



OPTIMISATION DU SPECTRE RADIOÉLECTRIQUE PAR LA RADIODIFFUSION NUMÉRIQUE TERRESTRE : UNE SOLUTION AU DÉSENGORGEMENT DE LA BANDE FM À KINSHASA

Biduaya Tujibikile Alain Justinⁱ

Doctorant en sciences informatiques,
Université Pédagogique Nationale de Kinshasa,
République Démocratique du Congo

Résumé :

Cet article porte sur l'optimisation numérique de la gestion du spectre radioélectrique, avec un focus particulier sur le désengorgement du réseau de radiodiffusion en modulation de fréquence (FM) dans la ville de Kinshasa, en République Démocratique du Congo. Au vu des besoins de communication croissants et aux limitations des canaux de diffusion dans la bande FM (87,5–108 MHz) actuelle, des difficultés d'accès au service pour les nouveaux opérateurs de radiodiffusion en FM sont réelles. Cette situation représente un défi à surmonter pour l'Autorité de Régulation des Postes et Télécommunications de la République du Congo (ARPTC), responsable de la gestion et de l'attribution des fréquences. Le but de cette étude est d'analyser l'état actuel d'occupation du spectre FM dans la ville de Kinshasa et de proposer des solutions techniques adaptées. Cette étude se base sur la technologie de transition de la radio FM analogique actuelle vers la radiodiffusion numérique terrestre (RNT), afin d'améliorer l'utilisation de la bande FM et augmenter sa capacité d'attribution des canaux de diffusion. La méthodologie utilisée se repose sur une approche analytique et expérimentale, avec une combinaison de l'analyse documentaire, de l'observation du système actuel et de la modélisation du système que nous proposons. Cette étude utilise des techniques de la numérisation, du multiplexage et de la modulation OFDM, qu'utilise la norme IBOC, où elle permet la diffusion simultanée de plusieurs programmes sur un seul canal. Les résultats issus du modèle proposé montrent que la radiodiffusion numérique permet une optimisation du spectre radioélectrique, avec une augmentation des canaux des diffusions et du nombre de programmes diffusables. Ce travail souligne donc l'importance de la transition vers la radiodiffusion numérique dans la ville de Kinshasa et propose des recommandations pour soutenir cette transition technique et technologique.

ⁱ Correspondence: email abiduaya@gmail.com

Mots-clés : spectre radioélectrique, radiodiffusion FM, optimisation, radiodiffusion numérique, IBOC, multiplexage, Kinshasa, ARPTC

Abstract:

This article focuses on the digital optimization of radio spectrum management, with particular emphasis on relieving congestion in the FM (Frequency Modulation) broadcasting network in the city of Kinshasa, Democratic Republic of Congo. Due to the growing demand for communication services and the limited availability of channels within the current FM band (87.5–108 MHz), access to broadcasting services for new FM operators has become increasingly challenging. This situation represents a major issue for the Regulatory Authority for Posts and Telecommunications of the Congo (ARPTC), which is responsible for frequency management and allocation. The objective of this study is to analyze the current state of FM spectrum occupancy in Kinshasa and to propose appropriate technical solutions. The study is based on the transition from analog FM broadcasting to digital terrestrial radio (DTR), aiming to improve spectrum efficiency and increase channel allocation capacity. The methodology combines analytical and experimental approaches, including literature review, observation of the existing system, and system modeling. It relies on digital techniques such as compression, multiplexing, and OFDM modulation, applied through the IBOC standard, enabling the simultaneous transmission of multiple programs over a single frequency channel. The results of the proposed model show that digital broadcasting significantly optimizes the use of the radio spectrum by increasing the number of available channels and broadcast programs. This work highlights the importance of transitioning to digital broadcasting in Kinshasa and provides recommendations to support this technical and technological transformation.

Keywords: radio spectrum, FM broadcasting, optimization, digital broadcasting, IBOC, multiplexing, Kinshasa, ARPTC

1. Introduction Generale

Le spectre radioélectrique constitue une ressource naturelle limitée dont la gestion efficace est essentielle au développement des systèmes modernes de communication selon l'article 44 de la constitution de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT, 2020 ; Art 44). « La croissance soutenue des services de radiocommunication et de radiodiffusion entraîne une augmentation continue de la demande en ressources fréquentielles, accentuant ainsi les phénomènes de congestion spectrale dans les grandes agglomérations urbaines (UIT, 2020 ; OCDE, 2014). »

La ville de Kinshasa présente une configuration unique en Afrique centrale. Située sur la rive gauche du fleuve Congo et séparée de Brazzaville par seulement quelques kilomètres, ces deux villes partagent le même espace de couverture fréquentielle. Cette proximité impose des mécanismes de coordination internationale destinés à prévenir les

brouillages nuisibles entre les stations de radiodiffusion des deux villes appartenant à deux pays différents.

Dans le système analogique actuel, la bande FM comprise entre 87,5 MHz et 108 MHz représente une largeur de bande totale de 20,5 MHz permettant théoriquement l'établissement de 68 canaux de radiodiffusion. Toutefois, en raison des exigences de partage fréquentiel entre Kinshasa et Brazzaville, seulement 34 canaux peuvent être attribués aux radiodiffuseurs opérant dans la capitale congolaise (UIT, GE 84). Cette limitation des canaux de diffusion réglementaire entraîne une limitation de la capacité d'affectation de l'Autorité de Régulations de Poste des télécommunications du Congo (ARPTC) dans le secteur de radiodiffusion et empêche par conséquent l'expansion du secteur.

Dans cette perspective, beaucoup d'études ont montré que la migration vers la radiodiffusion numérique constitue une réponse appropriée aux problèmes de saturation de la bande FM, grâce à l'amélioration de l'efficacité spectrale permise par les techniques de multiplexage et de compression numériques (UIT, 2020 ; ETSI, 2018).

Toutefois, la transition vers la radiodiffusion numérique ne se limite pas à l'adoption de nouvelles technologies de diffusion. Elle requiert également une adaptation des cadres réglementaires, techniques et organisationnels afin de répondre aux exigences de la transformation numérique du secteur de la radiodiffusion sonore (UIT, 2020 ; UNESCO, 2018 ; EBU, 2017).

Aujourd'hui, les utilisateurs des fréquences radioélectriques font face à deux défis majeurs :

- 1) répondre à une augmentation croissante de besoin en canaux (fréquences) de communication et
- 2) maintenir une bonne qualité de service. La difficulté résulte du fait que le nombre des fréquences (canaux) disponibles pour l'allocation du spectre radio est une ressource naturelle très limitée.

Cette contrainte impose une utilisation optimale et efficiente des fréquences, en tenant compte de tous les paramètres nécessaires pour minimiser la probabilité d'interférences et éviter le dysfonctionnement des services. Car, plus le spectre radioélectrique est encombré, plus il est difficile à être gérés.

En RD Congo en général et à Kinshasa en particulier, **l'Autorité de Régulation de la Poste et des Télécommunications du Congo ARPTC** en sigle, dispose d'un nombre très limité des fréquences (Canaux) utilisable pour couvrir les besoins du réseau des utilisateurs potentiels.

Pour ce faire, nous formulons les questions suivantes :

- Comment un seul canal (une seule fréquence) de transmission peut-elle être utilisée sur plusieurs applications au même moment dans le même environnement ?
- Et Comment faut-il procéder pour émettre plusieurs signaux sans forcément utiliser plusieurs canaux de fréquences ?

