

## Bibliographie

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

**En** : Télécommunication

**Spécialité** : Réseau et Télécommunications

**Par**: BENABDELLAH KARIM et BOUBEKEUR AHMED WALID

**Sujet**

## **SCMA POUR L'ACCES MULTIPLES DES RESEAUX SANS FIL 5G**

**Soutenu publiquement, le 19 / 09 /2020, devant le jury composé de :**

Mr F.T BENDIMERAD	Professeur	Président de jury
Mr S.M MERIAH	Professeur	Examineur
Mr M. BOUSAHLA	MCB	Examineur
Mr F. DERRAZ Fouad	MCA	Encadreur

**Année universitaire : 2019-2020**

## **Remerciements**

*Nous tenons particulièrement à remercier Allah le tout puissant, ce mémoire N'aurait jamais été réalisé sans sa bénédiction.*

*Nous adressons nos remerciements à notre encadreur Mr F. DERRAZ, pour son aide consistante, ses conseils judicieux, et pour ses Remarques objectives.*

*Nous remercions les membres du jury, Professeur MR BENDIMRED et MR MERIAH de l'université Tlemcen d'avoir l'amabilité de présider le jury, Mr M. BOUSAHLA pour sa participation à ce jury.*

*Nous profitons de cette opportunité pour exprimer notre gratitude à tous les enseignants qui ont contribué par leurs collaborations, disponibilités et sympathies, à notre formation. Nous exprimons notre reconnaissance à tous les doctorants avec qui nous avons pu bénéficier de leurs aides. Nous tenons à remercier nos familles de nous avoir soutenus, nous ne serons jamais assez reconnaissants envers nos parents qui ont toujours tout mis en œuvre pour qu'on s'épanouisse dans tout ce qu'on entreprend.*

*Enfin, nous tenons à remercier toute personne qui nous a aidés de près ou de Loin durant notre travail et en particulier tous nos collègues de la promotion 2020.*

## **Dédicaces**

*Ce mémoire est dédié à :*

*Nos parents,*

*Nos familles,*

*Nos ami(e)s,*

*Tous ceux qui nous aiment et qu'on aime.*

## **Résumé**

*Plusieurs implémentations d'un système de codage SCMA ont été présentées comme une nouvelle technique d'accès multiple en liaison montante et descendante pour la prochaine génération de réseaux mobiles. Comme on prévoit que la prochaine génération de réseaux mobiles sera déployée en 2020, les réseaux sans fil ont besoin de modifications et de mises à niveau importantes pour répondre aux besoins des réseaux 5G.*

## **Abstract**

*Several implementations of an SCMA coding system have been touted as a novel uplink and downlink multiple access technique for the next generation of mobile networks. As the next generation of mobile networks are expected to be deployed in 2020, wireless networks need significant changes and upgrades to meet the needs of 5G networks.*

## ملخص

على أنها تقنية وصول متعددة SCMA تم وصف العديد من تطبيقات نظام تشفير للوصلة الصاعدة والهابطة الجديدة للجيل التالي من شبكات الهاتف المحمول. نظرًا لأنه من المتوقع نشر الجيل التالي من شبكات الهاتف المحمول في عام 2020 ، تحتاج الشبكات اللاسلكية إلى تغييرات وترقيات كبيرة لتلبية احتياجات شبكات الجيل الخامس

# **TABLE DES MATIERES**

*Remerciement*

*Dédicace*

*Résumé.....I*

*Table des matières.....III*

*Liste des figures.....VI*

*Liste des tableaux.....VIII*

*Liste des abréviations.....IX*

*Introduction générale.....2*

## **Chapitre 1 : Rappel des Techniques d'accès orthogonales**

*Introduction.....5*

*1.2 Communications mobiles cellulaires.....6*

*1.2.1 L'évolution des technologies mobiles.....9*

*1.2.1.1 Techniques d'accès multiple orthogonal.....9*

*1.2.2 Systèmes cellulaires de première génération.....10*

*1.2.3 Systèmes cellulaires de deuxième génération.....13*

*1.2.4 Systèmes cellulaires de troisième génération.....17*

*1.2.5 Systèmes cellulaires de quatrième génération.....26*

<i>Conclusion</i> .....	36
<b><u>Chapitre 2 : l'accès multiple par code épars (SCMA)</u></b>	
<i>Introduction</i> .....	38
<i>1.1 Modèle de système de transmission SCMA</i> .....	39
<i>1.1.1 Procédure d'accès multiple</i> .....	40
<i>1.1.2 Cartographie du livre de codes SCMA</i> .....	42
<i>1.1.3 Représentation graphique des facteurs</i> .....	44
<i>1.2 Détection des utilisateurs multiples</i> .....	47
<i>1.2.1 Détection multi-utilisateurs optimale/quasi-optimale</i> .....	47
<i>A. Détection optimale des utilisateurs multiples</i> .....	47
<i>B. Détection des MAP</i> .....	48
<i>1.2.2 Autres détecteurs avancés</i> .....	50
<i>A. Détecteur EPA</i> .....	50
<i>B. Détecteur sic –mpa</i> .....	51
<b>CONCLUSION</b> .....	52
<b><u>Chapitre 03 : Expérience mise en œuvre du codage SCMA</u></b>	
<i>Introduction</i> .....	55
<i>3.1 Chaîné d'émetteur SCMA</i> .....	55
<i>3.1.1 Vers un encodeur SCMA</i> .....	56
<i>3.1.2 Cartographie des ressources physiques du GER</i> .....	57
<i>3.2 Mise en œuvre de MATLAB</i> .....	57

<i>3.3 Mise en œuvre du logiciel d'encodeur SCMA et résultats.....</i>	<i>59.</i>
<i>3.3.1 Amélioration de la mise en œuvre et des résultats du logiciel d'encodeur SCMA.....</i>	<i>61</i>
<i>3.4 RÉSULTATS DE La MISE EN ŒUVRE.....</i>	<i>66</i>
<i>3.4.1 Résultats de la mise en œuvre de MATLAB pour la chaîne d'émetteurs SCMA.....</i>	<i>66</i>
<i>3.4.2 Résultats de la mise en œuvre du logiciel d'encodeur SCMA.....</i>	<i>71</i>
<i>3.4.2.1 Amélioration des résultats de la mise en œuvre du logiciel d'encodeur SCMA.....</i>	<i>73</i>
<i>Conclusion .....</i>	<i>75</i>
<i>Conclusion générale.....</i>	<i>78</i>
<i>Références Bibliographiques.</i>	

# Liste des figures

- Figures 1.1**..... Diagramme d'architecture d'un réseau 1G
- Figures 1.2**..... Diagramme d'architecture d'un réseau 2G GSM.
- Figures 1.3**..... Schéma fonctionnel du récepteur de réseau 3G  
WCDMA
- Figures 1.4**..... Schéma fonctionnel de l'architecture du réseau  
WCDMA
- Figures 1.5**..... Schéma fonctionnel de l'émetteur de liaison  
descendante WCDMA
- Figures 1.6**..... Schéma fonctionnel de l'émetteur HSDPA
- Figures 1.7**..... Schéma fonctionnel de l'émetteur HSDPA
- Figures 1.8**..... Schéma fonctionnel de l'architecture du réseau  
HSDPA
- Figures 1.9**..... Représentation temps / fréquence du signal  
OFDM
- Figures 1.10**..... Génération de forme d'onde OFDMA avec sous-  
porteuse K (SC)
- Figure 1.11** ..... Schéma fonctionnel de l'architecture du réseau 4G  
LTE

**Figure 2.1**..... *Le modèle de système pour SCMA*

**Figure2.2**..... *Illustration des livres de codes SCMA et de la correspondance entre les bits et les mots de code*

**Figure 2.3** .....*Représentations graphique d'un facteur d'un décodeur*

**Figure 2.4**..... *constellations multidimensionnelles*

**Figure3.1**..... *Une solution prometteuse pour la 5G*

**Figure3.2**..... *Constellation de six couches de données différentes.*

**Figure3.3 (1.2.3.4.5.6.7)**.....*code Word user*

## **Liste des tableaux**

**Tableaux3.1**..... Encodage turbo à l'aide de la boîte à outils de communication MATLAB

**Tableaux3.2**..... Mappage de mots de code pour un utilisâtes

**Tableaux3.3**..... Pseudo de codage SCMA pour la première mise en œuvre

**Tableaux3.4**..... Pseudo de codage SCMA pour la deuxième implémentation

**Tableaux3.5**..... Codage SCMA configurable sans pseudo Adder

**Tableaux3.6**..... Résumé des trois résultats préliminaires de la mise en œuvre du logiciel

**Tableaux 3.7**..... Mise en œuvre du logiciel d'encodeur SCMA sans ajout et résultats de tableaux multiples

## Liste des abreviations

1G ..... 1ère Génération  
2G ..... 2ème Génération  
3G..... 3ème Génération  
4G ..... 4ème Génération  
5G ..... 5ème Génération

### A

AM.....modulation de L'amplitude

### B

BSC..... Base Station Controller  
BSS..... Base Station Sub-system  
BTS..... Base Transceiver Station

### C

CDMA.....Code Division Multiple Access

### D

### E

EDGE..... Enhanced Data Rates for GSM Evolution  
EIR .....Equipment Identity Register  
Epa.....eNodeB evolved NodeB  
EPC..... Evolved Packet Core  
E-UTRA..... Evolved-Universal Terrestrial Radio Access  
eUTRAN evolved UTRAN

## F

FDD..... Frequency Division Duplexing  
FDMA..... l'accès multiple par répartition dans le temps

## G

GGSN..... Gateway GPRS Support Node  
GMSC .....Gateway MSC  
GPRS .....General Packet Radio Service  
GSM .....Global System for Mobile Communication

## H

HLR..... Home Location Register  
HSDPA .....High Speed Downlink Packet Access  
HSOPA .....High Speed OFDM Packet Access  
HSPA .....High Speed Packet Access  
HSS .....Home Subscriber Service

## I

IEEE..... Institute of Electrical and Electronics Engineers  
IETF..... Internet Engineering Task Force  
IMEI..... International Mobile Equipment Identity  
IMS IP .....Multimedia Sub-system  
IMSI .....International Mobile Subscriber Identity  
IP Internet Protocol

## L

LAN .....Local Area Network  
LMT..... Latvijas Mobilais Telefons  
LTE..... Long Term Evolution

## M

M2M .....Machine To Machine  
MAN..... Metropolitan Area Network  
MIMO .....Multi Input Multi Output  
MMS..... Multimedia Messaging Service  
MS .....Mobile Station  
MSC .....Mobile Switching Centre  
MSISDN..... Mobile Station  
MTS .....Mobile TeleSystem  
Mpa.....  
MI.....

## N

NMC .....Network and Management Centre  
NS-2 .....Network Simulator 2  
NS-3..... Network Simulator 3  
NSS..... Network Sub System

## O

OFDM .....Orthogonal Frequency Division Multiplexing  
OFDMA..... Orthogonal Frequency Division Multiple Access  
OMC .....Operations and Maintenance Center  
OSS..... Operation Sub-System

## P

PAPR..... Peak-to-Average Power Ratio  
PCU .....Packet Control Unit  
PDN .....GW Packet Data Network Gate-Way  
PDP..... Packet Data Protocol  
PGW..... Packet Switch-GetWay  
PLMN .....Public Land Mobile Network

## Q

QAM .....Quadrature Amplitude Modulation  
QPSK .....Quadrature Phase Shift Keying

## R

RSVP .....Resource ReSerVation Protocol  
RNC .....Radio Network Controller  
RNIS..... Réseau Numérique à Intégration de Services  
RTC .....Réseau Téléphonique Commuté  
RTCP .....Real-time Transport Control Protocol

## S

SC-FDMA..... Single Carrier-Frequency Division Multiplexing Access  
SGSN..... Serving GPRS Support Node  
SIM .....Subscriber Identity Module  
SINR..... Signal Interference Noise Ratio  
SMS..... Short Message Service  
SMSC .....Short Message Service Center

## T

TB .....Transport Block  
TCP..... Transmission Control Protocol  
TDD .....Time-Division Duplex  
TMN..... Telecommunications Management Network

## U

UDP .....User Datagram Protocol  
UE .....Terminal Mobile  
UIT..... Union Internationale des Télécommunications  
UMTS..... Universal Mobile Telecommunications System

## V

VLR..... Visitor Location Register  
VoIP .....Voice over IP

VSF-OFCDM ...Variable Spreading Factor Orthogonal Frequency and  
Code Division

## W

WAP..... Wireless Application Protocol  
WCDMA .....Wide Coding Division Multiple Access  
WiFi..... Wireless Fidelity  
WIMAX..... Worldwide Interoperability for Microwave Acce



# **Introduction Générale**

Autrefois, la communication mobile était une technologie coûteuse et luxueuse que peu de gens pouvaient se permettre, mais aujourd'hui, elle est devenue une technologie accessible, disponible presque partout et utilisée par presque tout le monde. La partie la plus critique des technologies de communication est constituée par les réseaux de communication sans fil qui jouent un rôle indéniable dans la connectivité à large bande abordable dans la société de l'information que nous avons aujourd'hui.

Toutefois, la demande de trafic de données sur la bande de fréquence des cartes mobiles augmentera davantage à l'avenir. Si l'on part du principe que les réseaux sans fil fournissent le service aux utilisateurs avec la même consommation d'énergie que les réseaux existants, le coût de la fourniture d'un bit à l'utilisateur final augmentera considérablement dans le trafic massif. Par conséquent, les réseaux 5G doivent offrir des composants à faible consommation d'énergie pour maintenir le coût du trafic aussi bas que possible.

Par rapport à ce qu'offrent aujourd'hui les réseaux sans fil, la prochaine génération doit fournir un éventail beaucoup plus large d'exigences en matière d'accès. Pour ce faire, la 5G doit envisager une nouvelle technique d'accès multiple qui présente une grande efficacité spectrale. La performance des réseaux de communication sans fil dépend des techniques d'accès multiples. Ainsi, les techniques d'accès multiple sont toujours la technologie clé dans les réseaux sans fil, de la première génération à la génération actuelle. Il existe deux catégories de techniques d'accès multiple, orthogonales et non orthogonales. Cette classification est faite en fonction de la manière dont les ressources sont dédiées aux utilisateurs. Comme dans les techniques d'accès multiple orthogonales (OMA).

Les utilisateurs des techniques orthogonales précédentes sont affectées orthogonalement aux ressources et les ressources peuvent être dans le domaine du temps, de la fréquence ou du code, tandis que les techniques NOMA sont généralement basées sur le domaine de puissance au lieu des domaines du temps,

de la fréquence ou du code et rendent toutes les sous-porteuses disponibles pour chaque utilisateur.

Dans le domaine du code, le NOMA s'inspire de la technique CDMA déjà utilisé pour la 3G. Cette technique fonctionne comme une procédure de codage qui encode les données binaires en données complexes multidimensionnelles. Le LDS est un schéma spécifique du CDMA qui utilise quelques éléments non nuls dans la séquence de codage. Le SCMA présente certaines similitudes avec le CDMA et surtout le LDS, mais il s'agit d'un accès multiple non orthogonal. Le SCMA utilise un processus de codage allant du domaine binaire au domaine complexe multidimensionnel. Ce processus de codage peut être effectué différemment pour différents utilisateurs et, dans le récepteur, les données des utilisateurs peuvent être détectées à l'aide de l'algorithme MPA en raison de la rareté du processus de codage. En utilisant le SCMA, le système peut être surchargé comme le LDS lorsque le nombre d'utilisateurs est supérieur au facteur d'étalement qui est la longueur du mot de code dans le SCMA.

