

Étude de l'intégration de la radio sur fibre sur le réseau TNT, Bénin

Patrick Coffi SOTINDJO^{1*}, Hermann ETEKA², Léopold DJOGBE² et Antoine VIANOU²

¹ *Université Nationale des Sciences Technologies, Ingénierie et Mathématiques, (UNSTIM), Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, (ENSET), Laboratoire de Recherche Pluridisciplinaire de l'Enseignement Technique, (LARPET), Lokossa, Bénin*

² *Université Abomey-Calavi, (UAC), Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, (EPAC), Laboratoire d'Electrotechnique, de Télécommunications et d'Informatique Appliquée, (LETIA), Abomey-Calavi, 01 BP 2009 Cotonou, Bénin*

(Reçu le 27 Mars 2023 ; Accepté le 01 Juin 2023)

* Correspondance, courriel : patcotindjo@yahoo.fr

Résumé

Cette étude a pour objectif la réduction du coût d'installation du réseau de la Télévision Numérique Terrestre (TNT) dans les pays de la sous-région à travers l'introduction de la technologie Radio sur fibre (RoF) dans l'architecture de déploiement. Cette étude a été menée au Bénin qui a déjà déployé son réseau TNT. Dans nos travaux, nous avons proposé une chaîne de transmission "Émetteur/Récepteur DVB-T2" intégrant la Radio sur Fibre. Cette chaîne de transmission a ensuite fait l'objet d'une cosimulation "Matlab-Optisystem" afin de déterminer la distance maximale de transport du signal Radio Fréquence -TNT sur la fibre. A l'issue des travaux de la cosimulation, il ressort que nous pouvons effectuer, avec un Taux d'Erreur Binaire (TEB) cible inférieure à 10^{-9} , une transmission RoF sur une distance maximale de 100 km avec les paramètres ci-après : Fréquence d'émission : 570 Mhz ; débit de transmission : 35 Mbits/s. A partir des résultats obtenus, nous avons donc proposé une nouvelle architecture de déploiement du réseau TNT-Bénin intégrant la technologie RoF à coût réduit (Baisse estimée à 33 %) et garantissant les mêmes performances que le réseau actuel.

Mots-clés : TNT, RoF, émetteur, récepteur, DVB-T2, RF, TEB.

Abstract

Study of the integration of fibre radio on the TNT-Benin network

The objective of this work is to reduce the cost of installing the DTT (Digital Terrestrial Television) network in the countries of the sub-region through the introduction of RoF (Radio over Fiber) technology in the network deployment architecture. This study was conducted in Benin, which has already deployed its DTT network. In our work, we proposed a "Transmitter/Receiver DVB-T2" transmission chain integrating Radio over Fiber. This transmission chain was then the subject of a "Matlab-Optisystem" co-simulation in order to determine the maximum transport distance of the Radio Frequency -TNT signal on the fiber. At the end of the co-simulation work, it appears that we can carry out, with a target Binary Error Rate (BER) of less than 10^{-9} , a RoF transmission over a maximum distance of 100 km with the parameters below : Transmission frequency: 570

Mhz; transmission rate: 35.625 Mbits/s. Based on the results obtained, we therefore proposed a new deployment architecture for the TNT-Benin network integrating RoF technology at a reduced cost (Estimated drop of 33 %) and guaranteeing the same performance as the current network.

