

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de BEJAIA
Faculté des Sciences Technologie
Département Génie Electrique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Master en Télécommunications

Option Réseaux et Système

Thème

Simulation et performance d'algorithmes pour l'accès aux ressources à base de SCMA

Présenté par :

Encadré par : Mr AZNI Mohamed

- OUTEMZABET Feriel
- HARZOUZ Khadidja

Devant les jurys composés de :

- | | | |
|--------------------------|------------|-----------|
| - Mr BELLAHSENE Hocine | MCA | Examineur |
| - Mr KHIREDINE Abdelkrim | Professeur | Président |

Année universitaire : 2019/2020

Remerciement

Nous sommes reconnaissantes à grand Dieu pour la bonne santé et le bien-être qui nous a aidé à compléter ce travail.

Nous remercions messieurs les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre encadreur Dr AZNI Mohamed pour le soutien continu, pour sa patience, de motivation et savoir immense. Ses conseils nous ont aidé dans tout le temps de la recherche et la rédaction de ce mémoire.

Nos sincères remerciements vont également à tous nos professeurs durant ces cinq années à l'université, pour leurs conseils, leur aide et leur soutien.

Enfin nous en profitons pour remercier tous nos collègues pour tout le plaisir que nous avons eu au cours des cinq dernières années.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler « *vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation je suis fière* ». **Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.**

Je remercie ma sœur Lana et mon frère Soufiane, pour leurs encouragements.

Enfin, je remercie Walid qui a toujours été là pour moi. Mes plus chères amies Tiziri, Kaissa et aussi ma binôme Khadîdja. Leurs soutiens inconditionnels et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

OUTEMZABET Feriel

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents, ma mère et mon père, qui ont été toujours là pour moi, qui m'ont soutenu et qui m'ont encouragé. Quoi que je dise et quoi que je fasse je ne vous remercierai jamais assez, votre présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour avancer dans ma vie, je vous aime énormément.

Mes chères sœurs, Lili et Amira et mon cher frère Youva, ainsi que toute la famille (la liste est très longue).

Mes copines Lydia, Kami, ma binôme Feriel et à tous mes amies, amis et toutes les personnes qui m'ont toujours accompagné durant mon chemin d'étude supérieure.

Un grand merci pour Massi qui a été toujours là pour moi, qui m'a aidé et qui m'a soutenu durant tout mon parcours universitaire.

Que dieu vous donne santé, bonheur, courage et réussite.

KHADIDJA

Table de matière

Table de matière.....	I
Liste des figures.....	III
Liste des tableaux.....	V
Liste des abréviations.....	VI
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 : généralité sur les techniques d'accès multiple

1.1 Introduction.....	3
1.2 Techniques d'accès multiple.....	3
1.3 L'accès multiple OMA.....	4
1.3.1 FDMA (Frequency Division Multiple Access).....	5
1.3.2 TDMA (Time Division Multiple Access).....	6
1.3.3 CDMA (Code Division Multiple Access).....	7
1.3.4 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).....	10
1.3.5 OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access).....	11
1.4 NOMA (Non Orthogonal Multiple Access)	12
1.4.1 SCMA (Sparse Code Multiple Access) (domaine de code)	13
1.5 Conclusion.....	13

Chapitre 2 : Sparse Code Multiple Access SCMA

2.1 Introduction.....	15
2.2 La cinquième génération.....	15
2.3 Définition de SCMA.....	16
2.4 Concept de base de SCMA.....	16
2.5 Mappage du livre de codes.....	17
2.6 Procédure d'accès Multiple.....	19
2.7 Modèle de système.....	20
2.7.1 Encodage des canaux.....	21
2.7.2 Operations d'encodage et de décodage.....	22
2.7.3 Encodage SCMA.....	23

2.7.4 PRE mapping.....	24
2.7.5 Décodage canal.....	27
2.7.6 décodage SCMA.....	27
2.8 Caractéristiques de la technique SCMA.....	35
2.9 Conclusion.....	35

Chapitre 3: Simulations et résultats

3.1 Introduction	37
3.2 Modèle du système.....	37
3.3 Conception et description du simulateur MATLAB.....	37
3.3.1 Schéma synoptique du modulateur et démodulateur SCMA.....	38
3.3.2 Implémentation du modulateur SCMA.....	38
3.3.3 Canal de transmission	39
3.3.4 Implémentation du démodulateur SCMA.....	39
3.4 Résultats de simulation.....	41
3.5 Conclusion.....	44
Conclsion générale	45
Bibliographie	46

Liste des figures

Figure 1.1 :	Opérations de multiplexage et démultiplexage.....	4
Figure1.2 :	Technique d'accès multiple FDMA	5
Figure1.3 :	Les bandes de garde (guard band)	5
Figure1.4 :	Technique d'accès multiple TDMA	6
Figure 1.5 :	Principe de fonctionnement du TDMA	7
Figure 1.6 :	Code Division Multiple Access	8
Figure 1.7 :	Principe de fonctionnement de CDMA	8
Figure 1.8 :	Division en plusieurs sous-porteuses	10
Figure 1.9 :	Différence entre l'OFDM et l'OFDMA	12
Figure 1.10 :	NOMA (Non Orthogonal Multiple Access)	12
Figure 1.11:	Solution NOMA possible.....	13
Figure 2.1 :	Architecture fonctionnelle pour les réseaux mobiles 5G	16
Figure 2.2 :	Modèle de système de base SCMA	17
Figure 2.3 :	Mappage bit à mot de code SCMA	18
Figure 2.4 :	Exemple de mot de code SCMA 8-point	19
Figure 2.5 :	Accès multiple avec SCMA	20
Figure 2.6 :	Chaîne de liaison montante SCMA avec codage de canal	21
Figure 2.7 :	PRE Mapping.....	24
Figure 2.8 :	Le schéma bloc de PRE Mapping.....	25
Figure 2.9 :	Constellation de signaux pour QPSK Modulation	26
Figure 2.10 :	Constellation de signaux pour la modulation 16-QAM	27
Figure 2.11 :	Schéma fonctionnel pour les systèmes SCMA de liaison montante.....	28
Figure 2.12 :	Représentation du Factor Graph en SCMA	28
Figure 2.13 :	Schéma bloc du décodeur MPA	30

Figure 3.1 :	Modèle de simulation.....	37
Figure 3.2 :	Schéma synoptique du modulateur et démodulateur SCMA.....	38
Figure 3.3 :	Bloc fonctionnel du décodeur Log-MPA.....	40
Figure 3.4 :	Graphe de BER en fonction de SNR (Codebooks optimaux).....	42
Figure 3.5 :	Graphe de BER en fonction de SNR.....	43
Figure 3.6 :	Graphe de BER en fonction de SNR.....	43
Figure 3.7 :	Résultats du BER en fonction de SNR.....	44

Liste des tableaux

Tableau 2.1 :	Les valeurs des constellations pour QPSK.....	26
Tableau 3.1 :	Paramètres de simulation.....	41

Liste des Abréviations

1G :	Première Génération
2G :	Deuxième Génération
3G :	Troisième Génération
4G :	Quatrième Génération
5G :	Cinquième Génération
ADSL :	Asymmetric Dgital Subscriber Line
AMI :	Alternate Mark Inversion
AWGN :	Additive White Gaussian Noise
B8ZS :	Bipolar with Eight-Zero Substitution
BS :	Base Station
CDMA :	Code Division Multiple Access
DS-CDMA :	Direct Squence-CDMA
FDMA :	Frequency Division Multiple Access
FEC :	Forward Error Correction
FH-CDMA :	Frequency Hop-CDMA
FN :	Function Node
IES :	Interférence Entre symboles
GSM :	Global System for Mobile Communications
LDPC :	Low Density Parity-Check Code
LDS :	Low Density Signature
LDS-CDMA :	Low Density Signature-CDMA
LDS-OFDM :	Low Density Signature-OFDM
LLR :	Log-Likelihood Ratio
LTE :	Long Term Evolution
MAS :	Multiple Access Schemes
ML :	Maximum Likelihood
MPA :	Message Passing Algorithm

MUSA :	Multi-User Shared Access
NOMA :	Non Orthogonal Multiple Access
NR :	New Radio
OFDM :	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA :	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OMA :	Orthogonal Multiple Access
PAPR :	Peak to Average Power Ratio
PRE :	Physical Ressource Element
PRI :	Primary Rate Interface
QAM :	Quadrature Amplitude Modulation
QoS :	Quality of service
RE :	Quadrature Phase Shift Keying
SCMA :	Ressource Element
SIC :	Successive Interference Cancellation
SPA :	Message Passing Sum-product Algorithm
TEB :	Taux D'erreurs Binaire
TDMA :	Time Division Multiple Access
TS :	Time Slot
UE :	User Equipment
UMB :	Ultra Mobile Broadband
UMTS :	Universal Mobile Telecommunications System
VN :	Variable Node

Introduction général

Les réseaux mobiles ont évolué à travers une série de générations, chacune représente des améliorations technologiques significatives par rapport aux générations précédentes. Les deux premières générations des réseaux mobiles ont d'abord introduit la voix analogique (1G), puis la voix numérique (2G). Générations subséquentes ont soutenu le développement des smartphones en introduisant des connexions de données (3G) et permettant l'accès à Internet. Les réseaux de services 4G ont amélioré les connexions de données, plus rapide, meilleur et capable de fournir une plus grande bande passante pour des utilisations telles que le streaming.

Aujourd'hui, la cinquième génération représente une nouvelle révolution sur le marché mobile qui a changé les moyens d'utiliser les téléphones portables dans des bandes passantes. L'utilisateur n'a jamais connu une telle technologie de haute valeur qui comprend tous type de fonctionnalités avancées et le déploiement en cours de ce nouveau réseau de télécommunications a fait preuve qu'il est le plus puissant et le plus demandé.

Avec la prolifération des utilisateurs mobiles, les systèmes de communication sans fil ont conduit à un progrès progressif dans les générations de systèmes de communication sans fil. Les réseaux sans fil 5G sont en concurrence pour satisfaire les exigences des utilisateurs. Par rapport aux anciens systèmes sans fil, la cinquième génération (5G) doit prendre en charge une efficacité spectrale ultra élevée et des connexions massives, et ces exigences ne peuvent pas être satisfaites en utilisant les techniques traditionnelles d'accès multiple orthogonal (OMA) À cet égard, l'accès multiple non orthogonal (NOMA) a récemment attiré de plus en plus d'attention de la part des universités et de l'industrie et convient donc à la 5G et au-delà.

Pour surmonter tout ça une des techniques NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access), Sparse Code Multiple Access (SCMA) propice est conçue. C'est une technique d'accès multiple qui a son nœud dans la conception du livre de codes optimal, à l'aide de la constellation multidimensionnelle.

L'objectif de ce projet est l'étude et la simulation de l'accès multiple à code fragmenté (SCMA) pour la nouvelle radio 5G.

Ce travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est axé sur la description des différentes techniques d'accès (OMA et NOMA).

En particulier, nous étudions dans le chapitre deux la vue d'ensemble de l'accès multiple par code fragmenté (SCMA), un code schéma de domaine NOMA.

Le dernier chapitre développe une simulation et une analyse des résultats.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion et des perspectives.

Chapitre 1 : Généralité sur les techniques d'accès multiple

1.1 Introduction

En télécommunications, les signaux transportant une information sont véhiculés entre une source et un destinataire en utilisant un support physique (le câble, la fibre optique etc..). Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique, comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...) mais convertis sous une forme numérique. Le principe du système de transmission est alors d'acheminer l'information de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible (débit maximum avec la probabilité d'erreur binaire minimale).

Dans ce premier chapitre, nous allons faire une présentation des techniques d'accès multiple, les plus souvent employées dans les systèmes de communications numériques en décrivant leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs avantages et inconvénients ; nous clôturons ce chapitre avec une brève conclusion.

1.2 Techniques d'accès multiples

Il n'est généralement pas possible d'attribuer à chaque utilisateur son propre canal, d'autant plus que le nombre de personnes interconnectées ne cesse de croître. Il est donc absolument indispensable d'avoir recours au multiplexage.

Le multiplexage consiste à grouper plusieurs voies, dont chacune est attribuée à une communication, en leur permettant de transmettre simultanément sur le même support physique sans se mélanger ou se perturber mutuellement tout en gardant le but de réduire les risques d'encombrement des canaux de transmission et, en parallèle, servir le plus grand nombre d'utilisateurs (rentabilité) tout en garantissant une certaine qualité de service (QoS) c'est-à-dire taux d'erreur, débits, connectivité, délai [1] [2].

En réception, afin de restituer ces voies sous leur forme initiale, l'opération de démultiplexage est indispensable, la **figure 1.1** montre la technique de multiplexage et de démultiplexage [1].



Figure 1.1 : Opérations multiplexage et démultiplexage

Malheureusement comme dans tout partage, cela implique des interactions entre les signaux des utilisateurs.

Pour limiter ces interactions, MAS (Multiple Access Schemes) peut être classé en deux méthodes d'accès multiples [4] :

- La méthode d'accès NOMA (Non Orthogonal Multiple Access).
- La méthode d'accès OMA (Orthogonal Multiple Access).

1.3 L'accès multiple OMA (Orthogonal Access)

En OMA, plusieurs utilisateurs transmettent sur des canaux orthogonaux de sorte qu'il n'y ait pas d'interférence dans la forme d'onde du signal des utilisateurs. Ainsi, le récepteur détecte le signal pour chaque utilisateur sans interférence d'autres utilisateurs avec des performances d'erreur similaires à celles d'un seul utilisateur. La ressource totale du système/largeur de bande W en temps et en fréquence est divisée en M canaux de fréquence entre les utilisateurs. Des exemples de techniques OMA comprenant TDMA (Time Division Multiple Access), FDMA (Frequency Division Multiple Access), OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), CDMA (Code Division Multiple Access) [4].

1.3.1 FDMA (Frequency Division Multiple Access)

1.3.1.1 Définition

FDMA est une technique d'accès multiple par répartition en fréquence, cette technique est considérée des plus ancienne ; c'est une technologie par laquelle la bande passante totale disponible pour le système est divisée en fréquences. Cette division est faite entre des fréquences non superposées qui sont ensuite assignées à chaque paire communicante (2 téléphones). (Voir **figure1.2**)

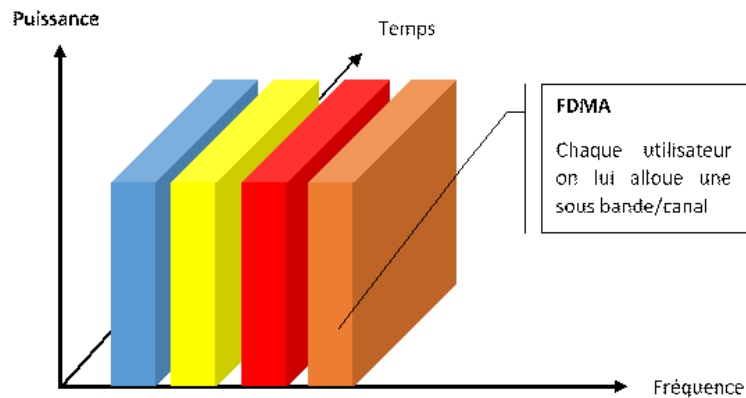


Figure1.2 : Technique d'accès multiple FDMA

Afin d'éviter les interférences entre les différentes sous-bandes on les sépare par des intervalles de garde (guard band), qui sont des intervalles de fréquence, comme c'est illustré dans la **figure 1.3** [1].