Comme les réseaux LTE ne prennent pas en charge la connectivité massive sur la **liaison montante**, le SCMA, en tant que nouveau schéma d'accès multiple ayant pour caractéristique de fournir **une connectivité massive**, peut être un substitut approprié à l'OFDMA. Le SCMA avec un grand nombre de couches permet la surcharge du système qui permet une connectivité massive. Chaque couche du SCMA représente un utilisateur et possède un processus de codage spécifique sous la forme d'un livre de codes.

L'objectif dans notre travail est d'étudier l'algorithme de liaison descendante principale du SCMA, en tant que nouvelle technique d'accès multiple, le codeur SCMA afin de proposer un nouveau système de codage pour la prochaine génération de réseaux mobiles.

**Chapitre 1: Rappel des Techniques d'accès**  
**orthogonales**

## **1. Introduction**

Ce chapitre donne un aperçu de l'évolution des systèmes de communication mobile cellulaire. Nous commençons par une citation d'une conversation tenue sur un réseau cellulaire mobile par Martin Cooper le 3 avril 1973 [1]. Je vous appelle depuis un téléphone portable, un vrai téléphone portable de poche.

L'appareil mobile utilisé au cours de cette conversation était un Motorola DynaTAC pesant environ 1,2 kg et coûtant environ 9 000\$. Cet événement historique a déclenché un mouvement qui allait changer la vie de tant de personnes. Ce changement de vie va bien au-delà de l'assistance aux utilisateurs de téléphones portables. En effet, il a donné naissance à des appareils très complexes, notamment les "smart phones". Ces appareils répondent non seulement à nos besoins en matière de communication vocale et de données, mais ils prennent également en charge un très large éventail de services de soutien des applications, la concurrence avec les jeux en ligne, la consommation et la production de contenu vidéo, la réalisation de mesures médicales, l'utilisation de services de localisation, etc [ 1,2 ]. Comme ces appareils sans fil ont bénéficié de la loi de Moore, les technologies mobiles cellulaires ont pu rester au centre de l'attention afin d'introduire de nouvelles fonctionnalités et de nouveaux avantages pour l'utilisateur final [10]. Ce chapitre est destiné à aborder les principales technologies à l'origine de la conception des nouveaux systèmes radio (NR) 5G, qui se concentre sur les solutions permettant de prendre en charge les nouveaux services 5G dans les transmissions en liaison montante (UL) avec des exigences telles que la faible latence et la haute fiabilité, les économies d'énergie et les applications de petits paquets. Les ressources sans subvention (GF) dans les UL NR sont appelées "une subvention configurée", ce qui signifie que les ressources pré-configurées spécifiques à l'UE seront utilisées pour la transmission UL UE

sans programmation/subvention dynamique. De même, la station de base (BS) du réseau 5G NR est appelée "Next Generation NodeB" ou "gNB".

## **1.2 Communications mobiles cellulaires :**

Les normes cellulaires utilisent une variété de techniques d'accès multiple (AM), que nous mettons en évidence dans le tableau 1.1. Ces techniques comprennent l'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA), l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA), l'accès multiple par répartition en code (CDMA) et l'accès multiple par répartition en fréquence orthogonale (OFDMA). Nous décrivons également la méthode de duplex utilisée pour les communications bidirectionnelles et les ressources physiques réelles disponibles à attribuer à chaque utilisateur. Les méthodes de duplex sont le duplex à répartition dans le temps (TDD) et le duplex à répartition en fréquence (FDD).

Toutes les techniques d'accès multiple ci-dessus peuvent être considérées comme une forme d'accès multiple "orthogonal" (OMA), où l'accès des utilisateurs, en théorie, n'interfère pas les uns avec les autres puisqu'ils partagent le support sans fil. Elles sont toutefois limitées au nombre de ressources disponibles qui les rendent orthogonales entre elles, à l'exception de l'AMRC, où la transmission du dispositif sans fil vers la station de base est intrinsèquement non orthogonale. En FDMA, la fréquence est divisée en canaux à utiliser par différents utilisateurs. En AMRT, le temps est divisé en tranches de temps pour permettre à divers utilisateurs d'accéder au système cellulaire. En CDMA, les utilisateurs sont séparés par des codes PN et transmettent sur l'ensemble du canal de fréquence,

tout en même temps. En OFDMA, les utilisateurs sont affectés à divers canaux de fréquence (groupes de sous-porteuses) à différents intervalles de temps. Pour le système cellulaire numérique de prochaine génération appelé 5G, l'OFDMA est toujours utilisé lorsque l'espacement des sous-porteuses et la durée des intervalles de temps sont flexibles et évolutifs pour répondre à des exigences et des cas d'utilisation très variés. Il est également prévu d'utiliser le NOMA en 5G. La figure 1.1 donne un aperçu des différentes techniques d'accès multiple qui seront examinées dans cette section. Elles sont comparées dans trois dimensions ou domaines : puissance, temps et fréquence.

L'efficacité spectrale (bps/Hz) est une mesure de performance du système qui continue à être améliorée à chaque génération. La figure 1.2 montre les efficacités spectrales DL des normes cellulaires numériques 2G, 3G, 4G et 5G par rapport aux débits de données théoriques de pointe. Remarquez qu'avec chaque nouvelle norme, la demande de débits de données de plus en plus élevés ainsi qu'une demande accrue d'efficacité spectrale devient plus prononcée. À chaque génération de cellules, on s'attend non seulement à une augmentation des performances, mais aussi à l'ajout de nouvelles fonctionnalités. La figure 1.3 montre comment les capacités des utilisateurs de téléphones cellulaires (et les caractéristiques attendues) ont augmenté de manière exponentielle au cours de l'évolution des générations cellulaires. Nous avons commencé par la voix uniquement, puis nous sommes passés aux capacités de voix et de service de messages courts (SMS) en 2G. Les capacités de données ont été améliorées en 3G

pour inclure les services à commutation par paquets. La 4G a fourni l'Internet mobile avec des cas d'utilisation élargis pour l'Internet des objets (IoT), véhicule-tout (V2X), appareil-à-appareil (D2D), etc. Le système cellulaire de prochaine génération, le 5G, ne devrait qu'accroître les possibilités d'utilisation, ouvrant ainsi de nombreuses portes à des services innovants.

La DL est la direction de communication de la BS vers le combiné ou l'équipement de l'utilisateur (UE). L'UL est la direction de communication des UE vers la BS. L'UL consiste également en un accès aléatoire où les UE tentent d'accéder aux ressources des systèmes de communication, soit à partir de l'état de puissance, soit en initiant une nouvelle transaction.

La méthode utilisée pour séparer les communications DL et UL est appelée duplex. Par exemple, cette opération peut être effectuée dans le temps (TDD) et/ou la fréquence (FDD). Dans le domaine FDD, certains créneaux horaires sont attribués au DL et d'autres à l'UL. Dans le domaine FDD, les transmissions UL et DL se font simultanément dans des bandes de fréquences différentes. Les avantages de la TDD sont qu'un seul spectre est nécessaire et partagé (aucun spectre jumelé n'est nécessaire), et qu'il existe des vues de canal symétriques (les mesures UL peuvent être utilisées pour les communications DL et vice versa). L'avantage du FDD est qu'il nécessite moins d'exigences de synchronisation temporelle ; cependant, en raison de la séparation de fréquence entre le DL et l'UL, les mesures UL peuvent ne pas être utiles pour les communications DL car la réciprocité ne peut être garantie. Quelle que soit la méthode utilisée, la latence

(temps nécessaire pour accéder aux ressources du réseau) devient de plus en plus critique en tant qu'indicateur de performance du système.

### **1.2.1 L'évolution des technologies mobiles**

Dans cette section, nous présenterons les technologies d'accès radio mobile (RAT) et comprendrons leurs avantages et leur évolution. La figure 1.1 montre l'évolution de la norme cellulaire de 1G à 4G. Nous remarquons que l'évolution de la 2G et de la 3G a entraîné une augmentation de la complexité du système à travers plusieurs normes, ce qui a changé lorsque le secteur a convergé vers une seule norme 4G, où l'on constate maintenant une augmentation de la complexité au sein d'une seule norme.

### **Techniques d'accès multiple orthogonal**

- **FDMA** (accès multiple par répartition en fréquence)

Difficile d'attribuer plusieurs porteuses dans un même canal

Les canaux à bande étroite (moins que la largeur de bande de cohérence du canal sans fil) sont souhaitables

Des bandes de garde dans le domaine des fréquences sont nécessaires pour réduire les interférences dans les bandes de fréquences adjacentes

Nombre fini de ressources orthogonales.

- **TDMA** (accès multiple par répartition dans le temps)

Une compensation des interférences entre symboles (égalisation) est nécessaire

Utilise des bandes de garde dans le domaine temporel pour permettre des variations de délai de Transmissions UL.

La synchronisation des créneaux horaires dans toutes les utilisations est essentielle pour ne pas détruire le principe de l'OMA avec un nombre fini de ressources orthogonales.

- **CDMA** (accès multiple par répartition en code)

Utilise toute la largeur de bande en même temps en utilisant des codes de diffusion

Nombre fini de ressources orthogonales.

- **OFDMA** (accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence)

Affectation de différentes sous-porteuses à différents utilisateurs (à différents intervalles de temps)

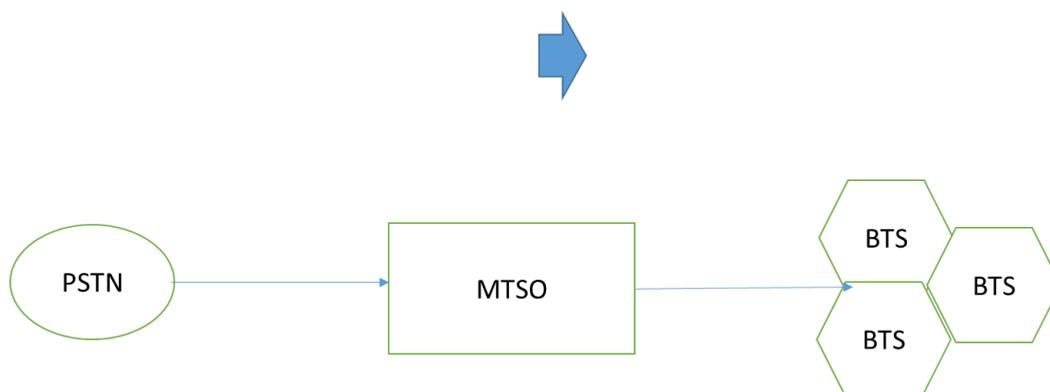
Nombre fini de ressources orthogonales.

Le spectre est très précieux pour les opérateurs et reste nécessaire pour augmenter le débit du système et des utilisateurs. Il existe un mouvement à l'échelle du secteur qui vise non seulement à utiliser le spectre traditionnel sous licence, mais aussi à adopter le spectre sans licence (traditionnellement utilisés par les appareils WiFi) et le spectre partagé à tout moment et en tout lieu possible.

## **1.2.2 Systèmes cellulaires de première génération**

Le système cellulaire mobile de première génération (1G) a été créé pour permettre les communications vocales et aider les utilisateurs mobiles lorsqu'un appel vocal est transféré à une autre station de base (ou cellule) lorsque l'utilisateur mobile traverse physiquement l'environnement cellulaire. La technologie utilisée était la modulation de fréquence (FM) analogique, et le spectre était divisé en segments de 30 kHz, appelés canaux. Un seul utilisateur utilisait la totalité du canal pendant toute la durée de son appel. Ce système est appelé services avancés de téléphonie mobile (AMPS) et est désigné sous le nom de 1G [2]. Afin de permettre une large couverture, une technique de réutilisation des fréquences a été introduite. Les mêmes canaux de fréquence peuvent être réutilisés par d'autres utilisateurs, en même temps, à condition que la distance soit suffisamment grande pour causer une interférence minimale. Cette interférence est appelée interférence entre canaux ou interférence entre cellules. Dans un effort pour augmenter la capacité globale du système, une nouvelle technologie a été introduite, appelée AMPS à bande étroite (N-AMPS). Ici, l'espacement des canaux a été réduit à 10 kHz. De même, dans le but d'introduire des services de données (qui n'étaient pas pris en charge dans les AMPS), on a proposé des données numériques cellulaires par paquets qui utilisaient des canaux de fréquence lorsque les utilisateurs de la voix n'étaient pas présents. Cependant, il a été rapidement déterminé qu'un réseau sans fil intégré voix et données était nécessaire pour fournir de tels services de

manière efficace et efficiente. Des détecteurs discriminateurs simples et robustes ont été utilisés, qui étaient imprésentables, tout en étant sensibles à la FM aléatoire et à de profonds évanouissements dus à la propagation par trajets multiples observée dans l'environnement radio. Forcer la communauté des systèmes cellulaires mobiles à passer à une technique de modulation différente [3, 4]. La figure 1.4 présente une architecture de réseau cellulaire typique pour la 1G. Où une cellule est désignée comme une forme hexagonale. Pour pouvoir augmenter la capacité, les cellules peuvent être divisées en cellules plus petites, également appelées secteurs. Le bureau de commutation téléphonique mobile (MTSO) se connecte aux stations émettrices-réceptrices de base (BTS) et au réseau téléphonique public commuté (RTPC). Il contrôle également les transferts, l'acheminement des appels, l'enregistrement, l'authentification, etc. Il s'agit d'un réseau à commutation de circuits (CS).



**Figure 1.1 Diagramme d'architecture d'un réseau 1G**

Le réseau a utilisé le spectre sous licence pour fournir les services vocaux, spectre que les opérateurs ont acheté auprès des instances dirigeantes concernées.

Les normes cellulaires analogiques 1G déployées dans le monde entier sont énumérées ci-dessous. Note a Il n'existait pas de norme mondiale unique.

- Les services avancés de téléphonie mobile (AMPS)

- basés aux États-Unis

Modulation FM analogique, duplex FDD, accès multiple basé sur FDMA  
Supporte le N-AMPS pour la bande étroite, la largeur de bande du canal était a diminué de 30 à 10 kHz.

- Téléphone mobile nordique (NMT)

- Les pays nordiques

Modulation FM analogique, duplex FDD, accès multiple basé sur FDMA

La largeur de bande du canal dépendait de la bande de fréquence déployée :

25 kHz ou 12,5 kHz

Soutien à l'itinérance dans les pays européens.

- Système de communication à accès total (TACS) - basé au Royaume-Uni

Variante pour le Japon disponible (J-TACS)

Modulation FM analogique, duplex FDD, accès multiple basé sur FDMA

Largeur de bande du canal 30 kHz

### **1.2.3 Systèmes cellulaires de deuxième génération**

Les systèmes cellulaires mobiles de deuxième génération (2G) ont été créés pour étendre la capacité des utilisateurs de la voix ainsi que pour offrir une capacité de services de données intégrés. La technologie s'est éloignée de la modulation analogique pour s'orienter vers la modulation numérique. Ce passage au numérique a permis d'améliorer la qualité des communications vocales grâce à l'utilisation de codeurs vocaux (vocoders), à la prise en charge des services de données, initialement par le biais de services de messagerie courte (SMS), au cryptage pour renforcer la sécurité et à l'augmentation de la capacité du système. Cette génération a permis de passer de l'AMRF à l'AMRT et à l'AMRC. C'était une époque très intéressante pour les utilisateurs de téléphones cellulaires ; nous entendons par là qu'ils étaient exposés à des systèmes cellulaires 2G incompatibles. La communauté européenne soutenait le système mondial de communications mobiles (GSM), tandis que les États-Unis se battaient contre deux normes concurrentes : IS-54 (rebaptisé plus tard IS-135) basé sur l'AMRT et IS-95 (rebaptisé plus tard CDMA-One) basé sur le CDMA. Ces trois normes cellulaires avaient toutes trois une valeur technique.