Partant de ces interrogations, nous pensons que :

- Le spectre fréquentielle radio est certes limité, mais pour faire face à ce défi, il y a besoin de la réutilisation efficiente des fréquences qui pourrait se faire par une distribution optimale du spectre de fréquences disponibles sur une zone dans un réseau qui garantit un écoulement maximal du trafic tout en minimisant les interférences.
- Plusieurs signaux utiles pourraient être transmis simultanément sur un seul canal grâce aux techniques de numérisation et de multiplexage. Cette approche permet d'exploiter une même fréquence porteuse pour transporter plusieurs flux d'information dans un réseau de radiodiffusion. En effet, le signal numérisé peut être compressé de manière efficace, réduisant ainsi la largeur de bande nécessaire et améliorant l'utilisation du spectre. Dans le contexte de Kinshasa, la radiodiffusion numérique terrestre basée sur le standard IBOC (In-Band On-Channel) constitue un modèle particulièrement adapté. Ce standard offre l'avantage d'un fonctionnement hybride, permettant la coexistence des signaux analogiques et numériques sur une même fréquence. Il favorise ainsi une transition progressive et maîtrisée vers le numérique, tout en garantissant la continuité des services existants.

Cette réflexion vise à étudier l'état actuel de l'occupation, utilisation et gestion des fréquences, envisager les pistes des solutions pour aider à désengorger et soulager le spectre de fréquences FM. Pour un plus grand nombre d'utilisateurs et services alloués à Kinshasa par l'ARPTC afin de garantir une plus grande efficacité dans l'utilisation et l'occupation de la bande de radiodiffusion sonore.

En d'autres termes :

- Répondre au besoin de la croissance dans l'utilisation des canaux des fréquences, dans l'évolution des applications des télématiques et des radiodiffusions ;
- Avoir le Contrôle sur l'utilisation conforme du spectre de fréquences en utilisant les techniques de la numérisation ;
- Et donner à l'ARPTC les outils afin de rationaliser l'usage du spectre de fréquences, même dans un environnement où les fréquences ne sont pas encore une ressource rare.

Dans le contexte actuel de transition numérique du pays, appuyer par le code numérique de la RD Congo ; cette ébauche propose des solutions concrètes et pragmatiques au problème de plus en plus pressant. De plus, cette recherche se situe au carrefour de plusieurs disciplines : l'informatique, la gestion, la télématique et la régulation des TIC. Elle est pertinente pour :

- Les autorités de régulation (ARPTC, Le ministère des Postes et Télécommunications ainsi que celui de l'Economie Numérique de la République Démocratique du Congo ;
- Les opérateurs du réseau de radiodiffusion.
- Les chercheurs en gestion des ressources spectrales ;
- Et plus largement, les citoyens Kinois qui sont bénéficiaires des services qui exploitent les canaux du réseau concernés.

2. Litterature Revisee

La bande de fréquences allouée à la radiodiffusion FM s'étend de 87,5 MHz à 108 MHz, correspondant à la bande II des Very High Frequencies (VHF). Cette plage de fréquences est spécifiquement réservée à la diffusion sonore analogique et constitue une ressource spectrale réglementée au niveau international (UIT, 2020).

Conformément à la réglementation de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), toute assignation, octroi et gestion de fréquences radioélectriques entre deux pays voisins doivent respecter des principes de coordination et de partage. Ce cadre réglementaire vise à garantir une utilisation harmonieuse et équitable du spectre, tout en évitant les interférences préjudiciables entre les services de radiocommunication des États concernés.

Dans ce contexte, les villes de Kinshasa (République Démocratique du Congo) et Brazzaville (République du Congo) qui ne sont séparées que par 5 Km et partagent le même spectre radioélectrique dans la bande de radiodiffusion FM. Cette proximité géographique particulière rend indispensable une coordination rigoureuse des fréquences utilisées dans chacune de ces capitales.

Noté qu'une bande de fréquences est définie comme une portion continue du spectre radioélectrique délimitée par deux fréquences exprimées en hertz (Hz) selon (UIT, 2020). Dans la région africaine, y compris la ville de Kinshasa, la bande allouée à la radiodiffusion sonore en modulation de fréquence s'étend de 87,5 MHz à 108 MHz, soit une largeur totale de 20,5 MHz.

En même temps, la largeur de bande nécessaire pour une transmission en modulation de fréquence peut être déterminée à l'aide de la formule recommandée par l'UIT (UIT-R SM.853-1), qui s'exprime de la manière suivante :

$$BP = 2 M + 2 D K \quad (1)$$

Avec :

BP : largeur de bande nécessaire.

M: fréquence de modulation la plus élevée

D: excursion maximale de la porteuse RF

K: facteur égal à 1 si l'hypothèse $D \gg M$ est satisfaite.

$$N = \frac{f_{max} - f_{min}}{\Delta f} + 1 \quad (2)$$

où :

N = nombre de canaux,

f_{max} = fréquence maximale (108 MHz),

f_{min} = fréquence minimale (87.5 MHz),

Δf (Delta f) = espacement entre deux canaux (0.3 MHz).

Donc :

$$N = \frac{108 - 87.5}{0.3} + 1 = 69 \text{ canaux}$$

Cela signifie que l'on peut avoir 69 fréquences centrales espacées régulièrement de 300 kHz, chacune de ses fréquences représentent un canal de diffusion FM.

2.1 Analyse de l'existant sur la transmission numérique et du spectre radioélectrique

2.1.1 Le plan d'adressage des canaux de diffusion pour la bande FM

Selon les recommandations de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), un canal de transmission analogique en modulation de fréquence (FM) dans la zone Afrique occupe généralement une largeur de bande d'environ 0,3 MHz (300 kHz) (UIT, 2020).

La bande de fréquences dédiée à la radiodiffusion sonore en FM, située dans le domaine des très hautes fréquences (VHF), s'étend de 87,5 MHz à 108 MHz. Cette plage constitue un espace fréquentiel limité qui doit être géré de manière rationnelle afin d'éviter les interférences entre les stations et d'assurer une qualité optimale des transmissions.

Le plan d'adressage des canaux consiste ainsi à diviser cette bande en intervalles réguliers correspondant à la largeur de bande allouée à chaque station. Avec une largeur approximative de 300 kHz par canal, il devient possible d'estimer le nombre maximal de canaux disponibles dans la bande FM.

En Appliquant cette logique nous aurons :

La bande FM : 87,5 MHz à 108 MHz, soit une largeur totale de :

- $108 \text{ MHz} - 87,5 \text{ MHz} = 20,5 \text{ MHz}$.
- Largeur de la bande 0.3MHz

2.1.2 Définir la progression des fréquences :

- La première fréquence centrale est 87,6 MHz.
- Chaque émetteur est espacé de 300 kHz (0,3 MHz).

Les fréquences centrales des émetteurs suivent une progression arithmétique :

$$f_n = 87,6 \text{ MHz} + (n-1) \times 0,3 \text{ MHz},$$

Où f_n est la fréquence du nième émetteur.