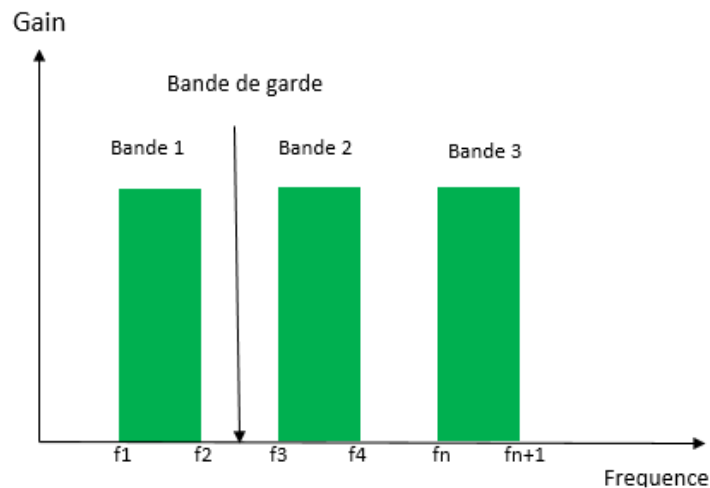


Figure1.3 : Les bandes de garde (guard band)

1.3.1.2 Principe de fonctionnement

Cette méthode sépare les canaux par fréquence, donc si les utilisateurs veulent avoir deux canaux, ils auront deux fréquences distinctes. Si une conversation se déroule sur un canal, elle occupe exclusivement l'ensemble du canal. Il n'y a qu'une seule conversation et un seul utilisateur à la fois par canal radio [5]. Plus de canaux radio nécessitent plus de fréquences.

1.3.1.3 Avantages et inconvénients

✓ Avantages

- Moins de traitement de signal requis (communications bandes étroites).
- Synchronisation temporelle facilitée.

✓ Désavantages

- Sensibilité au fading fréquentiel (pas de diversité fréquentielle).
- Interférence des canaux adjacents.
- Nécessité éventuelle d'intervalle fréquentiel de garde.

1.3.2 TDMA (Time Division Multiple Access)

1.3.2.1 Définition

Le Time division multiple access (TDMA) ou L'accès multiple par répartition dans le temps est un mode de multiplexage permettant de transmettre plusieurs signaux sur un seul canal. Il s'agit d'une méthode d'accès au canal, utilisée pour faciliter le partage de canal sans interférence. TDMA permet à plusieurs stations de partager et d'utiliser le même canal de transmission en divisant les signaux en différents intervalles de temps. Les systèmes mobiles fondés sur le TDMA possèdent une capacité 3 à 6 fois supérieure à celle des systèmes analogiques fondés sur le FDMA [5]. (Voir **figure1.4**)

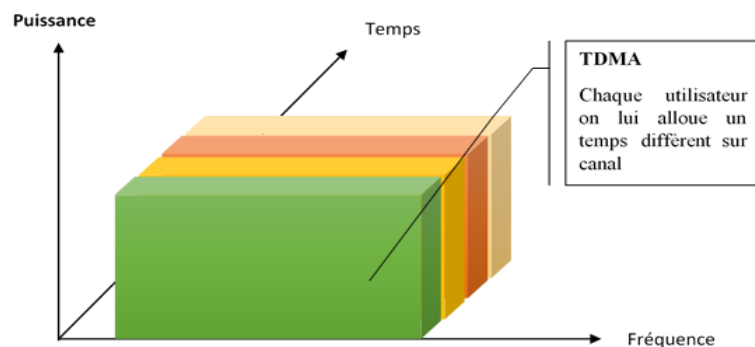


Figure1.4 : Technique d'accès multiple TDMA

1.3.2.2 Principe de fonctionnement

Dans ce système, une même bande de fréquence est partagée par un certain nombre d'utilisateurs, c'est-à-dire attribuer un intervalle (ou slot) de temps unique à chaque utilisateur. Sur chaque TS (Time Slot), un utilisateur unique peut communiquer en utilisant la bande allouée, le processus est répété dans le temps de manière périodique comme montré dans la **figure 1.5**.

Exemple : En GSM $\equiv N=8$ utilisateurs sur 200 kHz de bande.

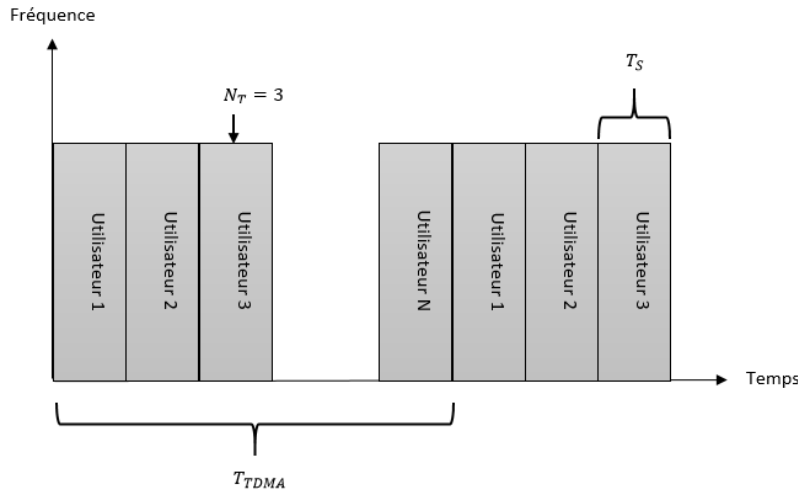


Figure 1.5 : Principe de fonctionnement du TDMA.

1.3.2.3 Avantages et inconvénients

✓ Avantages

- Utilisation de toute la bande de fréquence.
- Plan de fréquence très simplifiée.
- Plusieurs slots peuvent être alloués à la demande.
- Le contrôle de puissance moins strict grâce à l'interférence diminuée.

✓ Inconvénients

- L'inconvénient majeur de la TDMA est la nécessité d'un dispositif de synchronisation du réseau et une légère complexité des équipements des BS (Base Station).
- Grand overhead (La taille de données de service).

1.3.3 CDMA (Code Division Multiple Access)

1.3.3.1 Définition

CDMA est une technique d'accès multiple grâce à laquelle les différents utilisateurs peuvent communiquer simultanément dans une même bande de fréquences ; elle est classée parmi les techniques d'accès par étalement de spectre [1]. La distinction entre les différents utilisateurs s'effectue grâce à un code qui leur est attribué et connu exclusivement par l'émetteur et le récepteur. (Voir **figure 1.6**)

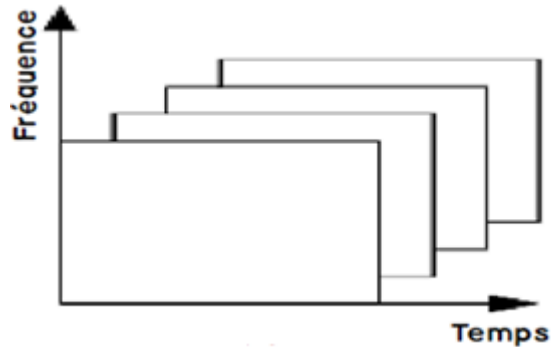


Figure 1.6 : Code Division Multiple Access

1.3.3.2 Principe de fonctionnement

Le principe est le suivant : une clé (ou code) correspond à chaque utilisateur, à l'aide de cette clé son message est codé avant d'être émis ; tous les utilisateurs utilisent les mêmes temps et fréquences pour la transmission, ils sont séparables par leurs codes orthogonaux. Le signal utile de bande étroite est multiplié par un signal de bande large (code d'étalement) et donc chacun des utilisateurs a son propre code, orthogonal aux autres [6].

Tous les autres codes sont vu comme un bruit, les récepteurs détectent le code désiré donc ils doivent connaître le code utilisé de l'émetteur. (Voir **figure 1.7**)

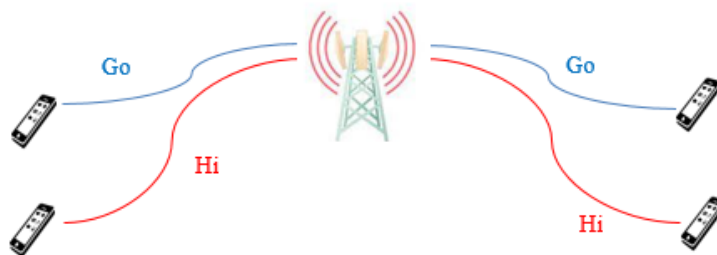


Figure 1.7 : Principe de fonctionnement de CDMA

➤ Variantes CDMA

Il existe deux principaux types de CDMA :

- **FH-CDMA (Frequency Hop-CDMA)**

Fréquence Hopping Code Division Multiple Access est une technique de modulation de base utilisée dans la transmission du signal du spectre à propagation. FH-CDMA est le changement répétitif de fréquence au moment de la transmission radio (un émetteur saute entre toutes les fréquences disponibles sur la base d'un algorithme spécifique) [7].

Certains des avantages sont une protection de la vie privée accrue, une réduction des interférences à bande étroite et une meilleure capacité du canal.

- **DS-CDMA (Direct Sequence-CDMA)**

C'est à ce type de CDMA qu'on fait généralement référence quand on parle de CDMA, et c'est celui que nous avons étudié aussi bien théoriquement qu'expérimentalement [7]. Ici, on multiplie directement le message à transmettre par le code (séquence pseudo-aléatoire). L'étalement spectral du signal codé vient de ce que la fréquence du code est largement supérieure à la fréquence d'envoi des données.

1.3.3.3 Avantages et inconvénients

✓ Avantages

- Large couverture (presque 2 fois que le GSM, économise l'argent pour l'opérateur).
- Efficacité spectrale.
- Gestion de saut de cellules (handover).
- Diversité en fréquence.

✓ Inconvénients

- Les performances du système dégradent avec la croissance du nombre d'utilisateurs.
- Les autres canaux sont des sources de bruit (tout le monde émet sur la même bande de fréquence au même temps)
- Réglages des puissances d'émission doit être fins (chaque émetteur doit émettre avec la même puissance).
- Nécessité d'une égalisation intensive.

1.3.4 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

1.3.4.1 Définition

L'OFDM est une technique très performante de transmission de données analogiques pour les réseaux sans fil à haut débit numérique, apparue depuis les années 60, elle est également une solution efficace pour lutter contre les effets des trajets multiples [11].

C'est un procédé de codage de signaux numérique, son principe est de diviser la bande de fréquence en plusieurs sous-bandes orthogonales, autrement dit transformer un canal large bande en un certain nombre de canaux bande étroite de largeur plus petite que la bande de cohérence du canal [2]. (Voir **figure 1.8**)

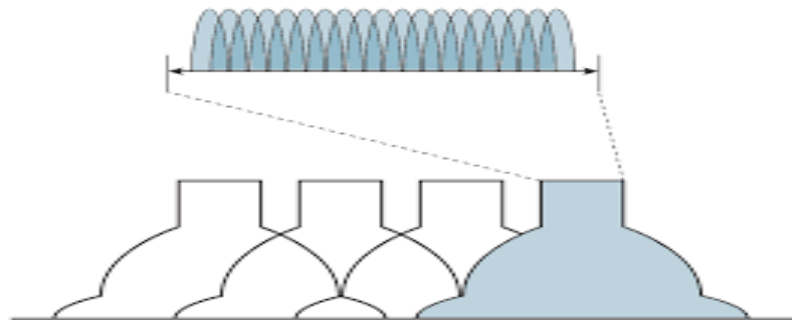


Figure 1.8 : Division en plusieurs sous-porteuses

1.3.4.2 Fonctionnement de l'OFDM

Pour émettre un signal, l'OFDM divise une plage de fréquences en plusieurs sous-canaux (sous-bandes) espacés par des zones libres de tailles fixes (guard band). Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (des émetteurs, par exemple) indépendants et à des fréquences différentes [13].

Afin d'effectuer cette transmission, au lieu de transmettre les données en série comme le font les systèmes mono-porteuse, les systèmes OFDM transmettent les données par bloc en introduisant aux informations utiles de la redondance (appelée intervalle de garde qu'il faut être plus long que le délai maximal du canal multi-trajets), dont la structure cyclique permet, à l'aide de transformées de Fourier, une inversion simple (scalaire) du canal propagation [3].

La technique OFDM est utilisée dans les transmissions par câble et satellite, mais aussi l'ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) fonctionne sur le principe de l'OFDM pour la

diffusion (broadcast) de sons, de données ou de vidéos. Mais de plus en plus, l'OFDM se destine aux systèmes de communications sans fil [12].

1.3.4.3 Avantages et inconvénients

✓ **Avantages**

- Interférence entre symboles faible (IES).
- Encombrement spectral optimal.
- Canal invariant localement.
- Codage.

✓ **Inconvénients**

- Sensibilité aux erreurs de fréquence porteuse.
- PAPR (Peak to Average Power Ratio) élevé (OFDM n'est pas un schéma de modulation à enveloppe constante).

1.3.5 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

1.3.5.1 Définition

L'OFDMA ou Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, est une technique de multiplexage d'accès par porteuses orthogonales, ainsi qu'une technique de codage des données utilisées principalement dans les réseaux de téléphonie mobile de 4^{eme} et 5^{eme} génération, et fait partie de la famille FDMA [10].

C'est une technique qui permet à chaque terminal d'occuper un sous-ensemble d'une sous-porteuse, sachant que chaque sous-ensemble est appelé canal de trafic OFDMA or que chaque canal de trafic est attribué exclusivement à un seul utilisateur à tout moment.

La technique OFDM alloue les utilisateurs dans le domaine temporel seulement, contrairement à la technique OFDMA où les utilisateurs allouent dans les deux domaines temporel et fréquentiel à la fois (Voir la **figure 1.9**).