Afin d'augmenter la capacité du système, non seulement la bande de fréquences a été divisée en canaux, mais aussi le temps a été divisé en tranches horaires pour la TDMA. Dans le cas du CDMA, les informations de chaque utilisateur étaient

brouillées et la fréquence était répartie par une séquence de pseudo-bruit (PN) ; tous les utilisateurs transmettaient en même temps sur l'ensemble du canal.

Ces normes utilisent des fréquences sous licence achetées par les opérateurs de réseau auprès de l'organisme local de gestion du spectre. La complexité des récepteurs augmentait de façon exponentielle, surtout si l'on considère que les débits de données, le schéma de modulation et le nombre d'antennes concernées ont augmenté.

Les normes cellulaires numériques 2G déployées dans le monde entier sont énumérées ci-dessous. Notez qu'il n'existe pas de norme cellulaire mondiale unique.

#### **- Norme GSM unique en Europe**

Basé sur l'AMRT Modulation numérique (GMSK), duplex FDD

Largeur de bande du canal = 200 kHz

Durée de l'image = 4,615 ms

Durée du créneau horaire = 0,557 ms (8 créneaux/trame)

Débit de données = 270.833 Kbps

Évoluée vers les services généraux de radiocommunication par paquets (GPRS), également considérés comme 2,5G

Évoluée vers des débits de données améliorés pour l'évolution du GSM (EDGE), également considéré comme 2,75G.

- IS-54 (également appelé IS-136) - norme américaine Basé sur l'AMRT

Modulation numérique ( $\pi/4$ -DQPSK), duplex FDD

Largeur de bande du canal = 30 kHz

Durée de l'image = 40 ms

Durée du créneau horaire = 6,67 ms (6 créneaux/trame)

Débit de données = 48,6 Kbps.

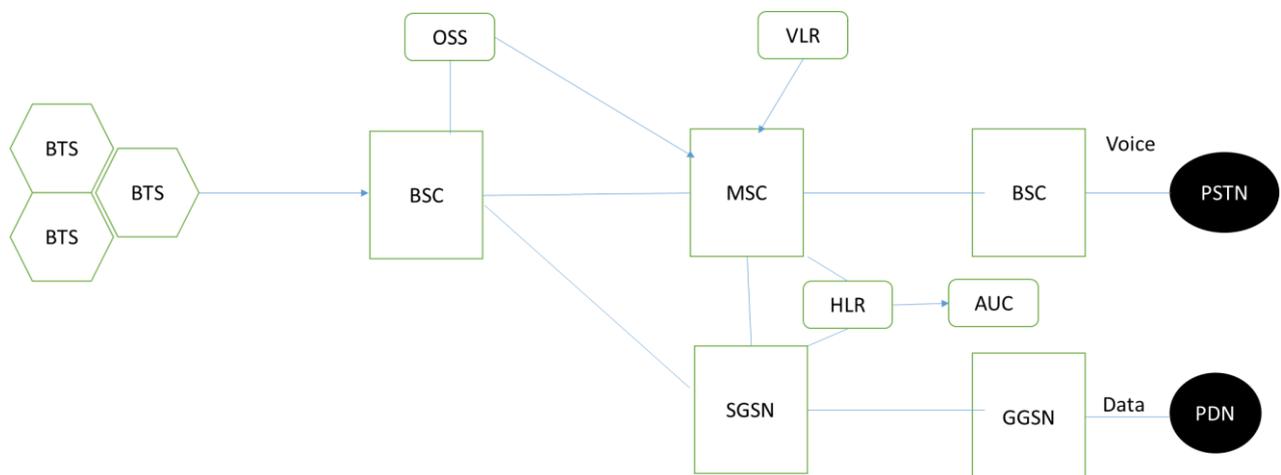
- Norme IS-95 (également appelée CDMA-One) aux États-Unis et en Corée

Basé sur le CDMA, développé par Qualcomm

Modulation numérique (QPSK, O-QPSK), duplex FDD

Durée de l'image = 20 ms

Tous deux ont été créés pour augmenter le débit de données des utilisateurs au-delà de la capacité de base du GSM ainsi que pour ajouter la capacité de services par paquets. Ces systèmes sont très utilisés aujourd'hui [5].



**Figure 1.2 Diagramme d'architecture d'un réseau 2G GSM.**

Le schéma fonctionnel de l'architecture du réseau GSM est illustré à la figure 1.2 et se présente comme suit des éléments de réseau suivants :

- Sous-système de station de base (BSS) qui est composé de deux parties : les BTS et le contrôleur de station de base (BSC)

- Sous-système d'exploitation et de soutien (OSS) qui contrôle et surveille l'ensemble du réseau GSM
- Centre de commutation mobile (MSC) qui assure l'enregistrement, l'authentification, la localisation des appels, l'acheminement des appels, etc.
- Le registre de localisation des domiciles/visiteurs (HLR/VLR), une base de données contenant des informations sur les abonnés
- Le centre de commutation mobile passerelle (GMSC) obtient des informations sur les abonnés de l'HLR pour acheminer les appels vers le MSC correct
- Servir le nœud de support GPRS (SGSN) pour le routage des paquets et la gestion de la mobilité
- Le nœud de support GPRS (GGSN) organise le réseau GPRS et l'interconnexion externe par commutation de paquets.

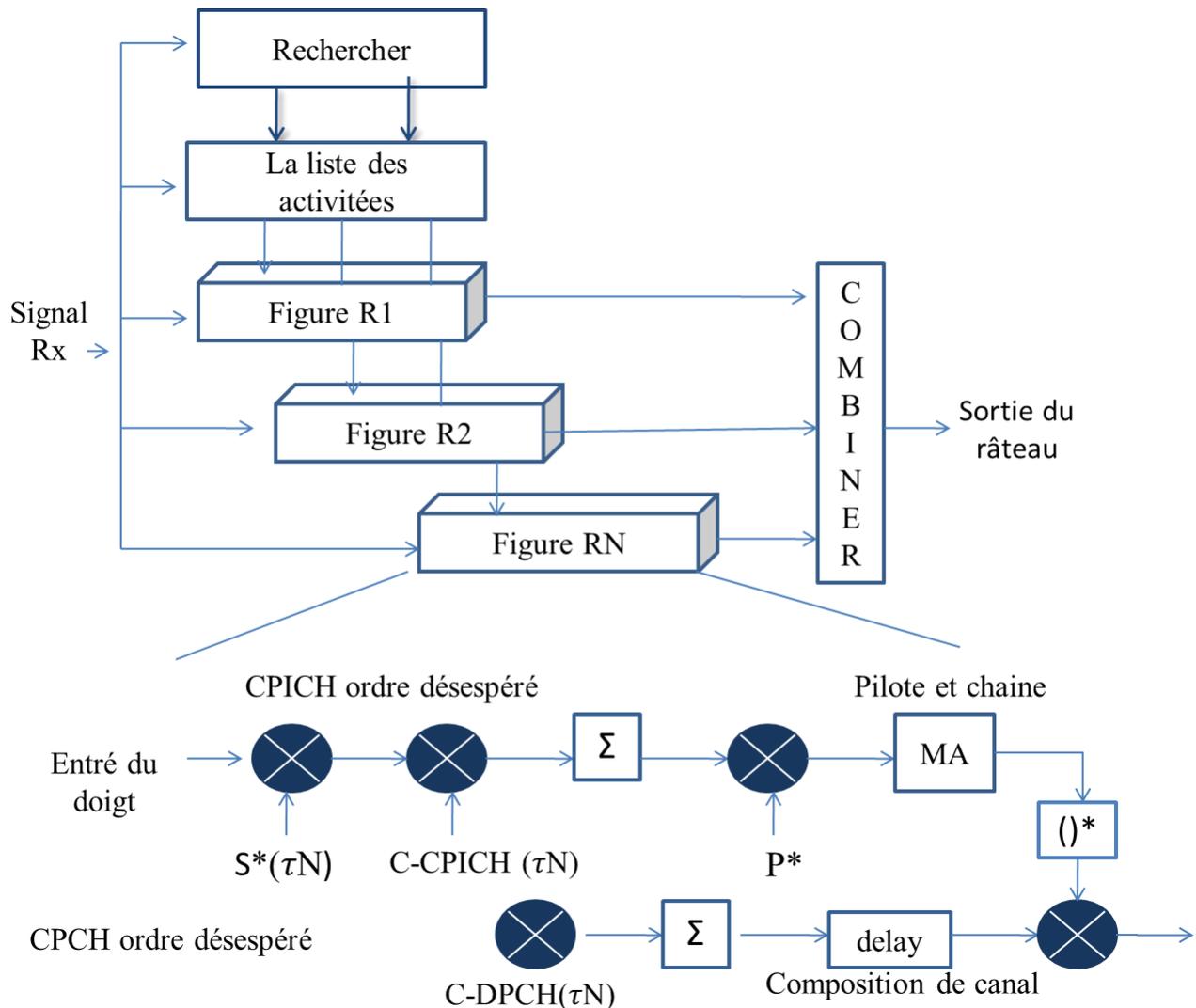
### ***1.2.4 Systèmes cellulaires de troisième génération***

Ce système cellulaire numérique de troisième génération (3G) a été créé pour augmenter la capacité des utilisateurs du système et satisfaire l'appétit croissant de débit de données. Cette génération a fourni la possibilité pour les utilisateurs de surfer sur Internet et d'avoir des services de voix et de données simultanés. Elle a également été le catalyseur de l'écosystème pour introduire des applications vidéo sur les appareils des utilisateurs de téléphones portables. Les services CS et PS ont été pris en charge dès sa définition initiale. À ce stade de l'évolution de la téléphonie cellulaire, l'accès mobile à l'internet devenait de plus en plus important.

La technique de l'AMM est passée de l'utilisation de l'AMRT et de l'AMRC à la normalisation de l'AMRC. Le CDMA-One a évolué vers le CDMA2000, et le GSM/IS-136 a évolué vers le WCDMA (WCDMA).

Le CDMA est une technique d'accès multiple où plusieurs utilisateurs sont séparés par des codes PN et transmettent en même temps sur toute la largeur de bande allouée. Il est bien connu que plus les utilisateurs transmettent, plus les interférences intracellulaires se multiplient, appelées interférences d'accès multiple. Un mécanisme de contrôle de la puissance a été utilisé dans le système pour non seulement améliorer les performances dans un environnement d'évanouissement par trajets multiples, mais aussi pour contrôler les interférences introduites par chaque utilisateur supplémentaire dans le système. Le contrôle de la puissance était la solution au problème de la proximité, son objectif étant d'avoir une transmission UE flexible afin que tous les utilisateurs reçus par le NodeB aient une énergie comparable. Cela a permis de créer une solution dans laquelle tous les utilisateurs pouvaient interférer de la même manière les uns avec les autres. L'Union internationale des télécommunications (UIT) a défini les objectifs de la 3G sous la forme d'exigences IMT-2000. L'organisme de normalisation du 3GPP a été créé et a établi des spécifications pour soutenir les mises en œuvre qui répondaient à ces exigences de l'UIT. Le système cellulaire 3G a continué à utiliser le spectre sous licence. Le concept de petites cellules a été introduit dans la norme et a été appelé Home NB. L'agrégation de porteuses (CA) était une graine plantée dans le système 3G comme méthode pour évoluer et supporter des débits

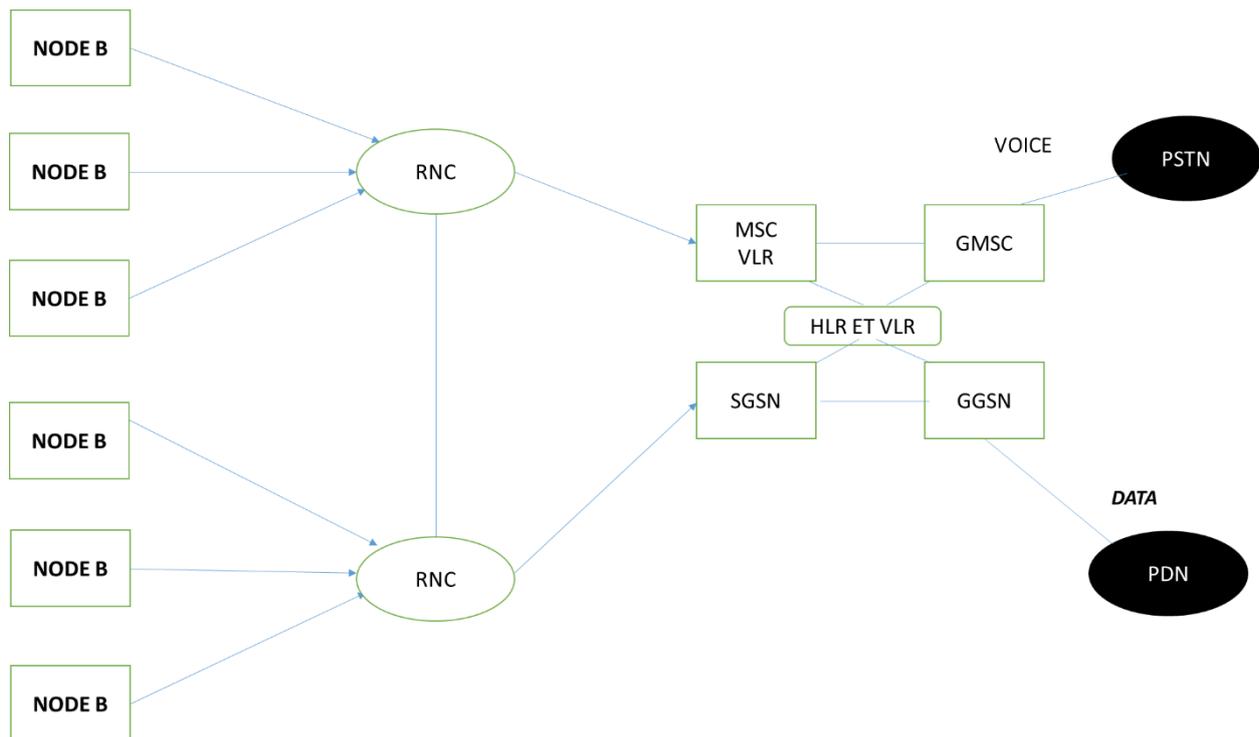
de données plus élevés pour les utilisateurs. Cette graine a grandi et profite actuellement aux systèmes 4G modernes.



**Figure 1.3 Schéma fonctionnel du récepteur de réseau 3G WCDMA**

Le multiplexage spatial à entrées et sorties multiples (MIMO) était également une graine plantée dans le système 3G où plusieurs flux ou couches étaient transmis à l'utilisateur. La modulation d'ordre supérieur a également été normalisée ; le passage de la modulation 16-QAM à 256-QAM dans un système cellulaire mobile

terrestre était très récent à cette époque. La figure 1.2 présente un exemple de récepteur en râteau, conçu pour contrer les effets des évanouissements par trajets multiples, utilisé pour la réception du signal de liaison descendante AMRC-LB. Un paramètre clé de la conception du système WCDMA consiste à faire en sorte que la largeur de bande de transmission soit supérieure à la largeur de bande de cohérence du canal sans fil, de sorte que les trajets multiples (ou échos) puissent être utilisés pour exploiter la diversité temporelle du canal. Le récepteur se compose de  $N$  qui suivent individuellement les trajets multiples et démodulent les formes d'onde respectives. Chaque signal est supposé démoduler le canal pilote commun (CPICH) pour permettre l'estimation du canal [6, 7]. La complexité du récepteur augmente de façon linéaire avec le débit de données, le schéma de modulation utilisé et le nombre d'antennes prises en charge. Dans la norme WCDMA, les options de duplex FDD et TDD ont été fournies pour **les spectres paires et non paires**, respectivement. Pour faciliter le traitement numérique du signal du récepteur, des symboles pilotes communs et dédiés ont été insérés dans les formes d'onde. L'industrie de la téléphonie cellulaire a reconnu le passage complet d'une détection non cohérente à une détection cohérente.



