réflexion et diminuer la puissance utile du signal. Dans les installations TNT, l'impédance standard de 75 ohms est utilisée afin d'optimiser la transmission.

Le filtrage du signal permet de limiter les interférences, notamment celles causées par les réseaux mobiles 4G et 5G situés dans des bandes de fréquences voisines. L'utilisation de filtres LTE contribue à préserver la qualité de réception dans les zones exposées à ces perturbations.

Enfin, un amplificateur peut être utilisé pour compenser les pertes liées aux câbles ou à un signal faible. Celui-ci doit être correctement paramétré afin d'éviter toute saturation susceptible de dégrader la réception.

5. Simulation antenne type Yagi (diagramme de rayonnement, gain)

5.1 Objectifs et présentation du logiciel

L'objectif des simulations était de compléter les tests réels par une analyse précise des performances des antennes dans un environnement de test. Cela permet d'étudier leur comportement sans contraintes matérielles et d'optimiser les paramètres techniques. Le logiciel utilisé offre des outils pour modéliser et analyser les antennes. Il permet de générer des représentations graphiques en deux dimensions, comme les diagrammes de rayonnement, ainsi que des visualisations en trois dimensions pour étudier en profondeur leur fonctionnement.

Voici l'antenne que nous avons représenté sur la simulation :

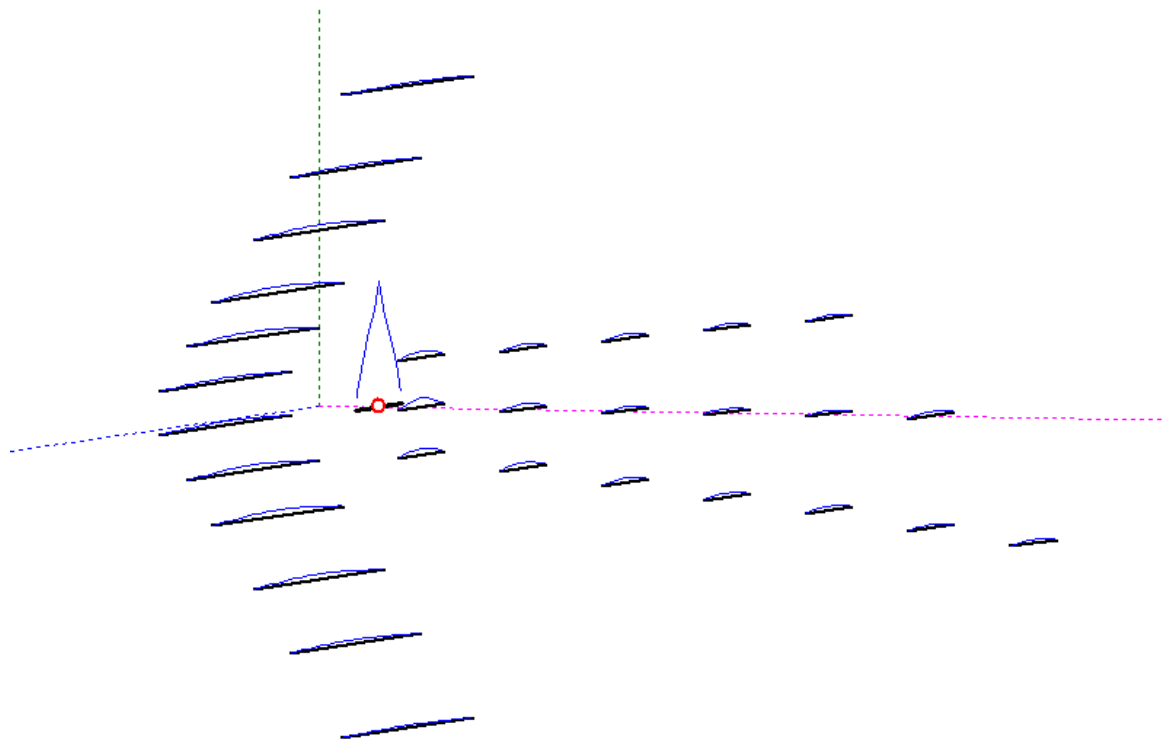


Figure 9 : Antenne Yagi représenté en 3D sur la simulation

5.2 Diagramme de rayonnement sur différents angles

Sur la TNT, un diagramme de rayonnement est la représentation graphique de la manière dont une antenne d'émission diffuse les ondes de télévision selon les directions et les angles autour du site d'émission.

Il permet de montrer :

- les directions privilégiées de diffusion vers les zones à couvrir,
- les limitations de puissance dans certaines directions (pour éviter les interférences avec d'autres émetteurs),
- la couverture géographique du signal TNT.

Notre antenne ici utilise la polarisation horizontale puisque les éléments (barres horizontales constituant l'antenne) sont horizontaux.

Nous allons ici étudier le rayonnement sur 2 fréquences différentes de la TNT.

Dans le premier cas, nous allons voir le diagramme de rayonnement sur 490 MHz.

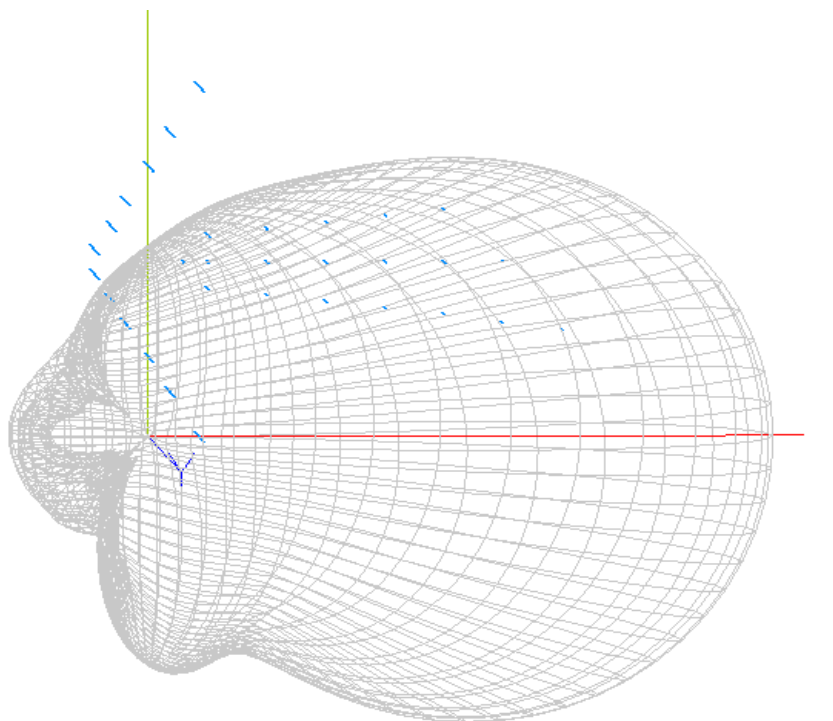


Figure 10 : Format de l'onde 3D pour 490 MHz

Dans le premier cas, la simulation montre que l'antenne directive atteint un gain maximal de 10.6 dBi. Ce résultat confirme sa capacité à concentrer le signal dans une direction précise, réduisant les pertes d'énergie. On voit également que $G_{\max} - G_a = 0 \text{ dB}$ c'est la différence entre le gain maximum et le gain dans la

