**Dédicace**

Je dédie ce travail :

* A ma mère **SOLOME Delphine,**pour ses sacrifices, son amour, son soutien et ses prières tout au long de mes études.
* A mes frères et sœurs qui m’ont soutenu quotidiennement, partagé les moments de doute et de joie pendant ces années.

Merci d’être toujours là pour moi.

**Remerciements**

Mes sincères remerciements :

* A l’Eternel Dieu Tout Puissant pour le souffle de vie qu’il continue de m’accorder ;
* A Monsieur xxxxxx, Directeur de l’Ecole Polytechnique d’Abomey-Calavi, à son adjoint le Dr. Xxxxxx et tout le personnel administratif ;
* Au xxxxxxx, Chef du département de Génie Informatique et Télécommunications (GIT) et à tous les enseignants dudit département ;
* Au Docteur Patrick SOTINDJO, mon maitre mémoire pour avoir accepté suivre ce travail en dépit de ses multiples responsabilités ;
* A l’Ingénieur Fabrice DAKO, mon maître de stage, pour son encadrement durant mon stage ;
* Toute la 11ème promotion du Secteur Industriel de l’EPAC pour tous les moments passés ensemble.
* 

**Liste des sigles et acronymes**

**AM** Amplitude Modulation

**AC**

**AWGN** Additive White Gaussian Noise  
**BER** Binary Error Rate

**COFDM** Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex  
**CRR** Conférence Régionale des Radiocommunications

**DAB** Digital Audio Broadcasting

**DQPSK** Differential Quadrature Phase Shift Keying  
**DRM** Digital Radio Mondiale

**ETSI** European Telecommunications Standards Institute

**FEC** Forward Error Correction  
**FFT** Fast Fourrier Transform  
**FIB** Fast Information Block  
**FIC** Fast Information Channel  
**FM** Frequency Modulation

**HE-AAC** High-Efficiency Advanced Audio Coding

**MATLAB** MATrix LABoratory

**MCI**  
**MEPG** Moving Picture Experts Group  
**MSC** Main Service Channel

**OFDM** Orthogonal Frequency Division Multiplexing

**PAD  
PRBS** Pseudo-Random Binary Sequence  
**PSK** Phase Shift Keying modulation

**QAM** Quadrature Amplitude Modulation  
**QPSK** Quadrature Phase Shift Keying modulation  
**RNT** Radio Numérique Terrestre  
**SI** Service Information  
**SNR** Signal to Noise Ratio  
**TDMB** Terrestrial Digital Multimedia Broadcasting

**TEB** Taux d’Erreur Binaire  
**TNT** Télévision Numérique Terrestre  
**UIT** Union Internationale des Télécommunications  
**VHF** Very High Frequency  
**ZF** Zero Forcing

**Liste des tableaux**

**Liste des figures**

**Résumé**

**Abstract**

**Introduction générale**

La radio est l’un des médias électroniques les plus utilisés par l’homme pour acquérir de l’information, se cultiver et se divertir. Elle permet à l’homme grâce à ses différents programmes de rester connecter au reste du monde. Depuis le début de la radiodiffusion au début des années 1920, le marché est largement couvert par les systèmes de radiodiffusion audio AM et FM [1]. Aujourd’hui, nous vivons dans un monde de systèmes et de services de communication numérique. En effet, lors de la Conférence Régionale des Radiocommunications (CRR) de l’UIT (Union Internationale des Télécommunications) tenue à Genève du 15 mai au 16 juin, un traité international (Accord GE06) a fixé au 17 juin 2020 la disparition des systèmes de radiodiffusion sonore analogique [4]. Par conséquent, les systèmes de transmission de radiodiffusion ont désormais tendance à passer de la transmission analogique conventionnelle au numérique [1].

Le système de radiodiffusion FM actuel est en train d’être remplacé progressivement par le système de Radiodiffusion Numérique Terrestre (RNT) dans de nombreux pays du monde [2].

Au Bénin le mode de diffusion de la radio reste la diffusion analogique en bande FM.

C'est dans l’optique de bénéficier des avantages du numérique en radiodiffusion terrestre au Bénin, que le présent travail a été initié. Il porte sur la Migration de la radiodiffusion FM vers la radio numérique terrestre au Bénin.

Pour bien cerner ce thème nous avons divisé l'ouvrage en cinq grandes parties.