**Figure 1.4 Schéma fonctionnel de l'architecture du réseau WCDMA**

L'architecture du réseau WCDMA 3G est présentée à la figure 1.7. Le NodeB a remplacé les fonctions BTS, et le contrôleur de réseau radio (RNC) a remplacé les fonctions BSC. Le WCDMA est également appelé système de téléphonie mobile universel (UMTS). Le réseau d'accès radio terrestre UMTS (UTRAN) se compose de groupes de NodeB et de RNC [8].

Les normes cellulaires 3G déployées au niveau mondial sont énumérées ci-dessous. Notez qu'il n'existait pas de norme cellulaire mondiale unique.

- WCDMA (également appelé UMTS)

Modulation numérique (QPSK, 16-QAM, 64-QAM, etc.), duplex FDD/TDD

Largeur de bande du canal = 5 MHz (avec un débit de puce = 3,84 Mcps)

Durée de l'image = 10 ms

Durée du créneau horaire = 0,667 ms (15 créneaux horaires/trame)

Débits de données jusqu'à 1 Mbps

Définie par l'organisme de normalisation 3GPP.

- CDMA2000

Modulation numérique (QPSK, 16-QAM, 64-QAM), duplex FDD

Largeur de bande du canal =  $1,25 \text{ MHz} \times 3$

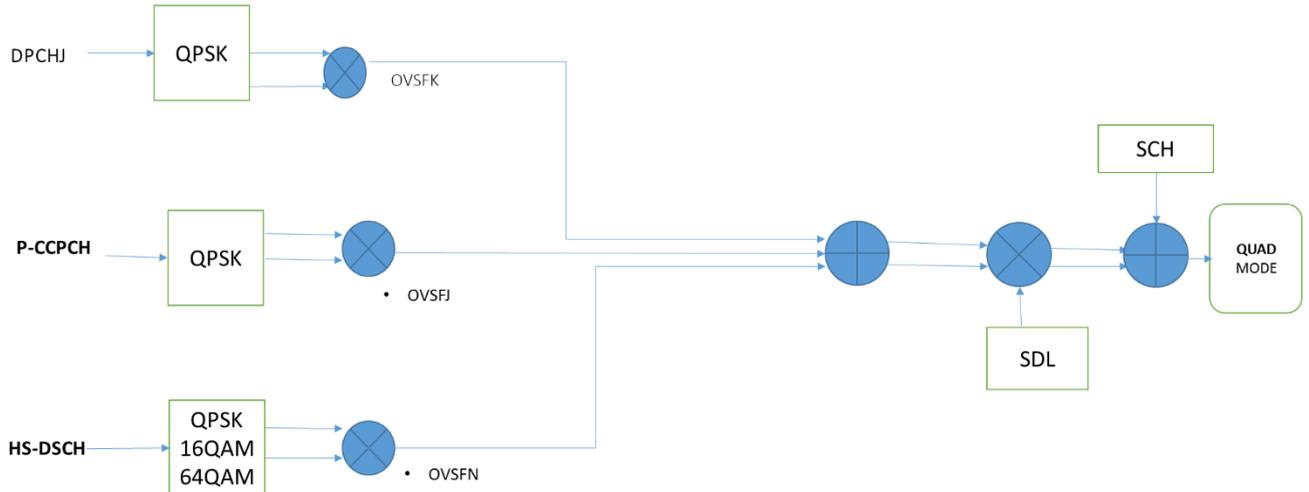
Durée de l'image = 10 ms

Durée du créneau horaire = 0,667 ms (15 créneaux horaires/trame)

Débits de données jusqu'à 1 Mbps

Définie par les normes 3GPP2.

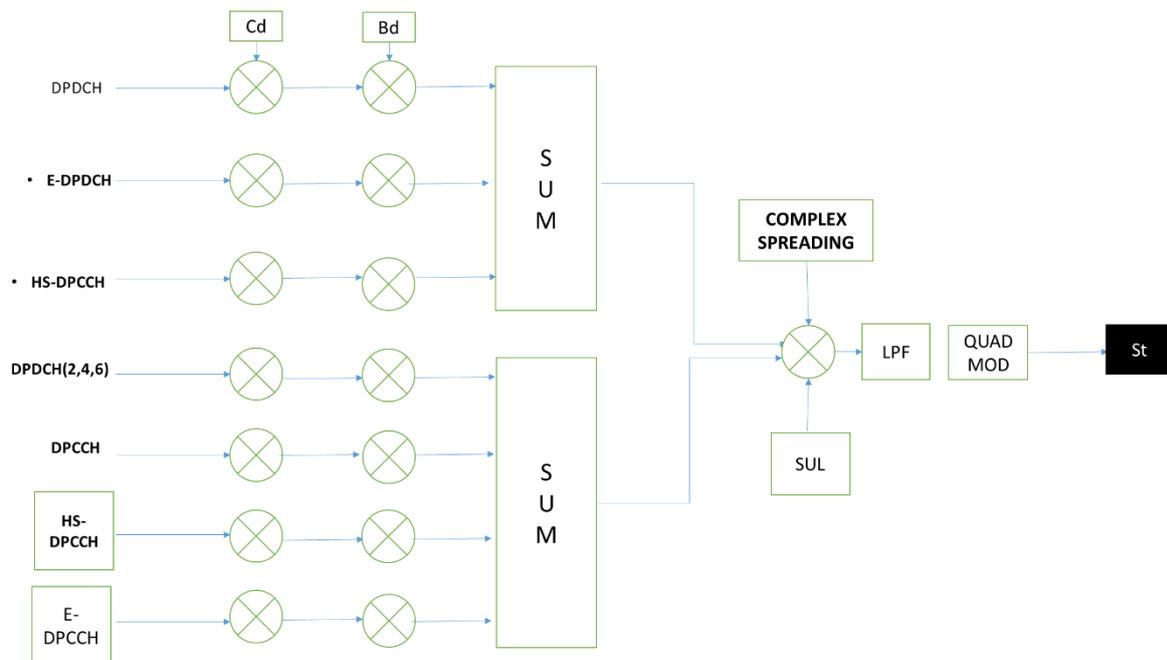
**La figure 1.5** présente un schéma fonctionnel WCDMA de haut niveau de l'émetteur de la liaison descendante. Chaque cellule possède un code d'embrouillage unique, tandis que les mêmes codes d'étalement (facteur d'étalement variable orthogonal (OVSF)) sont réutilisés dans chaque cellule. Les codes d'étalement sont également appelés codes de canalisation.



**La figure 1.5 Schéma fonctionnel de l'émetteur de liaison descendante**

**WCDMA**

Le schéma fonctionnel de **l'émetteur de la liaison montante** est également illustré à la **figure 1.6**

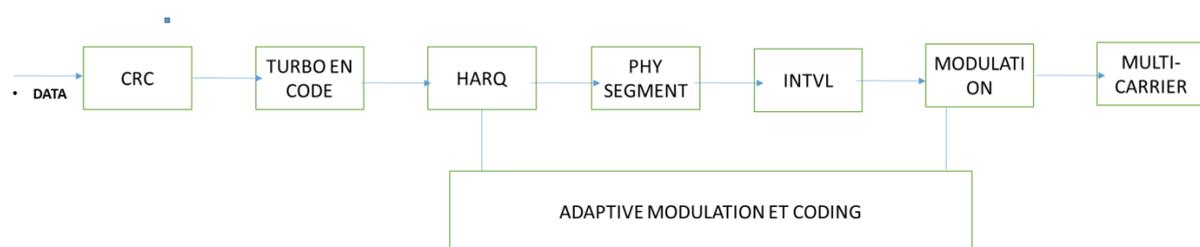


**Figure 1.6 Schéma fonctionnel de l'émetteur de liaison Montante WCDMA**

Chaque cellule possède un code d'embrouillage unique, les codes d'étalement sont également réutilisés dans chaque cellule. La différence est que la liaison montante utilise également le multiplexage en quadrature entre les canaux I et Q [9, 10]. Le système cellulaire WCDMA a évolué vers ce que l'on appelle l'accès par paquets à haut débit (HSPA), qui se compose à la fois de la liaison descendante (HSDPA) et de la liaison montante (HSUPA). Le HSPA a été créé parce qu'il fallait trouver un moyen efficace de fournir des services par paquets. L'HSPA a introduit le concept de canal partagé et la modulation et le codage adaptatifs (AMC) prenant en charge la demande de répétition automatique hybride (HARQ). En outre, dans le HSPA :

- Toute la bande de fréquences a été utilisée
- Les utilisateurs ont programmé sur la base d'un intervalle de temps de transmission de durée de 2 ms, et ont utilisé les codes PN comme ressources physiques.
- Le concept d'aplatissement de l'architecture du réseau a été introduit pour prendre en charge les communications à faible latence.

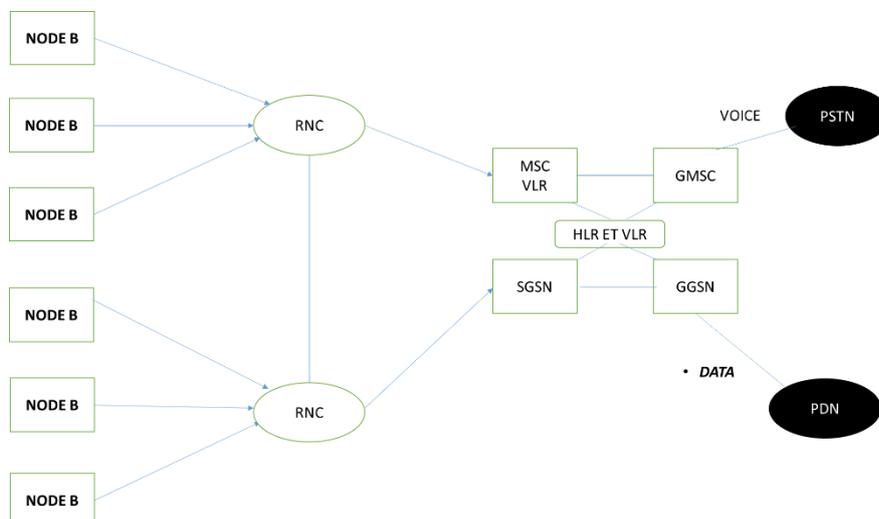
Un diagramme de blocs HSDPA est présenté à **la figure 1.7**.



**Fig. 1.7 Schéma fonctionnel de l'émetteur HSDPA**

Chaque paquet utilisateur est protégé et transmis à l'UE ; un accusé de réception (ACK) est censé garantir l'absence d'erreur de communication. En cas d'accusé de réception négatif (NACK), le planificateur décidera de la combinaison de codage, de modulation et de ressources physiques à utiliser pour augmenter la probabilité d'une communication sans erreur [11].

La figure 1.8 présente le schéma fonctionnel de l'architecture du réseau 3G HSDPA. Certaines fonctionnalités (mises en évidence dans la figure) précédemment exécutées dans le RNC sont maintenant exécutées plus près de la limite du réseau d'accès au sein du NodeB - soutenant l'initiative d'aplatissement du réseau.



**Fig. 1.8 Schéma fonctionnel de l'architecture du réseau HSDPA**

L'évolution du WCDMA est devenue une grande préoccupation pour les concepteurs de systèmes cellulaires. Tous les outils connus étaient utilisés pour augmenter le débit de données de l'utilisateur. Le HOM a été utilisé pour

augmenter le débit de données dans une largeur de bande spectrale autorisée. Le MIMO, sous la forme d'un multiplexage spatial, a été utilisé pour augmenter le débit de données dans une largeur de bande spectrale autorisée. La largeur de bande spectrale a également été augmentée sous forme d'agrégation de porteuses, pour augmenter le débit de données ; cependant, l'efficacité spectrale est restée inchangée. L'augmentation de la largeur de bande à porteuse unique a suscité de plus en plus de préoccupations. Le système WCDMA de base utilisait un récepteur en râteau qui fonctionne mieux lorsque le gain de traitement est plus important, plutôt que plus petit. Ce facteur d'expansion de la largeur de bande (opération d'étalement du signal), associé aux débits de données élevés souhaités par l'utilisateur, a empêché le système WCDMA classique d'évoluer davantage.

### 1.2.5 Systèmes cellulaires de quatrième génération

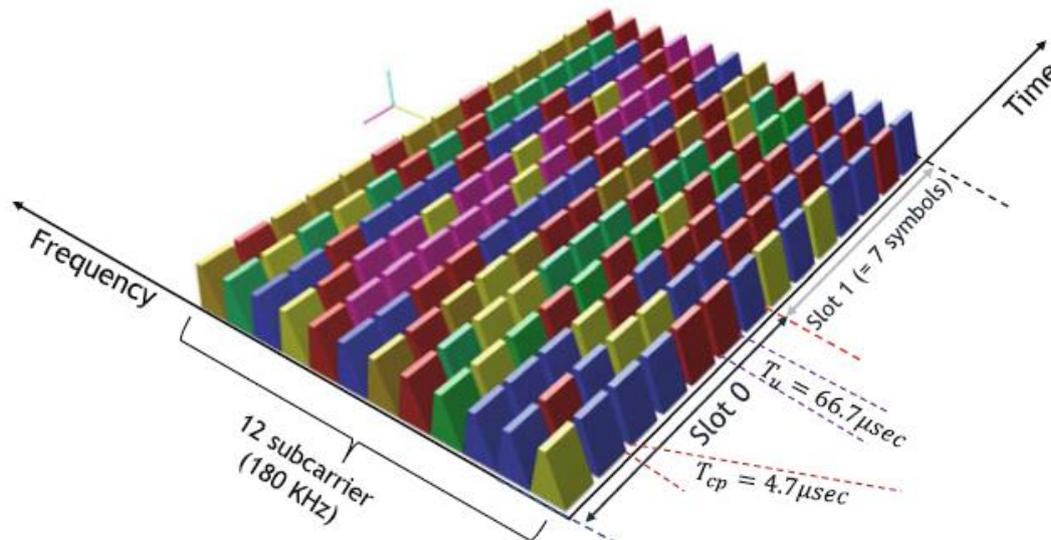
Ce système cellulaire numérique de quatrième génération (4G) a été créé pour soutenir la capacité exponentielle du système et l'appétit de débit de données. Des débits de données beaucoup plus élevés étaient nécessaires pour permettre l'accès à l'internet mobile et aux applications vidéo. L'évolution à long terme (LTE) est également connue sous le nom de 4G et ne prend en charge que les réseaux basés sur la PS. La norme évolue également pour utiliser des options de spectre sous licence, sans licence et partagées, dans le but commun d'augmenter le débit de données de l'utilisateur, d'accroître la capacité du système, de réduire la latence et

d'améliorer l'expérience de l'utilisateur. L'UIT a défini des objectifs 4G sous la forme d'exigences IMT-2010.