Keywords : *DTT, RoF, transmitter, receiver DVB-T2, RF, BER.*

1. Introduction

L'avènement de la numérisation et le développement de l'informatique ont impacté tous les secteurs d'activité. Le monde de l'audiovisuel n'en est pas du reste avec l'apparition de nouvelles techniques dans le traitement numérique des signaux de télévision. Cette avancée technique dans le secteur de la télévision favorise l'obtention d'une meilleure qualité d'image et de son, l'utilisation rationnelle des ressources fréquentielles, l'intégration des services interactifs, etc. Le numérique offre donc de nouvelles opportunités et implique des changements fondamentaux dans la façon de produire, de distribuer et de consommer la télévision. C'est fort de cela que la Conférence Régionale des Radiocommunications (CRR) qui s'est tenue à Genève du 15 mai au 16 Juin 2006 a débouché sur un traité international (Accord GE06) qui a recommandé la fin de la télédiffusion analogique et son extinction dans la bande III au plus tard le 17 juin 2015 [1]. De ce fait, plusieurs pays membres de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) ont migré de la télévision analogique terrestre à la télévision numérique terrestre dans les délais prescrits. Par contre, d'autres pays sont en retard dans ce processus d'implémentation de la TNT. L'une des causes de ce retard est le lourd investissement financier qu'induit la migration de la télévision analogique terrestre à la télévision numérique terrestre dans les pays en voie de développement, qui ont bien d'autres priorités (Santé, Sécurité, Education, infrastructures routières, etc.). C'est dans ce contexte que le Bénin a réussi à sortir la tête de l'eau en lançant officiellement la TNT le vendredi 17 Février 2023 soit environ 8 ans après la date prescrite. Soucieux de rendre plus accessible le déploiement de la TNT dans les pays à revenu limité, nous nous sommes intéressés au déploiement fait au Bénin et avons proposé une architecture intégrant la Radio sur Fibre (RoF) dans le but d'amoindrir le coût de déploiement. Cette solution pourra donc inspirer les pays qui n'ont pas encore déployé cette technologie chez eux. L'objectif de ce travail est donc la réduction du coût d'implémentation du réseau TNT tout en garantissant une bonne qualité de réception. Pour y parvenir, nous allons dans un premier temps, présenter les concepts de base de la RoF et de la TNT et passer à la présentation du déploiement actuel de la TNT au Bénin. Après cette étape, nous allons nous intéresser aux performances de la TNT à travers la norme DVB-T2 sur une liaison RoF en réalisant une cosimulation « Matlab-Optisystem » dans le but de déterminer la portée d'une telle liaison. Les résultats de la cosimulation nous permettront de faire un redimensionnement du réseau TNT-Bénin intégrant la RoF. Enfin, une comparaison du point de vue financier de l'architecture actuelle et de l'architecture proposée sera faite afin d'édifier l'opinion sur la pertinence des projections effectuées.

2. Matériel et méthodes

2-1. Point des concepts exploités

2-1-1. La Radio sur Fibre

Le terme « Radio-sur-Fibre » (RoF) fait référence à des techniques de transmission de signaux radiofréquences (RF) par voie optique. La technique de transmission RoF est basée principalement sur la modulation d'une porteuse optique par un signal radiofréquence portant lui-même les données à transmettre [2, 3]. Le schéma de principe de la RoF est présenté à la *Figure 1*.

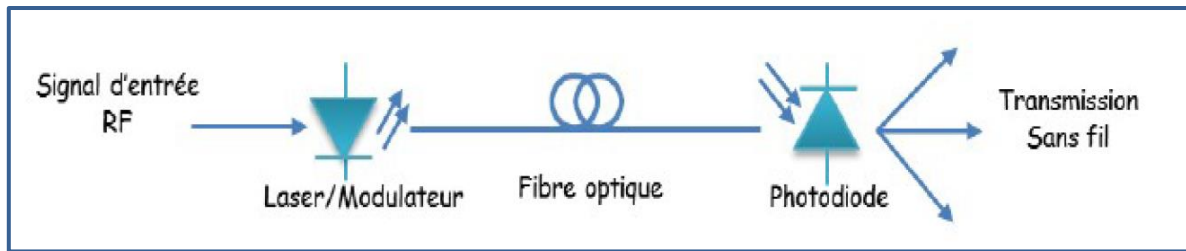


Figure 1 : Principe de fonctionnement de la Radio sur Fibre [2]

Le laser est donc directement alimenté par un signal RF. Ce signal RF provient d'un système d'émission RF et donc a déjà subi une modulation l'amenant ainsi à la forme sous laquelle elle devrait être envoyée vers une antenne. Mais au lieu d'envoyer ce signal vers une antenne, on l'envoie vers un laser qui le transforme de sa forme électrique en une forme optique. Le signal optique RF obtenu est alors transmis à travers la fibre optique et reconverti à destination en un signal électrique grâce à un photodétecteur (Photodiode). Le signal RF finalement reçu est envoyé vers une antenne pour son émission sous forme d'onde radioélectrique [3]. Cette technique est très intéressante car elle permet la centralisation des fonctions. En effet, si l'on doit installer des émetteurs radiofréquences devant diffuser le même signal ou non à plusieurs endroits ; au lieu d'acheter un émetteur par endroit, on en installe un à un endroit stratégiquement identifié ; on produit le signal RF à diffuser et grâce à la technologie RoF, on fait parvenir ce signal à tous les autres endroits où l'on n'installe qu'un convertisseur optique électrique, un amplificateur et une antenne [3]. Au lieu donc de répliquer le même investissement sur les différents sites, on se contente d'un déport de signal et il a été prouvé que cette technique est très avantageuse en matière d'investissement financier lorsque des infrastructures optiques ont déjà été déployées.