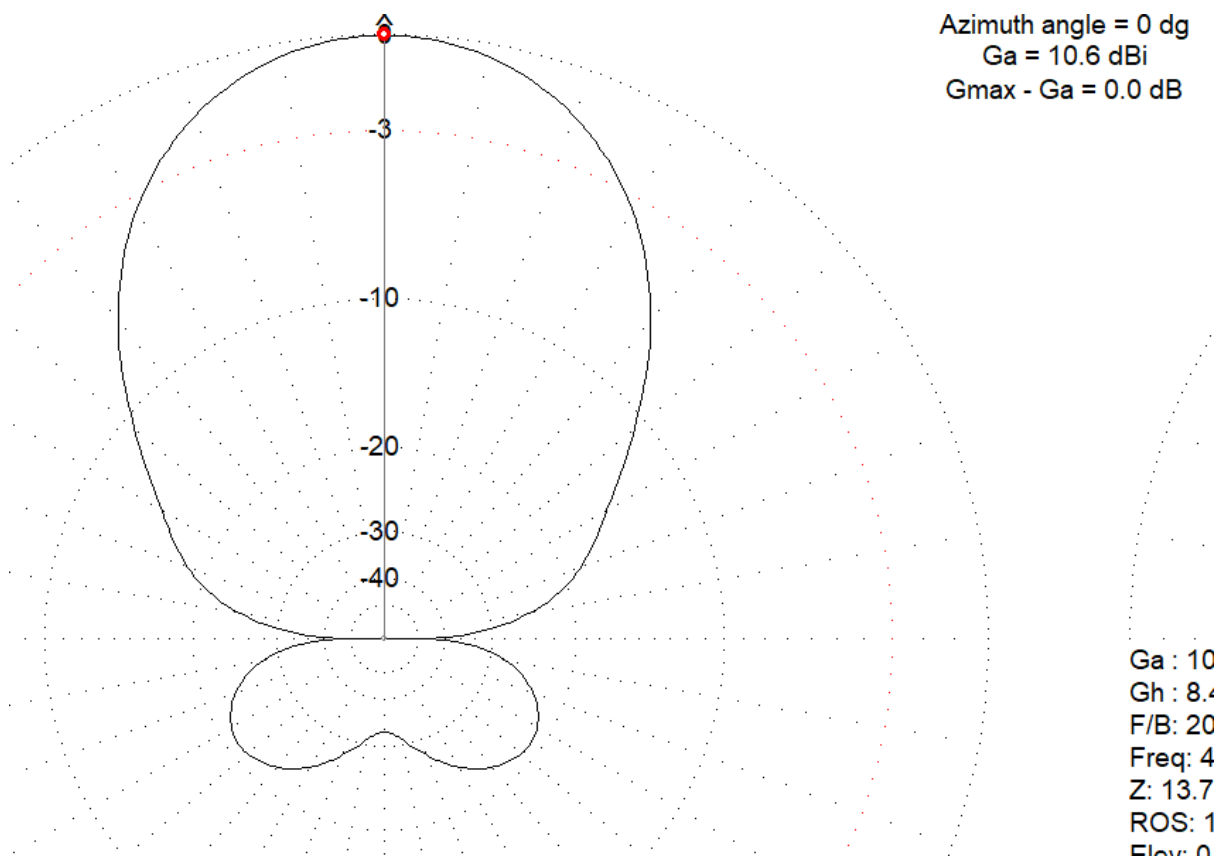


Figure 11 : Diagramme de rayonnement pour 490 MHz axe principal de rayonnement

direction étudié. Cela signifie que l'on se trouve exactement dans la direction du gain maximal (axe principal de rayonnement).

Ensuite, voici le diagramme de rayonnement du basculement du gain de la direction étudié à 0 dBi. Comme on peut voir sur l'image ci-dessous, le gain maximal de l'antenne est environ 10,7 dB supérieur au gain mesuré à -50° , ce qui signifie que le signal est atténué de 10,7 dB par rapport au maximum dans cette direction, cette atténuation est volontaire en TNT afin d'éviter les brouillages avec d'autres émetteurs et de limiter la couverture vers certaines zones.

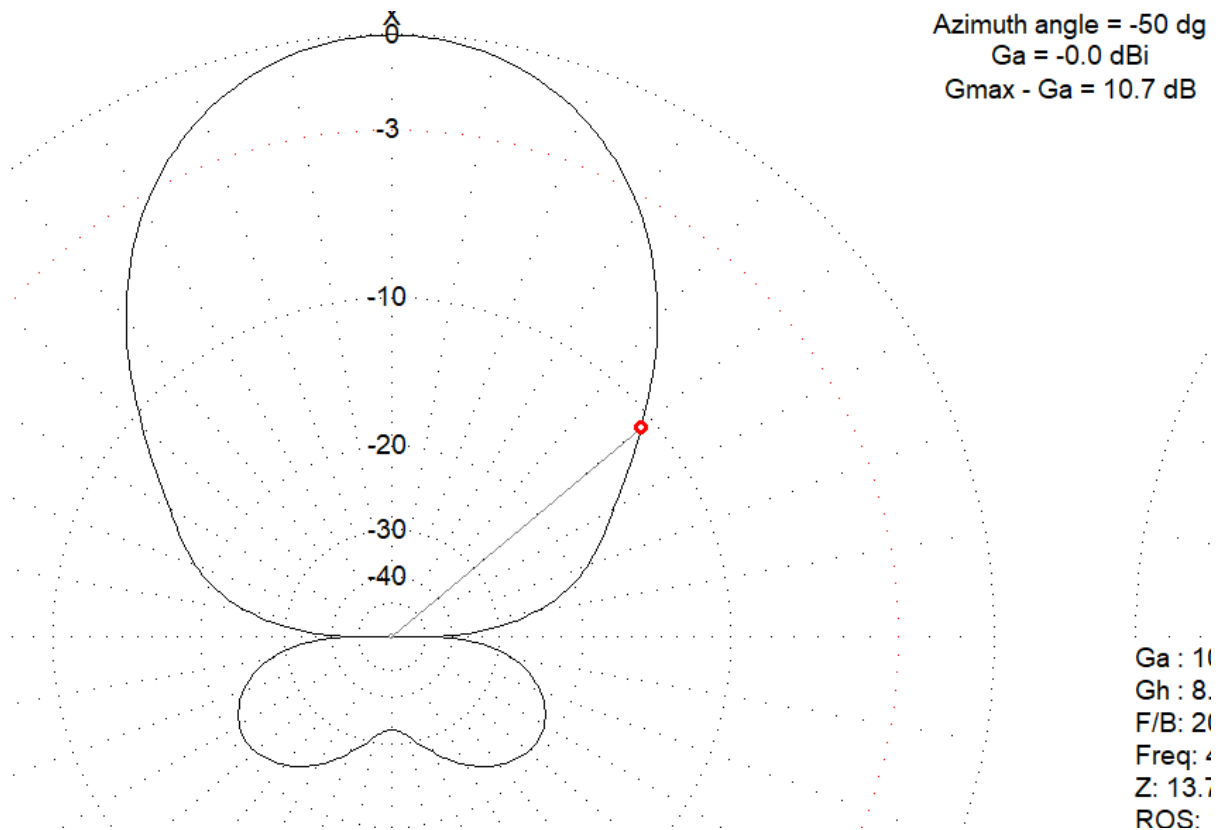


Figure 12 : Diagramme de rayonnement pour 490 MHz basculement de rayonnement

Et enfin sur cette dernière image de rayonnement du cas 1, à 180° d'azimut, c'est-à-dire à l'arrière de l'antenne, le gain G_a est de -21,7 dBi, ce qui indique que l'antenne rayonne très faiblement dans cette direction.

La différence $G_{max} - G_a$ est de 32,4 dB, ce qui signifie que le signal arrière est atténué de 32,4 dB par rapport au gain maximal.

Cette très forte atténuation correspond au lobe arrière de l'antenne et traduit une excellente directivité, recherchée en TNT afin de concentrer la puissance

vers la zone de service, de réduire les interférences avec les émetteurs situés à l'arrière et de limiter la couverture inutile dans cette direction.