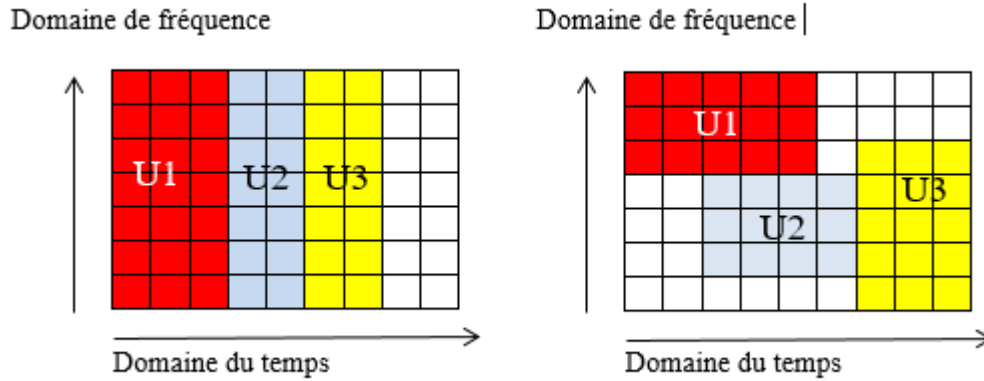


Figure 1.9 : Différence entre l'OFDM et l'OFDMA

1.4 NOMA (Non Orthogonal Multiple Access)

Ces dernières années, les systèmes d'accès multiple non orthogonal (NOMA) ont reçu une attention considérable pour les réseaux cellulaires de cinquième génération (5G) [17] [18].

La principale raison de l'adoption de NOMA dans la 5G tient à sa capacité à servir plusieurs utilisateurs en utilisant les mêmes ressources de temps et de fréquence, elle utilise un codage de superposition au niveau de l'émetteur de telle sorte que le récepteur d'annulation d'interférence successive (SIC) puisse séparer les utilisateurs à la fois dans la liaison montante et dans les canaux de liaison descendante. Il existe deux principales techniques NOMA : domaine de puissance et domaine de code [19].

Le NOMA dans le domaine de la puissance atteint le multiplexage dans le domaine de la puissance, tandis que le NOMA dans le domaine du code réalise le multiplexage dans le domaine du code (SCMA). (Voir **figure 1.10** et **figure 1.11**)



Figure 1.10 : NOMA (Non Orthogonal Multiple Access)

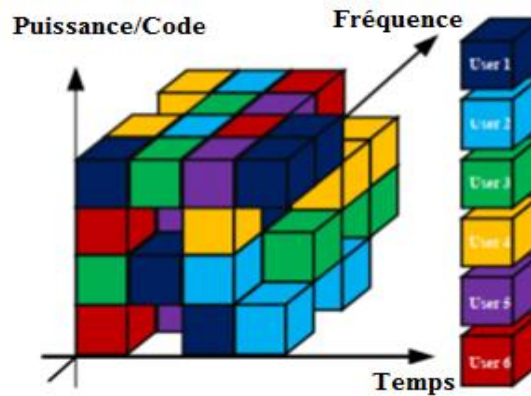


Figure 1.11: Solution NOMA possible [20]

1.4.1 SCMA (Sparse Code Multiple Access) (domaine de code)

L'idée de base de NOMA via le multiplexage de domaine de code est similaire à celle du CDMA, où différents utilisateurs sont attribués avec des codes différents. La transmission multi-utilisateur est alors transportée en utilisant les mêmes ressources temps-fréquence. Il existe des schémas NOMA via le multiplexage de domaine de code : LDS-CDMA (Low Density Signature-CDMA), LDS-OFDM (Low Density Signature-OFDM), SCMA, MUSA (Multi-User Shared Access).

Essentiellement, Sparse Code Multiple Access mappe directement différents flux de données entrants à transmettre à différents mots de code clairsemés [21]. Chaque utilisateur a un livre de codes prédéfini et les zéros de ce livre de codes sera dans les mêmes positions.

1.5 Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis de rappeler les différentes techniques d'accès multiple OMA et NOMA, en donnant plusieurs exemples avec de brèves définitions et en citant leurs avantages et inconvénients pour différencier entre eux. Nous avons aussi abordé la technique SCMA.

Dans le prochain chapitre, nous aborderons SCMA, qui fait l'objet de notre étude dans ce mémoire, de manière détaillée.

Chapitre 2 : Sparse Code Multiple Access (SCMA)

2.1 Introduction

La croissance rapide du trafic et les exigences d'accès omniprésentes sont essentielles pour explorer les réseaux de communication sans fil de la génération courante (5G). Dans le domaine de recherche actuel sur la 5G, l'accès multiple non orthogonal a été proposé comme un changement de paradigme des technologies de couche physique. Parmi toutes les technologies non orthogonales existantes, il a été démontré que le système d'accès multiple à code épars (SCMA) récemment proposé permet d'obtenir de meilleures performances au niveau de la liaison, une connectivité massive, une meilleure qualité de service, un débit plus élevé, moins de latence.

Dans ce chapitre nous présenterons le concept de base du SCMA, ses principales caractéristiques, et enfin ses opérations d'émission et de réception.

2.2 La cinquième génération

La 5G est l'internet du futur. Cette technologie comprend un réseau d'accès radio et un cœur de réseau convergent combinant accès fixe et accès mobile. Elle possède de nombreuses fonctionnalités suffisamment avancées afin de permettre de résoudre un bon nombre de problème de notre vie quotidienne.

Cette nouvelle génération vise des secteurs très variés, qui n'auraient pas nécessairement d'autres éléments communs que cette technologie, mais qui sont des piliers importants d'une société : l'énergie, la santé, les médias, l'industrie et le transport [11]. (Voir la **Figure 2.1**)

Parmi les principaux objectifs de la 5G :

- De plus gros forfaits data : le volume de données devra être 1000 fois plus élevé.
- Moins d'antennes : le nombre de terminaux pouvant être connectés par antenne devra être 100 fois supérieur, mais le nombre d'antennes dépend surtout des fréquences utilisées.
- Les meilleurs débits (1 Gb par seconde).
- Un temps de « latence » plus court donne l'impression que le réseau est très réactif.
- Plus de batterie, moins de consommation.

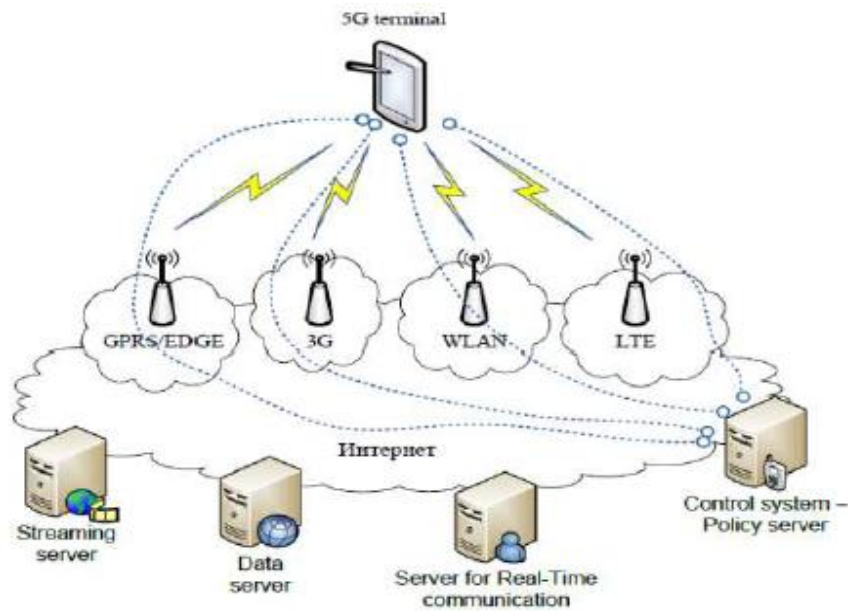


Figure 2.1 : Architecture fonctionnelle pour les réseaux mobiles 5G

2.3 Définition de SCMA

L'accès multiple à code clairsemé (SCMA) est un nouveau système d'accès multiple qui appartient à NOMA, se bénéficie encore de la technique de réception à faible complexité, mais avec de meilleures performances par rapport à LDS.

Dans SCMA, la procédure de mappage et de diffusion des symboles bit to QAM sont combinées et les bits entrants sont directement mappés à un mot de code multidimensionnel d'un ensemble de code SCMA. Chaque couche (utilisateur) a son codebook dédié. Façonner le gain d'une constellation multidimensionnelle est la principale source de l'amélioration des performances par rapport à la simple répétition des symboles QAM dans LDS [25]. En général, la conception du codebook SCMA est un problème d'optimisation.

2.4 Concept de base du SCMA

Au niveau de l'émetteur, le codeur SCMA avec J utilisateurs (couches) et K ressources physiques effectue un mappage à partir de $m = \log_2 M$ bits dans un livre de codes complexe de dimension K et de taille M , qui peut être défini comme

$$f : \mathbb{B}^{\log_2 M} \rightarrow \mathcal{X}, \quad \mathbf{x} = f(\mathbf{b})$$

Où \mathbf{b} désigne les bits codés du canal entrant, $M = 2^m$, $\{m = 1, 2, 3, \dots\}$ et $\mathbf{x} \in \mathcal{X} \subset \mathbb{C}^k$ avec $|\mathcal{X}| = M$ [23].

Le mot de code complexe K –dimensionnel \mathbf{x} est un vecteur clairsemé avec $N < K$ (N entrées non nulles). Chaque couche $j = 1, \dots, J$ a son propre livre de codes pour générer le mot de code souhaité en fonction du flux d'entrée binaire.

Un encodeur SCMA peut être redéfini comme $f: \equiv \mathbf{V}\mathbf{g}$ où la matrice de mappage binaire $\mathbf{V} \in \mathbb{B}^{k \times N}$ mappe simplement les N dimensions d'un point de constellation à un mot de code SCMA à K –dimensions.

Notons que \mathbf{V} contient $K - N$ lignes nulles et par conséquent, tous les mots de code contiennent $\mathbf{0}$ dans les mêmes $K - N$ dimensions [23]. Éliminant toutes les lignes nulles de \mathbf{V} le reste peut être représenté par une matrice d'identité \mathbf{I}_N ce qui signifie que le mappeur binaire ne permute pas les dimensions du sous-espace \mathcal{C} pendant le processus de mappage. Le livre de codes résultant contient M codewords, chacun composé de K valeurs complexes à partir desquelles seul un maximum N est différent de zéro spécifié par la matrice \mathbf{V} [12].

La **figure 2.2** représente un modèle de système de base SCMA qui est similaire au modèle de transmission LTE, et qui peut être utilisé à la fois pour la liaison montante et la liaison descendante [13].

Le SCMA utilise un étalement à faible densité qui a été utilisé dans la technique LDS en CDMA et ci-après appelé étalement clairsemé.

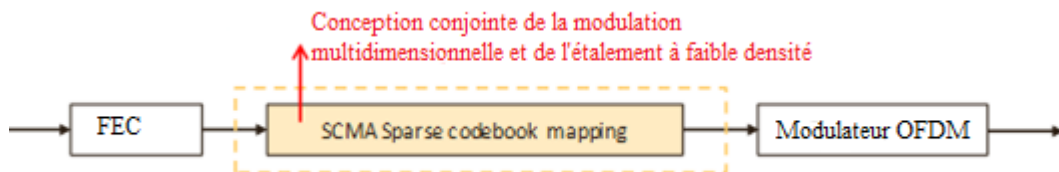


Figure 2.2 : Modèle de système de base SCMA

2.5 Mappage du livre de codes

SCMA a un mappage de couche similaire à LTE, c'est -à-dire une ou plusieurs couches SCMA peuvent être attribuées à un utilisateur / flux de données.

Le modulateur SCMA mappe les bits d'entrée à un mot de code complexe multidimensionnel sélectionné dans un livre de codes SCMA spécifique à la couche. Ces mots de code sont rares, autrement dit que peu de leurs entrées sont non nulles et les autres sont nulles [21].

Tous les mots de code SCMA correspondant à une couche SCMA ont un emplacement unique d'entrées non nulle [13].

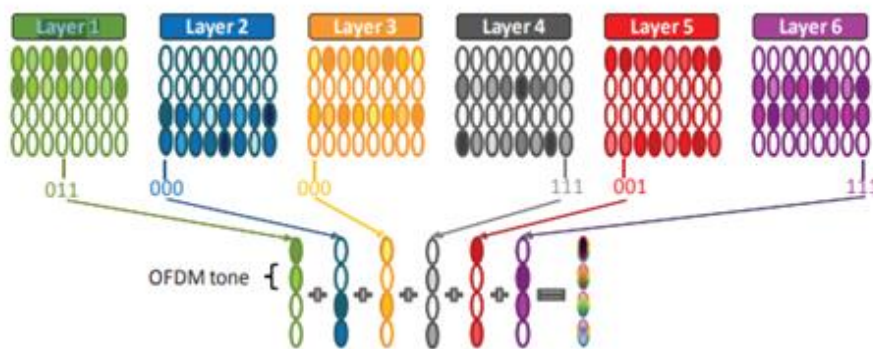


Figure 2.3 : Mappage bit à mot de code SCMA

La **figure 2.3** représente un exemple de 6 codebooks pour la transmission de 6 flux de données. Comme on peut le voir, chaque livre de code contient 8 mots de code complexes multidimensionnels qui correspondent à 8 points de constellation et la longueur de chaque mot de code est de 4, ce qui correspond à la longueur d'épandage.

Lors de la transmission, les mots de code des différentes couches sont combinés avant le modulateur OFDM dans la liaison descendante.

Quant à la liaison montante, pour une transmission UE (User Equipment) à couche unique, chaque mot de code est d'abord introduit dans le modulateur OFDM.

La conception du livre de codes SCMA est basée sur l'optimisation conjointe de la conception du modèle d'épandage clairsemé et de la conception de la modulation multidimensionnelle.

En général, l'objectif de la génération du livre de codes est de fournir de bonnes propriétés de distance parmi les points de l'ensemble de la constellation multidimensionnelle pour maximiser le codage / mise en forme.

Une caractéristique des livres de codes SCMA est la possibilité d'avoir moins de points de projection sur chaque élément de ressource ; cela est dû à la nature multidimensionnelle du livre de codes qui permet à deux points de constellation d'entrer en collision sur certaines des composantes non nulles, vu qu'ils peuvent être séparés sur les autres composantes non nulles. La **figure 2.4** illustre un exemple où les points de constellation correspondant à 100 et 000 entrent en collision sur le premier ton, mais qui sont séparés sur le deuxième, ce qui signifie que le nombre de points de projection est égal à 4 au lieu de 8 [13].

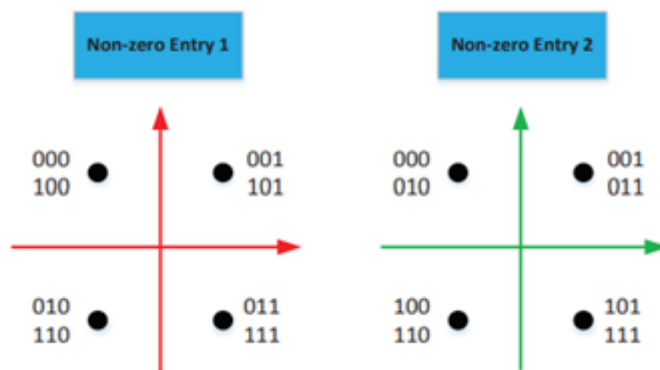


Figure 2.4 : Exemple de mot de code SCMA 8-points

2.6 Procédure d'accès Multiple

La **figure 2.5** représente un exemple d'accès multiple à 6 utilisateurs où chaque utilisateur se voit attribuer un livre de codes SCMA spécifique à sa couche. Au niveau du codeur FEC (Forward Error Correction) se fait le contrôle des erreurs dans la transmission de données sur des canaux de communication peu fiables ou bruyants. L'idée centrale est que l'expéditeur code le message de manière redondante, les bits codés de chaque utilisateur sont directement mappés au mot de code SCMA conformément à son codebook attribué ; ces mots de codes sont ensuite combinés sur des tonalités OFDM et les symboles sont transmis sous forme de blocs SCMA.