2-1-2. La Télévision Numérique Terrestre

Quand l'on parle de Télévision Numérique Terrestre, il s'agit de l'ensemble de techniques basées sur des réémetteurs terrestres et destinées à émettre et recevoir des signaux numériques représentant des séquences audiovisuelles. De façon plus explicite, la télévision parviendra aux téléspectateurs par des ondes radioélectriques émises depuis des stations terrestres et directement transmises vers les consommateurs. La TNT est très indiquée pour la diffusion de la télévision car elle permet d'utiliser de façon rationnelle la ressource fréquentielle en comparaison avec la télévision analogique terrestre et aussi d'assurer une transmission de très bonne qualité mais surtout insensible aux intempéries ce qui n'est pas le cas pour la télévision numérique satellitaire [4]. De façon synthétique, l'on peut résumer l'architecture de déploiement de la TNT à la **Figure 2**. Les stations éditrices sont les chaînes de télévision qui produisent le signal audiovisuel à diffuser. Ces différentes stations éditrices font converger, vers un nœud central (la tête de réseau), l'ensemble de leurs signaux à travers le réseau de collecte. Ce réseau peut se baser sur diverses technologies (Fibre optique, Faisceaux Hertziens, Liaison satellitaire, etc.). Au niveau de la tête de réseau, les différents signaux provenant des différentes stations éditrices sont multiplexés pour générer un flux unique (un signal unique) à envoyer vers les téléspectateurs. Ce flux unique est envoyé vers les stations de diffusion situées à des distances plus ou moins proches des téléspectateurs à travers le réseau de transport. Ce réseau de transport peut être satellitaire, fibré, etc. Une fois le signal parvenu aux stations de diffusion stratégiquement positionnées pour couvrir toute la superficie à desservir, le signal est traité selon la norme de diffusion TNT déployée et envoyé vers les téléspectateurs. Au niveau des téléspectateurs, des décodeurs permettent de démultiplexer le signal unique reçu et donc de retrouver les signaux envoyés par chaque station éditrice.

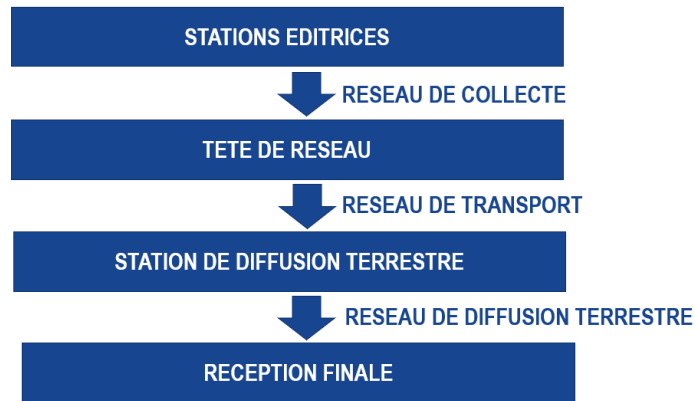


Figure 2 : Nœuds et différents segments de l'architecture de déploiement de la TNT

L'architecture de la TNT déployée au Bénin est présentée à la **Figure 3** (Source : Enquêtes Terrain).



Figure 3 : Architecture de déploiement de la TNT au Bénin

Le réseau de collecte est principalement constitué de liaisons FH et fibrées mais les signaux sont aussi reçus de certains éditeurs notamment les chaînes étrangères par satellite. Toutes ces liaisons (FH, Fibrées et Satellitaires), permettent le transport des signaux produits par les éditeurs vers la tête de réseau. Le réseau de transport est un réseau satellitaire et la diffusion se fait par onde radiofréquence UHF. Au Bénin, le réseau de diffusion est constitué de 29 stations émettrices. La **Figure 4** schématise la répartition géographique des différents sites de diffusion.