À ce stade de l'évolution de la téléphonie cellulaire, le secteur a convergé vers une norme unique, la LTE. Le système cellulaire LTE est basé sur l'OFDMA où le TTI a été réduit de 2 ms (utilisé dans le système cellulaire 3G) à 1 ms. Cette réduction du TTI a amélioré les performances en permettant de réagir plus rapidement aux conditions changeantes des canaux, de sorte que des algorithmes de programmation plus efficaces peuvent être utilisés. La réduction du TTI a également permis de réduire la latence de bout en bout. Les options de largeur de bande de fréquence ont également augmenté : 1,4, 3, 5, 10, 15 et 20 MHz pour permettre des déploiements flexibles de la bande passante. Pour prendre en charge efficacement l'accès multiple FDMA, on a choisi l'OFDMA (via la transformée de Fourier rapide inverse (iFFT) et les opérations FFT) qui a divisé la bande de fréquences en sous-canaux (ou sous-porteuses) d'un espacement de 15 kHz. Pour réduire au minimum la complexité du traitement du signal du récepteur, il était souhaitable que l'espacement des sous-porteuses soit inférieur à la largeur de bande de cohérence du canal sans fil. Pour fournir des services à plus haut débit, la prise en charge des MIMO est obligatoire afin d'accommoder plusieurs couches par multiplexage spatial [12].

Rappelons qu'avec un système TDMA, l'augmentation du débit de données (ou la diminution de la durée de temps de symbole) a amené le récepteur à utiliser un égaliseur pour combattre les interférences inter symboles (ISI). Les débits de

données plus élevés, la modulation d'ordre supérieur et les écarts de retard plus importants ont entraîné une augmentation significative de la complexité de l'égaliseur. Avec un système WCDMA, l'augmentation du débit de données (ou la diminution de la durée de la puce) a obligé le récepteur à utiliser la diversité temporelle du canal sans fil, mais a nécessité un gain de traitement important pour lutter de manière adéquate contre les ISI, avec le WCDMA, la motivation était d'avoir une largeur de bande de transmission plus grande que la largeur de bande de cohérence du canal sans fil ; cependant, pour l'OFDM, c'est le contraire qui est vrai. L'OFDM répond à la demande de débit de données plus élevé en générant de nombreux canaux à bande étroite, où l'on peut voir que chaque canal à bande étroite subit une perturbation plate en fréquence. Cette observation, associée au fait que le traitement du signal dans le domaine fréquentiel est possible, a fait de l'OFDM une technique multiporteuse très intéressante pour atténuer un environnement d'évanouissement sélectif en fréquence. Dans l'OFDMA, les utilisateurs sont multiplexés à la fois dans le domaine des fréquences et dans le domaine temporel, comme le montre **la figure 1.9** pour le système LTE.

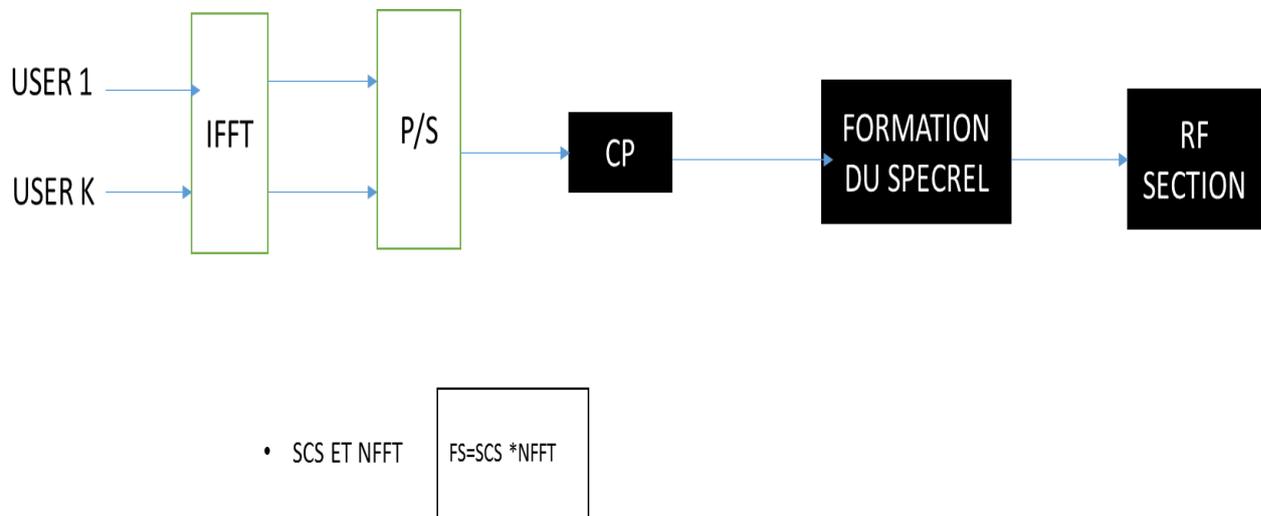


**Fig. 1.9** Représentations temps / fréquence du signal OFDM pour la norme LTE.

Il y a quatre symboles différents (QPSK) chacun représenté par une couleur

Sur l'interface aérienne LTE, l'unité d'allocation est un bloc de ressources physiques (PRB). Un PRB est constitué de 12 sous-porteuses par 7 symboles OFDM, ce qui équivaut à 84 symboles de modulation. L'allocation minimale à un seul UE pendant une sous-cadre (1 ms) est de 2 PRB avec un PRB dans chaque slot de la sous-cadre. Ainsi, un UE obtiendra un total de 2 PRB/sous-trame, ce qui équivaut à 168 symboles de modulation/sous-trame. Notez que ces 168 symboles de modulation ne peuvent pas tous être utilisés pour transmettre des informations d'utilisateur, mais certains de ces symboles de modulation sont utilisés pour la synchronisation ou comme pilote pour l'estimation du canal. Chaque PRB contient 12 sous-porteuses, et a donc une largeur de bande de  $12 \times 15 \text{ kHz} = 180 \text{ kHz}$ . La figure 1.12 représente 2 PRB ( $2 \times 7 \text{ symboles} \times 12 \text{ sous-porteuses}$ ). En supposant une modulation MDPQ, il y a quatre symboles différents représentés par quatre couleurs différentes. Chaque couleur représente un élément de ressource (RE) et transporte deux bits avec la modulation MDPQ. **La figure**

1.10 présente un schéma fonctionnel donnant un exemple de génération de forme d'onde OFDMA.



**Figure. 1.10** Génération de forme d'onde OFDMA avec sous-porteuse K (SC)

Nous mettons également en évidence les différents points de la chaîne de traitement qui peuvent avoir un impact significatif sur les performances du système. Le nombre de sous-porteuses (SC) a un impact direct sur le débit de données et la capacité d'utilisation du système. Du point de vue du système, cette valeur doit être aussi grande que possible ; cependant, la largeur de bande occupée doit être contrôlée par la fonction de mise en forme spectrale. La puissance crête à moyenne du symbole OFDM a également un impact sur la largeur de bande occupée et impose des exigences de linéarité à respecter pour minimiser toute augmentation de la croissance spectrale. Enfin, il faut noter que l'ajout du préfixe cyclique (CP) supprime l'ISI du canal sans fil. La durée du préfixe cyclique (CP) doit être suffisamment grande pour dépasser la longueur de la dispersion

temporelle du canal sans fil, mais aussi petite que possible pour maximiser les informations des données utilisateur pendant la durée de la sous-trame.

L'OFDM présente certains inconvénients qui devraient être pris en compte dans les futurs systèmes, tels que :

- Frais généraux du CP : La nécessité d'ajouter la CP introduit une redondance dans la transmission et entraîne donc une perte d'efficacité spectrale. Cette perte est plus importante lorsque la CP est long ou lorsque l'espacement des sous-porteuses (SCS) est faible.

- Sensibilité aux décalages de fréquence et de temps : Afin de conserver l'orthogonalité en OFDM, l'émetteur et le récepteur doivent avoir exactement la même fréquence de référence. Tout décalage de fréquence ruinera l'orthogonalité, causant une fuite de sous-porteuse connue sous le nom d'interférence inter-porteuse (ICI).

- Émission hors bande (OOB) élevée : L'OFDM suppose une impulsion rectangulaire dans le domaine temporel qui est équivalente à sinc dans le domaine fréquentiel qui a une largeur de bande infinie théoriquement et provoque des émissions relativement élevées (OOB).

L'absence de mise en forme spectrale (filtrage ou fenêtrage) crée de grands lobes latéraux spectraux dans le spectre d'émission.

- Rapport puissance de crête/moyenne élevé (PAPR) : L'enveloppe de la forme d'onde OFDM présente une grande variation qui pose des problèmes lorsqu'on

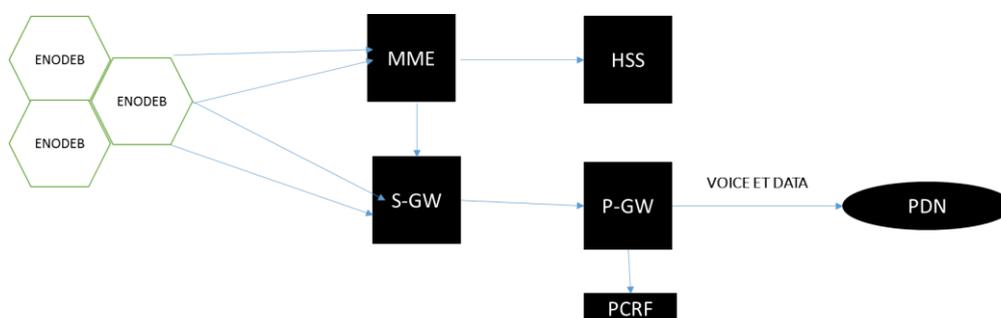
rencontre un dispositif non linéaire tel qu'un amplificateur de puissance d'émission.

Le PAPR élevé en OFDM par rapport à la technique de transmission à porteuse unique est dû à la somme des nombreuses sous-porteuses individuelles ayant des phases différentes, ce qui peut donner un PAPR élevé lorsqu'elles sont additionnées.

En termes de largeur de bande occupée, le 3GPP n'a pas spécifié de technique de mise en forme spectrale en LTE et chaque fournisseur d'équipement et de dispositif met en œuvre sa propre solution. Les sous-porteuses OFDM sont traitées comme des  $\sin(x)/x$ , donc l'application de la mise en forme spectrale permettra de produire une forme d'onde plus efficace sur le plan spectral avec un impact minimal ou nul sur les performances d'orthogonalité. Ces lobes latéraux spectraux ont une puissance relativement élevée en raison de la forme rectangulaire supposée. Ces lobes latéraux élevés nécessitent une large bande de garde pour réduire l'interférence hors bande. L'application de techniques de mise en forme spectrale, telles que la multi-porteuse à banc de filtres, la multi-porteuse à filtrage universel, etc, permettra de réduire les lobes latéraux . L'autre composante peut être trouvée en observant les symboles OFDM transmis adjacents dans le domaine temporel ; il y aura des discontinuités de phase qui causeront également des émissions spectrales.

Le problème de la puissance crête à moyenne de l'OFDM peut être considéré comme une somme pondérée de sinusoides, ce qui permet d'expliquer le grand

PAPR du symbole OFDM généré (jusqu'à 12 dB). Un PAPR élevé peut être problématique si la forme d'onde rencontre des non-linéaires. La réduction du facteur de crête est une technique utilisée pour réduire le PAPR et une technique utilisée pour compenser la distorsion non linéaire est la pré-distorsion numérique. La forme d'onde de la liaison montante LTE utilise la méthode FDMA à porteuse unique (SC-FDMA) pour réduire l'impact du PAPR sur les appareils portables. Enfin, pour minimiser l'ISI et fournir la propriété de convolution cyclique, une petite partie de la fin de chaque symbole est ajoutée au début de chaque symbole OFDM transmis. La taille du CP dépend de l'étalement du délai et le LTE utilise un CP court et un CP long. Pour le LTE, le CP court a une valeur de 4,7  $\mu$ s, ce qui représente environ 8 % du temps du symbole. D'une manière générale, si l'on ne s'attend pas à rencontrer un grand écart de temps de propagation dans un déploiement particulier, il convient alors d'utiliser un CP de durée inférieure ou raccourcie. Le schéma fonctionnel de l'architecture du réseau LTE 4G est présenté à la **figure 1.11**.



**Fig. 1.11** Schéma fonctionnel de l'architecture du réseau 4G LTE

Notez que nous disposons désormais d'une norme cellulaire mondiale unique. Le noyau de paquets évolué (EPC) a remplacé les fonctions du réseau central (CN), et le eNodeB a remplacé les fonctions du NodeB. L'EUTRAN se compose des groupements eNodeB et EPC. La connexion EUTRAN à l'EPC consiste en une signalisation du plan de contrôle et du plan utilisateur. Ce fut le début d'un effort pour séparer les plans utilisateur et de contrôle afin de permettre différentes les taux d'évolution et les scénarios/options de déploiement du réseau [13]. En LTE, le SCS est fixé à 15 kHz, ce qui se traduit par une durée de symbole OFDM de 66,67  $\mu$ s. Il y a 14 symboles de données par tranche de temps (1 ms), et chaque symbole OFDM nécessite un CP. En incluant les durées de tous les CP, on obtient une équivalence de 15 symboles (données + CP) dans une tranche de temps. La plus grande taille de FFT est de 2048, ce qui crée une fréquence d'échantillonnage de 30,72 millions d'échantillons/s. Nous énumérons ci-dessous quelques caractéristiques de la LTE dans le calendrier de diffusion des organismes de normalisation du 3GPP.

- Les taux de données ont augmenté en employant HOM, MIMO, et CA
- De nouvelles fonctionnalités sont ajoutées : DC, V2X, IoT, D2D, etc.
- Une technologie avancée pour soutenir l'amélioration des performances : le système multipoint coordonné (CoMP), réduction de la latence, formation de faisceau - Flexibilité spectrale et RAT : sous licence, partagée, sans licence et LTE-WiFi l'agrégation.

Comme nous l'avons vu précédemment, certaines graines ont été plantées dans le système cellulaire 3G pour d'observer à quel point ils seraient bénéfiques pour les générations futures. Par exemple, CA continue d'être utile, MIMO est devenu de plus en plus essentiel, et HOM est efficace. En fait, ces trois techniques ont été testées avec succès et sont commercialement déployées ; elles doivent atteindre le débit supérieur à 1 Gbps en LTE [14].

La figure 1.15 révèle également un écart par rapport à l'évolution typique des systèmes cellulaires qui a été donnée à l'augmentation des débits de données, à l'augmentation de la capacité des utilisateurs et à la réduction de la latence. Cette nouvelle tendance montre clairement les ajouts de nouveaux services (ou fonctionnalités, cas d'utilisation) que l'industrie reconnaît comme étant nécessaires à la demande de la société. Ces nouveaux services n'étaient pas vraiment destinés à être abordés lors de la création de la 4G en 2006. La largeur des nouveaux services attendus augmente très rapidement (comme le montre la figure 1.3). Le réseau connaît également sa propre croissance évolutive. Le "front d'onde" basé sur la mise en réseau définie par logiciel (SDN) et la virtualisation des fonctions réseau (NFV) quitte le centre de données [15], se fraye un chemin à travers le réseau central et jusqu'au réseau d'accès sans fil. Ces charges de travail du CN et du RAN ont commencé à être mises en œuvre sur une plate-forme homogène et polyvalente basée sur l'unité centrale (au lieu des approches traditionnelles logique dédiée + processeur de signal numérique + microcontrôleur). Cela a déclenché le mouvement Cloud RAN en utilisant les

avantages du secteur des technologies de l'information et de la communication (TIC). La 4G déploiera ces technologies, et lorsqu'elles seront couronnées de succès, on s'attend à ce que la 5G soit une mise à niveau du réseau.