En premier lieu, nous allons mener une étude comparative des normes existantes de la RNT en vue de choisir la norme adéquate pour le Bénin, puis étudier de manière approfondie cette norme choisie.

Dans la deuxième partie, nous allons implémenter la chaine de la norme identifiée et quantifier l'apport de la rotation de constellation dans cette chaine.

Pour la troisième partie, nous allons décrire la migration de la radio FM vers la RNT, tout en proposant une architecture de déploiement au Bénin. Enfin nous allons évaluer l'impact de cette migration sur les acteurs de l'écosystème RNT. (ok)

**Contexte et justification**

La radio numérique terrestre, permet tout comme la FM, la diffusion des programmes de radio par voie hertzienne. Contrairement à la radio analogique hertzienne FM où une fréquence ne permet de transmettre qu’une radio, chaque fréquence en RNT véhicule plusieurs services radios qui sont groupés dans un multiplex [Conseil Superieur de l’Audiovisuel].

La RNT présente de nombreux avantages tels que : une meilleure qualité de diffusion et de réception, la diffusion de plusieurs radios sur la même fréquence ce qui permettrait une meilleure utilisation du spectre de fréquences, une diminution des coûts de transmission et un émetteur RNT n’a besoin que d’une fraction de l’énergie électrique par rapport à un émetteur FM conventionnel [1]. Ces avantages de la RNT justifient son introduction dans le monde des médias afin de remplacer progressivement les systèmes radio conventionnels existants. Nous nous intéresserons donc au déploiement de la RNT au Bénin. (ok)

**Problématique**

La diffusion FM reste aujourd’hui le seul mode d’écoute de la radio au Bénin. Elle est utilisée dans le cadre de la réception fixe, mobile et portable.

La transmission analogique en FM rencontre de plus en plus ses limites de capacités. [fulltext] Elle n’offre aucune protection contre les interférences multi-trajets surtout dans le cas de la réception mobile.

Le signal analogique subit donc une dégradation non contrôlée lors de sa propagation et la correction des erreurs de transmission à la réception est complexe [4]. De plus, la bande de 87.5 à 108 MHz destinée à la diffusion FM commence à se saturer [5]. L’autorité de régulation a plusieurs demandes de licence qu’il n’arrive pas à satisfaire en raison de cette pénurie de fréquences. Ces problèmes de la diffusion analogique limitent les possibilités de disposer d’un même programme de manière continue sur tout ou une partie du territoire. Le passage à la RNT, va permettre de pallier aux insuffisances de la FM, d’innover dans le domaine de la radiodiffusion et d’offrir une expérience plus riche aux auditeurs. (ok)

**Objectif du projet**

Ce travail a pour objectif de proposer et d’évaluer un système de radiodiffusion numérique terrestre pour le Bénin en se basant sur l’infrastructure existante. Plus spécifiquement, il s'agira :

* d'implémenter et de simuler la chaine de transmission du système que nous avions identifiée adéquate pour le Bénin
* d'intégrer la rotation de constellation dans la chaine pour l’amélioration des performances de cette norme
* proposer une architecture de déploiement de la RNT au Bénin en se basant sur l'existant
* d'évaluer l'impact de la migration sur les acteurs de l'écosystème RNT

**SYNTHESE BIBLIGRAPHIQUE**

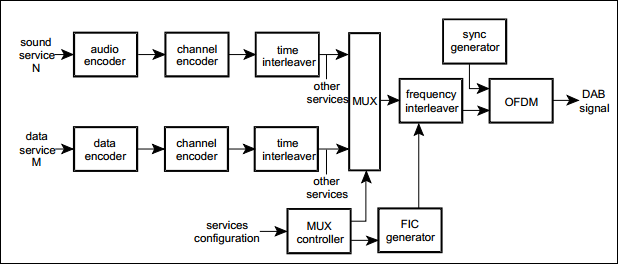
**Chapitre I : Etude comparative des normes de la RNT et choix d’une norme au Bénin**

Pour assurer la fiabilité des systèmes de radiodiffusion numérique terrestre, différents standards ont été élaborés. Ce sont des normes européennes utilisées par la plupart des pays d’Europe dans les systèmes de Radiodiffusion Numérique Terrestre. Le présent chapitre permettra de décrire ces normes et d’apporter les particularités en vue d'identifier une pour le Bénin. (ok)