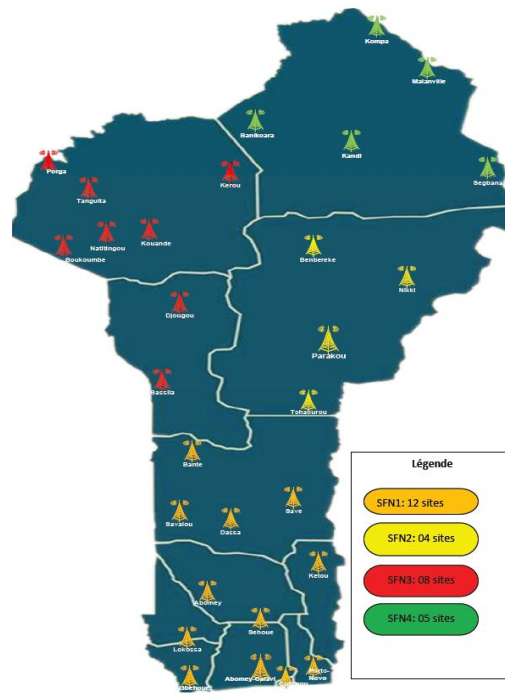


Figure 4 : Répartition géographique des sites de diffusion TNT au Bénin

Sur chaque site de diffusion, il y a réplication d'une série d'équipements. Le **Tableau 1** présente la liste de ces équipements.

Tableau 1 : Point des Equipements sur les sites de TNT du réseau Béninois

N°	Équipements	Nombre par site	Nombre sur tous les sites
01	Parabole et accessoires	1	29
02	IRD	2	58
03	T2-Edge	2	58
04	Modulateur DVB-T2	2	58
05	Amplificateur de signal RF	2	58
06	Filtre d'émission	1	29
07	Charge fictive	1	29
08	Déshydrateur	1	29
09	Pylône	1	29
10	Réseau d'antennes UHF	1	29

L'objectif de ce travail est de trouver un moyen de centraliser les fonctions les plus importantes sur certains sites et donc de simplifier les autres sites en ne réutilisant pas tous les équipements de diffusion sur tous les sites. Cela permettra de réduire le coût de déploiement du réseau. Pour atteindre cet objectif, la RoF sera utilisée. L'utilisation de la technologie RoF est intéressante pour le cas d'étude car le Bénin a déjà raccordé la majorité de ses communes par fibre optique. Les pays qui s'inspireront de ce choix technologique devront avoir aussi cet atout afin que cette solution leur soit bénéfique.

2-1-3. Méthodologie exploitée

Pour rappel, l'objectif de ce travail est de simplifier certaines stations de diffusion en centralisant plusieurs fonctions d'émission sur des sites et en utilisant la RoF pour déporter le signal centralisé vers les sites simplifiés. Pour atteindre cet objectif, la méthodologie suivante a été adoptée :

- Etat des lieux des caractéristiques du signal TNT exploité au Bénin ;
- Détermination de la distance maximale de déport du signal TNT par la RoF ;
- Conception d'une architecture d'implémentation de la TNT basée sur la RoF ;
- Point du matériel à utiliser ;
- Etude comparative (coût) des deux architectures (architecture existante et architecture proposée).

2-2. Matériel

Le matériel utilisé dans le cadre du travail en plus de nos ordinateurs est résumé dans le **Tableau 2** suivant :

Tableau 2 : Matériel utilisé

Logiciels de simulation utilisés	Canal exploité	Critère d'évaluation
Matlab 2019 Optisystem 7	Optique (Co-simulation Matlab & Optisystem)	TEB (Taux d'Erreur Binaire)

3. Résultats et discussion

De l'état des lieux des caractéristiques du signal TNT Béninois, la chaîne de transmission retenue pour modéliser le signal à déporter par la RoF est schématisé sur la **Figure 5**. En effet, le signal à déporter est le signal DVB-T2. Le signal audiovisuel numérique en bande de base doit donc être transmis. Ce signal est représenté par le générateur de bits sur la **Figure 5**. Ces éléments binaires en entrée de l'émetteur DVB-T2, après codages BCH et LDPC, subiront la modulation QAM puis la modulation OFDM et enfin la modulation IQ pour la transposition du signal à la fréquence d'émission. Le signal radiofréquence obtenu à l'issue de ces opérations demeure réel. Or pour moduler directement un laser, le signal doit être réel mais positif. C'est ainsi qu'une composante continue DC (Bias) sera ajoutée au signal puis la résultante sera envoyée sur le laser pour une modulation directe. Le signal optique obtenu attaquera enfin le canal de transmission qu'est la fibre optique. A la réception, le signal optique détecté sera converti en signal radiofréquence électrique par un photodétecteur. Le signal électrique obtenu, subira ensuite successivement la démodulation IQ, la démodulation OFDM et la démodulation QAM. Les bits obtenus en sortie du démodulateur QAM seront décodés en LDPC et BCH puis comparés aux éléments binaires envoyés pour une évaluation du taux d'erreur binaire.