### **Conclusion**

Les réseaux mobiles et sans fil ont connu un essor sans précédent ces dernières années. Il s'agit d'une part du déploiement de plusieurs générations successives de réseaux de télécommunications essentiellement dédiés à la téléphonie (2G, GSM) puis plus orientés vers le multimédia (3G, UMTS). D'autre part, les réseaux locaux sans fil sont rentrés dans la vie quotidienne au travers de standards phares tels que Wifi, Bluetooth, etc.

Depuis plusieurs années le développement des réseaux mobiles n'a pas cessé d'accroître, plusieurs générations ont vues le jour (1G, 2G, 3G, 4G et prochainement la 5G pas encore mis en œuvre) et connues une évolution remarquable, en apportant un débit exceptionnel et qui ne cesse d'augmenter, une bande passante de plus en plus large et un des avantages d'une telle bande passante est le nombre d'utilisateur pouvant être supportés.

**Chapitre 2 : l'accès multiple par code**  
**(SCMA)**

## *Introduction*

Les systèmes surchargés, dans lesquels le nombre d'utilisateurs est supérieur à la dimension de l'espace du signal, présentent un intérêt pratique pour les communications multi-utilisateurs à large bande.

L'un de ces systèmes est l'accès multiple par code épars (SCMA), qui est une technique prometteuse d'accès multiple non orthogonal par domaine de code pour relever les défis des réseaux mobiles de cinquième génération (5G) [1-4]. L'accès multiple non orthogonal a le potentiel d'accueillir plus d'utilisateurs avec des ressources limitées, ce qui offre de nombreux avantages par rapport à l'accès multiple orthogonal, notamment la capacité multiutilisateur, la prise en charge de la transmission surchargée, la fiabilité et la faible latence de la transmission sans subvention, la flexibilité du multiplexage des services, etc. Les applications de la signalisation non orthogonale pour les communications multi-utilisateurs ont été étudiées il y a plusieurs années, des efforts importants ont été consacrés à la conception optimale de la signalisation et aux techniques de détection intensive multi-utilisateurs, afin de supprimer les interférences d'accès multiple (MAI) pour réduire la probabilité d'erreur ou augmenter la capacité. Hoshyar et Guo suggèrent l'accès multiple basé sur une signature à faible densité (LDS) [5], ou l'accès multiple par répartition en code (CDMA) [6], qui permet à chaque utilisateur de répartir intentionnellement ses données sur une fraction des puces, au lieu de toutes les puces, pour réduire à la fois l'interférence d'accès multiple et la

complexité de la détection multi-utilisateurs. Inspiré par la capacité de surcharge et la faible complexité du LDS, le SCMA est développé en héritant du LDS la structure de séquence clairsemée, de sorte que l'algorithme de passage de message (MPA) est disponible dans la détection multi-utilisateurs pour atteindre des performances quasi optimales.

Contrairement au système LDS, les constellations de signaux multidimensionnelles, au lieu de l'étalement, sont utilisées en SCMA pour lutter contre l'évanouissement des canaux et l'AMI. Par conséquent, le SCMA permet d'obtenir un gain de codage plus important et une meilleure efficacité spectrale grâce à l'amélioration des livres de codes par rapport au LDS. Faisant partie de la famille NOMA, le SCMA est capable de prendre en charge un accès surchargé dans le domaine du codage, ce qui permet d'augmenter le débit et la connectivité globale. En concevant soigneusement le livre de codes et les constellations de modulation multidimensionnelles, le codage et le gain de mise en forme peuvent être obtenus simultanément. Dans un système SCMA, les utilisateurs occupent les mêmes blocs de ressources de manière peu dense, ce qui permet une détection conjointe abordable et peu complexe au niveau du récepteur. La rareté du signal garantit une petite collision même pour un grand nombre d'utilisateurs simultanés, et la conception des codes de type "spread-coding" apporte également une bonne couverture et une capacité anti-interférence grâce au gain d'étalement.

## 1.1 Modèle de système de transmission SCMA

### 1.1.1 Procédure d'accès multiple

Un système de transmission SCMA peut être simplement illustré sur la figure.1. Supposons qu'il y ait  $J$  utilisateurs synchrones multiplexant sur  $K$  ressources orthogonales partagées, par exemple  $K$  tranches de temps ou des tonalités de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM), et que chaque utilisateur utilise une couche SCMA. Le schéma de codage de contrôle d'erreur directe (FEC) peut être des codes de contrôle de parité à faible densité (LDPC) ou des codes polaires qui ont été adoptés récemment pour le 5G. Chaque modulateur/encodeur SCMA fait correspondre les bits codés à un mot de code complexe à  $K$  dimensions, et les  $J$  mots de code qui en résultent constituent un bloc SCMA ( $J = 6, K = 4$ ).

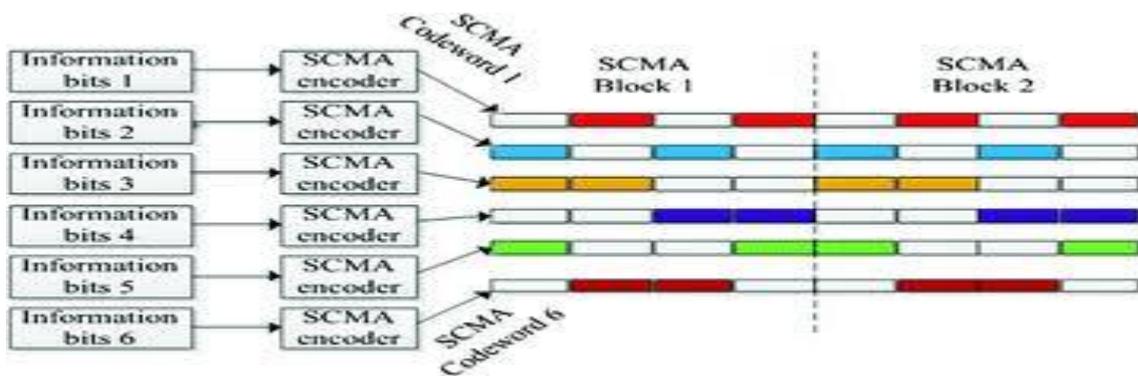


Figure 2.1 Le modèle de système pour SCMA

Les mots de code multi-utilisateurs dans chaque bloc SCMA sont multiplexés sur les transmissions aériennes dans le canal d'accès multiple (MAC) de la liaison montante, ou ils sont superposés à l'émetteur du canal de diffusion de la liaison descendante (BC). Comme chaque bloc SCMA occupe  $K$  ressources pour la transmission des mots de code, le facteur de surcharge qui en résulte est  $J/K$ . Ce processus d'accès multiple est similaire à celui du CDMA, où les signaux étalés en CDMA sont remplacés par les mots de code SCMA. Une détection multi-utilisateurs est effectuée au niveau du récepteur pour récupérer les mots de code en collision. Pour le MAC de la liaison montante, le vecteur de signal reçu après le multiplexage synchrone par l'utilisateur est exprimé comme suit :

$$\mathbf{y} = \sum \mathit{diag}(\mathbf{h})\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad .1$$

où  $x_j = [x_j[1], \dots, x_j[K]]^T$  et  $h_j = [h_j[1], \dots, h_j[K]]^T$ , sont respectivement le mot de code à  $K$  dimensions et le gain de canal correspondant pour le  $j$ ème utilisateur, et  $\mathit{diag}(h_j)$  désigne la matrice diagonale avec  $h_j[K]$  étant la  $k$ ème element de la diagonale. Le  $\mathbf{n}$  vecteur de taille  $n$  est le bruit blanc gaussien additif (AWGN) avec une moyenne nulle et une variance  $N_0$  par dimension. Il est pratique de considérer le modèle MAC comme un système de communication "MIMO" équivalent, et le vecteur reçu en (1) devient :

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

où  $H = [diag(h_1), \dots, diag(h_K)]$ , est la matrice de canaux "MIMO" équivalente, et  $X = [x_1^T, \dots, x_J^T]$ , est le mot de code multi-utilisateurs combiné représentant un bloc SCMA. Pour la liaison descendante BC, les mots de code des utilisateurs multiples sont superposés avant la transmission, de sorte qu'ils subissent le même évanouissement. En cas d'absence de brouillage entre les ressources K, le vecteur de signal reçu est donné par :

$$y = diag(h) \sum x + n = diag(h)x \quad (3)$$

Où un seul récepteur est considéré ici pour des raisons de simplicité.  $X = J = 1 \ x_j$ , est le mot de code superposé de J utilisateurs à l'entrée d'un BC, qui représente également un bloc de mots de code SCMA. Dans ce qui suit, la majuscule X désigne toujours le mot de code combiné multi-utilisateurs de J utilisateurs dans le modèle MAC, ou le mot de code superposé dans le modèle BC.

### 1.1.2 Cartographie du livre de codes SCMA

Livre de codes dans le SCMA sont conçues conjointement de manière multidimensionnelle et peu étendue Contrairement à la modulation utilisée pour la 3G et la 4G, la modulation et la cartographie du. Un modulateur/encodeur SCMA mappe les bits d'entrée en un mot de code à K dimensions éparses, qui est sélectionné dans un livre de code de taille M spécifique à la couche. Les mots de code complexes à K dimensions du livre de code sont des vecteurs épars avec  $N < K$  entrées non nulles, et tous les mots de code contiennent 0 dans les mêmes

dimensions. Le livre de codes est donc éparé, et c'est de là que provient le nom de l'"accès multiple par code éparé". Les livres de codes sont construits par une cartographie à partir d'une constellation complexe à  $N$  dimensions avec une matrice de cartographie. Désigne la constellation pour la  $j^{\text{ème}}$  couche/utilisateur avec  $C_j$ , qui contient  $M_j$  points de constellation de longueur  $N_j$ . La matrice de cartographie  $V_j$  fait correspondre les points de la constellation à  $N_j$  Dimensions avec les mots de code SCMA pour former le livre de codes  $X_j$ . Pour simplifier notre éclairage et notre analyse, nous supposons que toutes les couches ont la même taille et la même longueur de constellation, c'est-à-dire  $M_j = M, N_j = N, \forall j$ . En résumé, le livre de codes résultant pour le  $j^{\text{e}}$  utilisateur contient  $M$  mots de code, chaque mot de code est constitué de  $K$  valeurs complexes à partir desquelles seul  $N$  est non nul spécifié par la matrice de cartographie  $V_j$ .

**figure.2.** La présente un exemple de cartographie des livres de codes, où est illustré un ensemble de livres de codes contenant 6 livres de codes pour la transmission de 6 couches SCMA ( $J = 6$ ). Chaque livre de codes contient 8 mots de code en quatre dimensions ( $M = 8, K = 4$ ), et deux des quatre entrées dans les mots de code sont non nulles ( $N = 2$ ). Lors de la transmission, le mot de code de chaque couche est sélectionné sur la base de l'étiquetage de la séquence de bits.

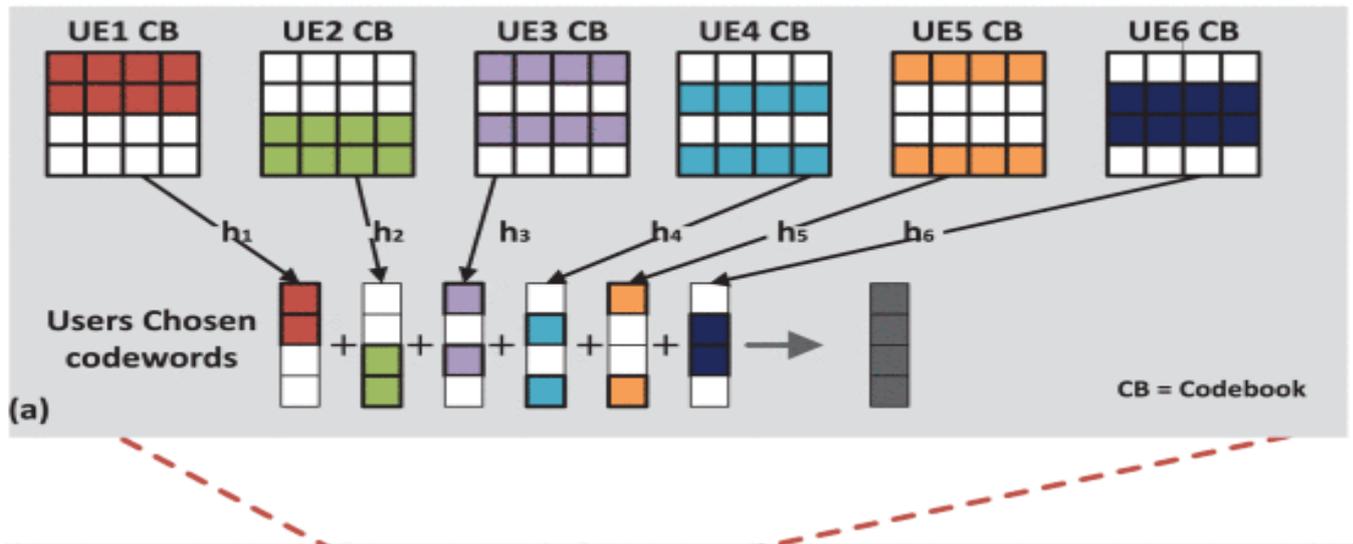


Figure .2.2 Illustration des livres de codes SCMA et de la correspondance entre les bits et les mots de code

### 1.1.3 Représentation graphique des facteurs

La structure à faible densité des mots de code SCMA peut être efficacement caractérisée par un graphique factoriel, qui est analogue à celui des codes LDPC.

Un vecteur colonne binaire  $\mathbf{f}_j$  de longueur  $k$  est utilisé pour indiquer les positions des entrées nulles (avec le chiffre 0) et non nulles (avec le chiffre 1) du  $j$  livre de codes. Ensuite, une matrice  $K \times J$  clairsemée  $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_J]$ , appelée matrice de graphe factoriel, peut être utilisée pour indiquer les relations entre les couches et les ressources. Les lignes de  $\mathbf{F}$  indiquent les ressources et les colonnes indiquent les couches.  $(k, j)$ ème élément de  $\mathbf{F}$ , désigné par  $\mathbf{f}_{k,j}$ , est égal à 1 si la  $j$ ème couche fournit ses données à la  $k$ ème ressource. De même, les  $J$  nœuds de variables (VN) et les  $K$  nœuds de fonctions (FN) du graphique factoriel représentent respectivement les couches et les ressources, et le  $j$ ème VN

est relié au kème FN si et seulement si  $\mathbf{fk}, \mathbf{j} = \mathbf{1}$ . Dans ce qui suit, nous indiquons :(4)

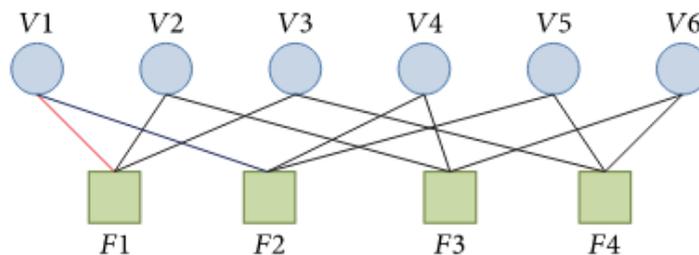
$$\omega \mathbf{k} = \{j; 1 < j < k; f = 1\}$$

$$\omega \mathbf{j} = \{k; 1 < j < k; f = 1\}$$

L'ensemble des couches contribuant à la **kième** ressource, et l'ensemble des ressources occupées par la **jième** couche, respectivement. Pour une matrice de graphique factoriel régulier,

$$|\varphi \mathbf{1}| = |\varphi \mathbf{K}| \text{ et } |\varphi \mathbf{1}| = \dots = |\varphi \mathbf{J}|, \text{ et } d \mathbf{f} = |\varphi \mathbf{k}| \text{ et } d \mathbf{v} = |\varphi \mathbf{j}|.$$

Graphique factoriel avec  $K = 6N = 4$



**Figure .2.3 Représentations graphique d'un facteur d'un décodeur**

Les principales caractéristiques de la SCMA sont les suivantes :

- **Multiplexage non orthogonal par domaine de code** : Le SCMA permet la superposition de plusieurs mots de code provenant de différents utilisateurs sur plusieurs ressources, ce qui permet de supporter la surcharge. Le modèle de superposition sur chaque ressource est défini dans les livres de codes.