Le dernier émetteur ne doit pas dépasser 108 MHz, donc :

$$f_n \leq 108 \text{ MHz}.$$

En remplaçant f_n :

$$87,6 + (n-1) \times 0,3 \leq 108.$$

Simplifions :

$$(n-1) \times 0,3 \leq 108 - 87,6,$$

$$(n-1) \times 0,3 \leq 20,4.$$

Divisons par 0,3 :

$$N - 1 \leq 20,4 / 0,3 \} = 68.$$

Donc :

$$N \leq 69.$$

Il y a 69 canaux, et leurs fréquences centrales sont :

$$f_n = 87,6 + (n-1) \times 0,3 \text{ MHz} \quad n = 1, 2, \dots, 69.$$

Voici la liste des fréquences centrales pour chaque canal (en MHz) :

Tableau 1 : La liste des fréquences centrales pour chaque canal

Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8	Canal 9	Canal 10
87.6	87.9	88.2	88.5	88.8	89.1	89.4	89.7	90.0	90.3
Canal 11	Canal 12	Canal 13	Canal 14	Canal 15	Canal 16	Canal 17	Canal 18	Canal 19	Canal 20
90.6	90.9	91.2	91.5	91.8	92.1	92.4	92.7	93.0	93.2
Canal 21	Canal 22	Canal 23	Canal 24	Canal 25	Canal 26	Canal 27	Canal 28	Canal 29	Canal 30
93.6	93.9	94.2	94.5	94.8	95.1	95.4	95.7	96.0	96.2
Canal 31	Canal 32	Canal 33	Canal 34	Canal 35	Canal 36	Canal 37	Canal 38	Canal 39	Canal 40
96.6	96.9	97.2	97.5	97.8	98.1	98.4	98.7	99.0	99.2
Canal 41	Canal 42	Canal 43	Canal 44	Canal 45	Canal 46	Canal 47	Canal 48	Canal 49	Canal 50
99.6	99.9	100.2	100.5	100.8	101.1	101.4	101.7	102.0	102.2
Canal 51	Canal 52	Canal 53	Canal 54	Canal 55	Canal 56	Canal 57	Canal 58	Canal 59	Canal 60
102.6	102.9	103.2	103.5	103.8	104.1	104.4	104.7	105.0	105.3
Canal 61	Canal 62	Canal 63	Canal 64	Canal 65	Canal 66	Canal 67	Canal 68	Canal 69	
105.6	105.9	106.2	106.5	106.8	107.1	107.4	107.7	108.0	

Source : Nous même.

A voir le tableau ci-haut, 69 émetteurs peuvent être installés avec des fréquences centrales allant de 87,6 MHz à 108 MHz, espacées de 0,3MHz comme l'exige la réglementation. En d'autres termes, les écarts de fréquences entre 2 stations sont de 0,3 MHz, soit 300 kHz.

Par exemple d'illustration : la station à 100,0 MHz est suivie de celle à 100,3 MHz et précéder de celle de 99,7Mhz.

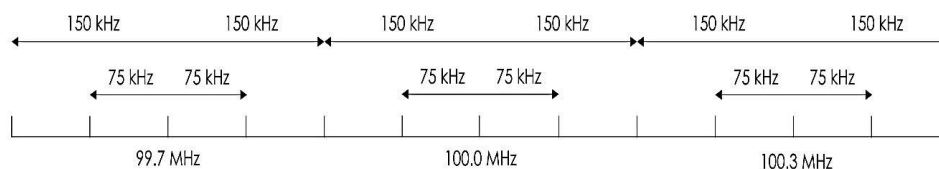


Figure 1 : Largeur d'un canal en FM (source : nous-même)

Noté que pour une fréquence centrale donnée, la largeur de la bande de 300Khz autour de cette fréquence comprend 150Khz de part de d'autre de la centrale et fait partie du canal de diffusion de cette fréquence centrale.

Par exemple, sur la Figure 1, le canal de 100Mhz comprends la bande allant de 99.85Mhz a 100.15Mhz. Soit une largeur de 300Khz autour de la centrale qui est de 100Mhz. (Voir la figure ci-haut)

2.2 Application de la Réglementation UIT

Le Règlement des radiocommunications de l'UIT impose aux administrations des États voisins des procédures de coordination fréquentielle destinées à garantir la compatibilité électromagnétique des réseaux et à prévenir les brouillages préjudiciables. Dans le contexte particulier de Kinshasa et de Brazzaville, cette exigence réglementaire se traduit par un partage de facto des ressources fréquentielles de la bande FM entre les deux capitales (UIT, 2020).

C'est le cas des villes de Kinshasa (République Démocratique du Congo) et Brazzaville (République du Congo) qui partagent le même spectre radioélectrique dans la bande de radiodiffusion FM (87,5 – 108 MHz). Cette proximité géographique particulière rend indispensable une coordination rigoureuse des fréquences utilisées dans chacune de ces capitales.

2.3 Répartition des canaux de diffusion entre Kinshasa et Brazzaville

La bande FM comprend théoriquement 68 canaux de diffusion si l'on applique un espacement standard de 300 kHz entre canaux (de 87,5 MHz à 108 MHz). Cependant, en raison du partage du spectre entre Kinshasa et Brazzaville, ces 68 canaux ne peuvent pas être utilisés simultanément et indépendamment dans les deux villes.

Selon les principes de coordination dictés par l'Union Internationale des Télécommunications, le plan d'adressage des fréquences impose que l'utilisation d'un canal par une ville bloque automatiquement l'utilisation des canaux adjacents dans l'autre ville. Cette mesure technique est mise en place pour prévenir les brouillages et interférences, notamment dans une bande analogique sensible comme celle de la FM. En pratique, cela signifie que :

- Si une fréquence donnée est utilisée à Kinshasa, les fréquences voisines (adjacentes) sont réservées ou interdites d'utilisation à Brazzaville, et vice versa.
- Ce mécanisme de protection a réduit de moitié le nombre de canaux effectivement disponibles pour chaque ville. Ainsi, au lieu des 68 canaux théoriques disponibles sur la bande FM, chaque ville ne peut utiliser qu'environ 34 canaux, dans un schéma de répartition alternée.
- Le tableau ci-dessous représente les fréquences des Kinshasa, celles omis du tableau 2 par rapport au tableau 1 sont celles utilisées dans la ville de Brazzaville.

C'est sur cette base que s'appuie l'ARPTC (Autorité de Régulation de la Poste et des Télécommunications du Congo - RDC) et l'ARPCE (Agence de Régulation des Postes

et des Communications Électroniques République du Congo) pour attribuer un canal de diffusion pour la radio en FM.

Tableau 2 : Liste des canaux alternés d'une ville dans le cas de deux villes voisines

87.6		88.2		88.8		89.4		90.0	
Canal 11	Canal 12	Canal 13	Canal 14	Canal 15	Canal 16	Canal 17	Canal 18	Canal 19	Canal 20
90.6		91.2		91.8		92.4		93.0	
Canal 21	Canal 22	Canal 23	Canal 24	Canal 25	Canal 26	Canal 27	Canal 28	Canal 29	Canal 30
93.6		94.2		94.8		95.4		96.0	
Canal 31	Canal 32	Canal 33	Canal 34	Canal 35	Canal 36	Canal 37	Canal 38	Canal 39	Canal 40
96.6		97.2		97.8		98.4		99.0	
Canal 41	Canal 42	Canal 43	Canal 44	Canal 45	Canal 46	Canal 47	Canal 48	Canal 49	Canal 50
99.6		100.2		100.8		101.4		102.0	
Canal 51	Canal 52	Canal 53	Canal 54	Canal 55	Canal 56	Canal 57	Canal 58	Canal 59	Canal 60
102.6		103.2		103.8		104.4		105.0	
Canal 61	Canal 62	Canal 63	Canal 64	Canal 65	Canal 66	Canal 67	Canal 68	Canal 69	
105.6		106.2		106.8		107.4		108.0	

Source : Nous même.

Noté : pour les deux villes partageant le même spectre radioélectrique, le cas de Kinshasa et Brazzaville, l'écart entre les deux canaux d'émission dans une ville est de 0.6 Mhz pour s'éloigner des interférences et brouillage étant donné que les canaux adjacents émettent de la ville voisine.