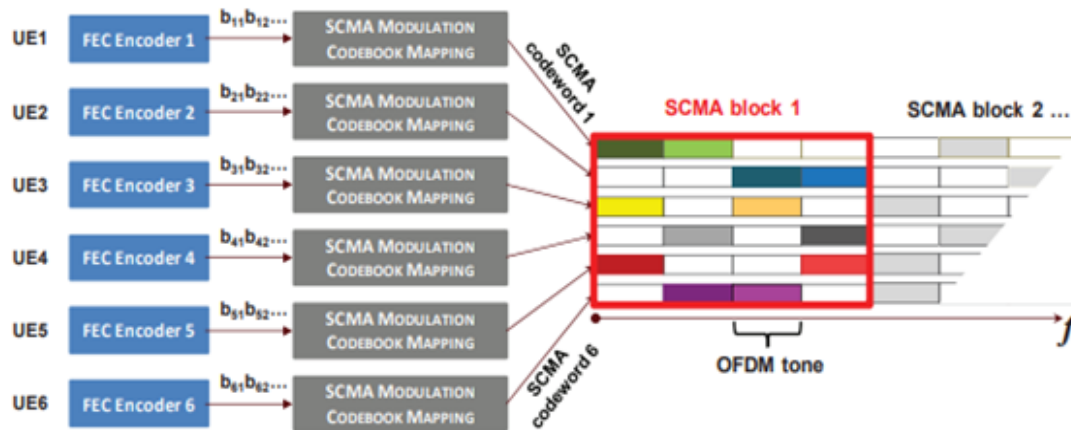


Figure 2.5 : Accès multiple avec SCMA

2.7 Modèle de système

Dans NR (New Radio), l'accès multiple non orthogonal (NOMA) est l'un des sujets les plus populaires, avec 15 schémas NOMA différents proposés. En général, elle peut soutenir efficacement une capacité avec une plus grande flexibilité et robustesse, ainsi que l'adaptabilité vers un grand nombre de connexions. Ces propriétés contribuent à une meilleure expérience utilisateur [14].

Dans SCMA, plusieurs utilisateurs transmettront sur la même ressource blocs avec différents codebooks. Avec des livres de code clairsemés, la collision entre les utilisateurs est réduite, donc SCMA annule les interférences inter-utilisateurs.

Nous avons dans la **figure 2.6** un système de transmission SCMA qui est suffisamment éclairé et qui sera discuté dans les sections suivantes.

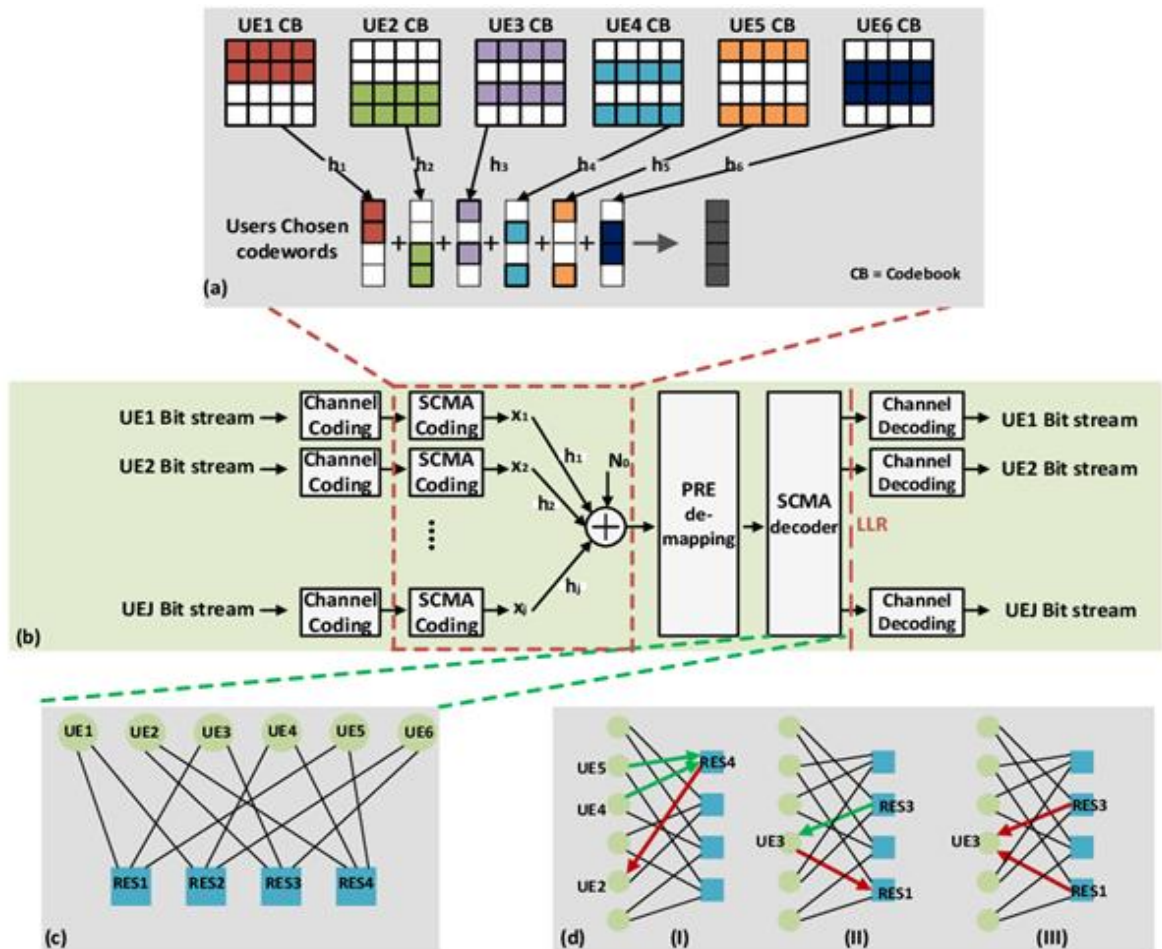


Figure 2.6 : Chaîne de liaison montante SCMA avec codage de canal

2.7.1 Codage de canal

Le codage de canal adapte le message généré par la source au canal de transmission. L'encodeur de canal accepte en entrée un ensemble de messages de longueur fixe et mappe l'alphabet source dans un alphabet de canal, puis introduit un ensemble de symboles de redondance afin de protéger le message et l'envoie enfin via le canal [22] [15].

Il existe trois schémas de codage de canal :

- Turbo.
- LDPC (Low Density Parity-Check Code).
- Codes polaires.

Ces schémas ont été sélectionnés comme candidats pour les communications sans fil de 5^{ème} génération (5G), en raison de leur performances et implémentation à la pointe de la technologie [26].

Les codes Turbos sont une classe de codes FEC haute performance développés vers 1990-91, qui ont été les premiers codes pratiques à se rapprocher auprès de la capacité du canal, un théorique maximum pour le débit de code auquel une communication fiable est encore possible compte tenu d'un niveau de bruit [26].

Les codes Turbos sont utilisés dans les communications mobiles 3G/4G (par exemple, dans UMTS et LTE) et dans les communications par satellite (dans l'espace lointain) ainsi que dans d'autres applications recherchées par les concepteurs pour obtenir un transfert d'informations fiables sur une communication a bande passante ou à latence limitée en présence du bruit corrompant les données. Ils sont en concurrence avec les codes LDPC, qui fournit des performances similaires. Le nom "Turbo code" est né de la boucle de rétroaction utilisée pendant le décodage de code turbo normal, qui a été analogue au retour d'échappement utilisé pour le moteur suralimentation [14].

2.7.2 Encodage et décodage SCMA

Les opérations de codage, à la fois pour la liaison montante et la liaison descendante, impliquent le remplacement du modulateur QAM (Quadrature Amplitude Modulation) par un modulateur SCMA qui mappe les bits codés directement sur le mot de code multidimensionnel à partir des livres de codes normalisés. Les opérations de décodage remplacent l'égalisation du canal d'un utilisateur unique et le démappeur QAM du récepteur LTE existant par un démodulateur SCMA qui détecte conjointement les couches de données superposées et fournit des résultats LLR (Log-Likelihood Ratio) séparés aux turbo-décodeurs de chaque couche. En raison de la nature clairsemée des livres de codes SCMA, un algorithme de passage de message de faible complexité MPA (Message Passing Algorithm) [11] pourrait être utilisé pour obtenir des performances de détection à probabilité maximale proches avec une complexité raisonnable.

2.7.3 Encodage SCMA

La procédure de codage SCMA est définie comme un mappage de m bits à un livre de codes complexe K –dimensionnel de taille M ($M = 2^m$).

Les mots de code complexes à K dimensions sont constitués de $N < K$ éléments non nuls. Chaque utilisateurs j a un livre de codes unique parmi l'ensemble des livres de codes J [14].

Cas pratique :

Les utilisateurs J (généralement appelés couches) peuvent transmettre des informations sur K ressources orthogonales simultanément.

Le facteur de surcharge est défini comme $\lambda = J/K$. Un exemple de livre de codes, défini pour $J = 6$ et $K = 4$, est présenté ci-dessous :

$$\mathbf{CB}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -0.1815 - 0.1318j & 0 & 0.7851 \\ 0 & -0.6351 - 0.4615j & 0 & -0.2243 \\ 0 & 0.6351 + 0.4615j & 0 & 0.2243 \\ 0 & 0.1815 + 0.1318j & 0 & -0.7851 \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{CB}_2 = \begin{bmatrix} 0.7851 & 0 & -0.1815 - 0.1318j & 0 \\ -0.2243 & 0 & -0.6351 - 0.4615j & 0 \\ 0.2243 & 0 & 0.6351 + 0.4615j & 0 \\ -0.7851 & 0 & 0.1815 + 0.1318j & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{CB}_3 = \begin{bmatrix} -0.6351 + 0.4615j & 0.1392 - 0.1759j & 0 & 0 \\ 0.1815 - 0.1318j & 0.4873 - 0.6156j & 0 & 0 \\ -0.1815 + 0.1318j & -0.4873 + 0.6156j & 0 & 0 \\ 0.6351 - 0.4615j & -0.1392 + 0.1759j & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{CB}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.7851 & -0.0055 - 0.2242j \\ 0 & 0 & -0.2243 & -0.0193 - 0.7848j \\ 0 & 0 & 0.2243 & 0.0193 + 0.7848j \\ 0 & 0 & -0.7851 & 0.0055 + 0.2242j \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{CB}_5 = \begin{bmatrix} -0.0055 - 0.2212j & 0 & 0 & -0.6351 + 0.4615j \\ -0.0193 - 0.7848j & 0 & 0 & 0.1815 - 0.1318j \\ 0.0193 + 0.7848j & 0 & 0 & -0.1815 + 0.1318j \\ 0.0055 + 0.2242j & 0 & 0 & 0.6351 - 0.4615j \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{CB}_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0.7851 & 0.1392 - 0.1759j & 0 \\ 0 & -0.2243 & 0.4873 - 0.6156j & 0 \\ 0 & 0.2243 & -0.4873 + 0.6156j & 0 \\ 0 & -0.7851 & -0.1392 + 0.1759j & 0 \end{bmatrix}^T.$$

Où \mathbf{CB}_j est un livre de code pour l'utilisateur j . Les colonnes de livres de codes sont des mots de code, donc chaque utilisateur mappe $m = 2$ bits à l'un des $M = 4$ mots de code à quatre dimensions [27] [14].

La conception du livre de codes multidimensionnels est l'un des problèmes les plus important pour SCMA car ses performances dépendent fortement de ce livre et c'est ce qui la particularise des autres schémas d'accès non orthogonaux. En effet, cette conception permet l'amélioration de l'efficacité spectrale et a un impact direct sur la complexité de détection.

2.7.4 PRE mapping

Chaque mot de code a quatre points de constellation et il existe également quatre PRE (Physical Ressource Element), dans ce cas, chaque point de constellation d'un mot de code serait transmis sur un PRE (voir la **Figure 2.7**). Étant donné que dans la mise en œuvre, il y a six couches / utilisateurs de données et quatre ressources physiques, pour transmettre chaque élément d'un mot de code de six utilisateurs sur un PRE, six points de constellation doivent être additionnés puis transmis. De plus, les bits entrants pour chaque couche de données sont indépendants et traités en parallèle, de sorte que ce qui serait mappé à PRE est la somme de six points de constellation de six couches de données différentes. Le traitement PRE est schématisé par la **figure 2.8**.



Figure 2.7 : PRE Mapping

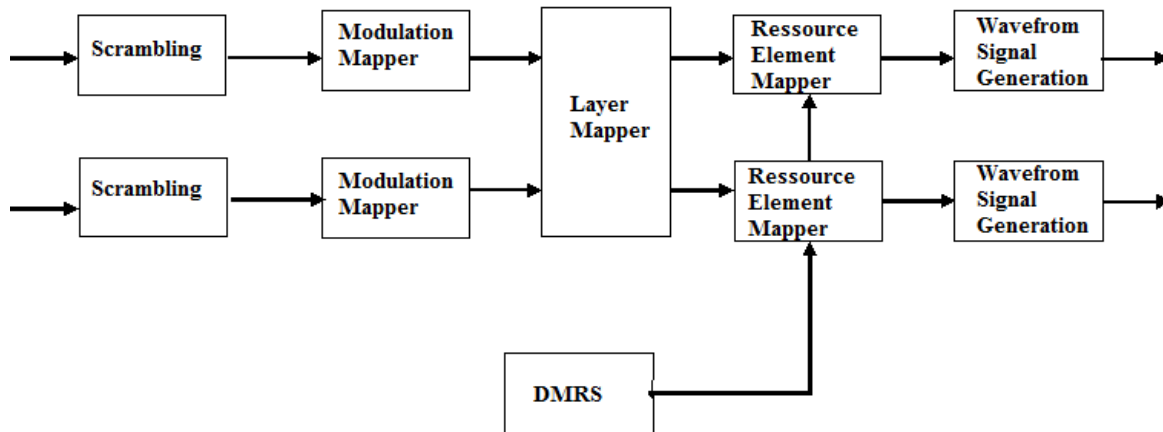


Figure 2.8 : Le schéma bloc de PRE Mapping

✓ Scramling (Embrouillage)

Le brouillage est une technique qui n'augmente pas le nombre de bits et assure la synchronisation. Le problème avec une technique comme l'AMI bipolaire (Alternate Mark Inversion) est que la séquence continue de zéro crée des problèmes de synchronisation, une solution à cela est le brouillage [28]. Il y a deux techniques de brouillage :

- B8ZS (bipolar with eight-zero substitution)
- HDB3 (Modified AMI Code)

➤ Techniques de modulations

Le type de la modulation utilisée dépend du canal et des paramètres négociés par les protocoles de la couche supérieure.