- Diffusion épars : Le SCMA utilise l'étalement dispersé pour réduire les interférences entre les couches, de sorte que davantage de collisions de mots de code peuvent être tolérées avec un récepteur peu complexe.
- Modulation multidimensionnelle : Le SCMA utilise des constellations multidimensionnelles pour une meilleure efficacité spectrale.

```

6 % Livres de codes
7 CB (:,:, 1) = [ 0 0 0 0 ; ...
8 - 0,1815 - 1j * 0,1318 - 0,6351 - 1j * 0,4615 0,6351 + 1j * 0,4615 0,1815 + 1j * 0,1318 ; ...
9 0 0 0 0 ; ...
10 0,7851 - 0,2243 0,2243 - 0,7851 ];
11
12 CB (:,:, 2) = [ 0,7851 - 0,2243 0,2243 - 0,7851 ; ...
13 0 0 0 0 ; ...
14 - 0,1815 - 1j * 0,1318 - 0,6351 - 1j * 0,4615 0,6351 + 1j * 0,4615 0,1815 + 1j * 0,1318 ; ...
15 0 0 0 0 ];
16
17 CB (:,:, 3) = [- 0,6351 + 1j * 0,4615 0,1815 - 1j * 0,1318 - 0,1815 + 1j * 0,1318 0,6351 - 1j * 0,4615 ; ...
18 0,1392 - 1j * 0,1775 0,4873 - 1j * 0,6156 - 0,4873 + 1j * 0,6156 - 0,1392 + 1j * 0,1775 ; ...
19 0 0 0 0 ; ...
20 0 0 0 0 ];
21
22 CB (:,:, 4) = [ 0 0 0 0 ; ...
23 0 0 0 0 ; ...
24 0,7851 - 0,2243 0,2243 - 0,7851 ; ...
25 - 0,0055 - 1j * 0,2242 - 0,0193 - 1j * 0,7848 0,0193 + 1j * 0,7848 0,0055 + 1j * 0,2242 ];
26
27 CB (:,:, 5) = [- 0,0055 - 1j * 0,2242 - 0,0193 - 1j * 0,7848 0,0193 + 1j * 0,7848 0,0055 + 1j * 0,2242 ; ...
28 0 0 0 0 ; ...
29 0 0 0 0 ; ...
30 - 0,6351 + 1j * 0,4615 0,1815 - 1j * 0,1318 - 0,1815 + 1j * 0,1318 0,6351 - 1j * 0,4615 ];
31
32 CB (:,:, 6) = [ 0 0 0 0 ; ...
33 0,7851 - 0,2243 0,2243 - 0,7851 ; ... /
34 0,1392 - 1j * 0,1775 0,4873 - 1j * 0,6156 - 0,4873 + 1j * 0,6156 - 0,1392 + 1j * 0,1775 ; ... /
35 0 0 0 0 ];
36

```

Figure .2.4 constellations multidimensionnelles

## 1.2 Détection des utilisateurs multiples

Cette sous-section traite des schémas de détection multi-utilisateurs pour le SCMA, y compris la détection optimale, le récepteur MPA et d'autres récepteurs avancés.

### 1.2.1 Détection multi-utilisateurs optimale/quasi-optimale

#### A. Détection optimale des utilisateurs multiples

Supposons que l'état du canal soit parfaitement estimé au niveau du récepteur, étant donné le vecteur de signal reçu  $y$ , on peut écrire le maximum optimal commun de détection de probabilité a posteriori (MAP), pour le mot de code multi-utilisateur  $X$  et pour le mot de code du  $j$  e utilisateur  $x_j$

$$X_j = \arg \{(\max(p_{x/y}))\} \quad (2)$$

$$p(x/y) = p(y/x)/p(y) \times p(y/x) p(x) p(x/y)$$

Sont respectivement la probabilité a priori conjointe pour le mot de code de chaque utilisateur et la probabilité du vecteur de signal reçu. En supposant que les composantes du bruit sur les  $K$  ressources sont distribuées de manière identique et indépendante.) (*i. i. d.*), on obtient :

$$p(x) = \sum p(x_j) \text{ et } p(y) = \sum p(y/x) p(x) p(y) \quad (3)$$

et si l'on considère que seuls  $d$   $f$  utilisateurs se sont réellement affrontés pour la  $k$ th ressource, nous avons

$$p(y\{k\}/x) = 1/\pi N_0 \text{ EXP}(-1/N_0 [y\{k\} - \sum h_j x_j \{kk\}]) \quad (4)$$

Ainsi, la décision MAP pour le  $j$  e mot de code de l'utilisateur est donnée par :

$$X_j = \mathit{arg\ max} [\sum p(x) \sum p(y[k]/x)] \quad (5)$$

Avec la probabilité du mot de code pour chaque utilisateur, il est facile de calculer le taux de log-vraisemblance (LLR) pour chaque bit codé, afin qu'il puisse servir d'entrée pour le décodeur FEC. Pour le  $j$ ieme utilisateur, le LLR, en considérant le même bit  $b_{j,m}$ , est calculé par

$$A(b_{jm}) = \log(\mathit{pr}\{b_{jm} = 1/y\} / (\mathit{pr}\{b_{jm} = 0/y\}) \quad (6)$$

Où  $X_{1j,m}$  et  $X_{0j,m}$  sont des sous-ensembles de  $X_j$  pour lesquels le même bit du  $j$ ieme utilisateur,  $b_{j,m} = 1$  et  $b_{j,m} = 0$  respectivement. Notez que la résolution de l'équation (8) est équivalente à la résolution du problème du produit marginal des fonctions (MPF), qui est d'une complexité exponentielle avec la recherche en force brute, et dont l'emploi est prohibitif lorsque le nombre d'utilisateurs augmente.

## **B. Détection des MAP**

Comme le codage SCMA peut être représenté par un graphique factoriel à propriété éparse, l'AMP de faible complexité peut être utilisée pour résoudre le problème du MPF avec des performances quasi optimales.

Soit  $I(t) = kj$  l'information extrinsèque à passer de  $FN K$  à  $VN J$  à la  $t$ ieme itération, et  $I(t) = JK$  l'information extrinsèque à passer de  $VN J$  à  $FN K$ . Étant donné la probabilité antérieure  $p(x_j)$ , la probabilité que  $X_j$  soit transmis

par le *jieme* utilisateur étant donné l'échantillon du canal est mise à jour comme suit :

$$I(x_j) = \sum p(x_j) \quad (10)$$

Après un certain nombre d'itérations, la probabilité postérieure de  $X_j$  produite par le MAP est proportionnelle à :

$$I_j(x_j) = p(x_j) \sum I(x_j) \quad x_j.j = 1 \dots \dots j \quad .11$$

Après un certain nombre d'itérations, la probabilité postérieure de  $X_j$  produite par le MAP est proportionnelle à :

$$A(b_{jm}) = \log(\sum x_j I_j(x_j) / \sum x_j I_j(x_j)) \quad .12$$

où  $X_{1j.m}$  et  $X_{0j.m}$  sont les mêmes que dans l'équation (9). La principale complexité de l'AMP provient du calcul de (12.10), la sommation sur  $x_i$  additionne termes alors que  $M$  probabilités doivent être calculées à chaque itération, ce qui conduit à un ordre de complexité  $O(KMD F)$ , et est bien inférieur à celui de la détection optimale de l'AMP. Dans les applications pratiques, la fonction exponentielle dans l'algorithme MPA peut entraîner de grandes gammes dynamiques et une très forte charge de stockage, alors le domaine logarithmique MPA est préféré pour éviter les opérations exponentielles. Pour l'opération log-MPA, les informations échangées entre les FN et les VN peuvent être exprimées par:

$$I(x_j) = \log p(x_j) + \sum I(x_j) \quad .13$$

où la formule logarithmique de Jacobi  $\log I_{epi} = \max p_i$  est appliquée pour une réduction de la complexité à un certain degré, ce qui donne la détection max-log-MPA. Le LLR de sortie du détecteur MPA est donné par :

$$A(b_j, m) = \max I_j(x_j) - \max I_j(x_j) \quad .14$$

$$I_j(x_j) = \log p(x_j) + \sum I_j(x_j)$$

### 1.2.2 Autres détecteurs avancés

Le détecteur MPA présente encore une complexité exponentielle en ce qui concerne la taille du livre de codes (M) et le nombre d'utilisateurs accédés à chaque ressource (d f), ce qui peut devenir peu pratique pour la mise en œuvre de livres de codes de très grande taille (par exemple,  $M \geq 64$ ) et de très forte surcharge (par exemple,  $d f \geq 8$ ). Certains autres détecteurs avancés peuvent exploiter le gain potentiel de la SCMA tout en offrant une flexibilité suffisante pour un bon compromis entre la performance et la complexité de la détection [7, 8].

## A. Détecteur EPA

L'algorithme de propagation des attentes (EPA) est une méthode d'inférence bayésienne approximative dans l'apprentissage machine pour estimer des distributions postérieures sophistiquées avec des distributions simples par projection de distribution, et il s'avère être un détecteur multi-utilisateurs itératif efficace pour le SCMA ainsi que certains autres schémas d'accès multiples [8]. Elle permet d'approcher le message discret dans l'AMP comme un message gaussien continu en utilisant le critère de divergence Kulmbach- Libeller ( KL) minimum, et d'utiliser les probabilités a posteriori renvoyées par le décodeur FEC pour calculer la croyance approximative en un symbole et le message approximatif, de sorte que le passage du message se réduise à la moyenne et que les paramètres de variance soient mis à jour. L'algorithme détaillé est donné dans [8]. Avec l'EPA, l'ordre de complexité de la détection SCMA est réduit à une complexité linéaire, c'est-à-dire qu'il ne s'échelonne linéairement qu'en fonction de la taille  $M$  du livre de codes et du degré moyen des nœuds de facteur  $d_f$ , tandis que les résultats de la simulation montrent que le détecteur EPA présente presque les mêmes performances d'erreur que le MPA pour la SCMA avec diversité de récepteur. En conséquence, la charge de calcul du récepteur SCMA est considérablement allégée et ne pose plus de problème pour la mise en œuvre dans les systèmes réels.

## **B. Détecteur SIC-MPA**

Le récepteur SIC (Successive interférence cancellations) est une sorte de récepteur multi-utilisateurs qui traite tous les autres utilisateurs non décodés comme des interférences lors du décodage d'un utilisateur cible, et peut être mis en œuvre soit au niveau du symbole, soit au niveau du mot codé. Il fonctionne bien lorsque le rapport signal/bruit (SNR) reçu par les utilisateurs est très différent de celui des autres utilisateurs. Cependant, la performance de détection se détériore lorsque la différence de SNR n'est pas évidente entre les utilisateurs, auquel cas il y a propagation d'erreur. Pour trouver un bon équilibre entre les performances de la liaison et la complexité de la mise en œuvre, il est raisonnable de combiner le SIC avec un récepteur MPA (SIC-MPA). Plus précisément, la MPA est appliquée à un nombre limité d'utilisateurs en premier lieu, de sorte que le nombre d'utilisateurs en collision sur chaque ressource ne dépasse pas une valeur seuil donnée (par exemple, les utilisateurs  $d_s$ ). Ensuite, les utilisateurs décodés avec succès sont retirés par le SIC et la procédure se poursuit jusqu'à ce que tous les utilisateurs soient décodés avec succès ou qu'aucun nouvel utilisateur ne soit décodé avec succès dans MPA. Dans le cas où  $d_s = d_f$ , la MPA est complète, et lorsque  $d_s = 1$ , elle devient un récepteur SIC pur. Étant donné que la MPA est utilisée pour un nombre très limité d'utilisateurs au lieu de tous les

utilisateurs, la complexité du décodage est considérablement réduite, qui est de l'ordre de  $O(t \cdot kmbs)$

## Conclusion

Le SCMA peut être considéré comme un schéma d'accès multiple par division de code, Les livres de codes sont construits sur la base de constellations multidimensionnelles, et le gain de mise en forme l'aide à surpasser les schémas fournit jusqu'à 300% de connectivité supplémentaire en répartissant les informations du livre de codes de chaque utilisateurs sur de SCMA est introduit pour augmenter le spectre spectral de liaison descendante et l'efficacité des réseaux cellulaires sans fil 5G.

MU\_SCMA par rapport aux autres techniques de multiplexage existantes telles que MU\_MIMO dont laquelle la sensibilité au vieillissement de la chaîne et haute les frais généraux au retour d'informations sur les canaux sont les obstacles à leurs mise en œuvre pratique dans un réseau réel.

Le débit de données élevé et même en temps la robustesse à la mobilité sont deux grands avantages de MU\_SCMA, en outre par rapport à un schéma MU\_MIMO basé sur le domaine spatial, pré codage, le multiplexage dans le domaine de code a un avantage en terme de calcul coté émission.

L'extension de MU\_SCMA à multiples TP et les scénarios MIMO constituent une orientation pour les activités de recherches futures.

SCMA est un candidat prometteur pour la communication 5G car il tonalité fréquence OFDMA partagé.

**Chapitre 03 : Expérience mise en œuvre du codage**  
**SCMA**

## **Introduction**

Afin d'améliorer l'accès sans fil, de nouvelles techniques de modulation comme la SCMA sont envisagées. Afin d'évaluer leur pertinence, des architectures de plateformes matérielles possibles sont envisagées. Les solutions finales doivent répondre aux contraintes technologiques imposées par la vitesse de l'horloge, la densité des transistors et la taille des matrices pour répondre aux exigences croissantes en matière de débit de données et à la complexité des techniques avancées de traitement des signaux. Dans les implémentations de systèmes sans fil typiques, des fonctionnalités de haut niveau sont implémentées dans des logiciels ou des micro logiciels exécutés sur des unités de traitement central (CPU) à usage général, tandis que les fonctionnalités des couches PHY et MAC sont généralement exécutées sur un mélange de cœurs DSP et d'accélérateurs de bande de base dédiés. Les stations de base virtuelles peuvent également être mises en œuvre en intégrant plusieurs systèmes sur puce (Soc) avec un tissu d'interconnexion à haut débit.

### **3.1 Chaîne d'émetteur SCMA**

Les livres de codes SCMA constituent les régions de contention des utilisateurs qui caractérisent chaque utilisateur ou chaque couche de données. Les mots de code SCMA, collectés pour les flux entrants du livre de codes SCMA, sont rares pour atténuer la complexité de l'algorithme de transmission de messages (MPA) utilisé pour la détection multi-utilisateurs [48] [49]. Une simple chaîne d'émetteurs SCMA, comme comprend trois modules : le Turbo Encoder, La conception des livres de codes peut être considérée comme la première étape de la mise en œuvre de SCMA, à partir de laquelle les chaînes de liaison montante et descendante peuvent être définies (figure 3.1).