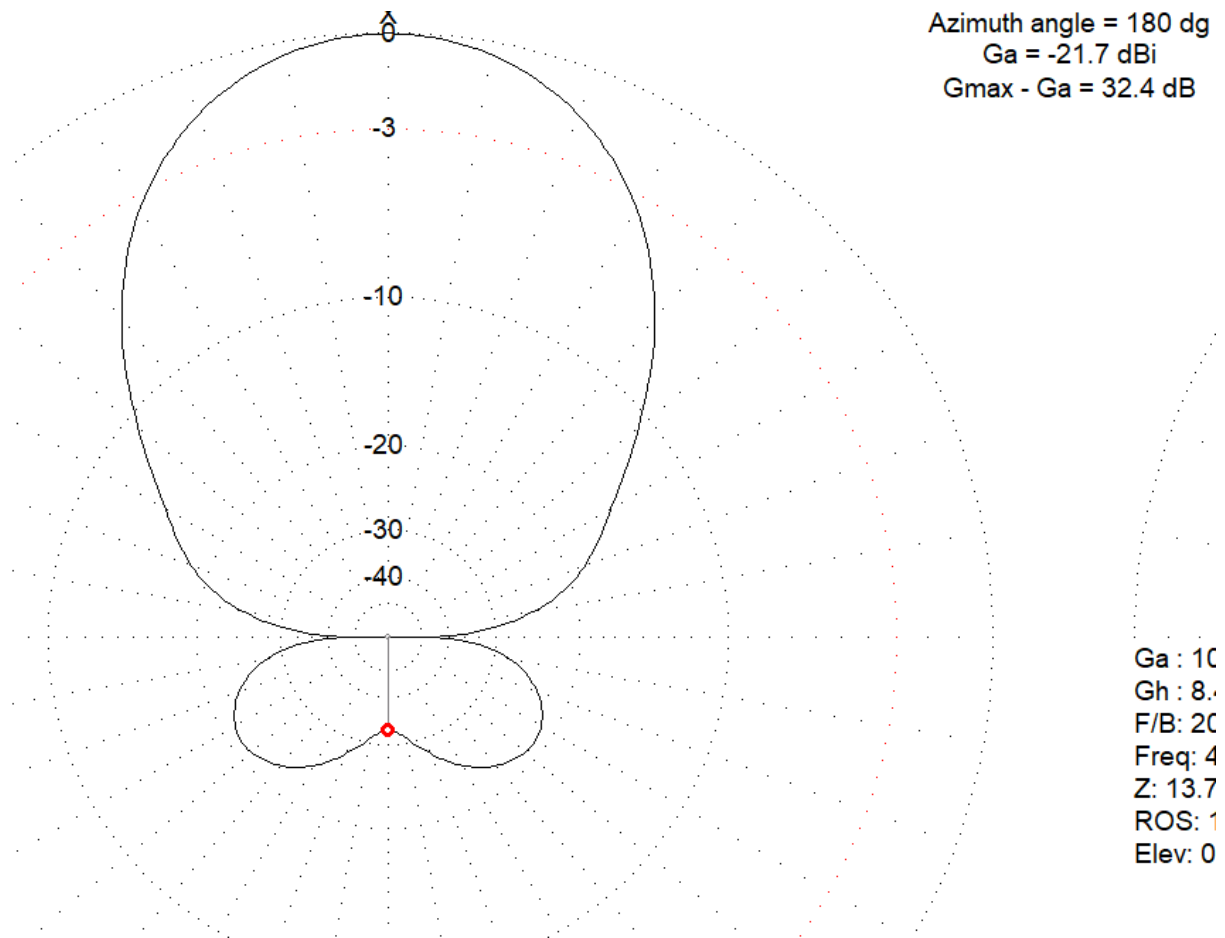


Figure 13 : Diagramme de rayonnement pour 490 MHz sur le lobe arrière

Dans le cadre de la TNT, il est pertinent d'utiliser deux fréquences différentes, ici 490 MHz et 602 MHz (sur le cas 2 que nous allons étudier juste après), car la télévision numérique terrestre n'émet pas sur une fréquence unique mais sur plusieurs canaux répartis dans la bande UHF (environ 470 à 694 MHz).

Ces deux fréquences permettent de représenter :

- 490 MHz, située dans la partie basse de la bande UHF,
- 602 MHz, située dans une partie plus haute de la bande UHF.

Le diagramme de rayonnement d'une antenne peut varier avec la fréquence : la forme des lobes, le gain, la directivité et l'atténuation arrière ne sont pas strictement identiques sur toute la bande TNT. En prenant deux fréquences

différentes, on montre donc que l'antenne fonctionne correctement sur l'ensemble de la bande TNT, et que ses performances restent conformes aux exigences de couverture et de limitation des brouillages, quel que soit le canal utilisé.

Voici tout d'abord pour le cas 2, la modélisation de la forme de l'onde en 3D :

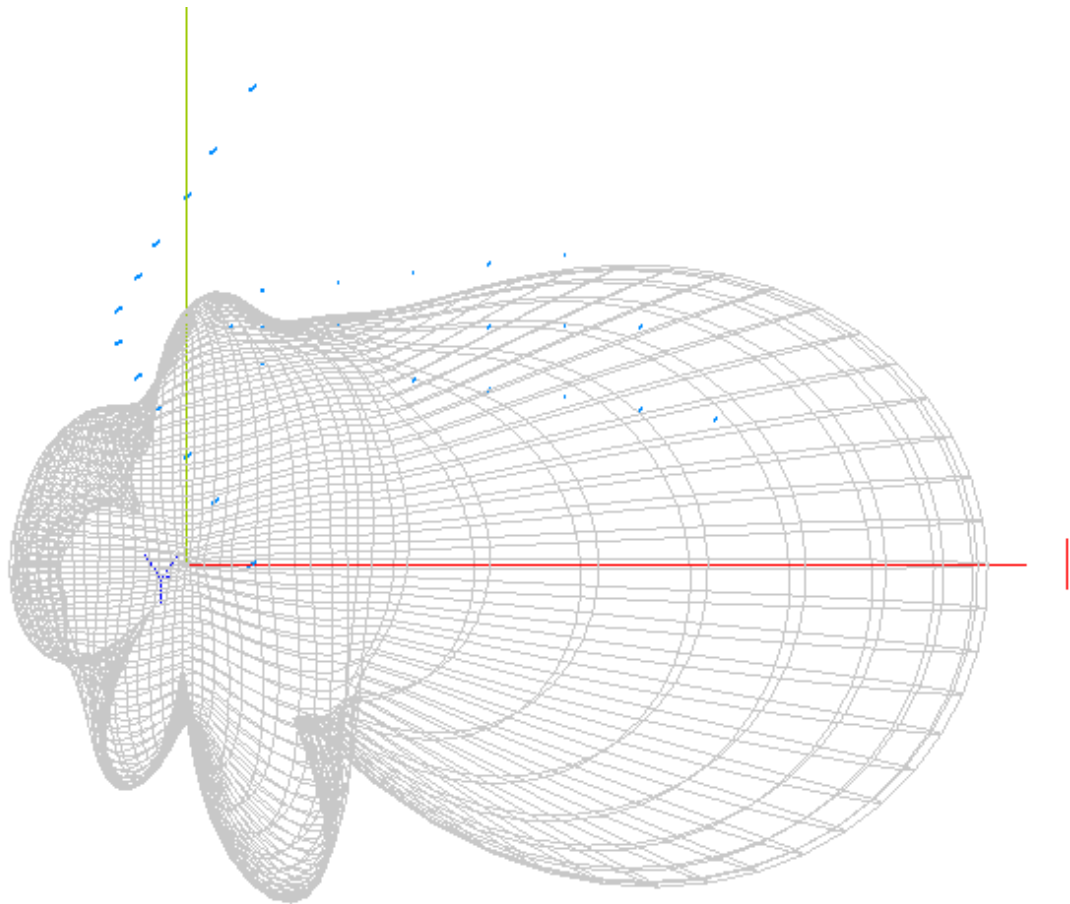


Figure 14 : Forme de l'onde pour 602 MHz en 3D

On note ici, une légère différence par rapport à la modélisation 3D du cas 1, le lobes ici est plus avancé que le premier. On peut émettre l'hypothèse que l'angle

de rayonnement sera plus petit, mais la puissance de l'onde plus forte à la vue de la forme du lobe.