Bien que les émissions de ces canaux adjacents peuvent être aussi captés dans l'autre ville et vice versa étant donné qu'elles partagent le même espace hertzien. Cette proximité géographique impose une coordination stricte entre les deux capitales, conformément aux normes de l'Union Internationale des Télécommunications, afin d'éviter les interférences nuisibles.

Toutefois, cette régulation réduit de 50% les ressources naturelle disponibles, limitant ainsi des nouvelles affectations.

Actuellement, seulement 34 canaux FM sont attribuables pour Kinshasa, un chiffre nettement insuffisant face à la forte demande des radios publiques, communautaires, commerciales et religieuses. La quasi-totalité des fréquences sont déjà occupées, et les possibilités d'extension sont restreintes par ces contraintes.

Sur le plan administratif national, les efforts de numérisation du spectre radioélectrique en République Démocratique du Congo présentent des résultats contrastés. Si la transition numérique a déjà permis de libérer une partie de la bande UHF auparavant dédiée à la télévision analogique au profit des services mobiles de quatrième génération (4G), d'importants défis subsistent, notamment la saturation des canaux de radiodiffusion sonore à Kinshasa. Par ailleurs, plusieurs exploitants ont déjà modernisé leurs infrastructures en se dotant de studios de production et de diffusion numériques.

Toutefois, la mise en œuvre effective de la transformation numérique demeure tributaire du renforcement des cadres institutionnels, réglementaires et de la volonté politique. À cet effet, le Gouvernement a confié au ministère des Postes, Télécommunications et Numérique le pilotage du processus de numérisation dans le

cadre du Plan National du Numérique. Ce document stratégique, orienté vers l'horizon 2030, vise à faire de la RDC une société de l'information en s'appuyant sur quatre piliers fondamentaux : les infrastructures, les contenus, les usages applicatifs ainsi que la gouvernance et la régulation, avec un accent particulier sur la modernisation des infrastructures numériques et l'élargissement de l'accès aux services numériques (Code du numérique de la RDC, 2023).

2.4 Modélisation, simulation et optimisation du spectre FM par la radiodiffusion numérique terrestre

Partant des normes et standards dictées par l'Union Internationale des Télécommunications, nous concevons un système entièrement numérique en respectant les lois de la RD Congo, qui va de la production des programmes en studio numérique, en passant par un traitement des signaux avant d'attaquer l'émetteur radioélectrique de diffusion sonore numérique.

La radio numérique terrestre (RNT) que nous mettons en place, à l'instar de la FM analogique, va diffuser des programmes par voie hertzienne terrestre.

Ce système va fonctionner dans les bandes de fréquences VHF II qui sont celle de la FM selon le plan de Genève 1984 de l'UIT pour la radiodiffusion sonore qui couvrent la gamme allant de 87.5 à 108Mhz dans la région d'Afrique. Et sa largeur de bande passante est d'environ 1,5 MHz en radio numérique.

A la différence de la FM analogique qui ne permet de transmettre qu'une seule radio sur une fréquence, la radio numérique terrestre (RNT) que nous mettons en place va véhiculer plusieurs services de radios sur la même fréquence, selon le principe du multiplexage.

Le nombre de services diffusés sur un canal dépend du débit qui est alloué à chaque service et donc de la qualité sonore et des données associées à ces services. Au vu de ce qui précède, et de la recommandation Rec. UIT-R BS.1114-10 de l'Union Internationale de Télécommunications (UIT) de décembre 2017, c'est la norme In-Band On-Channel (IBOC) du système radio numérique C qui est plus adaptée à nos réalités. Il est donc celui qui sera utilisé pour cette étude de migration vers le numérique pour le désengorgement de la bande passante.

2.4.1 La radio numérique

La radiodiffusion sonore numérique, communément appelée DAB (Digital Audio Broadcasting), constitue un système de diffusion développé dans le cadre du projet EUREKA 147, permettant la transmission numérique des programmes radiophoniques avec une meilleure qualité de service et une utilisation plus efficace du spectre.

Plusieurs standards de radiodiffusion numérique existent, classés en deux catégories :

- **Standards ouverts :**

DAB/DAB+, DRM et SDR, normalisés par l'UIT et l'ETSI, favorisant l'interopérabilité.

- **Standards propriétaires :**
tels que IBOC (HD Radio), permettant une diffusion hybride analogique-numérique dans la bande FM.
- **Systèmes satellitaires :**
comme XM Radio, utilisés pour la diffusion à grande échelle.

L'évolution vers des formats de compression performants tels que **HE-AAC v2** a permis d'améliorer considérablement le rapport qualité/débit, notamment avec la norme DAB+, augmentant ainsi la capacité de diffusion et la qualité audio.

Tableau 3 : Normes et bandes de fréquences utilisées

Bandes	Fréquences	DRM	DAB	IBOC	DVB-T	DVB-H	DMB
Ondes longues	148,5 - 283,5 kHz						
Ondes moyennes	526,5 - 1605,5 kHz						
Ondes courtes	2,3 - 26,1 MHz						
Bande II	87,5 - 108 MHz						
Bande III	174 - 230 MHz (1)						
Bandes IV et V	470 - 830 MHz						
Bande L	1452 - 1492 MHz					(2)	(3)
Bande S	2520 - 2670 MHz						

Source : UIT-R BS.774.

2.5 Conception d'un système d'optimisation du spectre fréquentiel par l'utilisation de la radio numérique terrestre de la norme C

Le système numérique C de la radiodiffusion sonore numérique repose sur la technologie *In-Band On-Channel* (IBOC), conçue pour faciliter l'introduction progressive de la radiodiffusion numérique.

Le concept d'IBOC désigne un ensemble de méthodes de transmission permettant la diffusion simultanée de signaux analogiques et numériques (*simulcast*) sur une même fréquence porteuse.

Ce système est destiné à une large gamme de récepteurs, incluant les dispositifs fixes, portables ainsi que les équipements embarqués à bord de véhicules, recevant les signaux issus d'émetteurs terrestres. Il peut être déployé dans des portions inoccupées du spectre, tout en présentant l'avantage majeur de permettre une diffusion simultanée de signaux analogiques et numériques au sein de la bande actuellement allouée à la radiodiffusion en modulation de fréquence (FM).

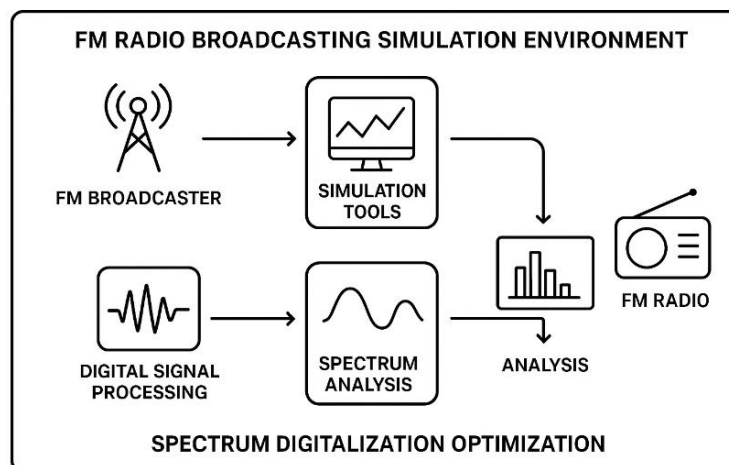


Figure 2 : Représentation de l’environnement de simulation
source : nous-même générer par MATLAB Simulink

De ce fait, le système IBOC apparaît particulièrement adapté pour assurer une transition progressive et maîtrisée entre la radiodiffusion analogique et la radiodiffusion numérique. Cette caractéristique offre aux radiodiffuseurs exploitant déjà la bande FM la possibilité d’évoluer de manière rationnelle vers des technologies numériques, sans rupture brutale de service.