**Présentation des normes**

**1- Digital Audio Broadcasting (DAB) (ok)**

Le DAB constitue le premier système de la radiodiffusion numérique terrestre. La norme DAB a été élaborée vers 1990 dans le cadre du programme européen de recherche et de développement Eureka et normalisée en 1997[]. Les bandes de fréquences retenues pour la radiodiffusion numérique DAB sont **les bandes III en VHF (174 à 239 Mhz) ainsi que la bande L (1452 Mhz à 1492Mhz)** [3]**.** Le format de compression utilisé par la norme DAB est le **MPEG-1/-2 Layer II** [3]. Pour protéger le message émis par la source contre les perturbations du canal le système utilise le codage convolutif. Comme technique de modulation le système est basé sur la modulation multi porteuse OFDM.



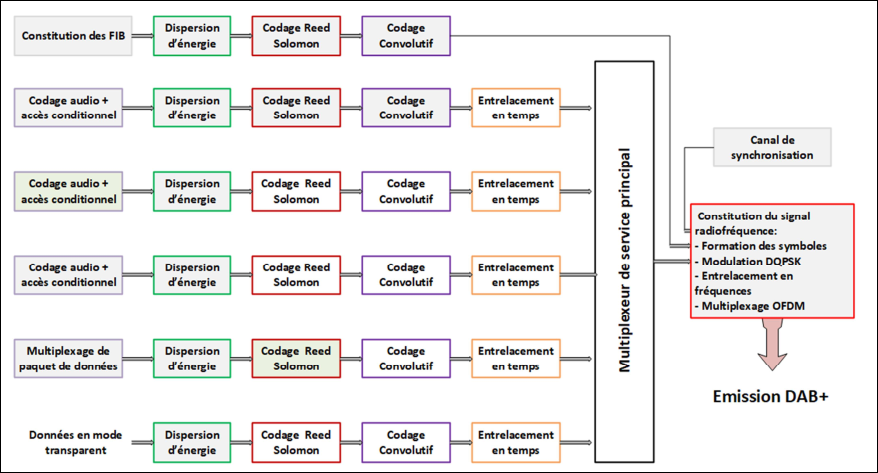
Schéma

**2- La norme DAB+ (ok)**

La norme DAB+ est la 2ème génération de la norme DABet a été publiée en 2007.

En effet, des travaux ont été réalisés dans le cadre de l’amélioration de la norme initiale DAB. Ainsi nous avons : [4]

* Une nouvelle technique de compression audio : **MPEG-4 AAC** quiest utilisée avec le DAB+.
* Une protection supplémentaire de la trame audio MPEG-4 par un **code de bloc Reed-Solomon**
* La possibilité d'héberger plus de services.



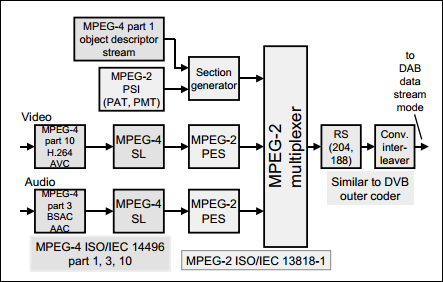
**3- Terrestrial Digital Multimedia Broadcasting (TDMB)**

La radiodiffusion multimédia numérique (T-DMB) est une technologie de transmission radio numérique développée en Corée du Sud dans le cadre d’un projet informatique national pour l’envoi des données multimédia tels que la télévision, la radio et la diffusion de données sur des appareils mobiles [6].

La norme a été normalisée au sein de la famille de normes européennes qui définissent le standard DAB par le forum WorldDAB. Elle constitue une évolution du DAB qui offre des capacités multimédia.

Elle utilise le MPEG-4 (H.264) pour la vidéo et le HE-AAC v2 (High Efficiency-Advanced Audio Coding) pour l’audio [4]. La norme T-DMB est très peu utilisée dans le monde. Elle est utilisée dans les pays tels que : Corée du Sud, Chine, Inde. Cette norme n’a vraiment pas réussi contrairement au DAB+ [7].