Sur l'image ci-dessous, on relève une valeur de $G_a = 12.4$ dBi. Ici l'hypothèse se confirme, en effet dans le cas 2 nous avons une valeur plus élevée que le cas 1. $G_{max} - G_a$ reste à 0 dB puisqu'on est sur l'axe principal de rayonnement.

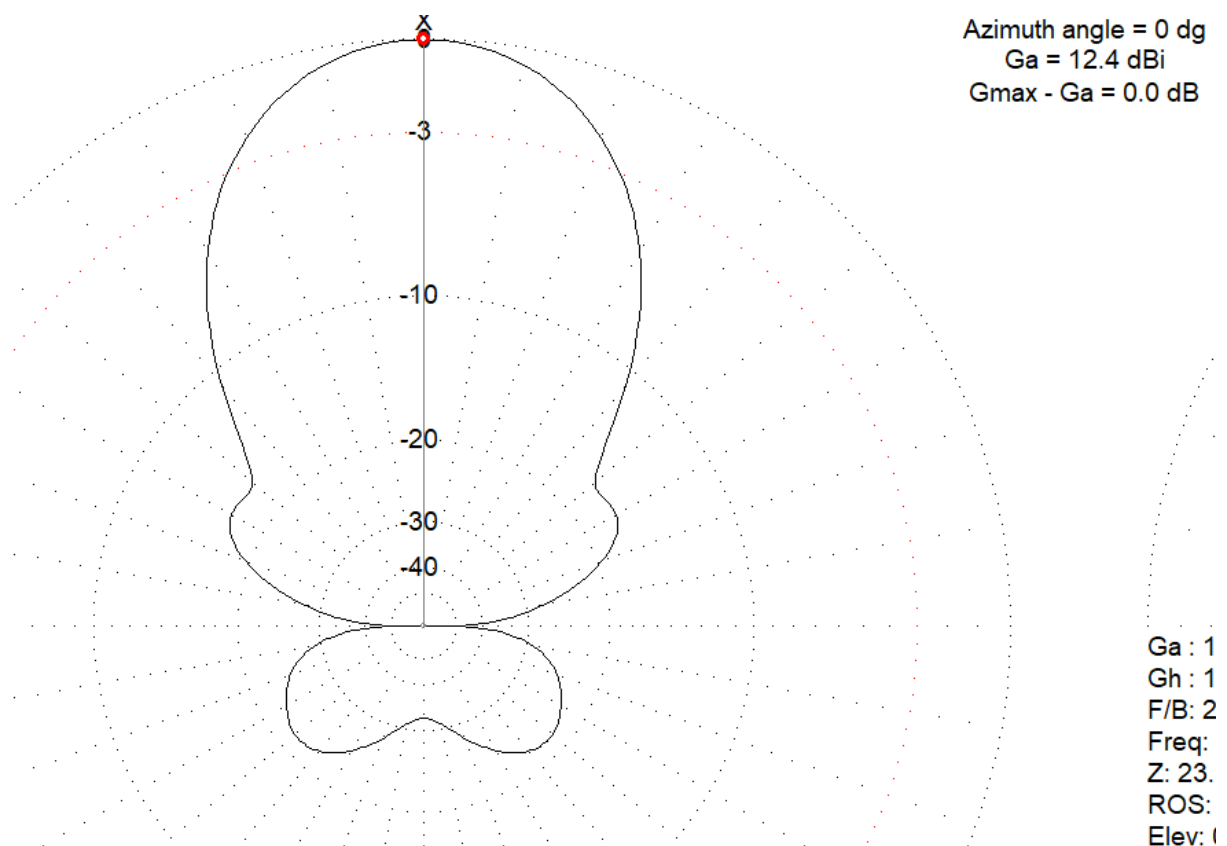


Figure 15 : Diagramme de rayonnement pour 602 MHz axe principal de rayonnement

Ensuite, on voit sur le diagramme ci-dessous que G_a bascule à 0 dB vers l'angle d'azimuth -42dg. L'hypothèse ici, ce confirme encore puisque l'angle de

rayonnement est moins élevé que dans le cas 1, et aussi parce que la valeur de $G_{\max} - G_a = 12.2 \text{ dB}$ contrairement au cas 1 qui vaut 10.7 dB

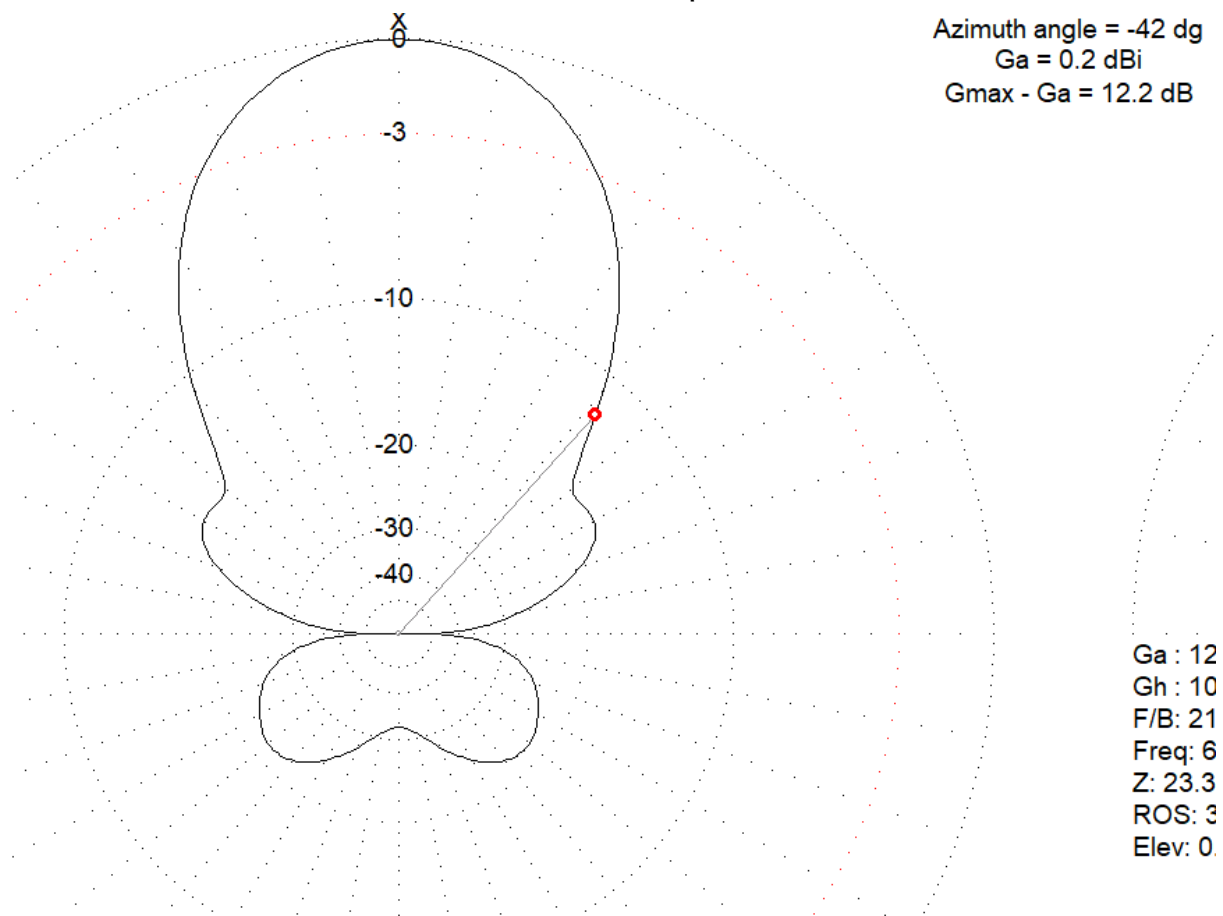


Figure 16 : Diagramme de rayonnement pour 602 MHz basculement de rayonnement

Et enfin sur le dernier diagramme du cas 2, à 180° d'azimut, c'est-à-dire à l'arrière de l'antenne, le gain G_a est de -19.7 dBi , ce qui indique que l'antenne rayonne très faiblement dans cette direction.