Par ailleurs, le système numérique C garantit une amélioration significative de la qualité audio, comparable à celle des enregistrements numériques destinés au grand public. Il offre également une certaine flexibilité, permettant aux radiodiffuseurs d’intégrer des services additionnels, notamment la diffusion de données, en complément des programmes audio enrichis. La figure 3 ci-après illustre le schéma fonctionnel du système de radiodiffusion IBOC.

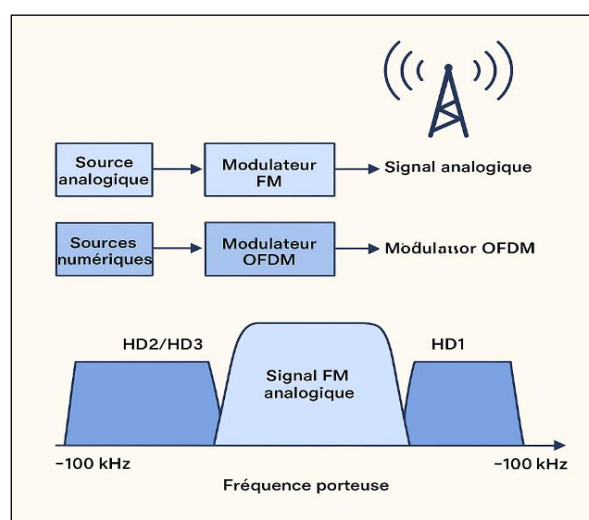


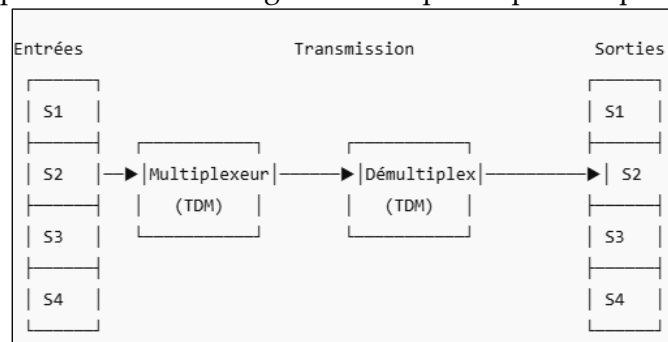
Figure 3 : Systèmes de radiodiffusion IBOC
source : Nous-même générer par MATLAB Simulink

2.6 Le multiplexage par répartition dans le temps

Le multiplexage par répartition dans le temps (Time Division Multiplexing – TDM), également appelé multiplexage temporel (Figure 4), est une technique de transmission qui permet d’acheminer plusieurs signaux numériques sur un même canal de communication, en les répartissant dans le temps plutôt que dans la fréquence (Proakis S. & Salehi M., 2008).

Le principe général du TDM repose sur la division du temps en intervalles successifs appelés créneaux temporels (time slots). Chaque signal ou canal se voit attribuer un créneau spécifique au sein d’une structure temporelle appelée trame. Ainsi, les différents flux de données sont transmis les uns après les autres, mais à une vitesse suffisamment élevée pour donner l’impression qu’ils sont transmis simultanément (Haykin S., 2001).

Figure 4 : Représentation des 4 signaux multiplexés par la répartition de temps



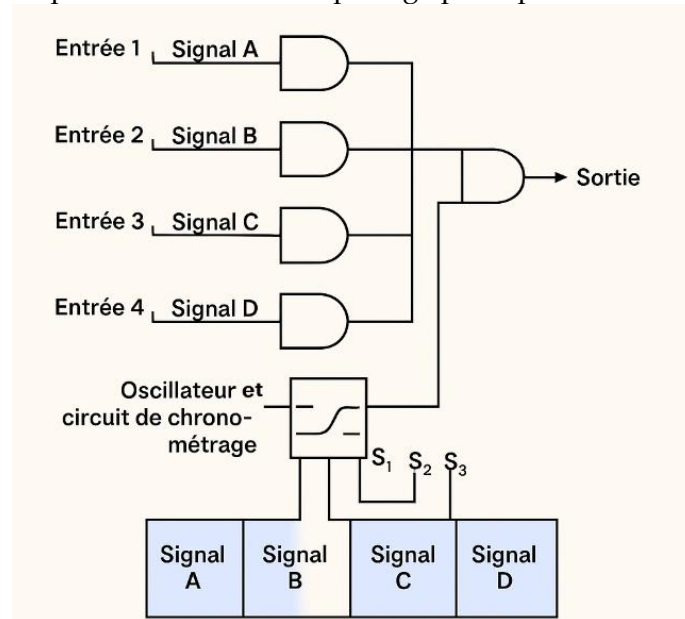
Source : Nous-même de Microsoft vision

Dans ce type de multiplexage, chaque canal occupe une portion de temps bien définie dans la trame globale, ce qui permet un partage efficace du support de transmission sans chevauchement entre les signaux. Ce mécanisme garantit que les données de chaque source peuvent être correctement identifiées et reconstituées au niveau du récepteur.

Le TDM est particulièrement adapté aux systèmes numériques, notamment dans les réseaux de télécommunications, où il permet d’optimiser l’utilisation des ressources tout en assurant une transmission fiable des informations. Il présente également l’avantage de ne pas nécessiter de bandes de garde entre les signaux, contrairement au multiplexage fréquentiel, ce qui améliore l’efficacité spectrale.

Cependant, le multiplexage temporel exige une synchronisation rigoureuse entre l’émetteur et le récepteur afin de garantir que les créneaux temporels soient correctement respectés et que les données ne se chevauchent pas (Proakis S. & Salehi M., 2008).

Figure 5 : Représentation du multiplexage par répartition dans le temps



Source : Nous-même générer par MATLAB Simulink

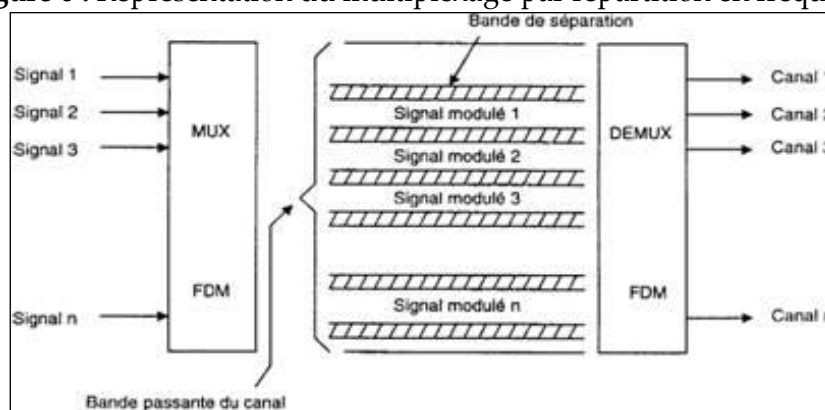
2.7 Le multiplexage par répartition en fréquence

Le multiplexage par répartition en fréquence (*Frequency Division Multiplexing – FDM*), également appelé multiplexage fréquentiel (Figure 6), est une technique de transmission qui permet de combiner plusieurs signaux de données afin de les transmettre simultanément sur un même support de communication (Proakis S. & Salehi M., 2008).