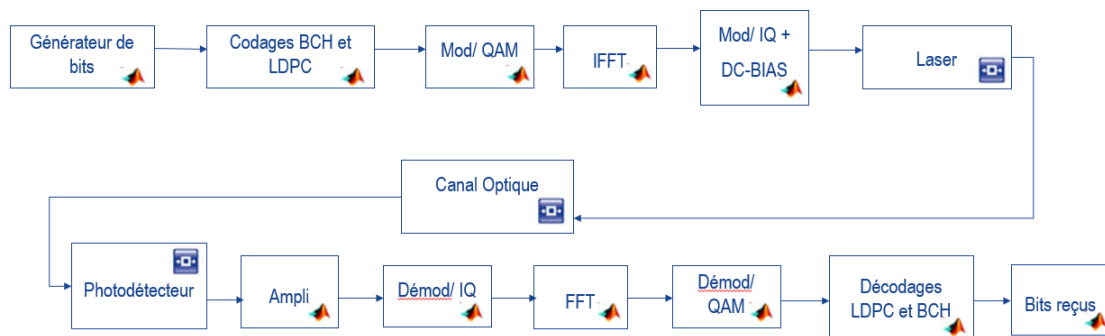


Figure 5 : Synoptique de la chaîne de transmission DVB-T2 intégrant la RoF

Cette chaîne conçue à base de l'état des lieux a donc été simulée grâce à une cosimulation Optisystem-Matlab dans le but de connaître la portée de cette liaison. Les paramètres utilisés dans l'implémentation de la liaison sont résumés dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Paramètres de la liaison

NORME	DVB T2
Fréquence	570 MHz
Débit	35 Mbits/s
Nb Sous-Porteuses	1024
Format de modulation	QAM

A l'issue de la simulation de cette liaison, les résultats obtenus sont consignés sur la **Figure 6**

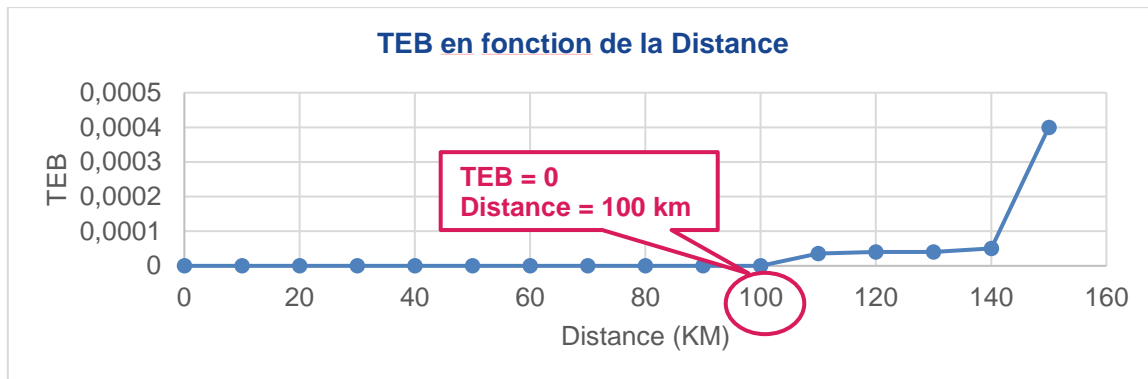


Figure 6 : TEB en fonction de la distance de fibre

A l'issue de cette simulation, nous avons déduit que la portée du déport du signal DVB T2 par la RoF est de 100km dans les conditions de travail. L'étape suivante a été la refonte de l'architecture de déploiement de la TNT en y intégrant les sites de centralisation des équipements. La **Figure 7** présente les nœuds et les segments de l'architecture proposée. En la comparant avec la **Figure 2**, il a été remarqué qu'au sein du réseau de transport, il y a eu l'apparition de certains nœuds appelés « Station de Diffusion Régionale Terrestre ». Ces nœuds sont des stations de centralisation et les portions du réseau de transport entre ces stations et les « Stations de Diffusion Terrestre » se feront en RoF.