❖ QPSK modulation (Quadrature Phase Shift Keying)

Dans le cas de QPSK, un groupe de 2 bits $[S_0, S_1]$ est mappé en un symbole de modulation complexe $(m_I(k) + j m_Q(k))$, $m_I(k)$ et $m_Q(k)$ étant les composantes en phase et en quadrature, comme l'indique le **tableau 2.1** et la **figure 2.9**.

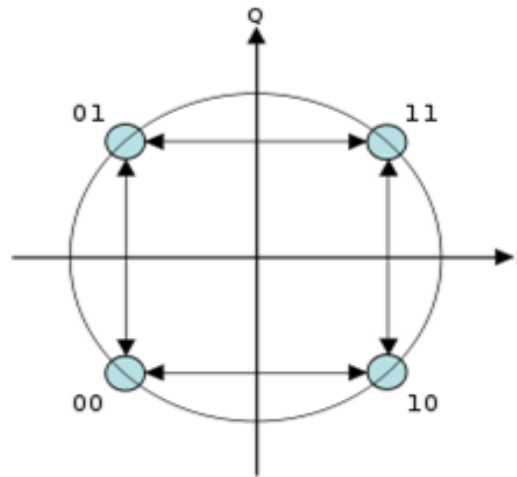


Figure 2.9 : Constellation de signaux pour QPSK Modulation

Indice k	Bits d'entrées du modulateur		Symboles de modulation	
	S_0	S_1	$m_I(k)$	$m_Q(k)$
1	0	0	$-D=1/\sqrt{2}$	$-D$
2	0	1	$-D$	D
3	1	0	D	$-D$
4	1	1	D	D

Tableau 2.1 : Les valeurs des constellations pour QPSK

❖ 16-QAM Modulation

Dans le cas d'une modulation 16-QAM, un groupe de 4 bits [$S_0 S_1 S_2 S_3$] est mappé dans le signal de constellation comme indiqué sur la figure 2.10.

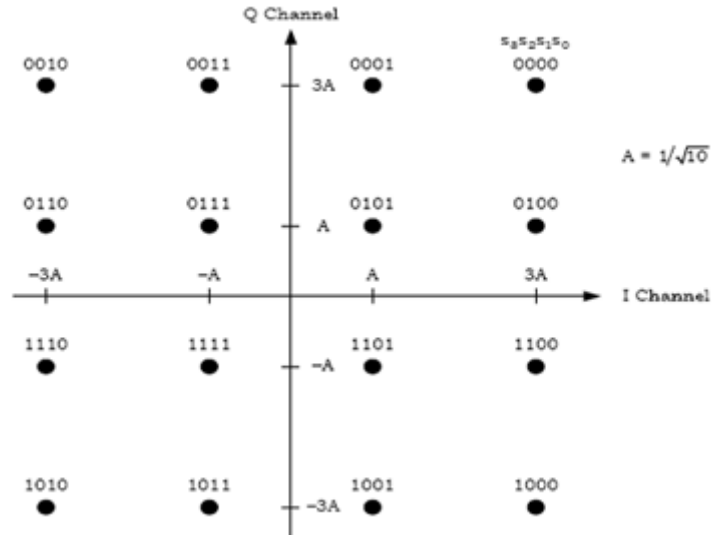


Figure 2.10 : Constellation de signaux pour la modulation 16-QAM

Les parties I et Q du symbole de modulation sont données par les parties réelles et imaginaires du mappage de symboles dans l'espace complexe.

Exemple :

Pour $[S_0 S_1 S_2 S_3]$, et comme montré par la **figure 2.10**, nous avons :

$$\begin{cases} m_I(k) = 3A \\ m_Q(k) = -3A \end{cases}$$

2.7.5 Les canaux

On appelle canal de transmission dans un réseau tout milieu physique servant de support au transfert d'une certaine quantité d'information d'une source vers un destinataire ; il existe 5 canaux de communication qui sont : câbles à paires torsadées, câbles coaxiaux, câbles à fibres optiques, et faisceaux hertziens [16].

2.7.6 Décodage SCMA

❖ **Schéma de détection**

Les codewords des codebooks sont rares, de sorte que la technique de détection MPA (Message Passing Algorithm) multi-utilisateurs a été utilisée pour détecter les mots de code multiplexés. La **figure 2.11** illustre le schéma fonctionnel d'un système de détection SCMA.

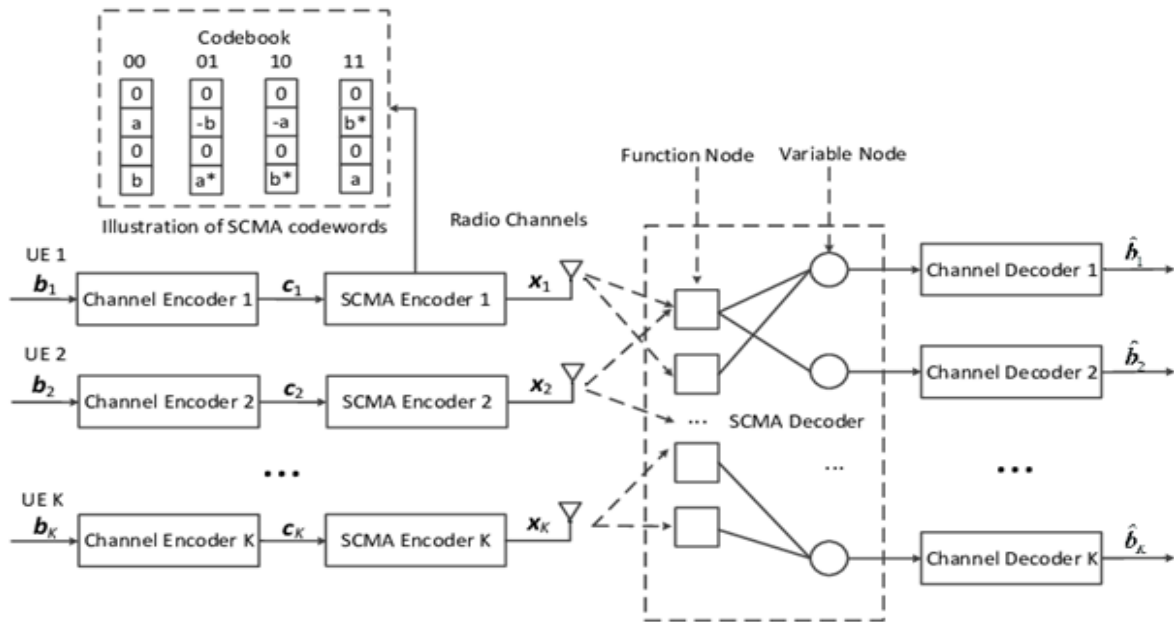


Figure 2.11 : Schéma fonctionnel pour les systèmes SCMA de liaison montante

❖ La représentation du Factor Graph

La structure à faible densité des mots de codes SCMA peut être efficacement caractérisée par un *factor graph*, comme dans les codes LDPC et ceci est illustré dans la **figure 2.12**, auquel est associée la matrice creuse F . Celle-ci est utilisée par le décodeur MPA pour faire passer les messages entre les *VNs* (Variables Nodes) et les *FNs* (Function Nodes) dans le but de détecter les signaux reçus y .

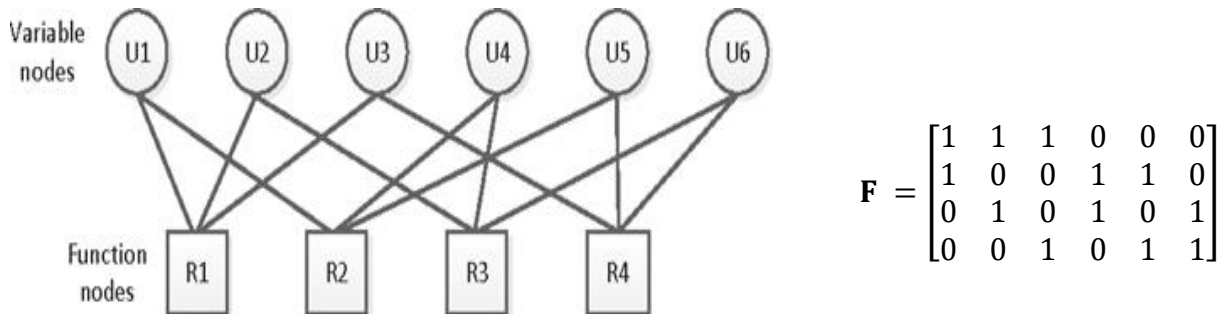


Figure 2.12 : Représentation du Factor Graph en SCMA

Les nœuds de fonction (FN) désignent le signal reçu, et les nœuds de variable (VN) désignent les codewords de chaque utilisateur.

Les lignes de \mathbf{F} indiquent les ressources, et les colonnes indiquent les couches. Un vecteur colonne binaire $\mathbf{f}(j)$ de longueur K est utilisé pour indiquer les positions des entrées zéro (avec le chiffre 0) et des entrées non nulles (avec le chiffre 1) du j – ème livre de codes [10].

Ensuite, le (k, j) ème élément de \mathbf{F} , noté $f(k; j)$ est 1 si la j – ème couche apporte ses données au k – ème ressource. En conséquence, laissez les nœuds de variable J (VN) et les nœuds de fonction K (FN) dans le graphe factoriel représenter les couches et les ressources, respectivement, et le j – ème VN est connecté au k – ème FN si et seulement si $f(k, j) = 1$. Dans ce qui suit on note :

$$\varphi_k = \{j : 1 \leq j \leq J, f_{k,j} = 1\},$$

$$\varphi_j = \{k : 1 \leq k \leq K, f_{k,j} = 1\}.$$

$$\mathbf{Y} = \overbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}}^{\mathbf{F}} \times \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{u1} \\ \mathbf{C}_{u2} \\ \mathbf{C}_{u3} \\ \mathbf{C}_{u4} \\ \mathbf{C}_{u5} \\ \mathbf{C}_{u6} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{n}_2 \\ \mathbf{n}_3 \\ \mathbf{n}_4 \end{pmatrix} \quad (1)$$

L'équation (1) représente le signal reçu passant par le canal AWGN ; où \mathbf{F} est la matrice résultante du factor graph, les \mathbf{C}_{uj} sont les mots de code des différents utilisateurs j et \mathbf{n}_k est le bruit additif du canal.

✓ **Message Passing Algorithm (MPA)**

MPA est un graphe factoriel basé sur un algorithme de détection quasi optimal et itératif. Le graphe contient deux types différents de nœuds : les nœuds de fonction (FN), représentant les K sous-porteuses, et les nœuds variables (VN), représentant les J utilisateurs

actifs. Le VN_j est connecté au FN_k lorsque l'utilisateur j utilise la sous-porteuses k , c'est-à-dire $X_{k,j} \neq 0$ [23].

La **figure 2.13** représente le décodeur MPA (effectué pour chaque bloc SCMA) :

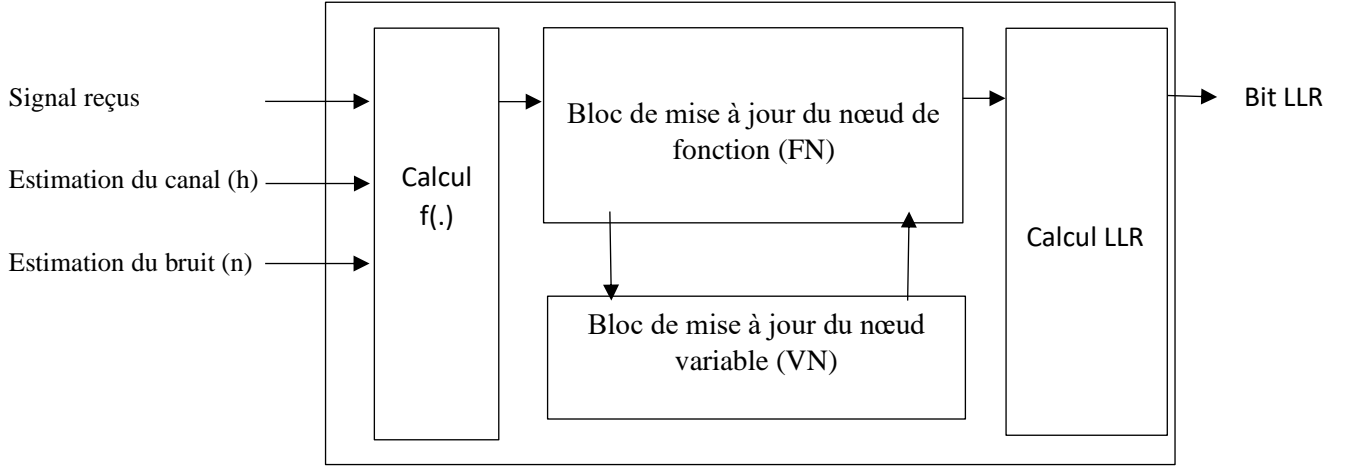


Figure 2.13 : Schéma bloc du décodeur MPA

Notons $N(j) = \{j, x_{jk} \neq 0\}$ l'ensemble des utilisateurs émettant sur la sous-porteuse k et $R(k) = \{k | x_{jk} \neq 0\}$ l'ensemble des sous-porteuses portant les informations de l'utilisateur j .

Le signal reçu après le multiplexage de couche synchrone peut être exprimé comme suit :

$$\mathbf{y} = \sum_{j=1}^N \text{diag}(\mathbf{h}_j) \mathbf{x}_j + \mathbf{n}_0 \quad (2)$$

Où $\mathbf{x}_j = (x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,N})^T$ est le mot de code de l'utilisateur j , $\mathbf{h}_j = (h_{j,1}, h_{j,2}, \dots, h_{j,N})^T$ est le vecteur de canal de la couche j , et \mathbf{n}_0 est le vecteur du bruit blanc Gaussien additif. Dans le cas où toutes les couches sont transmises à partir du même point d'émission, tous les canaux vers un récepteur cible sont identiques c'est-à-dire $\mathbf{h}_j = (h_{j,1}, h_{j,2}, \dots, h_{j,N})^T$, $\forall j$. Le signal reçu au nœud de ressource k est présenté comme \mathbf{y}_k . Comme les mots de code sont rares, seuls quelques-uns d'entre eux entrent en collision sur le nœud de ressource k [29].