Schéma



**4-Digital Radio Mondiale (DRM) (A revoir)**

La norme DRM [ETS 101980] a été créé en 2000. Elle a été développée pour remplacer la radiodiffusion analogique dans toutes ses bandes de fréquences. Deux modes d’exploitation du système sont normalisés :

* **DRM30 (DRM)**

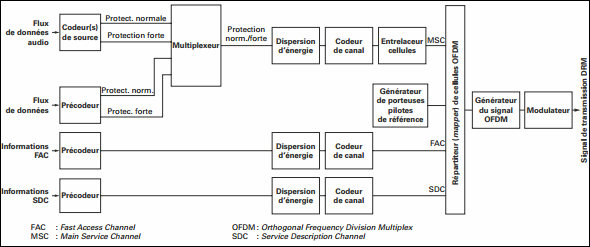
La norme est destinée à la bande de fréquences de 30 kHz à 30 MHz, dans laquelle le service AM était normalement transmis.

* **DRM+**

DRM+ est une extension de DRM30 qui a été développée et destinée aux fréquences supérieures à 30 MHz. La norme utilise le spectre de fréquences allant de 30MHz à la bande III en VHF et centré sur la bande II de diffusion en FM.

Les émissions DRM30/DRM+ utilisent les modes de modulation QAM, QPSK et la modulation multi-porteuse OFDM. La méthode de protection contre les erreurs est le codage convolutif. [4] La norme utilise le MPEG4 pour le codage source.

schéma



**TABLEAU RECAPITULATIF DES CARACTERISTIQUES DES NORMES**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Norme** | **DAB** | **DAB+** | | **T-DMB** | **DRM30** | | **DRM+** |
| **Capacités**  **(Chaines)** | 10 - 20 | 20 - 40 | | Environ 9 | 1-4 | | 1-4 |
| **Bandes de fréquences** | 174-239 MHz  1452-1492MHz | 174-239 MHz  1452-1492MHz | | 174-239 MHz  1452-1492MHz | 30KHz- 30 MHz | | 30-174 MHz |
| **Largeur de bande du canal** | 1.536MHz | 1.536MHz | 1.536MHz | | 4.5 ou 5 KHz  9 ou 10 KHz  18 ou 20 KHz | | 96 KHz |
| **Codage audio** | MPEG-1/2 Layer II | MPEG-4 HE-AAC V2 | MPEG-4 HE-AAC V2 | | MPEG-4 HE-AAC V2 | MPEG-4 HE-AAC V2 | |
| **Codage de canal** | Convolutif | Codage convolutif, Reed-Solomon | | | Codage convolutif | | |
| **Modulation** | OFDM  DQPSK | OFDM  DQPSK | | OFDM  DQPSK | OFDM, 16QAM, 64QAM  QPSK | | OFDM  16QAM  QPSK |
| **Possibilité de réaliser SFN** | **Oui** | **Oui** | | **Oui** | **Oui** | | **Oui** |

**5- Comparaison des normes**

**- DAB+ et TDMB**

**DAB+ et T-DMB** constituent des améliorations du DAB. Ces deux normes présentent des similarités. Elles utilisent un codage audio plus efficace et également un codage FEC supplémentaire, Reed-Solomon, ce qui permet une meilleure protection contre les erreurs.

La norme T-DMB permet des données associées plus riches qu’en DAB+. Elle permet grâce à ses composantes MPEG-4 vidéo la mise en œuvre de services interactifs, de vidéo contrairement au DAB+ [7].

Néanmoins T-DMB permet de diffuser moins de radios que le DAB+ et est plus gourmand en bande passante [7].

La norme TDMB n’est actuellement utilisée en radio dans aucun pays européen en dehors de la France qui a opté pour elle. Pour permettre donc une harmonisation au niveau européen le choix est porté sur le DAB+.

De plus pour les éditeurs, le DAB+ permettra une meilleure utilisation de la ressource spectrale que le TDMB.

**- DRM et DAB+**

Les normes DRM et DAB+ offrent aux auditeurs une expérience radio équivalente.

La norme DAB+ offre la possibilité de multiplexage de plusieurs chaines radio contrairement au DRM qui offre un petit multiplex de 1 à 3 programmes audio.

Pour une architecture ayant plusieurs programmes radios on utilisera plus d’émetteurs avec la norme DRM+ que la norme DAB+. Ce qui engendrera un coût d’investissement important et aussi une grande consommation en énergie [11].

**6- CHOIX ET JUSTIFICATION DE NORME**

Sur la base des comparaisons précédentes, la norme DAB+ serait plus adaptée pour remplacer la FM dans l’environnement Béninois.