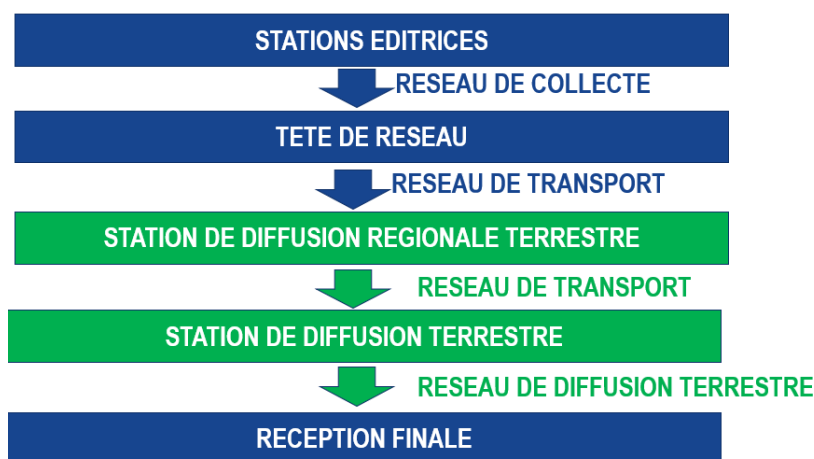


Figure 7 : Nœuds et différents segments de l'architecture revue du déploiement de la TNT

En se basant sur la portée déterminée, une étude a été faite pour déterminer la position des « Station de Diffusion Régionale Terrestre ». Il a été imposé comme contrainte le fait de ne pas créer de nouveaux sites mais de réutiliser les sites de diffusion existants en transformant certains d'entre eux en

« Station de Diffusion Régionale Terrestre » colocalisé avec la fonction de station de diffusion jadis réalisée afin qu'elle continue à remplir la fonction de couverture. La Figure 8 présente cette répartition géographique des différents sites avec comme légende :

- Site SDR : Site de Diffusion Régionale ;
- Site SD : Site de Diffusion ;
- Les liaisons en marron sont les liaisons RoF.

Une fois l'architecture proposée et la planification faite, l'évaluation financière du déploiement a été proposée en comparaison avec celle déployée actuellement au Bénin. Il faut rappeler que le Bénin a déjà interconnecté la majorité de ses communes avec la Fibre optique. Le coût de déploiement de cette infrastructure n'est donc pas intégré dans le bilan financier car le signal RoF peut être acheminé sur une longueur d'onde spécifique sans interférer avec le trafic existant. Le bilan matériel du réseau était essentiellement constitué des équipements de la tête de réseau et du réseau de diffusion qui comprend 29 sites. Le **Tableau 4** fait le récapitulatif de l'ensemble des équipements du réseau TNT-Bénin en exploitation. Le **Tableau 5** par contre présente le bilan du matériel nécessaire pour l'implémentation de la solution proposée. On y retrouve les équipements de la tête réseau, les équipements des 14 sites de diffusion régionaux et enfin les équipements des 15 sites de diffusion.

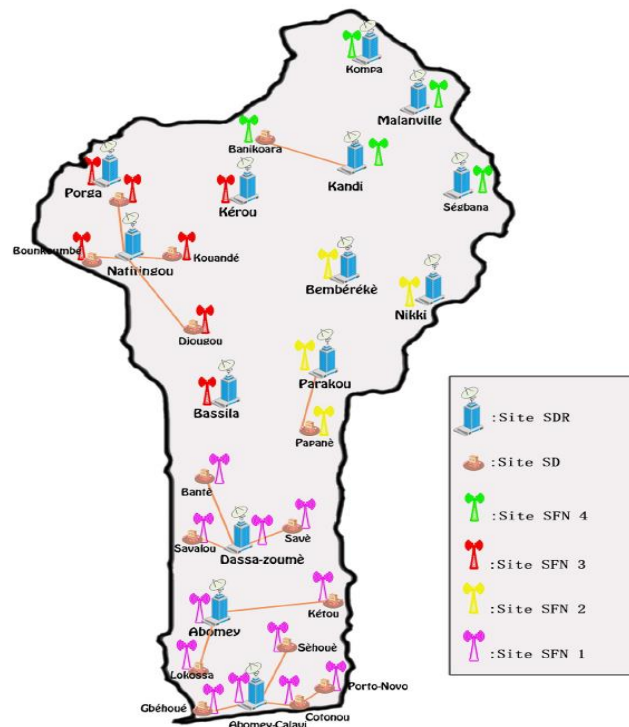


Figure 8 : Proposition de répartition géographique des stations de régionales et des sites de diffusion TNT au Bénin après intégration de la RoF