La différence $G_{\max} - G_a$ est de 32 dB , ce qui signifie que le signal arrière est atténué de 32 dB par rapport au gain maximal. En comparaison, cette antenne

rayonne un tout petit peu plus à l'arrière que dans le cas 1.

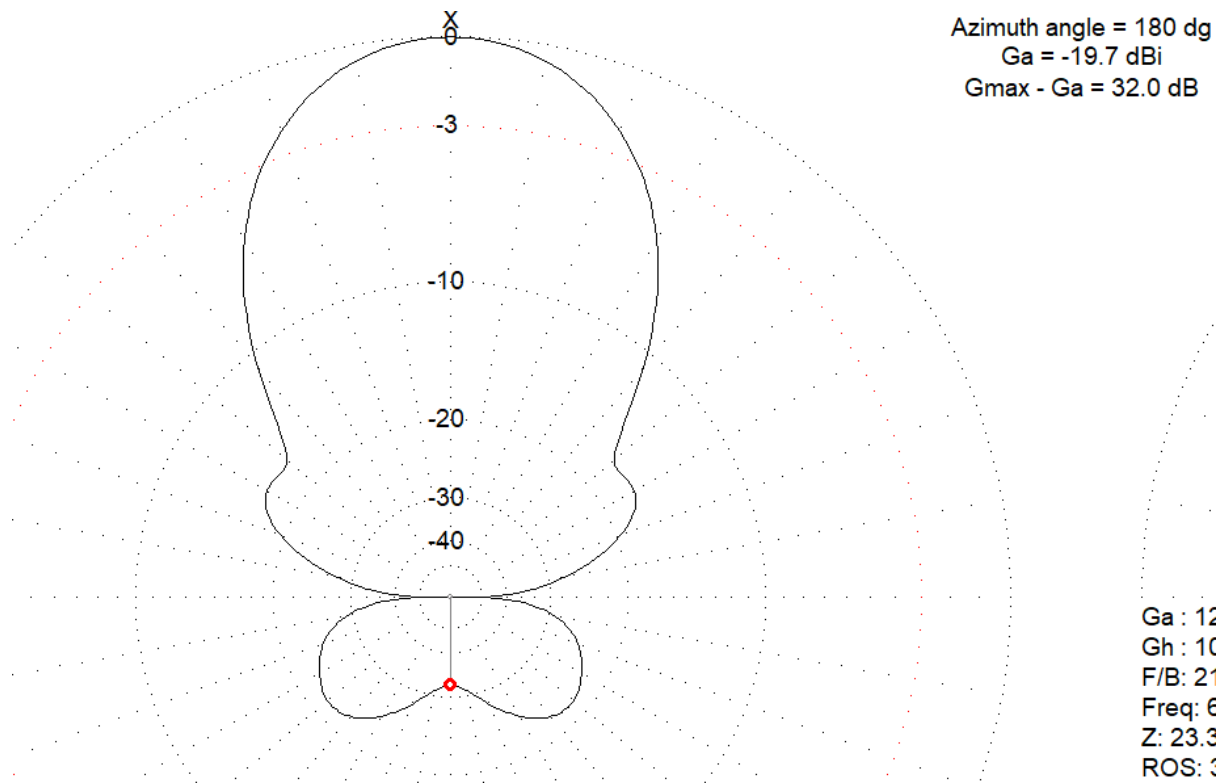


Figure 17 : Diagramme de rayonnement pour 602 MHz sur le lobe arrière

6. Test expérimentaux de la liaison TNT et analyse des performances

Cette partie de l'étude s'inscrit dans la continuité des sections précédentes, en confrontant les notions théoriques de propagation, de modulation COFDM et de bilan de liaison à des mesures réelles effectuées sur une liaison TNT en réception. Les expérimentations ont été réalisées à partir de l'IUT de Blois, là où se trouve nos antennes de réception en direction de l'émetteur TNT identifié à proximité de la gare, à une distance estimée à environ 1,21 km. Cette configuration permet d'étudier une liaison représentative d'un cas réel de réception TNT en zone périurbaine, où les contraintes de propagation et d'interférences sont significatives.

6.1 Présentation du contexte de mesure et paramètres étudiés

Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un testeur TNT professionnel permettant d'accéder à plusieurs indicateurs caractéristiques de la qualité du signal numérique. Les paramètres principaux analysés sont la puissance du signal reçu, exprimée en $dB\mu V$ puis interprétée en lien avec le bilan de liaison, le rapport porteuse sur bruit (C/N), critère déterminant pour la stabilité du décodage en modulation 64-QAM, la stabilité du flux MPEG-2 Transport Stream, caractérisée par l'accrochage du multiplex et le débit mesuré d'environ 24,9 Mbps, ainsi que l'influence de l'environnement de réception intérieur ou extérieur. L'ensemble des relevés a été réalisé sur une fréquence représentative de la bande TNT, 490 MHz, correspondant à un canal UHF utilisé en France. La modulation observée est une 64-QAM, cohérente avec les choix de diffusion décrits précédemment, permettant un débit élevé au prix d'exigences plus strictes sur la qualité du signal reçu.

6.2 Analyse comparative des antennes de réception

Cette étude se concentre sur l'analyse comparative de deux grandes familles d'antennes aux caractéristiques distinctes : les antennes directives de type Yagi, utilisées comme référence pour la qualité de réception, et une antenne plate omnidirectionnelle, principalement destinée à un usage domestique. Les antennes Yagi sont des antennes fortement directives dont la conception repose sur un ensemble d'éléments passifs (réflecteur, dipôle, directeurs) permettant de concentrer le rayonnement ou la réception dans une direction privilégiée. Cette directivité se traduit par un gain plus élevé, ce qui permet de compenser efficacement les pertes de propagation en espace libre mises en évidence dans le bilan de liaison théorique. De plus, cette sélectivité directionnelle

contribue à une meilleure réjection des interférences latérales, un point essentiel pour la stabilité d'une liaison numérique TNT. L'antenne plate étudiée est une antenne compacte et polyvalente, conçue pour une intégration discrète dans un environnement résidentiel. Elle a été testée en extérieur, où la propagation est plus favorable et moins affectée par les obstacles proches, et en intérieur, où les réflexions sur les murs, les pertes dues aux matériaux de construction et les interférences locales influencent fortement la réception. Comparée aux antennes Yagi, l'antenne plate présente un gain plus faible, mais offre une mise en œuvre simplifiée et une meilleure tolérance à l'orientation, au détriment de la performance brute.

6.3 Résultats de mesures sur antennes Yagi (antennes directives)

Un premier relevé a été effectué avec une antenne Yagi positionnée au sol en extérieur. La puissance mesurée est de 59 dB μ V, avec un rapport C/N de 28,3 dB, les porteuses s'étendant de 0 à 6816 et le multiplex MPEG-2 TS correctement accroché à un débit stable de 24,89 Mbps.