MPA vise à estimer le mot de code transmis $\hat{\mathbf{x}}$ étant donné le signal observé \mathbf{y} avec une complexité de calcul abordable.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_j &= \arg \max_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} \sum_{\mathbf{x}_i \in \mathcal{X}^k} p(x_1, \dots, x_j | \mathbf{y}) \\ &= \arg \max_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} \sum_{\{X_i\} \in \mathcal{X}^i} \prod_{i=0}^j p(x_i) \prod_{j \in \mathcal{R}(k)} p(\mathbf{y} |_{j, X_i}, l \in \mathcal{N}(j)) \end{aligned} \quad (3)$$

Où $\{X_i\}$ fait référence à l'ensemble des mots de code des utilisateurs correspondants, χ représente le j – ième livre de codes de l'utilisateur avec $|\chi| = M$ et \mathcal{X}^J est l'ensemble des livres de codes d'utilisateurs J . Chaque itération d'AMP se compose de deux étapes principales

- La transmission d'informations des *FNs* aux *VNs*

Et

- Echange d'informations entre les *VNs* et les *FNs*.

Soit $(m_{k \rightarrow j}^t(x_j))$ l'information extrinsèque envoyée de *FN* à *VN* $j \in \mathcal{N}(k)$ pour le mot de code correspondant à la t – ième itération. De même, $(g_{k \rightarrow n(x_k)}^t)$ est l'information extrinsèque transmise de *VN* à *FN* $k \in \mathcal{R}(j)$ pour le mot de code correspondant \mathbf{X}_j à la t – ième itération. Le processus AMP est défini comme suit [29] :

✓ **Étape 1 : Initialisation**

La probabilité a priori d'avoir envoyé un mot de code est uniforme, d'où

$$I_{j \rightarrow k}^0(\mathbf{x}_j) = P(\mathbf{x}_j) \frac{1}{M} \quad \forall j = 1, \dots, J, \quad \forall k \in \mathcal{R} \quad (4)$$

✓ **Étape 2 : échange de messages itératif**

a) Transmission d'informations de *FN* à *VN*

Pour un mot de code donné \mathbf{x}_j , le message passé de *FN* _{k} à *VN* _{j} est donné comme suit :

$$I_{k \rightarrow j}^t(\mathbf{x}_k) = \sum_{\{x_i | i \in \mathcal{N}(k) \setminus j\}} \exp \left\{ \frac{-1}{\sigma^2} \|\mathbf{y}_j - \sum_{x_{k_j}} h_{kj} x_{k_j}\|^2 \right\} \prod_{i \in \mathcal{N}(k) \setminus j} I_{i \rightarrow k}^{t-1}(\mathbf{x}_i) \quad (5)$$

b) Transmission d'informations de *VN* à *FN*

Ensuite, le message passé de *VN* _{k} à *FN* :

$$I_{j \rightarrow k}^t(k) = \frac{1}{M} \prod_{i \in \mathcal{R}(j) \setminus k} m_{i \rightarrow j}^{t-1}(\mathbf{x}_j) \quad (6)$$

La normalisation des messages est nécessaire à ce niveau pour garantir que la somme de toutes les probabilités de mots de code est égale à un :

$$I_{k \rightarrow j}^t(\mathbf{x}_j) = \frac{\prod_{(i \in \mathcal{R}(j))k} m_{i \rightarrow j}^{t-1}(\mathbf{x}_j)}{\sum_{\mathbf{x}_j} \prod_{(i \in \mathcal{R}(j))k} m_{i \rightarrow j}^{t-1}(\mathbf{x}_j)} \quad (7)$$

✓ **Étape 3** : calcul *LLR* et estimation des bits

L'algorithme doit itérer suffisamment c'est-à-dire T itérations, disons, pour converger. Ensuite, la probabilité a posteriori du mot de code correspondant \mathbf{X}_j , définie par $Pr(\mathbf{X}_j)$, est représentée par :

$$Pr(\mathbf{X}_j) = \frac{1}{M} \prod_{k \in \mathcal{R}(j)} I_{k \rightarrow j}^T(\mathbf{X}_j) \quad (8)$$

Les rapports binaires *log*-vraisemblance (*LLRs*) pour décider des bits $\log_2(M)$ sont :

$$LLR(b_i) = \log \frac{\sum_{(\mathbf{x}_j \in \mathcal{X} | b_i=0)} Pr(\mathbf{X}_j)}{\sum_{(\mathbf{x}_j \in \mathcal{X} | b_i=1)} Pr(\mathbf{X}_j)} \quad (9)$$

Ensuite, chaque bit utilisateur, \hat{b}_i avec $i \in \{1, \dots, \log_2(M)\}$, est estimé en comparant *LLR* au niveau du bit à 0 tel que :

$$\begin{cases} \hat{b}_i = 1 & \text{si } LLR \leq 0 \\ \hat{b}_i = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

✓ **Log – MPA**

Même si MPA est beaucoup moins complexe que l'algorithme ML (Maximum Likelihood) avec des performances presque optimales, il souffre toujours d'une complexité élevée, notamment en raison du grand nombre d'expositions impliquées opérations exponentielles et opérations de multiplication. Par conséquent, convertissez l'algorithme pour enregistrer le domaine ce Log-MPA connu. L'idée clé est de déplacer le processus de décodage itératif dans le domaine logarithmique pour éliminer tous les termes exponentiels dans MPA [30].

$$L_{k \rightarrow j}^t(\mathbf{x}_j) = -\log M \quad \forall j = 1, \dots, K, \forall k \in \mathcal{R}(j) \quad (10)$$

✓ **Étape 1** : échange de messages itératifs

a) Transmission d'informations de FN à VN

Pour un mot de code donné, le message transmis dans le domaine \log de FN peut-être calculé comme suit:

$$L_{k \rightarrow j}^t(\mathbf{x}_j) = \max_{\mathbf{x}_j | i \in \mathcal{N}(k)} \left\{ \frac{-1}{\sigma^2} \|\mathbf{y}_j - \sum_{\substack{k \\ \mathbf{x}_{kj} \neq 0}} h_{kj} \mathbf{x}_{kj}\|^2 + \sum_{i \in \mathcal{N}(k) \setminus k} L_{j \rightarrow k}^t(\mathbf{x}_j) \right\} \quad (11)$$

b) Transmission d'informations de VN à FN

Le message de domaine journal transmis de VN_j à FN_k pour le mot de code \mathbf{x}_j est ensuite modifié comme suit:

$$L_{j \rightarrow k}^t(\mathbf{x}_j) = \log\left(\frac{1}{M}\right) + \sum_{(i \in \mathcal{R}(j) \setminus k)} L_{i \rightarrow j}^{t-1}(\mathbf{x}_j) \quad (12)$$

Par souci de simplicité, l'opération de normalisation utilisée pour contrôler la zone de variation de la valeur de probabilité $L_{j \rightarrow k}^t$ de domaine logarithmique peut être ignorée dans le domaine logarithmique puisque tous les termes exponentiels sont éliminés.

✓ **Étape 2** : calcul LLR et estimation des bits

$$Q(\mathbf{x}_j) = \log\left(\frac{1}{M}\right) + \sum_{(i \in \mathcal{R}(j) \setminus k)} L_{i \rightarrow j}^{t-1}(\mathbf{x}_j) \quad (13)$$

Ensuite, les LLR par bit sont calculés comme suit

$$LLR(b_i) = \log \frac{\sum_{\substack{\mathbf{x}_j \in \mathcal{X} \\ |b_i=0}} e^{Q(\mathbf{x}_j)}}{\sum_{\substack{\mathbf{x}_j \in \mathcal{X} \\ |b_i=1}} e^{Q(\mathbf{x}_j)}} \quad (14)$$

✓ **Log – MPA avec seuil**

Dans l'algorithme Log-MPA actuel, le nombre d'itérations est généralement une valeur fixe. Autrement dit, indépendamment du fait que la séquence décodée soit suffisamment convergente, un certain nombre d'itérations doivent être effectuées, ce qui entraînera un gaspillage d'une grande quantité de ressources en cours d'exécution. La recherche actuelle sur les algorithmes Log-MPA se concentre principalement sur l'optimisation en chaque processus d'itération, la décision de chaque mot de code doit être répétée un nombre fixe d'itérations. Afin

de simplifier le processus itératif, un algorithme de messagerie log-domaine Log-MPA capable de convertir la multiplication en addition est sélectionné. La redondance itérative est causée par un nombre fixe d'itérations. Un algorithme de passage de message (Avoiding Redundant Iterations-MPA) qui peut supprimer les itérations redondantes est proposé pour ce problème. Sur cette base, nous obtenons des résultats similaires en optimisant l'algorithme de passage des messages dans le domaine du journal. Le principe de l'algorithme est de déterminer s'il faut effectuer des processus itératifs ultérieurs en surveillant le taux de convergence de chaque probabilité de mot de code, de manière à garantir que la complexité peut être réduite sous l'hypothèse d'obtenir des performances spécifiques. Le taux de convergence de la probabilité de mot de code est défini comme la différence entre la probabilité d'itération actuelle et la probabilité d'itération précédente.

La formule spécifique est la suivante :

$$\omega^t = |Q_{m,j}^t - Q_{m,j}^{t-1}| \quad (15)$$

Où

- $\omega^t(j)$ représente le taux de convergence de probabilité de mot de code du j – *ième* utilisateur dans le processus de t – *ième* itération.
- $m \rightarrow$ représente le nombre de mots de code dans chaque livre de codes.
- $Q \rightarrow$ la probabilité d'itération.

Les étapes de cet algorithme sont les mêmes que celle de l'algorithme Log-MPA mais à chaque itération, le taux de convergence dans l'équation (15), $\omega^t(j)$ a été calculé et comparé le taux de convergence du mot de code avec le seuil. Si $\omega^t(j) \geq$ le seuil nous continuons l'itération suivante ou les LLR bit par bit sont calculés comme dans l'équation (14).

2.7.7 Décodage canal

Le rôle du décodeur de canal est de vérifier d'abord si le message est en erreur et fait le nécessaire ; puis il supprime les symboles de redondance, mappe l'alphabet du canal dans l'alphabet de la source et transmet chaque message au décodeur source ou à l'étape suivante si elle existait [14].

Il existe de nombreux types de décodage de Turbo-codes comme MPA et SPA (message passing Sum-product Algorithm) [31].

2.8 Caractéristiques de la technique SCMA

Nous citons les principales caractéristiques suivantes :

- **Superposition du signal non orthogonal dans le domaine du code** : il permet la superposition de plusieurs symboles provenant d'utilisateurs différents sur chaque élément de ressource RE (Ressource Element).
- **Étalement clairsemé** : SCMA utilise l'étalement clairsemé pour réduire le nombre de collision de symboles.
- **Modulation multidimensionnelle** : SCMA utilise la modulation multidimensionnelle au lieu de l'étalement linéaire, comme dans CDMA, pour une meilleure efficacité spectrale [28].

Activé par toutes ces caractéristiques, le SCMA peut bénéficier d'une nouvelle transmission radio 5G grâce à une capacité élevée, une connectivité massive, frais généraux faibles, etc. Par exemple, sur la **figure 2.4**, 6 couches de données peuvent être prises en charge en étalant la longueur 4, ce qui entraîne un facteur de surcharge de 150%. La rareté de l'étalement du domaine de code réduit encore davantage les interférences entre les couches, de sorte que davantage de collisions de symboles peuvent être tolérées avec une complexité raisonnable du récepteur.

De plus, la modulation multidimensionnelle fournit une transmission plus efficace en énergie avec une réduction supplémentaire de la complexité, en utilisant des livres de codes SCMA avec un faible nombre de points de projection. Cela fait un composant important pour la prise en charge de transmissions sans octroi à faible latence et à faible surcharge pour les petits paquets arrivant sporadiquement.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu le système SCMA, en expliquant le fonctionnement de chaque bloc. Dans le codeur SCMA nous avons vu comment la conception des livres de codes se fait en général, par les principales opérations citées auparavant (graphe de facteurs, constellation complexe). A la fin, nous avons exposé les étapes de l'opération de décodage (plusieurs techniques).

On déduit également que le débit est plus élevé avec la technique SCMA et cela grâce à la superposition autorisée et la possibilité d'avoir plus d'un utilisateur par PRE.

Dans le prochain et dernier chapitre, nous ferons une simulation de ce système (SCMA).

Chapitre 3 : Simulations et résultats

3.1 Introduction

La conception des systèmes de communication nécessite une étude à l'avance et une évaluation de leurs performances. Le but de ce travail est d'arriver à réaliser cette évaluation pour la technique d'accès SCMA pour la 5G à travers une simulation, en vérifiant qu'il répond aux objectifs fixés.

Après avoir finalisé la partie théorique, nous passons dans ce chapitre à l'implémentation d'un algorithme de codage et de décodage SCMA. L'étude des performances de ce système est réalisée en termes de taux d'erreur binaire BER (Bit Error Rate) en fonction du rapport signal sur bruit SNR (Signal-Noise Ratio).

3.2 Modèle du système

Le modèle de système SCMA, utilisé dans notre simulation, suit l'échange d'information qui est représenté par la **figure 3.1**.

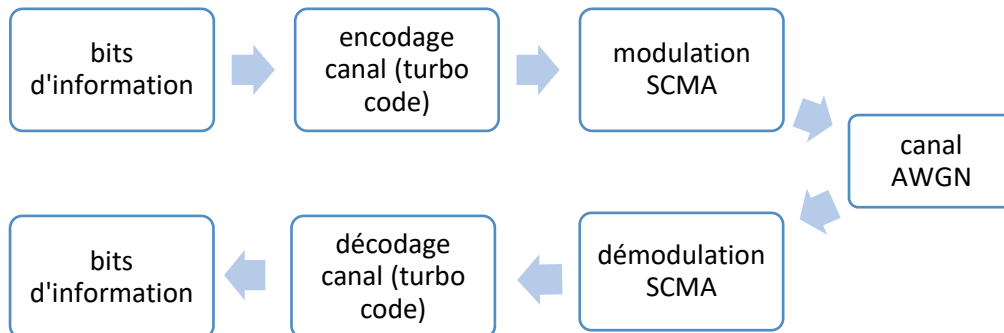


Figure 3.1 : Modèle de simulation

3.3 Conception et description du simulateur MATLAB

MATLAB a été utilisé comme environnement de simulation. MATLAB est un système informatique très puissant qui est utilisé pour le développement d'algorithmes, l'analyse des données, la visualisation et le calcul numérique. Il est aussi un outil pour la manipulation du calcul mathématique. MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs.

3.3.1 Schéma synoptique du modulateur et démodulateur SCMA

Dans la **figure 3.2**, nous représentons d'une manière générale les fonctions principales utilisées par la technique d'accès SCMA, ainsi que l'interaction (échange d'information) entre elles. La plupart de ces fonctions existent déjà dans la bibliothèque de MATLAB et peuvent être disponibles par simple appel.

Dans la suite de cette section, nous exposerons brièvement la structure du programme MATLAB destiné à l'implémentation d'un modulateur et d'un démodulateur SCMA.