Tableau 4 : Bilan matériel du réseau TNT existant

N°	Désignation	Quantité	Observation
Tête de Réseau National			
01	IRD (ABE 5001)	18	Pour la collecte des signaux auprès des chaînes éditrices.
02	Encodeur (Harmonic)	06	Encodage, multiplexage et adaptation du flux du signal multiplexé aux émetteurs DVB-T2
03	Multiplexeur (Prostream 9001)	02	
04	T2-Gateway (ENENSYS)	02	

05	Modulateur	02	Pour le transport du signal vers les sites de diffusion
06	Amplificateur	02	
07	Parabole et accessoires	01	
Réseau de diffusion			
01	Parabole et accessoires	29	
02	IRD (ProView 7001)	58	
03	T2-Edge	58	
04	Modulateur DVB-T2	58	
05	Amplificateur de signal RF (THU09/ TMU 09 Rhode & Shawrz)	58	Puissance de 1000w
06	Filtre d'émission	29	
07	Charge fictive	29	
08	Déshydrateur	29	Système de refroidissement de l'émetteur
09	Pylône	29	
10	Réseau d'antennes UHF	29	

Tableau 5 : Bilan matériel du réseau intégrant la RoF

N°	Désignation	Quantité	Observation
Tête de Réseau National			
01	IRD (ABE 5001)	18	Pour la collecte des signaux auprès des chaînes éditrices.
02	Encodeur (Harmonic)	06	Encodage, multiplexage et adaptation du flux du signal multiplexé aux émetteurs DVB-T2
03	Multiplexeur (Prostream 9001)	02	
04	T2-Gateway (ENENYS)	02	
05	Modulateur	02	Pour le transport du signal vers les sites de diffusion
06	Amplificateur	02	
07	Parabole et accessoires	01	
Site de Diffusion Régionale (SDR)			
01	Parabole et accessoires	14	
02	IRD (ProView 7001)	28	Les IRD sont redondés par site
03	T2-Edge	28	
04	Modulateur DVB-T2	28	
05	Amplificateur de signal RF (THU 09 / TMU 09 Rhode & Shawrz)	28	Puissance de 1000w
06	Filtre d'émission	14	
07	Charge fictive	14	
08	Déshydrateur	14	Système de refroidissement de l'émetteur
09	Pylône	14	
10	Réseau d'antennes UHF	14	
11	Convertisseur de signal électrique-optique	06	06 sites SDR en ont besoin pour desservir des sites SD.
Site de Diffusion (SD)			
01	Convertisseur de signal optique- électrique	15	15 sites SD en ont besoin pour recevoir le signal optique.
02	Amplificateurs de signal RF (THU 09/ TMU 09 Rhode & Shawrz)	30	Puissance de 1000 w
03	Filtre d'émission	15	
04	Charge fictive	15	
05	Déshydrateur	15	Système de refroidissement de l'émetteur
06	Pylône	15	
07	Réseau d'antennes UHF	15	

Comparer financièrement les deux architectures revient donc à évaluer le coût des équipements qui diffèrent d'une architecture à une autre. La tête de réseau étant restée inchangée, seul le réseau de diffusion marque la différence entre les deux architectures. Le **Tableau 6** nous présentent le bilan matériel des réseaux de diffusion des deux architectures.

Tableau 6 : Bilan du réseau de diffusion des deux architectures

N°	Désignation	Architecture actuelle	Architecture avec la RoF	Observation
01	Parabole et accessoires	29	14	01 par site
02	IRD (ProView 7001)	58	28	02 par site
03	T2-Edge	58	28	02 par site
04	Modulateur DVB-T2	58	28	02 par site
05	Convertisseur électrique-optique	0	06	Pour les 06 sites SDR qui desservent un ou plusieurs sites SD
06	Convertisseur optique - électrique	0	15	Pour les 15 sites SD
07	Amplificateurs de signal RF (THU 09/ TMU 09 Rhode & Shawrz)	58	58	02 par site
08	Filtre d'émission	29	29	
09	Charge fictive	29	29	
10	Déshydrateur	29	29	Système de refroidissement de l'émetteur
11	Pylône	29	29	
12	Réseau d'antennes UHF	29	29	

Seuls les six premiers équipements du **Tableau 6** marquent la différence entre les deux architectures. La comparaison financière des deux architectures ne dépendra donc que de ces 06 équipements. Le **Tableau 7** présente cette comparaison.