Le principe du FDM repose sur l'utilisation de porteuses distinctes, chacune associée à un flux de données spécifique. Chaque signal à transmettre module une porteuse à une fréquence bien déterminée. Les différents signaux modulés sont ensuite combinés pour former un signal global occupant une bande de fréquences répartie en plusieurs sous-bandes indépendantes. Ce procédé permet une transmission parallèle sans interférences, à condition de respecter des bandes de garde entre les canaux afin d'éviter les chevauchements indésirables.

Dans un contexte de partage des ressources, lorsque cette technique est utilisée pour permettre à plusieurs utilisateurs d'accéder simultanément à un même support physique, elle est désignée sous le terme de multiplexage par accès multiple par répartition en fréquence (*Frequency Division Multiple Access – FDMA*). Ce mode d'accès est largement utilisé dans les systèmes de radiocommunication, notamment dans les réseaux analogiques et certaines architectures numériques (Proakis S. & Salehi M., 2008). Le FDM présente plusieurs avantages, notamment la simplicité de mise en œuvre et la possibilité de transmission simultanée de plusieurs flux indépendants. Toutefois, il présente également des limites liées à l'utilisation de bandes de garde, ce qui peut réduire l'efficacité spectrale par rapport à des techniques plus avancées telles que l'OFDM, qui exploite le principe d'orthogonalité pour optimiser l'occupation du spectre (Haykin S., 2001).

Figure 6 : Représentation du multiplexage par répartition en fréquence



Source : Haykin, S. (2001). *Communication Systems* (4th ed.). Wiley.

2.8 Radio Numérique avec la Technologie IBOC (In-Band On-Channel)

a norme IBOC, aussi connu sous l'appellation HD Radio permet la cohabitation de la diffusion analogique et numérique dans la même bande FM, grâce au multiplexage OFDM et à la réutilisation des bandes latérales. Cette norme est celle que nous voulons pour une transition efficace pour la ville de Kinshasa.

Deux modes principaux sont distingués : le mode hybride et le mode tout numérique.

A. Mode Hybride (FM + HD1, HD2...)

- Bande utile = 20,5MHz pour une Largeur de canal = 400 kHz

Nombre des canaux = $20,5 \text{ MHz} / 0,4 \text{ MHz} = 51,25 \Rightarrow 51$ canaux

- Capacité par canal : 1 analogique + 2 numériques (en moyenne)
- Total : 51 analogiques + (51 × 2) numériques = 153 programmes

B. Mode Tout numérique ou All Digital en Anglais

- Bande utile : 20,5MHz pour une largeur de canal = 200 kHz

$20,5 \text{ MHz} / 0,2 \text{ MHz} = 102,5 \Rightarrow 102$ canaux numériques

- Capacité par canal : 3 programmes
- Total : $102 \times 3 = 306$ programmes

Tableau 4 : Synthèse des Calculs Gain en Nombre de Programmes

Technologie	Largeur unitaire	Capacité par unité	Nombre d'unités	Nombre total de programmes
FM analogique	300 kHz	1 radio analogique	68	68 radios
IBOC Hybride	400 kHz	1 analogique + 2 numériques	51	153 (51 analog + 102 numériques)
IBOC Tout numérique	200 kHz	3 numériques	102	306 programmes numériques
DAB (classique)	1,536 MHz	~6 programmes par multiplex	13	78 programmes
DAB+ (efficace)	1,536 MHz	12 à 18 programmes par multiplex	13	156 à 234 programmes

Source : Nous-même.

2.9 Efficacité de l'occupation du spectre radioélectrique

L'efficacité spectrale constitue un indicateur fondamental des performances d'un système de radiocommunication comme l'a dit Shannon dans ces expériences. Elle exprime la quantité d'informations utile pouvant être transmise par unité de bande passante et permet d'évaluer le degré d'utilisation des ressources fréquentielles disponibles (Proakis & Salehi, 2008). Elle est définie comme le rapport entre le débit binaire utile et la largeur de bande occupée.

$$\eta = \frac{D}{B} [\text{bit/s/Hz}] \quad (6)$$

où :

- η : efficacité spectrale
- D : débit utile transmis (bit/s)
- B : largeur de bande occupée (Hz)

Cette expression traduit la quantité d'information transmise par unité de bande passante. Plus η est élevé, plus le système utilise efficacement le spectre radioélectrique.

2.10 Occupation spectrale dans le système analogique FM

Dans le système analogique, chaque station radio occupe un canal dédié avec une largeur de bande fixe. Dans notre cas en appliquant la relation (3).

- Bande FM totale : $B_{tot} = 108 - 87.5 = 20.5 \text{ MHz}$
- Espacement inter-canaux : $\Delta f = 300 \text{ kHz} = 0.3 \text{ MHz}$
- Nombre théorique de canaux :

$$N_{th} = \frac{B_{tot}}{\Delta f} = \frac{20.5}{0.3} \approx 68$$

Cependant, en raison de la coordination entre Kinshasa et Brazzaville la capacité est réduite à 50% pour chaque ville soit : $N_a = 34$

Dans ces conditions, l'efficacité spectrale FM analogique se présente comme suite : Chaque canal transmet un seul programme, soit :

$$\eta_a = \frac{1}{0.3} = 3,33 \text{ programmes/MHz}$$

Le système analogique occupe une bande de 300 kHz pour transmettre une seule radio.

2.11 Occupation spectrale dans le système numérique (IBOC + OFDM)

La radiodiffusion numérique permet d'exploiter le spectre grâce aux techniques modernes de compression, multiplexage et modulation OFDM.

2.12 Organisation spectrale

- Largeur d'un multiplex numérique avec la norme IBOC est de : $B_n = 1.5 \text{ MHz}$

- En appliquant la relation (30) le nombre de multiplex dans cette même bande est de :

$$N_{mux} = \frac{20.5}{1.5} \approx 13$$

Donc, la largeur de la bande FM nous donne 13 blocs numériques capables de transporter plusieurs services simultanément.

2.13 Capacité multiplexée

- Nombre total de programmes dans la bande FM all numérique est :

$N_n = 306$ Comme indiquer dans les calculs ci-haut.

- Le nombre des programmes par multiplex est donc :

$$\frac{306}{13} \approx 24$$

Donc, Chaque multiplex transporte environ 24 radios.

2.14 Efficacité spectrale numérique

$$\eta_n = \frac{24}{1.5} \approx 16 \text{ programmes/MHz}$$

Chaque canal numérique permet de transmettre 16 programmes à la fois.

2.15 Gain spectral global

En faisant le rapport entre l'efficacité spectrale numérique et analogique nous avons le gain spectral. Soit :

$$G = \frac{\eta_n}{\eta_a} \quad G = \frac{16}{3.33} \approx 4.8$$

Sur le plan purement physique, le numérique est environ 5 fois plus efficace que l'analogique.

En pratique, le gain observé repose sur le nombre de diffuseurs ou canaux de diffusion, donnée par :

$$G_{sys} = \frac{N_n}{N_a} = \frac{306}{34} = 9$$

Ceci veut dire en d'autres termes que le spectre en numérique permet 9 fois plus de radios qu'en analogique ce qui donne à l'ARPTC une capacité additionnelle pour la même largeur de la bande à exploiter. Soit un Gain réel = 900 %.