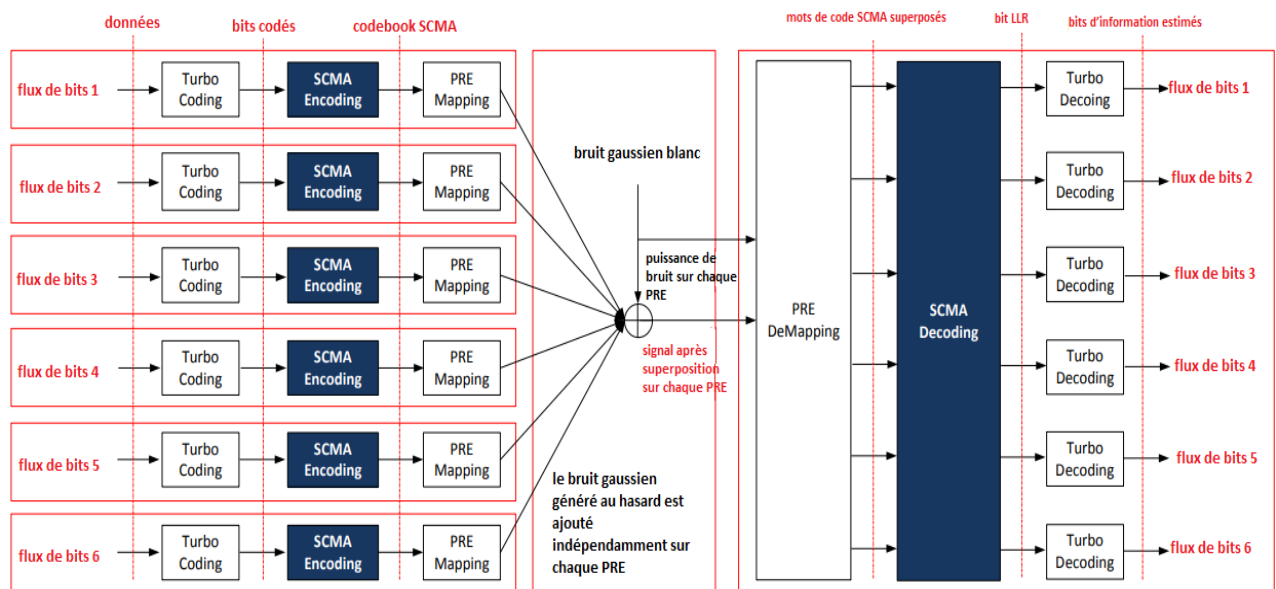


Figure 3.2 : Schéma synoptique du modulateur et démodulateur SCMA

3.3.2 Implémentation du modulateur SCMA

Dans la **section 3.3.1**, une chaîne d'émetteur SCMA simple a été illustrée dans la **figure 3.2**, qui comprend trois modules : le Turbo Encoder, le SCMA Encoder et le PRE Mapper. Cette chaîne émettrice SCMA a été implémentée dans MATLAB. Notons que le programme réalisé n'est pas destiné à un usage universel. Par conséquent, dans les résultats de simulation qui suivent, nous avons considéré le cas de six couches de données / utilisateurs et quatre ressources physiques. Nous examinerons alors les performances en termes de BER pour chaque couche ou utilisateur.

Le modulateur SCMA est structuré en trois parties fondamentales :

La première partie se charge de recueillir les paramètres du modulateur. Ces paramètres incluent par exemples les codebooks associés aux utilisateurs qui nécessitent d'être spécifiés exactement. D'autres paramètres tels que, le nombre de couches (utilisateurs) et le nombre de ressources sont alors déduits. Dans cette partie nous spécifions aussi le nombre d'itérations à considérer, le calcul du SNR etc...

La seconde partie consiste à générer aléatoirement les données à transmettre et à les organiser. Les données à transmettre sont organisées sous forme d'un vecteur \mathbf{x} .

Dans la troisième partie, la modulation SCMA proprement dite est réalisée en appliquant le traitement approprié au vecteur des données générées.

3.3.3 Canal de transmission

Le modèle de canal le plus fréquemment utilisé pour la simulation des transmissions numériques, qui est aussi un des plus faciles à générer et à analyser, est le canal à bruit blanc additif gaussien (AWGN). Ce bruit modélise à la fois les bruits internes (bruit dû à l'agitation thermique...) et les bruits externes (bruit d'antenne...). Ici, nous faisons intervenir ce canal dans le cadre de notre étude pour effectuer une transmission entre le codeur et le décodeur SCMA. Durant la transmission, un vecteur bruit \mathbf{n} est ajouté au vecteur de données \mathbf{x} . Notons ici que la puissance du signal relative à la densité spectrale du bruit peut être spécifiée.

3.3.4 Implémentation du démodulateur SCMA

Le démodulateur SCMA consiste essentiellement en l'implémentation de l'algorithme MPA (Message Passing Algorithm), en utilisant plus précisément la technique de détection log-MPA. L'entrée du démodulateur est le vecteur codé \mathbf{y} résultant de la somme du vecteur \mathbf{x} des données et du bruit \mathbf{n} introduit par le canal. L'organigramme du décodeur SCMA est montré par la **figure 3.3**. Notons que les opérations montrées sur la figure sont effectuées pour chaque bloc SCMA.

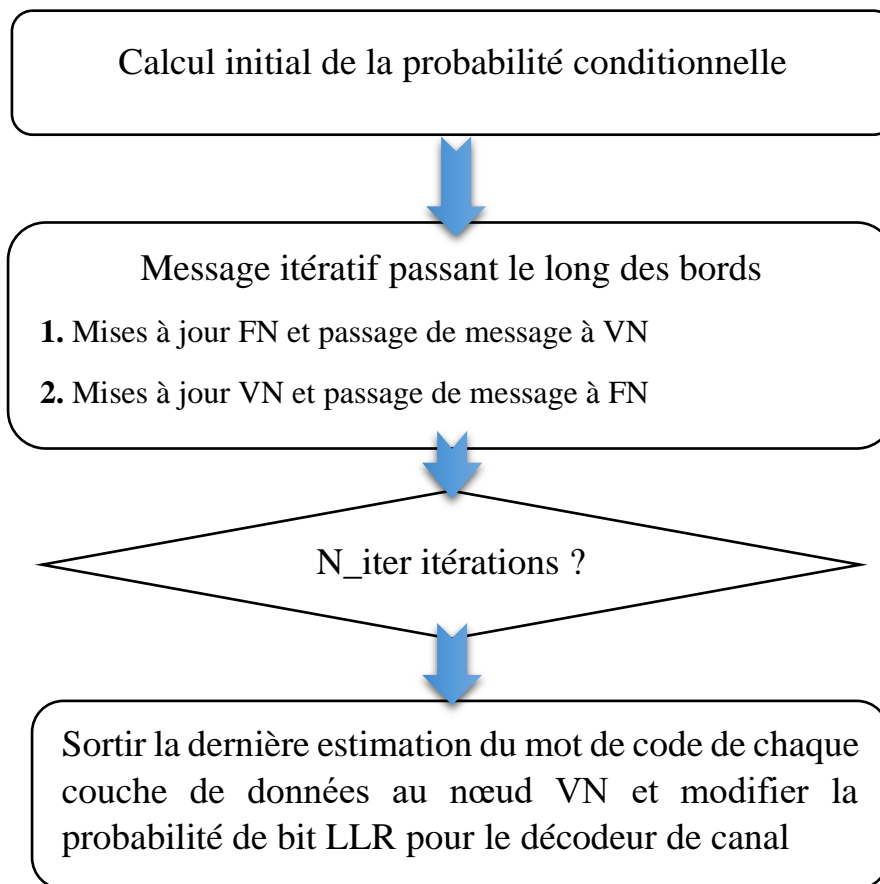


Figure 3.3 : Bloc fonctionnel du décodeur Log-MPA

Lors de la simulation, le programme initial fait appel à la fonction de décodage, dont le but est le calcul du résultat LLR en fonction de l'observation \mathbf{y} à la sortie du canal, des dictionnaires de mots de code \mathbf{CB} , de la réponse impulsionnelle du canal \mathbf{h} , de la densité spectrale de puissance N_0 du bruit, et du nombre d'itérations Nit .

L'algorithme Log-MPA effectue une boucle d'échange d'information entre les VNs et les FNs qui s'arrête en atteignant le nombre maximum d'erreurs précisé lors de la déclaration des paramètres au début du programme simulé. Ensuite, la matrice du factor graph correspondant est calculée, de laquelle une matrice de dimensions $\{(\log_2(\mathbf{M}) * \mathbf{V}, N)\}$ est déduite pour contenir les résultats LLR .

3.4 Résultats de simulation

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation. Durant les tests nous nous sommes intéressées au calcul du taux d'erreur binaire en fonction du rapport signal sur bruit au niveau du récepteur. Le TEB est considéré pour chaque utilisateur, ce qui nous renseigne sur le débit global du système mais aussi sur les débits garantis aux différents utilisateurs. Les paramètres de simulation sont résumés dans le **tableau 3.1**. Pour montrer l'importance de la conception des livres de codes, nous avons considérés le cas des livres de code optimaux mais aussi le cas de livres de codes quelconques et non optimaux.

Paramètre	Notation	Valeur
Signal SCMA dans la trame	N	10000
Nombre de codeword dans chaque coodbook	M	4
Nombre d'utilisateurs (couches)	V	6
Nombre d'itérations	$Niter$	10
Nombre maximum d'erreurs	$maxNumErrs$	100
Puissance du bruit	/	0.0033
EbN0	/	0 : 20
Codeur SCMA	/	Log-MPA

Tableau 3.1 : Paramètres de la simulation

- **Simulations utilisant des livres de codes optimaux**

La **figure 3.4** présente les résultats de la simulation montrant les performances de la technique SCMA. Nous exprimons ces performances en termes de BER en fonction du SNR. Dans ce premier test, nous avons considéré des livres de codes optimaux.

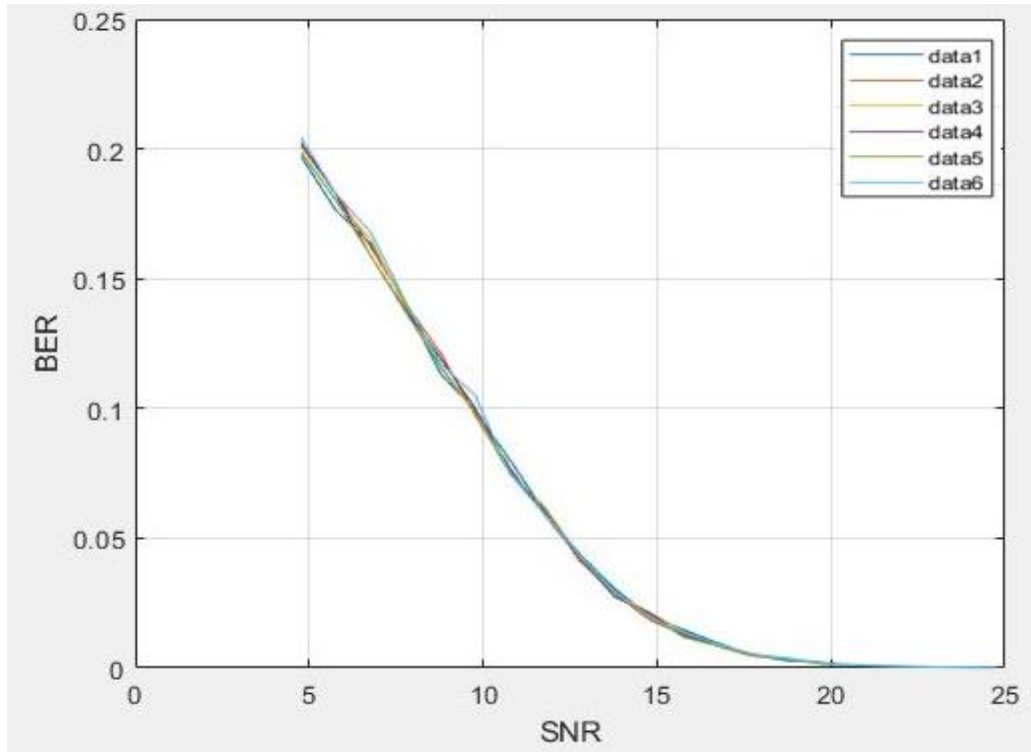


Figure 3.4 : Graphe de BER en fonction de SNR (codebooks optimaux)

Nous observons, sur la **figure 3.4**, 6 graphes correspondant aux six couches considérées dans cette simulation. Comme attendu, nous constatons que les performances sont identiques par rapport à l'ensemble des utilisateurs, montrant ainsi la capacité de SCMA à séparer efficacement les informations relatives aux utilisateurs malgré le partage de ressources sur les mêmes sous porteuses. Ceci prouve clairement, l'amélioration de l'efficacité spectrale du système conduisant à l'amélioration du débit global moyen du système.

- **Simulations utilisant des livres de codes non optimaux**

Les **figures 3.5 à 3.7** montrent des résultats obtenus en utilisant des livres de codes non optimaux. Nous avons introduit des livres de codes choisis aléatoirement. A travers ces tests, nous avons voulu montrer l'importance du choix des livres de codes. En effet, la communauté scientifique insiste sur l'importance de la conception des livres de codes. De ceux-ci, dépendent largement les performances de SCMA.

Sur ces figures, nous pouvons constater clairement la dégradation des performances. De plus, nous pouvons voir que les performances varient aléatoirement d'un utilisateur à l'autre.