Tableau 7 : Différence financière des deux architectures

Désignation	Architecture actuelle	Architecture avec la RoF	Prix Unitaire (dollars)	Prix Total (Architecture actuelle)	Prix Total (Architecture avec la RoF)
Parabole et accessoires	29	14	500	14.500	7.000
IRD (ProView 7001)	58	28	12.000	696.000	336.000
Modulateur DVB-T2	58	28	50.700	2.940.600	1.419.600
T2-Edge	58	28	1.120	64960	31360
Convertisseur électrique-optique	0	14	500	0	7000
Convertisseur optique - électrique	0	15	500	0	7500
TOTAL				3.716.060 \$	1.808.460 \$
				2 291 768 523 FCFA	1 115 313 451 FCFA

Taux d'échange ce 06/03/2023 : 1\$ pour 616.72 FCFA

Il ressort de l'analyse du **Tableau 7**, une réduction de plus d'un milliard de FCFA du coût d'installation du réseau TNT-Bénin si l'architecture intégrant la technologie RoF est mise en œuvre. Il s'en suivra une diminution considérable du coût d'exploitation du réseau.

4. Conclusion

L'objectif du travail est de justifier de l'opportunité d'intégrer la technologie RoF dans le réseau TNT en se basant sur l'implémentation de la TNT au Bénin. Il s'agissait donc de prouver qu'avec la nouvelle architecture intégrant la technologie RoF, les performances de l'architecture existante sont obtenues mais à un coût réduit. Pour ce faire, il y a eu d'abord une prise connaissance de l'architecture du réseau de la TNT-Bénin et de la technologie RoF qui permet la centralisation de certaines fonctions répétitives sur les sites de diffusion. Ensuite, une chaîne de transmission du signal TNT – DVB T2 intégrant la technologie RoF a été proposée. Ladite chaîne a fait l'objet d'une cosimulation afin de déterminer la distance maximale de transmission garantissant une bonne qualité de réception du signal. Les résultats de la cosimulation ont indiqué une portée maximale de 100 km pour un TEB cible égal à 10^{-9} . Ainsi, il a été proposé une nouvelle architecture du réseau de diffusion composée désormais de 14 sites de diffusion régionale et de 15 autres sites de diffusion. Enfin, une étude comparative des deux types d'architectures a révélé une baisse importante du coût d'implémentation du réseau proposé.

Références

- [1] - UIT, «Colloque international de l'UIT sur le passage au numérique,» 17 Juin 2015. [En ligne]. Disponible : <https://www.itu.int/fr/ITU-R/GE06-Symposium-2015/Pages/default.aspx>. [Accès le 23 Mars 2023]
- [2] - H. L. BRAS, Étude des réseaux radio sur fibre dans le contexte des réseaux d'accès et privés, UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE, (2008)
- [3] - M. A. ELAJI, Etude et modélisation d'un système de transmission radio-sur-fibre, TELECOM BRETAGNE, (2009)
- [4] - ITU-R, Handbook on Digital Terrestrial Television Broadcasting Networks and Systems Implementation, (2016)
- [5] - E. E. 3. 7. V1.4.1, Digital Video Broadcasting (DVB) Frame structure, channel coding and modulation for a second-generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2), (2015)
- [6] - K. S. GOUYET J., «Télévision Numérique Terrestre- Deuxième génération, système DVB-T2 : principes », (2019)
- [7] - A. NG'OMA, Radio-over-fibre technology for broadband wireless communication systems, Technische Universiteit Eindhoven, (2005)
- [8] - L. PIERRE, Télécommunications optiques, Editions Hermès, (1992)
- [9] - O. P. PASQUERO, Optimisation de systèmes de télévision numérique terrestre : Estimation de canal, Synchronisation et Schémas multi-antennes distribués, INSA, (2011)
- [10] - JOFFRAY GUILLORY, ERIC TANGUY, ANNA PIZZINAT, BENOIT CHARBONNIER, SYLVAIN MEYER, et al.. Radio sur fibre pour un réseau local domestique millimétrique. Journées Nationales Microondes, Brest, France, (May 2011), hal-00799886