La plupart des travaux européens en la matière préconisent une norme unique qui serait le DAB+, qui est donc déployée dans les pays européens. Les modèles de récepteurs sont donc pour la plupart compatibles avec le DAB/DAB+. De plus cette norme permettra une meilleure gestion de la ressource spectrale et aussi une réduction des coûts de diffusion par rapport aux autres normes.

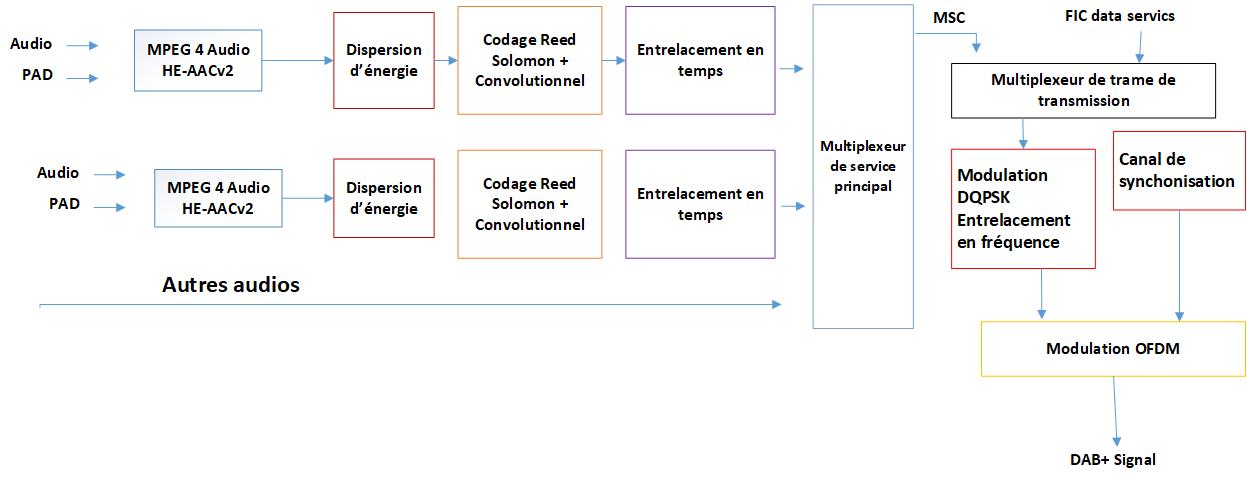
Le choix de la norme RNT pour le Benin sera donc le DAB+ au regard de ses avantages et du succès de son déploiement dans les autres pays.

**Chapitre II : Etude approfondie de la norme DAB+**

La norme DAB+ est la norme choisie pour le déploiement de la RNT au Bénin sur la base de l’étude comparative des normes RNT. Dans ce chapitre comme le titre l’indique, nous allons faire une description détaillée du système.

1. **Architecture de la norme**
   1. **Présentation de la norme DAB+**

La figure ci-dessus présente la chaîne d’émission simplifié du système DAB+.



**Figure : Synoptique simplifié de la chaine d’émission DAB+**

A présent décrivons les différents blocs de cette chaine.

**1-4 Codage source**

Le codage de source ou la compression est la capacité technique à réduire le volume de données numériques à transmettre sans dégrader le contenu final du signal. Le principe de la compression repose sur la suppression des données redondantes dans le même contenu.

Lanorme DAB+ utilise la compression HE-AAC version 2 (High-Efficiency Advanced Audio Coding) définie dans la norme MPEG-4.

**1-5 Dispersion d’énergie**

Il peut arriver que le train binaire contienne une longue suite de 0 ou de 1. Cela peut gêner la récupération du rythme à la réception. Pour rompre ces longues séquences de 1 et de 0 dans le flux de données, un brassage est réalisé par une séquence pseudo aléatoire (PRBS). C’est ce qu’on appelle la dispersion d’énergie.

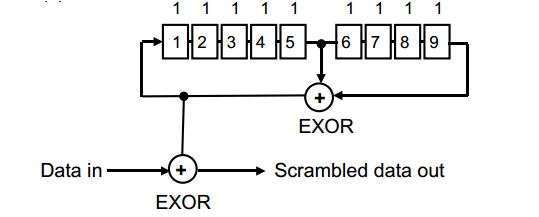
La dispersion permet d’augmenter le nombre de transitions du signal afin d’assurer l’efficacité du codeur.