2.16 Analyse en densité spectrale

La densité de programmes est donnée par :

$$\rho = \frac{\text{nombre de programmes}}{\text{bande}}$$

- Analogique :

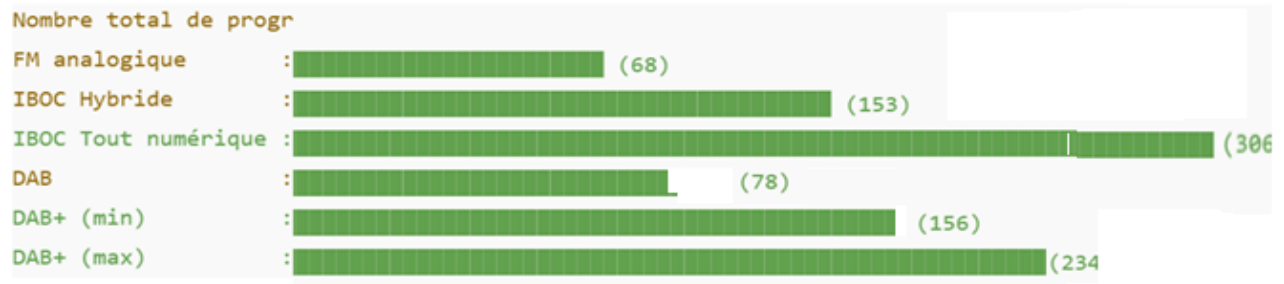
$$\rho_a = \frac{34}{20.5} = 1.65 \text{ programmes/MHz}$$

- Numérique :

$$\rho_n = \frac{306}{20.5} = 14.9 \text{ programmes/MHz}$$

Ce gain s'explique par l'intégration conjointe des techniques de compression numérique, multiplexage et modulation OFDM, permettant une exploitation optimale du spectre, en cohérence avec les limites théoriques établies par Shannon.

Figure 6 : Représentation graphique : Gain en nombre de programmes



Source : Nous-même générer par MATLAB Simulink

Tableau 5 : Synthèse des résultats

Technologie	Largeur unitaire	Capacité par unité	Nombre d'unités	Nombre total de programmes
FM analogique	300 kHz	1 radio analogique	68	68 radios
IBOC Hybride	400 kHz	1 analogique + 2 numériques	51	153 (51 analog + 102 numériques)
IBOC Tout numérique	200 kHz	3 numériques	102	306 programmes numériques
DAB (classique)	1,536 MHz	~6 programmes par multiplex	13	78 programmes
DAB+ (efficace)	1,536 MHz	12 à 18 programmes par multiplex	13	156 à 234 programmes

Source : Nous-même

3. Discussions et interprétations des résultats

Les résultats obtenus mettent en évidence les limites structurelles du système analogique, caractérisé par une faible efficacité spectrale, avec une occupation d'environ 300 kHz pour un seul programme, ce qui réduit fortement la densité d'exploitation du spectre.

À l'inverse, la radiodiffusion numérique IBOC (Tout numérique) lui permet un nombre important des diffuseurs au total 306, avec restructuration efficace de la bande FM, subdivisée en blocs multiplexés capables de transporter simultanément plusieurs services. Ainsi, la capacité de diffusion est significativement améliorée, avec une densité spectrale passant de :

1.65 programmes/MHz $\rightarrow$ 14.9 programmes/MHz

Soit un gain d'environ :

$G \approx 900\%$

Et aussi, il apparaît clairement que : Le système analogique présente une faible efficacité spectrale, car une bande de 300 kHz est utilisée pour transmettre une seule radio. Alors qu'en numérique, la bande FM peut être divisée en 13 blocs numériques capables de transporter plusieurs services simultanément.

Le bloc numérique permet de transmettre 16 programmes dans la même bande, augmentant considérablement la densité d'information.

L'analyse comparative de l'efficacité spectrale entre la radiodiffusion analogique et numérique montre que la densité de services passe de 1,65 programmes/MHz à 14,9 programmes/MHz. Cette amélioration significative, de l'ordre de 900 %, est rendue possible grâce à la combinaison des techniques de compression numérique, de multiplexage et de modulation OFDM.

Ainsi, la transition vers la radiodiffusion numérique permet une exploitation quasi optimale du spectre radioélectrique, se rapprochant des limites théoriques définies par Shannon. Elle transforme le spectre FM d'une ressource rare et congestionnée en un système hautement scalable, capable de supporter une croissance exponentielle du nombre de services radiophoniques dans la ville de Kinshasa.

3.1 Synthèse de l'impact socioéconomique de l'optimisation numérique du spectre FM à Kinshasa

L'ARPTC perçoit principalement deux catégories de revenus liées à l'exploitation des fréquences : les frais d'acquisition ou d'attribution des fréquences et les redevances annuelles d'exploitation.

Dans le cadre de cette étude, les hypothèses réglementaires retenues sur base de nos enquêtes démontrent que:

- Frais d'acquisition d'un canal est de : **12 000 USD** ; et

- Redevance annuelle par diffuseur : **2 500 USD**

La migration de la radiodiffusion analogique vers le numérique génère une forte augmentation des recettes de l'ARPTC. En situation analogique, avec 34 diffuseurs, les recettes totales s'élèvent à environ **493 000 USD**. Après numérisation, le nombre de diffuseurs passe à 306, portant les recettes globales à environ **4 437 000 USD**.

Cette transition entraîne un gain significatif : **+3 264 000 USD** sur les frais d'acquisition et **+680 000 USD par an** sur les redevances. Globalement, les recettes augmentent d'environ **800 %**, montrant que la numérisation permet une meilleure valorisation économique du spectre radioélectrique.

Sur le plan économique, cette amélioration technique se traduit par une création significative de valeur. En effet, le passage de :

34 → 306 diffuseurs

entraîne :

- une augmentation des recettes de l'ARPTC d'environ **3,94 millions USD**
- une hausse annuelle des redevances de **680 000 USD**
- la création de près de **1 360 emplois directs** (en raison de 5 emplois par diffuseur)
- une croissance substantielle des recettes fiscales (DGI) et des cotisations sociales (CNSS)

Ces résultats démontrent que l'optimisation numérique du spectre radioélectrique constitue à la fois :

- une amélioration technique majeure
- et un levier stratégique de développement socioéconomique

Ainsi, la migration vers la radiodiffusion numérique permet de transformer la bande FM, autrefois perçue comme une ressource fréquentielle limitée, en une plateforme de diffusion hautement évolutive et plus efficiente sur le plan spectral. Grâce à l'amélioration de la capacité de transmission et à l'optimisation de l'utilisation des fréquences disponibles, elle est en mesure de soutenir l'expansion des services audiovisuels et de contribuer durablement au développement de l'économie numérique en République Démocratique du Congo.

Tableau 6 : Synthèse de l'impact socioéconomique

Indicateur	Situation analogique	Situation numérique	Gain obtenu
Nombre de diffuseurs	34	306	+272
Frais d'acquisition des canaux	408 000 USD	3 672 000 USD	+3 264 000 USD
Redevances annuelles ARPTC	85 000 USD/an	765 000 USD/an	+680 000 USD/an
Recettes globales ARPTC	493 000 USD	4 437 000 USD	+3 944 000 USD
Taux de croissance des recettes ARPTC	100 %	900 %	+800 %
Nombre d'emplois directs	170	1 530	+1 360
Base contributive CNSS	170 salariés	1 530 salariés	× 9

Assiette fiscale DGI	Référence actuelle	Forte augmentation	+800 % estimés
Occupation du spectre	Saturation	Optimisée	+800 % de capacité

3.2 Stratégiques et perspectives de transition vers la radiodiffusion numérique

La saturation de la bande FM à Kinshasa, accentuée par les contraintes de coordination avec Brazzaville, limite fortement l'attribution de nouvelles fréquences et freine l'expansion du paysage radiophonique. Dans ce contexte, la radiodiffusion numérique terrestre apparaît comme une solution stratégique permettant d'améliorer l'efficacité spectrale et d'augmenter significativement la capacité de diffusion.