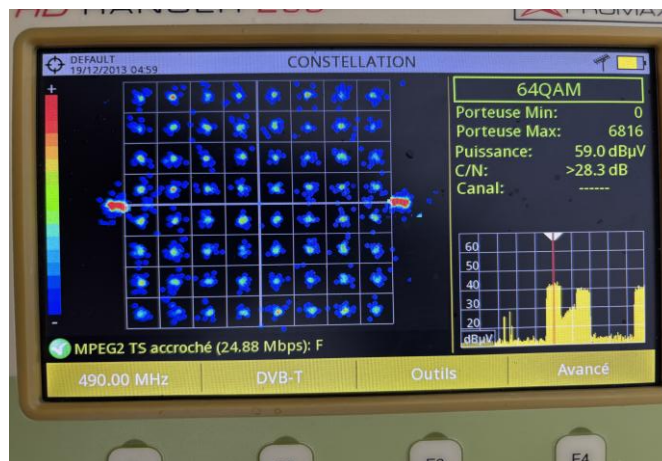


Figure 18 : Antenne directive au sol, en extérieur

Ce niveau de C/N est largement supérieur au seuil minimal requis pour une modulation 64-QAM, ce qui explique la stabilité de la réception. Toutefois, la puissance reçue reste modérée, ce qui s'explique par la faible hauteur de l'antenne, limitant la visibilité radioélectrique et augmentant l'influence des obstacles proches. Lorsque l'antenne directive est surélevée en extérieur, les performances s'améliorent nettement, la puissance reçue atteignant 68 dB μ V, soit un gain d'environ 9 dB par rapport à la configuration précédente, avec un rapport C/N de 37,2 dB sur les mêmes porteuses. Cette amélioration illustre directement les effets décrits dans le bilan de liaison : la réduction des pertes dues aux obstacles et l'optimisation de la propagation en espace

libre permettent de maximiser le gain effectif de l'antenne. La réception devient alors très robuste, avec une marge importante vis-à-vis du seuil de décodage.



Figure 19 : Antenne directive levée, en extérieur

6.4 Résultats de mesures sur antenne plate omnidirectionnelle

Dans la configuration antenne plate au sol en extérieur, la puissance mesurée est inférieure à 44,5 dBμV, avec un rapport C/N inférieur à 3,8 dB, les porteuses de 0 à 6816 et le multiplex MPEG-2 TS accroché à 24,88 Mbps.

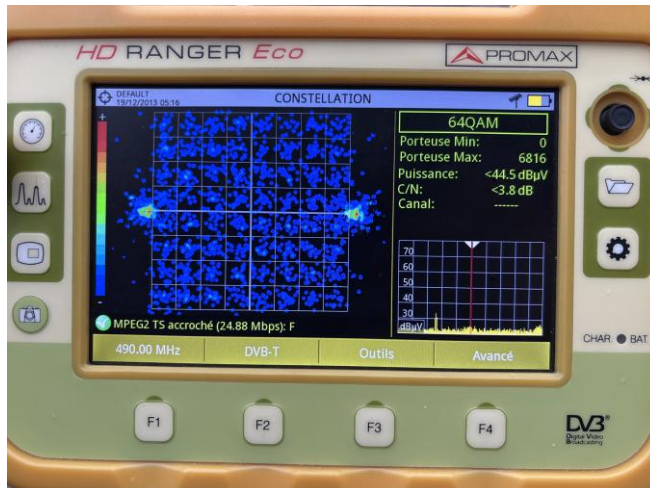


Figure 20 : Antenne omnidirectionnelle au sol, en extérieur

Malgré ces valeurs très faibles, le flux reste accroché, ce qui illustre la robustesse des mécanismes de correction d'erreurs intégrés à la norme DVB-T. Cependant, cette réception est très proche du seuil critique, la faible directivité et le gain limité de l'antenne plate rendant la liaison extrêmement sensible aux variations de l'environnement et aux interférences. En intérieur, toujours au sol, la puissance reçue augmente à 48 dBμV, avec un C/N supérieur à 17,2 dB sur les porteuses identiques et un débit de 24,89 Mbps. Cette amélioration peut s'expliquer par des effets de réflexions favorables sur les surfaces environnantes, créant localement un champ électromagnétique plus intense. Néanmoins, cette situation reste très dépendante de l'environnement immédiat, ce qui confirme que les antennes omnidirectionnelles offrent des performances variables et peu prédictibles dans des conditions réelles.

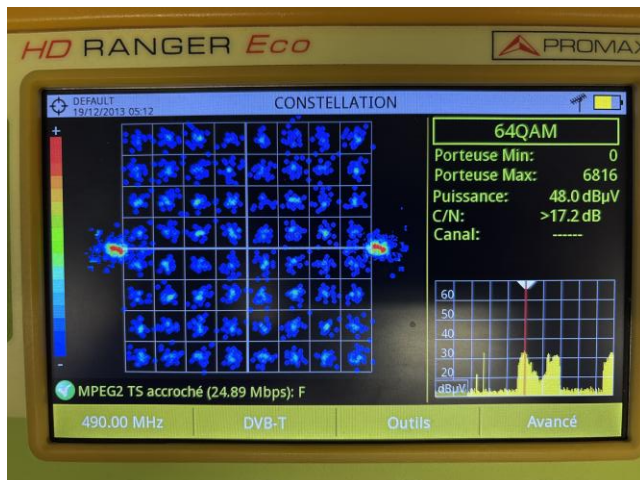


Figure 21 : Antenne omnidirectionnelle au sol, en intérieur

6.5 Résultats sur antennes râteau étroites (Yagi de dimensions intermédiaires)

Les antennes râteau étroites représentent un compromis entre encombrement et performance directive. Au sol en extérieur, une puissance de 57,9 dBμV et un C/N supérieur à 22,2 dB sont mesurés, avec les porteuses de 0 à 6816 et un débit MPEG-2 TS de 24,89 Mbps, assurant une réception stable.



Figure 22 : Antenne râteau étroite au sol, en extérieur

Au sol en intérieur, la puissance reste comparable à 56,2 dB μ V, avec un C/N supérieur à 21 dB et le même débit, montrant une bonne tolérance à l'environnement intérieur.

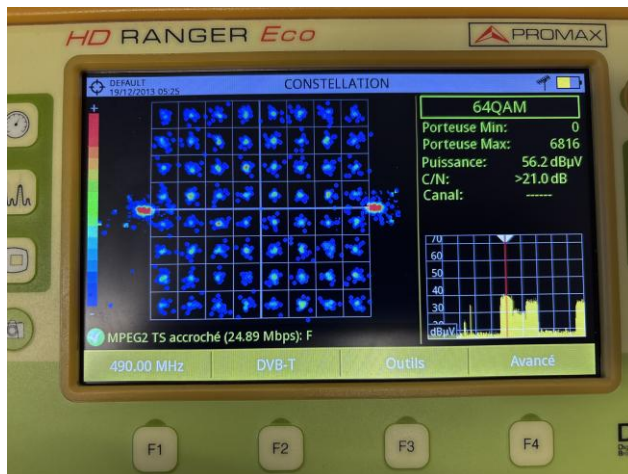


Figure 23 : Antenne râteau étroite au sol, en intérieur

Levée en extérieur, la puissance atteint 67 dB μ V, avec un C/N supérieur à 26,2 dB sur un débit de 24,88 Mbps, se rapprochant des performances de l'antenne Yagi de grande taille. Ces résultats confirment que la directivité et la hauteur de l'antenne jouent un rôle déterminant dans la qualité de la liaison TNT.

6.6 Mise en relation avec les simulations et diagrammes de rayonnement

L'ensemble de ces relevés expérimentaux est cohérent avec les simulations de diagrammes de rayonnement étudiées précédemment. Les valeurs élevées de C/N obtenues avec les antennes directives orientées correctement corroborent l'existence d'un lobe principal étroit, correspondant à la direction de gain maximal ($G_{max} - G_a = 0$ dB), et d'une atténuation marquée dans les directions latérales et arrière, comme observé sur les diagrammes en 2D et en 3D à 490 MHz. Les basculements de gain, avec des atténuations de l'ordre de 10 à 12 dB selon l'angle et jusqu'à 32 dB à l'arrière, se retrouvent indirectement dans les mesures réelles, notamment lors des tests au sol ou en intérieur. Le fait d'avoir étudié la bande TNT permet de montrer que les performances restent globalement cohérentes sur l'ensemble de la bande UHF, validant ainsi la conformité des antennes aux exigences de diffusion TNT.