Elle est effectuée par la sommation modulo 2 (ou exclusif) des données à transmettre avec celles du PRBS (Pseudo-Random Binary Sequence).

Le PRBS peut être défini comme la sortie d’un registre à décalage à rétroaction linéaire.

**Caractéristiques du PRBS :**

* Registre à décalage à 9 étages
* Séquence d’initialisation : 1111111111
* Polynôme générateur de séquence : ++1.



**Figure 5 : Dispersion d’énergie de la donnée** [Signal and communications]

**1-6 Codage de canal**

Le codage de canal consiste à protéger le message émis par la source contre les perturbations du canal. Le codage de canal permet de détecter les erreurs introduites par le canal et de les corriger. Le système DAB+ utilise le **codage convolutif et le codage Reed Solomon.**

**1-6-1 Codage Reed Solomon**

Il s’agit d’un code en bloc consistant à ajouter les bits de redondance à un bloc binaire.

**Principe de fonctionnement**

Le codeur prend **k** symboles de données en entrée et calcule les informations de contrôle pour construire **n** symboles en sortie. Il est défini par **RS (n, k, t, l)**:

* n nombre de symbole en sortie du codeur
* k : nombre de symbole de l’information (en entrée)
* t : capacité de correction d’erreur du codeur avec t = n-k/2
* **l**: symboles de redondances ajoutés **(l=2\*t)**

**Caractéristiques du codeur RS en DAB+**

Le codeur Reed Solomon utilisé dans le standard DAB est un code RS **(204,188,8,16**). Il ajoute l =16 octets de parité à chaque paquet de k=188 octets. Sa capacité de correction d’erreur est t= 8 octets sur un paquet de k=188 octets [ETSI].

**1-6-2 Codage convolutif (OK)**

A la différence d’un code en bloc comme le code RS, ce codeur ajoute des bits de redondance mais de manière dispersée au niveau de chaque paquet de 204 octets.

**Fonctionnement du codeur DAB+**

Le codage se fait à partir des registres à décalage à N= 6 étages et des opérateurs logique XOR. Chaque bit en entrée du codeur donne quatre bits en sortie.

**Caractéristiques :**

Le codeur est défini par :

* La longueur de contrainted’un code qui correspond au nombre de bits d’entrée consécutifs sur lesquels s’effectue le codage. Elle vaut 7 avec DAB+.
* Le rendement de code qui est le rapport entre le nombre de bits en entrée et le nombre de bits en sortie du codeur. DAB+ utilise des codes convolutifs de rendement ¼.

**1-7 Entrelacement temporel**

Cette opération consiste à séparer dans le domaine temporel les éléments  
binaires consécutifs en sortie du codeur convolutif pour éviter la succession d’erreurs.  
Le principe est de changer l’ordre des données à l’émission et de les remettre en ordre à la réception.

**1-8 Entrelacement fréquentiel**

Il consiste en la permutation des symboles issus de la modulation DQPSK en se basant sur une séquence pseudo-aléatoire fixe. Ce procédé permet d’optimiser l’exploitation de la diversité fréquentielle du canal et d’éviter que les symboles consécutifs n’occupent pas des canaux adjacents [ETSI]. (A revoir)

**1-9 Modulations numériques en DAB+**

Le but de la modulation est d’adapter le signal à son canal de transmission. Elle consiste à faire varier l’un des paramètres (phase, amplitude, fréquence) du signal porteur par le signal modulant. Les modulations utilisées en DAB+ sont :

**1-9-1 Modulation DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying)**

La modulation DQPSK est une variante de la modulation QPSK. Avant de décrire son principe, présentons la modulation QPSK.

**QPSK**

La modulation QPSK est une technique de modulation mono-porteuse basée sur la modulation de phase. Il s’agit d’une modulation PSK à 4 états.

Le principe est de regrouper deux bits du train binaire pour constituer les symboles correspondants. Les symboles prennent donc leurs valeurs dans un alphabet de 4 mots, 00,01,10,11. A chaque symbole est associé une valeur de phase de la porteuse parmi 4.