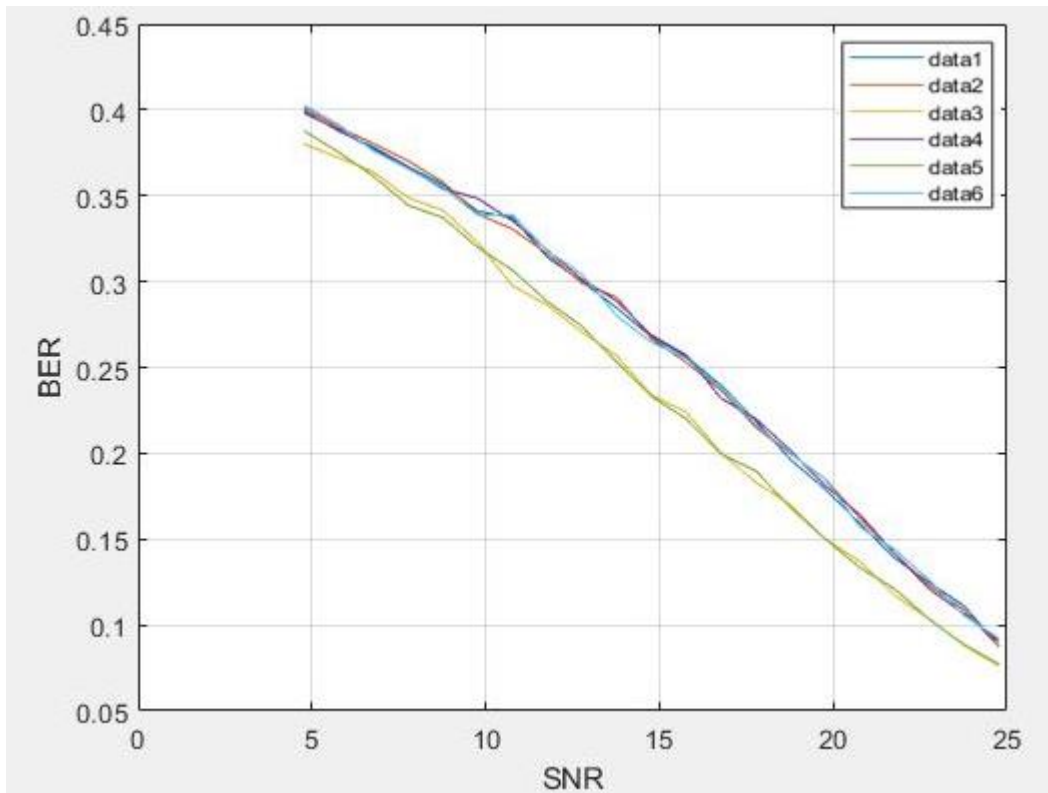


Figure 3.5 : Graphe de BER en fonction de SNR

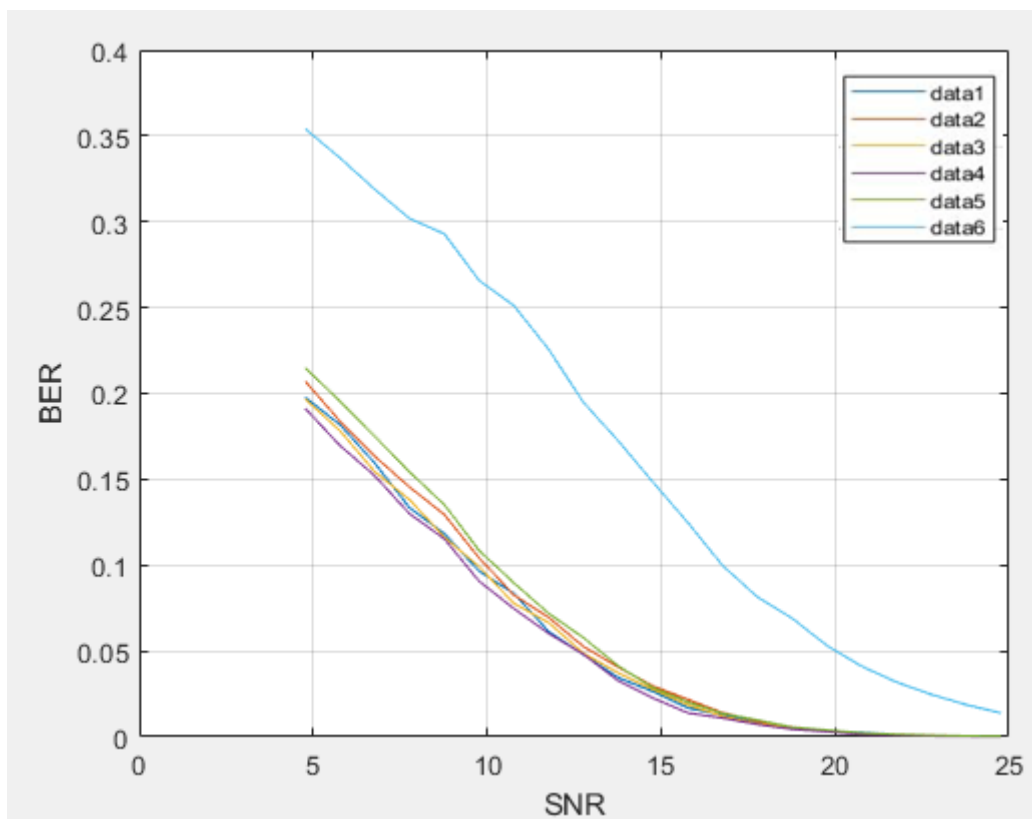


Figure 3.6 : Graphe de BER en fonction de SNR

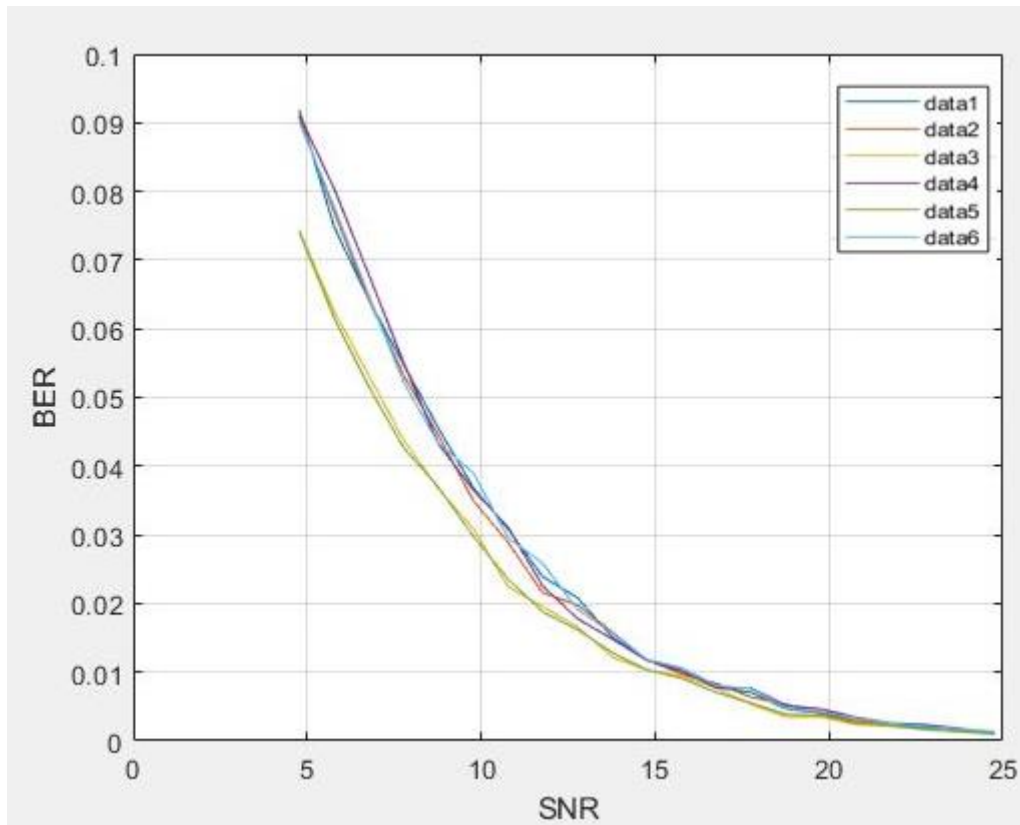


Figure 3.7 : Résultats du BER en fonction de SNR

3.5 Conclusion

Après avoir finalisé notre étude et tenant compte des résultats des simulations que nous avons présenté, nous constatons que les codebooks sont conçu suivant des étapes strictes causant des difficultés pour la conception des mots de code. Cependant, un livre de codes optimal permet de minimiser le BER et d'accroître le SNR de tous les utilisateurs et d'augmenter le débit binaire dans le but de répondre à toutes les demandes des abonnés.

D'après les résultats de la programmation effectuée nous confirmons que la difficulté de la génération des livres de codes est l'une des caractéristiques les plus importantes de la technique SCMA et c'est ce qui l'individualise des autres techniques d'accès multiples.

Conclusion générale

Le besoin de toujours augmenter le nombre d'utilisateurs, d'améliorer le débit, de déminuer le temps d'attente et minimiser les erreurs et la perte d'information pousse les chercheurs dans le domaine des communications sans fils à améliorer sans cesse les systèmes de communications existants et à imaginer de meilleures solutions pour les futurs standards.

Dans ce mémoire, nous avons étudié les performances de la technique d'accès multiple Sparse Code Multiple Access (SCMA) qui est récemment utilisée dans la 5G.

Nous avons débuté ce travail par une étude théorique qui englobe deux chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons introduit toutes les informations liées à l'accès multiple et les principales notions que nous devrions connaître à ce sujet. Nous avons également discuté des différents types de MAS : OMA et NOMA ; en basant sur le schéma NOMA via le domaine de code SCMA.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes concentrés sur le système SCMA. Nous avons défini cette technique en introduisant le concept de base, le fonctionnement et ses caractéristiques, en terminant ce chapitre par une brève conclusion.

Enfin, dans le troisième et dernier chapitre nous avons présenté la structure d'un programme MATLAB conçu pour simuler un encodeur et un décodeur SCMA. Nous avons présenté aussi des résultats que nous avons obtenus par simulations. Les résultats obtenus nous ont servi pour comparaison et évaluation de performances. La mesure de performances a été effectuée en considérant le taux d'erreur binaire (BER) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Les résultats nous ont montré que la conception des livres de code est délicate et qu'elle constitue une étape cruciale pour la mise en œuvre de la technique SCMA. Celle-ci est un candidat prometteur des schémas d'accès multiples pour la 5G.

Comme perspective à ce travail, il serait intéressant d'étendre la conception du programme pour prendre en charge des livres de codes quelconques. Ceci permettra d'évaluer le comportement de SCMA pour des facteurs de surcharge quelconques.

Bibliographie

- [1] : Ziani Z, Mellakhi A, « Etude et Simulations des performances des systèmes de communications à étalements de spectres dans les communications radio-mobiles », Mémoire de Master 2, Université Djilali Bounaama – Khemis-Miliana, 2017.
- [2] : Poulliat C, « Systèmes de Télécommunication », (21 Novembre 2011) (disponible en ligne (2020)).
- [3] : Rahmani Zahra, « Implementation of new multiaccess technique encoder for 5G wireless telecommunication networks », Mémoire pour l'obtention du Diplôme de Maîtrise, Université de Montréal, 2017.
- [4] : Bukar, Ibrahim, « Spectrally efficient Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) techniques for future generation mobile systems », Thesis University of Sussex, 2017.
- [5] : Arnaud Bournel, « Introduction aux systèmes de télécommunications », Université PARIS XI, 2002.
- [6] : Jeremy Laine, Philippe Vigneron, « Télécommunications numériques le CDMA », 2001.
- [7] : R1-162155, « Sparse Code Multiple Access (SCMA) for 5G Radio Transmission », Huawei, HiSilicon, Apr. 2016.
- [8] : Benyahia. H, Cherifi. W, « Etude des techniques MIMO à base de FBMC pour la 5G », Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 2017.
- [11] : Bendahmane. A, Ghermoul. R, « Etude de méthodes de beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour des systèmes FBMC », Mémoire de Master 2, Université Aboubekr Belkaïd – Tlemcen, 2018.
- [12] : Hosein Nikopour, Hadi Baligh, « Sparse Code Multiple Access », Ottawa Wireless R&D centre Huawei Technologies Canada Co, Ottawa, Ontario, Canada, 2013.
- [13] : Yiqun Wu, Chao Wang, Yan Chen, and Alireza Bayesteh, « Sparse Code Multiple Access for 5G Radio Transmission », Huawei Technologies Canada, Ltd. Ottawa, Ontario, Canada. Huawei Technologies, Co, Shanghai, China, 2018.
- [14] : Ad. Meriem, « Study and simulation of Sparse Code Multiple Access (SCMA) for 5G New Radio », Mémoire de Master, Université de Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, 2019.
- [17] : SMR Islam, N. Avazov, OA Dobre et KS Kwak, « Accès multiple non orthogonal dans le domaine de la puissance (NOMA) dans les systèmes 5G : potentiels et défis », I EEE Commun Surveys Tuts, octobre 2016.
- [18] : 3GPP, R1-163111, « Vues initiales et résultats d'évaluation sur l'accès multiple non orthogonal pour la liaison montante NR », avril 2016.

- [19] : DAI, Linglong, « A survey of non-orthogonal multiple access for 5G », IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018.
- [20] : Chen, Yan et al « Toward the standardization of non-orthogonal multiple access for next generation wireless networks », IEEE Communications Magazine, 2018.
- [21] : Abhay Mohan, V.M, « Tech seminar report on non orthogonal multiple access », 2017.
- [22] : <https://www.sciencedirect.com/> ,2020.
- [23] : S. Zhang, X. Xu, L. Lu, Y. Wu, G. He, and Y. Chen, « Sparse code multiple access : An energy efficient uplink approach for 5g wireless systems », in Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014.
- [24] : HAN, Yuxi, et al. « Enabling High Order SCMA Systems in Downlink Scenarios With a Serial Coding Scheme », IEEE Access, 2018.
- [25] : Taherzadeh. M, Nikopour. H, Bayesteh. A and Baligh. H, « SCMA Codebook Design », IEEE VTC-fall, 2014.
- [26] : Tahir, Bashar; Schwarz, Stefan, Markus, « BER comparison between Convolutional, Turbo, LDPC and Polar codes », In: 2017 24th International Conference on Telecommunications (ICT), IEEE, 2017.
- [27] : Klimentyev, Vyacheslav P. Sergienko, Alexander B, « A low-complexity SCMA detector for AWGN channel based on solving overdetermined systems of linear equations », International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY), IEEE, 2016.
- [29] : Dai. J, Niu. K, Dong. C et Lin. J, « Algorithmes améliorés de passage de messages pour l'accès multiple de code clairsemé », IEEE Transactions on Vehiculaire Technology, 2017.
- [30] : Liu. J, Wu. G, Li. S et Tirkkonen. O, « la mise en œuvre à point fixe du Log-MPA pour les signaux SCMA », IEEE Wireless Communications Letters, 2016.
- [31] : Charan Langton, « Turbo Coding and MAP decoding », 2007.

Webographie

- [9] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency_division_multiplexing#:~:text=L%27OFDM%20\(orthogonal%20frequency-une%20%C3%A9galisation%20de%20faible%20complexit%C3%A9.](https://fr.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency_division_multiplexing#:~:text=L%27OFDM%20(orthogonal%20frequency-une%20%C3%A9galisation%20de%20faible%20complexit%C3%A9.) 2020
- [10] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/OFDMA#:~:text=L%27OFDMA%20\(ou%20orthogona%20l%20frequency,e%20et%20e%20g%C3%A9n%C3%A9ration.](https://fr.wikipedia.org/wiki/OFDMA#:~:text=L%27OFDMA%20(ou%20orthogona%20l%20frequency,e%20et%20e%20g%C3%A9n%C3%A9ration.) 2020
- [15] : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/technologies-de-l-information-th9/techniques-et-systemes-de-transmission-en-reseaux-et-telecoms-42293210/transmissiondes-signaux-numeriques-e7100/codage-de-canal-e7100niv10003.html#:~:text=Le%20codage%20de%20canal%20consiste,par%20bit%20dans%20le%20r%C3%A9cepteur.> 2020.
- [16] : [https://www.memoireonline.com/10/13/7633/m_Etude-d-un-reseau-de-transmission-d-information-par-faisceau-hertzien-entre-deux-ports-de-la-provin13.html.](https://www.memoireonline.com/10/13/7633/m_Etude-d-un-reseau-de-transmission-d-information-par-faisceau-hertzien-entre-deux-ports-de-la-provin13.html) 2020.
- [28] : <https://www.geeksforgeeks.org/>, 2020.