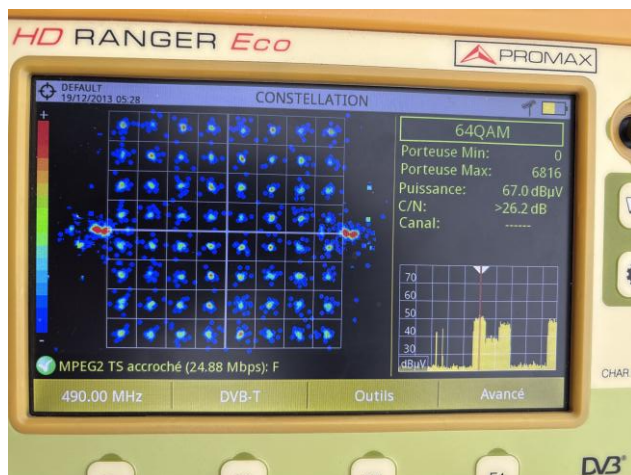


Figure 24 : Antenne râteau étroite levée, en extérieur

6.7 Synthèse et lien avec le bilan de liaison

Même si les tests de brouillage LTE n'ont pas été systématiquement quantifiés pour chaque configuration, la comparaison entre antennes directives et omnidirectionnelle montre que les antennes à fort gain et à lobe principal étroit sont mieux armées pour rejeter les signaux indésirables présents dans des directions différentes de celle de l'émetteur de télévision. En pratique, une antenne Yagi ou râteau correctement orientée et associée à un filtre LTE permet de limiter l'impact des émissions mobiles situées en bande adjacente, alors qu'une antenne omnidirectionnelle reste plus exposée aux perturbations, se traduisant par une dégradation plus rapide du rapport C/N. L'ensemble des mesures met en évidence la pertinence du bilan de liaison théorique présenté précédemment. Les gains d'antennes, les pertes de propagation et l'environnement de réception expliquent directement les écarts observés entre les différentes configurations. Les antennes directives offrent une marge de liaison confortable, garantissant une réception stable même en présence de perturbations, tandis que les antennes omnidirectionnelles restent utilisables uniquement lorsque le niveau de champ est suffisant. Ces résultats illustrent concrètement l'importance du dimensionnement de la chaîne de réception TNT pour assurer une qualité de service satisfaisante.

7. Bilan de liaison réseau TNT

Dans le cadre de la réalisation d'un schéma de liaison TNT et de son bilan de liaison, ce rapport analyse les performances d'une transmission sur une distance de 5 km entre une station de base et une antenne cliente. L'objectif principal est de déterminer la puissance émise par l'antenne émettrice. Pour cela nous parlerons entre autres de l'affaiblissement en espace libre, des pertes dans les câbles et des gains des antennes. Les résultats mesurés sont ensuite comparés aux valeurs théoriques à travers un bilan détaillé présenté sous forme de tableau, accompagné d'un schéma illustrant les différentes étapes de la transmission TNT.

7.1 Information de base

Fréquence : 450 MHz

Distance de transmission : 5 km

Longueur de câble : 24m

Puissance reçue mesurée : 68 dB μ V

Pour cette étude, la fréquence de transmission est de 450 MHz. La distance entre l'émetteur et le récepteur est de 5 km. Le câble utilisé mesure 24 mètres. La puissance tension mesurée est de 68 dB μ V, Ces valeurs permettront d'analyser le système.

7.2 Conversion 68 dBμV en dbm



Il s'agit d'une capture d'écran d'un appareil de mesure radiofréquence affichant le Niveau de signal reçu : 68 dBμV (décibels microvolts), qui est la mesure de la tension du signal capté.

$$\text{dB}\mu\text{V} = 106.98 + \text{dBm}_{50\Omega}$$

$$\text{dB}\mu\text{V} = 108.75 + \text{dBm}_{75\Omega}$$

Source :

<https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/2022/07/16/07/23/guide-to-rf-tuners-and-dbm-to-dbuV-conversion.html>

Pour effectuer cette conversion, j'ai utilisé la formule standard $\text{dBm} = \text{dB}\mu\text{V} - 107$, qui permet de passer d'une mesure de tension (dBμV) à une mesure de puissance (dBm), la conversion est essentielle pour évaluer la puissance des signaux reçus et émis

$$\text{dBm} = \text{dB}\mu\text{V} - 107$$

$$68 - 107 = -39 \text{ dBm}$$

Après conversion en dBm, on obtient une puissance reçue de -39 dBm.

Puissance réelle mesurée (-39,0 dBm)

Valeur obtenue à l'aide de l'instrument de mesure. L'écart avec la valeur théorique peut s'expliquer par des imprécisions, les équipements utilisés et les conditions réelles de propagation.

7.3 Calcul de l'affaiblissement

- Formule vue en cours :

$$A_0 = 32,4 + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(d)$$

- Données :

*A₀ (dB) : affaiblissement en espace libre
d (km) : distance entre émetteur (antenne) et récepteur (mobile)
f (MHz) : fréquence d'émission*

Figure 25 : Formule de l'affaiblissement

Pour déterminer l'affaiblissement entre l'émetteur et le récepteur, j'ai utilisé la formule théorique vue en cours : $A_0 = 32,4 + 20 \cdot \log(f) + 20 \cdot \log(d)$. J'ai substitué les valeurs données, à savoir une fréquence $f = 450$ MHz et une distance $d = 5$ km. Après avoir calculé les logarithmes, j'ai additionné les termes pour obtenir l'affaiblissement total comme indiqué sur le schéma.

$$A_0 = 32,4 + 20 \cdot \log(f) + 20 \cdot \log(d)$$

$$32,4 + 53,06 + 13,98 = 99,5 \text{ dB}$$

L'affaiblissement total sur une distance de 5 km est donc de 99,5 dB.

Affaiblissement (−99,5 dB)

Représente les pertes dues à la propagation de l'onde électromagnétique dans l'espace entre l'émetteur et le récepteur. Cet affaiblissement dépend principalement de la distance et de la fréquence du signal.

7.4 Pertes (Câblage)

Les caractéristiques du câble utilisé sont : 17 dB/100 m à une fréquence de 450 MHz.

Pour une installation de 24 m de câble coaxial, les pertes sont calculées ainsi

Calcul des pertes : $(17 \times 24) / 100 = 4.08$

Le câble reliant l'antenne au récepteur TNT présente une atténuation de 4,08 dB

Pertes de câblage (-4,1 dB)

Correspond aux pertes introduites par le câble coaxial reliant les équipements, ici sur une longueur de 24 m avec une atténuation de 17 dB pour 100 m. Ces pertes réduisent la puissance du signal transmis.

7.5 Calcule puissance émise

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - L_{FS} - L_M + G_{RX} - L_{RX}$$

Figure 26 : Formule de la puissance reçue

La puissance reçue n'est rien d'autre que la puissance disponible en sortie après déduction de toutes les pertes.

Pour retrouver la puissance en entrée, il faut donc additionner à la puissance reçue l'ensemble des pertes et soustraire les gains.

Prx correspond à la puissance reçue, Ptx à la puissance émise, Lfs à l'affaiblissement en espace libre et G les gains des antennes.

$$P_{tx} = P_{rx} + L_{fs} - G$$

$$-39 + 4.08 + 99.5 - 12 - 6 = 46.58$$

La puissance émise par l'émetteur est donc de 46,58 dBm.

Étant donné que je n'ai pas l'affaiblissement entre l'émetteur et l'antenne, j'ai choisi de ne pas le prendre en compte. Toutefois, en supposant qu'il soit également de 4,08 dB, la puissance émise serait de 50,66 dBm.

Puissance émise (+42,5 dBm)

Puissance délivrée par l'émetteur à la sortie. L'énergie initiale injectée dans la liaison avant toute perte.