La transition vers le numérique repose sur l'utilisation de technologies telles que la compression, le multiplexage et la modulation OFDM, qui permettent de diffuser plusieurs programmes sur une même fréquence. Elle améliore également la qualité de service (audio, stabilité du signal, services associés) et renforce la valorisation économique du spectre.

L'adoption d'un standard adapté, notamment la norme IBOC, permet une migration progressive grâce à la coexistence des signaux analogiques et numériques. Cette transition peut être structurée en phases : coexistence hybride, expansion numérique, puis passage au tout numérique.

Par ailleurs, la radiodiffusion numérique introduit un nouveau modèle organisationnel fondé sur la mutualisation des infrastructures et la dissociation entre opérateurs techniques et fournisseurs de contenus, réduisant ainsi les coûts et favorisant l'accès au marché.

Sur le plan économique, cette transformation entraîne une augmentation des recettes publiques, une ouverture du marché à de nouveaux acteurs et la création d'emplois. Elle contribue également à la modernisation globale du secteur audiovisuel et à l'essor de l'économie numérique.

Toutefois, la réussite de cette transition dépend de plusieurs facteurs : adaptation du cadre réglementaire, investissements en infrastructures, renforcement des compétences techniques et sensibilisation des usagers.

En définitive, la radiodiffusion numérique constitue à la fois une solution technique au désengorgement du spectre FM et un levier stratégique de développement durable du secteur des télécommunications en République Démocratique du Congo.

4. Conclusion générale

La gestion du spectre radioélectrique constitue aujourd'hui un enjeu stratégique majeur pour le développement des télécommunications et de la radiodiffusion moderne. Dans le contexte de la ville de Kinshasa, caractérisé par une forte croissance de la demande en services de radiodiffusion et par des contraintes de coordination internationale avec la ville de Brazzaville, la bande FM apparaît fortement saturée et ne permet plus de répondre efficacement aux besoins actuels et futurs du secteur.

L'analyse menée dans cette étude a montré que, bien que la bande FM offre théoriquement environ 68 canaux de diffusion sur une largeur de 20,5 MHz, les contraintes réglementaires et techniques réduisent cette capacité à environ 34 canaux effectivement exploitables, soit une perte de 50 %. Cette limitation constitue un obstacle majeur à l'expansion du paysage radiophonique, rendant difficile l'attribution de nouvelles fréquences et mettant en évidence les limites structurelles du système analogique, notamment sa faible efficacité spectrale.

Face à cette problématique, l'étude a démontré que la migration vers la radiodiffusion numérique terrestre constitue une solution pertinente, durable et adaptée au contexte de la République Démocratique du Congo. En s'appuyant sur les technologies de numérisation, de compression, de multiplexage et de modulation OFDM, notamment à travers la norme IBOC (In-Band On-Channel), il devient possible de diffuser plusieurs programmes sur une même fréquence, améliorant ainsi significativement l'utilisation du spectre radioélectrique.

Les résultats issus de la modélisation et de l'analyse montrent qu'un système entièrement numérique permettrait d'augmenter considérablement la capacité de diffusion, passant de 34 diffuseurs en mode analogique à environ 306 programmes en mode numérique, soit un gain d'environ 900 %. Cette optimisation traduit une transformation profonde du spectre FM, qui passe d'une ressource limitée et saturée à une plateforme de diffusion efficace, flexible et extensible, capable de répondre à une croissance importante des besoins.

Au-delà des performances techniques, la transition vers la radiodiffusion numérique présente des retombées socioéconomiques significatives. Elle permet une meilleure valorisation des ressources fréquentielles, une augmentation des recettes de l'autorité de régulation, une ouverture accrue du marché à de nouveaux acteurs, ainsi que la création d'emplois et le renforcement des recettes fiscales et sociales. Par ailleurs, elle favorise la mutualisation des infrastructures et la réduction des coûts d'exploitation, contribuant ainsi à la modernisation globale du secteur audiovisuel et au développement de l'économie numérique en République Démocratique du Congo.

Toutefois, la réussite de cette transition repose sur une approche intégrée et progressive, impliquant l'adaptation du cadre réglementaire, le renforcement des infrastructures techniques, l'amélioration des mécanismes de gestion et de contrôle du spectre, ainsi que le développement des compétences humaines et la sensibilisation des usagers. L'adoption d'un modèle hybride, permettant la coexistence des systèmes analogique et numérique, apparaît comme une stratégie réaliste pour garantir une migration maîtrisée et sans rupture de service.

En définitive, l'optimisation numérique de la gestion du spectre radioélectrique dans la bande FM s'impose comme une nécessité stratégique pour faire face aux défis de saturation à Kinshasa. La radiodiffusion numérique terrestre constitue non seulement une solution technique efficace pour le désengorgement du spectre, mais également un levier essentiel de transformation et de développement durable du secteur des

télécommunications, au bénéfice des autorités de régulation, des opérateurs et de l'ensemble de la population.

Creative Commons License Statement

This research work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>. To view the complete legal code, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.en>. Under the terms of this license, members of the community may copy, distribute, and transmit the article, provided that proper, prominent, and unambiguous attribution is given to the authors, and the material is not used for commercial purposes or modified in any way. Reuse is only allowed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

Conflict of Interest Statement

L'auteur déclare n'avoir aucun conflit d'intérêt.

About the Author(s)

Biduaya Tujibikile Alain Justin est Ingénieur et chercheur en sciences de gestion et sciences informatiques. Actuellement auditeur au DEA à la faculté des sciences économiques et de gestion, département des sciences commerciales et administratives de l'Université Pédagogique Nationale en République Démocratique du Congo.

Références

- European Broadcasting Union. (2017). *Digital radio toolkit*. EBU.
- European Telecommunications Standards Institute. (2018). *Digital Audio Broadcasting (DAB) systems*. ETSI.
- Haykin, S. (2001). *Communication systems* (4th ed.). Wiley. Retrieved from <https://koracademy.com/sites/default/files/inline-files/communication-systems-4thedition-by-simonhaykin.pdf>
- Organisation de Coopération et de Développement Économiques. (2014). *Perspectives des communications et de l'Internet*. OCDE.
- Proakis, J. G., & Salehi, M. (2008). *Digital communications* (5th ed.). McGraw-Hill. Retrieved from <https://daskalakispiros.com/files/Ebooks/digital-communication-proakis-salehi-5th-edition.pdf>
- Union Internationale des Télécommunications. (2020). *Règlement des radiocommunications*. UIT. Retrieved from <https://www.itu.int/fr/publications/ITU-R/Pages/publications.aspx?parent=R-REG-RR-2020&media=electronic>

- Union Internationale des Télécommunications. (2017). *Rec. UIT-R BS.1114-10 : Systèmes de radiodiffusion sonore numérique*. UIT. Retrieved from <https://www.itu.int/rec/R-REC-BS.1114/fr>
- Union Internationale des Télécommunications. (n.d.). *UIT-R SM.853-1 : Largeur de bande des émissions FM*. UIT.
- Union Internationale des Télécommunications. (1984). *Plan de Genève 1984 (GE84)*. UIT. Retrieved from https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-RRC.5-1984-PDF-E.pdf
- Union Internationale des Télécommunications. (2018). *Digital broadcasting trends*. UIT.
- UNESCO. (2018). *Guide de transition vers la radiodiffusion numérique*. UNESCO.
- République Démocratique du Congo. (2023). *Code du numérique*. Gouvernement de la RDC.