Le problème avec le QPSK est le manque de synchronisation de phase entre l’émetteur et le récepteur. Le récepteur doit être capable de reconnaitre la phase du signal entrant, ce qui est difficile à faire car l’étalement par trajets multiples peut dégrader la phase de la porteuse. Un décalage de phase entre le signal reçu et l’oscillateur local du récepteur introduira une erreur dans la phase des signaux reçus ce qui pourrait fausser l’identification des bits.

Le principale avantage de la modulation différentielle est donc d’assurer la synchronisation.

Le QPSK véhicule l’information a travers la phase absolue de chaque symbole Par contre le DQPSK transmet l’information en associant la phase d’un symbole par rapport au symbole précédent.

Principe matlab + constellation

**Modulation multi porteuse OFDM**

La norme DAB+ utilise la modulation multi porteuse OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) pour lutter contre le problème des interférences inter symboles causées le phénomène multi trajets. Elle consiste à diviser le flux de données à haut débit en K flux de données parallèles à faible débit et à moduler chacun d’eux sur sa propre porteuse. Pour s’assurer qu’il n’y ait pas d’interférence entre elles, les sous porteuses doivent être orthogonales. (OK)

**Chapitre 3 : Conception et** I**mplémentation de la chaine DAB+**

Le présent chapitre vise à décrire la conception du système DAB+ présenté au chapitre précédent. Dans un premier temps, nous allons présenter le fonctionnement général du système implémenté, puis les choix concernant les outils d’aide à la conception et les outils d’évaluation des performances.

**Fonctionnement générale du système DAB+ implémenté**

La chaine du système DAB+ est composée de trois grandes parties reliées : le bloc d’émission, le bloc de transmission et le bloc de réception.

**La partie émission**

La partie émission est constituée de X blocs :

**Le générateur de bits**

Ce bloc génère le message qui sera transmis sur le système. Le message est une séquence binaire aléatoire (0 ou 1) et correspond au signal audio compressé MPEG4.

**Le bloc de dispersion d’énergie**

Ce bloc a été effectué grâce au générateur pseudo aléatoire défini par la norme, présenté plus haut.

**Le bloc de codage**

Ce bloc comprend les codes Reed Solomon (RS) et convolutifs qui servent à coder l’information.

Le codage RS utilisé est celui prévu par la norme présentée au chapitre précédent.

Le codage convolutif a pour rendement ¼ et a été effectué avec le treillis (7, [133 171 145 133]).

**Le bloc d’entrelacement binaire**

Ce bloc permet de modifier la position des bits dans une trame binaire après le codage de canal.

**Le bloc de modulation DQPSK**

Les trames de vecteur binaire issus du bloc d’entrelacement sont redimensionnées (formation de symboles) et modulées suivant le principe de la modulation pi/4 DQPSK. Les signaux résultants sont constitués chacun de symboles DQPSK.

**Le bloc d’entrelacement fréquentiel**

Il permet de changer la position des symboles DQPSK

**La partie transmission (A revoir)**

Le bloc de transmission permet la propagation du signal émis par voie hertzienne. Nous avons utilisé trois types de canaux afin d’évaluer les effets de chacun d’eux sur le signal émis.

Nous avons :

**Le bruit AWGN** :

**Canal de Rayleigh**:

**Canal de Rice**:

**La partie réception**

A la réception, on réalise les opérations inverses à celles effectuées en émission.

Il s’agit de :

La démodulation OFDM

L’estimation de canal et de l’égalisation

La demodulation DQPSK

Le desentrelacement

Le décodage de viterbi qui permet de corriger les erreurs survenues lors de la transmission

Le decodage RS

La dispersion d’energie

**Choix des outils pour la conception**

**Logiciel de simulation**

Dans le cadre de notre étude, nous travaillerons avec le logiciel Matlab 2019 a Version (MATrix LABoratory) qui nous permettra de simuler la chaine de transmission DAB+. Matlab dispose de nombreuses fonctions que nous avons utilisés dans le cadre de l’implémentation du système DAB+ qui sont énumérées dans le Tableau X en Annexes.

**Matériel**

Le matériel utilisé est un ordinateur portable de capacité requise sur lequel est installé le logiciel de simulation.

**Outils d’évaluation des performances**

**Chapitre 4 : Intégration de la rotation de constellation dans la chaine DAB+**

**Chapitre5 Résultats et Discussion**

**Chapitre 6 Proposition d’une architecture de déploiement au Bénin**

**Chapitre 7 Etude de l’impact de la migration sur les acteurs de l’écosystème**