7.6 Calcule puissance théorique + tableau bilan

Puissance théorique :

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - L_{FS} - L_M + G_{RX} - L_{RX}$$

Figure 27 : Formule de la puissance théorique

Cette formule représente le bilan de puissance théorique. Elle permet de calculer la puissance reçue en fonction des différents gains et pertes dans le système.

Prx correspond à la puissance reçue, Ptx à la puissance émise, Ltx à la perte due au câble, Lfs à l'affaiblissement en espace libre, et Gtx/Grx aux gains respectifs des antennes émettrice et réceptrice.

$$Prx = Ptx - Ltx - Lfs + Gtx + Grx$$

$$46.58 - 99.5 - 4.08 + 12 + 6$$

$$= -39 \text{ dbm}$$

En théorie, nous étions censés obtenir une valeur de -39 dBm dans le meilleur des scénarios, et -43.08 si on compte le 2nd câble et qu'on lui donne la même valeur que le premier cable

Cet écart peut s'expliquer par plusieurs facteurs, tels que des pertes supplémentaires non prises en compte (câble entre l'émetteur et l'antenne), des imprécisions de mesure, ainsi que des conditions de propagation réelles différentes de la théoriques.

Bilan :

Désignation	Valeur	Unité
Puissance émise	+46.58	dBm
Affaiblissement	-99,5	dB
Pertes câblage (24m 17dB/100m)	-4,08	dB
Puissance théorique à la prise	-39.0 ou - 43.08	dBm
Puissance réelle mesurée	-39,0	dBm

Le bilan de puissance du système montre les valeurs suivantes : La puissance émise est de +46,58 dBm.

L'affaiblissement total du signal est de -99,5 dB, incluant les pertes en espace libre et autres atténuations.

Les pertes câblage sur 24 mètres sont estimées à -4,1 dB.

La puissance théorique à l'arrivée est calculée à -39 ou -43,1 dBm.

Enfin, la puissance réelle mesurée est de -39,0 dBm, ce qui permet de comparer la théorie et la pratique dans ce système.

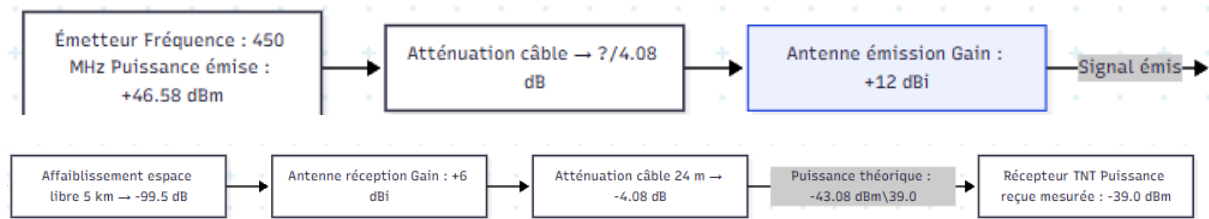


Figure 28 : Schéma d'une liaison TNT

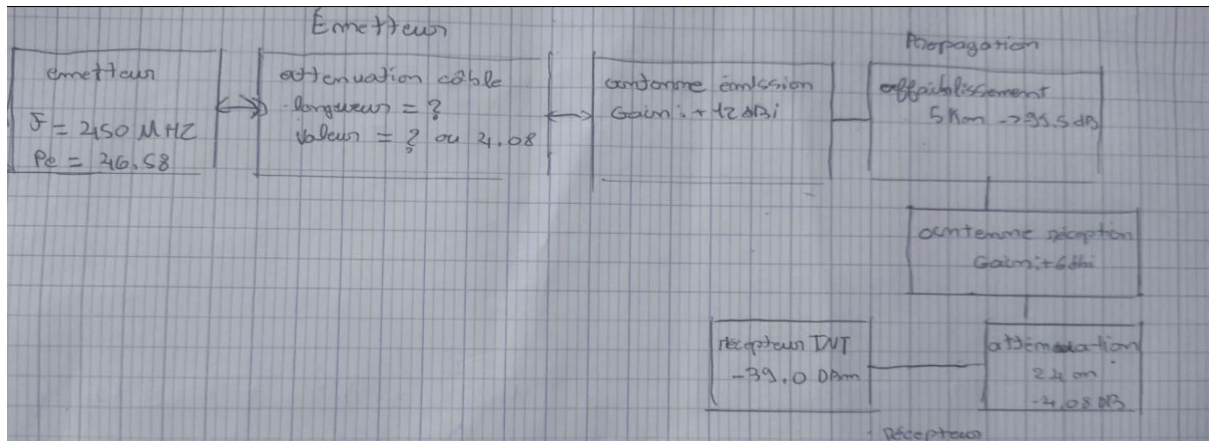


Figure 29 : Schéma d'une liaison TNT

Côté Émetteur : La fréquence utilisée est de 450 MHz avec une puissance émise de 46,58 dBm. Le signal subit une atténuation dans le câble, dont la valeur et la longueur exacte en dB reste à déterminer j'ai donc délibérément choisi de prendre un cas où il n'est pas pris en compte et un autre où il a une valeur de -4,08. Ensuite, l'antenne d'émission apporte un gain de +12 dBi.

Propagation : Le signal traverse un affaiblissement en espace libre sur une distance de 5 km, estimé à -99,5 dB.

Côté Récepteur : L'antenne de réception ajoute un gain de +6 dBi. Le signal subit une nouvelle atténuation dans le câble de 24 mètres, évaluée à -4,08 dB. Enfin, la puissance reçue mesurée au niveau du récepteur TNT est de 68 dBμV, soit -39 dBm après conversion.

Table des illustrations :

Figure 1 : Synoptique simplifié de la chaîne de diffusion DVB-T.	5
Figure 2 : Exemple d'analyse de constellation sur mesureur de champ.	7
Figure 3 : Allocation du spectre des fréquences UHF.	10
Figure 4 : Carte de couverture théorique de l'émetteur de Blois.	11
Figure 5 : Fiche technique et diagrammes de rayonnement de l'émetteur de Blois.	11
Figure 6 : Antenne panneau utilisée pour ce rapport	14
Figure 7 : Petite antenne Yagi utilisée pour ce rapport	14
Figure 8 : Grande antenne Yagi utilisée pour ce rapport	14
Figure 9 : Antenne Yagi représenté en 3D sur la simulation.....	16
Figure 10 : Format de l'onde 3D pour 490 MHz	17
Figure 11 : Diagramme de rayonnement pour 490 MHz axe principal de rayonnement. 18	
Figure 12 : Diagramme de rayonnement pour 490 MHz basculement de rayonnement 19	
Figure 13 : Diagramme de rayonnement pour 490 MHz sur le lobe arrière.....	20
Figure 14 : Forme de l'onde pour 602 MHz en 3D	21
Figure 15 : Diagramme de rayonnement pour 602 MHz axe principal de rayonnement. 22	
Figure 16 : Diagramme de rayonnement pour 602 MHz basculement de rayonnement 23	
Figure 17 : Diagramme de rayonnement pour 602 MHz sur le lobe arrière	24
Figure 18 : Antenne directive au sol, en extérieur.....	26
Figure 19 : Antenne directive levée, en extérieur.....	27
Figure 20 : Antenne omnidirectionnelle au sol, en extérieur.....	28
Figure 21 : Antenne omnidirectionnelle au sol, en intérieur	29
Figure 22 : Antenne râteau étroite au sol, en extérieur.....	29
Figure 23 : Antenne râteau étroite au sol, en intérieur	30
Figure 24 : Antenne râteau étroite levée, en extérieur.....	31
Figure 25 : Formule de l'affaiblissement	34
Figure 26 : Formule de la puissance reçue	35
Figure 27 : Formule de la puissance théorique	36
Figure 28 : Schéma d'une liaison TNT	38
Figure 29 : Schéma d'une liaison TNT	38