#### **3.1.1 vers un encodeur SCMA**

Dans un encodeur SCMA, les bits codés sont mappés à des mots de code dans le domaine complexe comme des amplitudes de signaux I et Q. Ensuite, les mots de code étendus sont transmis au canal. Les bits codés qui sont encodés par le code turbo sont injectés à l'entrée de l'encodeur SCMA. Chaque deux bits entrants sont mappés à un mot de code qui arrive de différents livre de code multidimensionnels. Comme nous avons utilisé un exemple de jeu de codes, pour chaque couche de données/utilisateur, un livre de codes différent est utilisé. Chaque livre de codes a quatre mots de code qui est un vecteur de quatre points de constellation. Par conséquent, au lieu de transmettre deux bits, quatre points de constellation sont transmis.

Chaque mot de code a quatre points de constellation transmis sur respectivement quatre ressources physiques. Dans notre mise en œuvre, il y a six couches de

données/utilisateurs et quatre ressources physiques. De plus, les bits entrants pour chaque couche de données sont indépendants et peuvent être traités en parallèle, de sorte que chaque ressource physique (PRE) transmet la somme de six points de constellation extraits des mots de code de six couches de données différentes (figure 3.2)

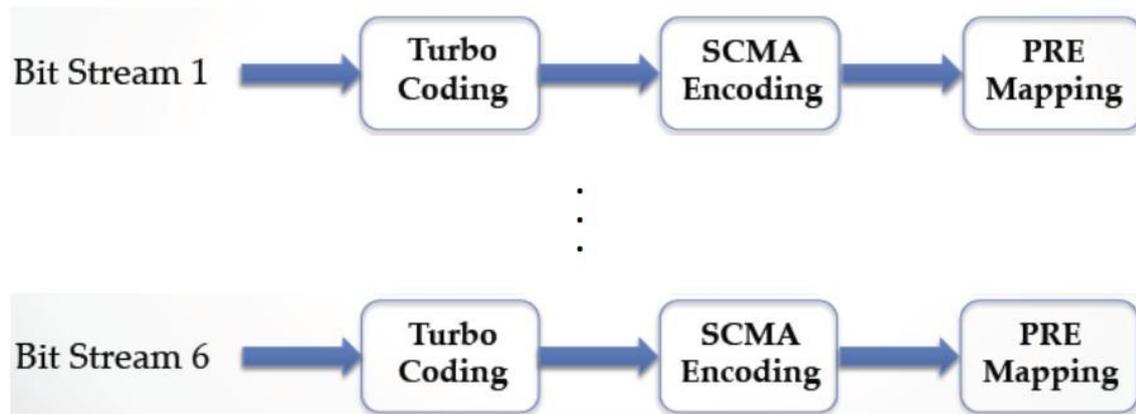


Figure .3.1 une solution prometteuse pour la 5G



Figure .3.2 constellation de six couches de données différentes.

### 3.1.2 Cartographie des ressources physiques du GER

Chaque mot de code a quatre points de constellation et il y a aussi quatre ressources physiques (P rés), dans ce cas, chaque point de constellation d'un mot de code serait transmis au moyen d'un GER. Puisque dans la mise en œuvre, il y a six couches de données/utilisateurs et quatre ressources physiques, pour transmettre chaque élément d'un mot de code de six utilisateurs au moyen d'un GER, six points de constellation devraient être ajoutés ensemble et transmis. De plus, les bits entrants pour chaque couche de données sont indépendants et traités en parallèle, alors ce qui serait mappé à chaque ressource physique (PRE) est la

somme de six points de constellation de six couches de données différentes.

### **3.2 Mise en œuvre de MATLAB**

MATLAB a été utilisé pour la mise en œuvre préliminaire d'une chaîne de codage SCMA en conjonction avec les encodeurs Turbo disponibles dans la boîte à outils de communication. Ainsi, le turbo encodeur de la boîte à outils de communication MATLAB peut être utilisé conjointement avec la chaîne de transmission SCMA. Les données d'entrée pour chaque utilisateur sont différentes et indépendantes et ont au moins 1024 bits. Comme notre hypothèse dans cette mise en œuvre est d'avoir six couches de données/utilisateurs et quatre ressources physiques, six formes et couleurs différentes ont été utilisées pour afficher les points de constellation liés à chaque utilisateur de données dans du. Tableau 3.1 et tableau 3.3.

**Tableau 3.1 : Encodage turbo à l'aide de la boîte à outils de communication MATLAB**

### Encodage Turbo avec MATLAB Communication

```
36
37 K = taille (CB, 1 ); % nombre de ressources orthogonales
38 M = taille (CB, 2 ); % nombre de mots de code dans chaque livre de codes
39 V = taille (CB, 3 ); % nombre d'utilisateurs (couches)
40
41 N = 10000 ; % De signaux SCMA dans la trame
42
43 EbN0 = 0 : 20 ;
44 SNR = EbN0 + 10 * log10 (log2 (M) * V / K);
45
46 Nerr = zéros (V, longueur (SNR));
47 Nbits = zéros (V, longueur (SNR));
48 BER = zéros (V, longueur (SNR));
49
50 maxNumErrs = 100 ;
51 maxNumBits = 1e7 ;
52 Nitre = 10 ;
```

En revanche, ce qui sera transmis sur chaque ressource physique (PRE) sont des amplitudes complexes de signaux porteurs orthogonaux I et Q. Comme six points de constellation devraient être transmis par un PRE, un total de six signaux I et Q seront transmis en profondeur un PRE. Par conséquent, la sommation de six points de constellation de six mots de code de différentes couches de données/utilisateurs est transmise par la P .

**Tableau 3.2 : Mappage de mots de code pour un utilisâtes**

```
36
37 K = taille (CB, 1 ); % nombre de ressources orthogonales
38 M = taille (CB, 2 ); % nombre de mots de code dans chaque livre de codes
39 V = taille (CB, 3 ); % nombre d'utilisateurs (couches)
40
```

### ***3.3 Mise en œuvre du logiciel d'encodeur SCMA et résultats***

Afin d'évaluer la complexité du codage SCMA et du multiplexage pour la

cartographie PRE, une mise en œuvre logicielle a été développée avec le langage de programmation C. Cette mise en œuvre suppose six couches de données/utilisateurs et quatre ressources physiques comme la mise en œuvre de MATLAB. Un exemple de recueil de codes compatible a été utilisé [52]. Comme un encodeur SCMA de base encode deux bits de chaque couche de données/utilisateur par itération, la première implémentation logicielle a suivi cette règle. Dans cette implémentation, dès que les deux premiers bits arrivent, le processus d'encodage commence. Le pseudo de codage SCMA pour cette mise en œuvre est indiqué dans le tableau 3.3. Le temps de traitement du codage SCMA Pour améliorer le temps de traitement, il est possible d'encoder plus de deux bits utilisateur de données par itération.

**Tableau 3.3 Pseudo de codage SCMA pour la première mise en œuvre**

<b>Pseudo-code de codage SCMA pour la première</b>	
<pre> &gt;&gt; 54 pour k = 1 : longueur (SNR) 55 56 N0 = 1 / ( 10 ^ (SNR (k) / 10 )); % puissance de bruit 57 58 while ((min (Nerr (:, k)) &lt; maxNumErrs) &amp;&amp; (Nbits ( 1 , k) &lt; maxNumBits)) 59 60     x = randi ([ 0 M- 1 ], V, N); Symboles % log2 (M) bits 61 62     h = 1 / sqrt ( 2 ) * (randn (K, V, N) + 1j * randn (K, V, N)); % Canal Rayleigh 63 64     s = scmaenc (x, CB, h); % d'encodage conjoint et propagation de canal d'évanouissement 65     y = awgn (s, SNR (k)); 66 67     LLR = scmadec (y, CB, h, N0, Niter); 68 69     % Symbole à la conversion de bits 70     r = de2bi (x, log2 (M), « left-msb » ); 71     données = zéros (log2 (M) * N, V); 72     pour kk = 1 : V </pre>	$\Sigma$

Afin de tirer parti de cette opportunité, le jeu de codes devrait être réarrangé et redimensionné pour pouvoir mapper quatre bits en deux mots de code à chaque itération. Par conséquent, pour cette deuxième implémentation logicielle,

l'ensemble de code book a été organisé pour permettre le traitement de quatre bits à la fois au lieu de deux. **Le tableau 3.4** montre le pseudo associé à cette mise en œuvre. Bien qu'il soit prévu que lorsque le nombre de bits traités à chaque itération double, le temps de traitement par bit pourrait être réduit d'un facteur de deux. Cependant, le temps de traitement observé par bit pour le deuxième logiciel. La mise en œuvre n'a pas été réduite de moitié, en partie en raison d'une complexité accrue lorsque les livres de codes sont réarrangés

**Tableau 3.4 : Pseudo de codage SCMA pour la deuxième implémentation**

#### Pseudo-code de codage SCMA pour la deuxième implémentation

```

76     Conversion % LLR en bits
77     datadec = remodeler ((LLR <= 0), [log2 (M) N * V]) . » ;
78     datar = zéros (log2 (M) * N, V);
79     pour kk = 1 : V
80         datar (:, kk) = remodeler (sous-échantillonnage (datadec, V, kk-1) . ' , [], 1);
81     fin
82
83     err = sum (xor (data, datar));
84     Nerr (:, k) = Nerr (:, k) + err. » ;
85     Nbits (:, k) = Nbits (:, k) + log2 (M) * N;
86     fin
87     BER (:, k) = Nerr (:, k) ./ Nbits (:, k);
88     k

```

Une autre approche pour améliorer le temps de traitement consiste à ajouter plus de parallélisme au code. Pour ce faire, le code a été réécrit en un code configurable. Cette version peut être configurée avec différents niveaux de parallélisme de 1,2,3 et 6. Cela signifie par exemple que si le parallélisme est défini sur 1, deux bits de chaque utilisateur sont traités par itération et si le parallélisme est défini sur 2, quatre bits de chaque utilisateur sont traités par itération. Les niveaux de parallélisme utilisés dans cette conception ont été choisis en fonction du nombre de couches/utilisateurs de données. Depuis lors, les

niveaux de parallélisme devraient être divisibles par 6 et donc les niveaux appropriés peuvent être 1,2,3 et 6. Le tableau 3.6 indique le pseudo-code de Les résultats observés montrent que le débit n'augmente pas linéairement et qu'il n'y a plus d'amélioration significative si le parallélisme est augmenté au-delà de 6. Ainsi, lorsque le code est instancié avec un parallélisme de 6, que l'algorithme de base sature les ressources matérielles disponibles pour un thread unique sur un i7.

### **3.3.1 Amélioration de la mise en œuvre et des résultats du logiciel d'encodeur SCMA**

Afin d'évaluer la complexité du codage SCMA et du multiplexage pour la cartographie PRE, des mises en œuvre logicielles ont été développées avec le langage de programmation C. Ces implémentations supposent six couches de données/utilisateurs et quatre ressources physiques. Encore une fois, le même jeu de codes d'exemple compatible a été utilisé [52]. Dans les implémentations précédemment discutées, un encodeur SCMA configurable avec différents niveaux de parallélisme a les meilleurs résultats. Comme le nombre de couches/utilisateurs de données est de six, quatre niveaux de parallélisme ont été développés dans cette conception. Puisque les valeurs de parallélisme déterminent le nombre de bits par utilisateur traité dans chaque appel de fonction, le nombre de bits de chaque couche de données/utilisateur traité par itération est égal à la valeur de parallélisme multipliée par deux. Par exemple, si la valeur de parallélisme est définie à 1, deux bits de chaque couche de données/utilisateur sont traités par itération et pour une valeur de parallélisme de 2, quatre bits de chaque couche de données/utilisateur sont traités par itération. En outre et dans la première tentative, afin de réduire la complexité du calcul, le type de données entier court a été utilisé pour les entrées et les sorties. En général, l'utilisation d'entiers courts au lieu de nombres à virgule

flottante a un impact sur la précision. Mais dans l'implémentation d'encodage SCMA, l'utilisation d'un entier court au lieu d'une virgule flottante n'a aucun impact sur la précision car la caractéristique inhérente des éléments de mots de code. La raison en est que les valeurs des mots de code utilisés dans les implémentations ont zéro valeur entière et ont seulement quatre chiffres dans leur partie mantissa. Donc, ils peuvent totalement tenir dans un entier court sans aucun arrondi. Aussi dans cette implémentation, le point fixe peut être utilisé avec tant de bits sans aucune influence sur la précision du calcul, nous avons juste besoin de mettre le point décimal fixe après le cinquième chiffre des éléments de codewords valeur et de réduire les résultats en conséquence. Bien que les résultats de cette mise en œuvre aient été bons, comme nous le verrons plus loin, ils n'ont pas atteint l'objectif d'un débit supérieur à 1 Gbps. Par conséquent, l'encodeur SCMA a été repensé et certaines améliorations ont été apportées afin de réduire le temps de traitement de l'encodage SCMA (latence) Pour la prochaine approche, la caractéristique inhérente de l'algorithme de codage SCMA a été considérée. Dans les implémentations d'encodeur SCMA conçues, il y a quatre P rés qui transmettent des mots de code de six couches/utilisateurs de données et à cette fin, certains ajouts sont normalement utilisés. Comme les carnets de codes utilisateurs sont constants, les résultats des addendas, qui sont les valeurs transmises par la P rés, sont prévisibles et peuvent être calculés à l'avance. Par conséquent, afin de réduire le temps de calcul dans l'encodeur SCMA, les addendas PRE sont remplacés par un tableau de recherche pré-compilé. Cette conception est appelée dans le reste de cette section l'encodeur SCMA configurable sans adder. En fait, pour chaque bit de résultat, cinq ajouts doivent être effectués afin qu'un encodeur SCMA sans adder enregistre 5 ajouts. Dans ce cas, les tableaux de recherche doivent être pré-compilés à l'avance. Une mise en œuvre du code C tirant parti d'un tel tableau a été produite. La taille du tableau est déterminée par le nombre de couches de données/utilisateurs et nombre

de Pres. La version No adder du pseudo de l'encodeur .**Tableau 3.5 : Codage SCMA configurable sans pseudo Adder (tableau multiple)**

<b>Codage SCMA configurable avec pseudo-code sans additionneur (table multiple)</b>
<pre> &gt;&gt; 54 pour k = 1 : longueur (SNR) 55 56 N0 = 1 / ( 10 ^ (SNR (k) / 10 )); % puissance de bruit 57 58 while ((min (Nerr (:, k)) &lt; maxNumErrs) &amp;&amp; (Nbits ( 1 , k) &lt; maxNumBits)) 59 60 x = randi ([ 0 M- 1 ], V, N); Symboles % log2 (M) bits 61 62 h = 1 / sqrt ( 2 ) * (randn (K, V, N) + 1j * randn (K, V, N)); % Canal Rayleigh 63 64 s = scmaenc (x, CB, h); % d'encodage conjoint et propagation de canal d'évanouissement 65 y = awgn (s, SNR (k)); 66 67 LLR = scmadec (y, CB, h, N0, Niter); 68 69 % Symbole à la conversion de bits 70 r = de2bi (x, log2 (M), « left-msb » ); 71 données = zéros (log2 (M) * N, V); 72 pour kk = 1 : V 73 données (:, kk) = remodeler (sous-échantillon (r, V, kk- 1 ) . ' , [], 1 ); 74 fin </pre>

En outre, pour réduire davantage la complexité, le type de données entier court est utilisé pour les entrées et les sorties au lieu du type de données à virgule flottante. Dans cette conception, un seul tableau pré-compilé est utilisé pour produire quatre valeurs de sortie Pres. Afin de tirer davantage parti de l'indépendance des couches de données/utilisateurs et d'expérimenter davantage sur le parallélisme exploitable, au lieu d'utiliser une table de recherche pré-compilée, plusieurs tables ont été utilisées pour générer des sorties partitionnées. De cette manière, puisqu'il y a quatre Pres dans l'encodeur SCMA conçu, quatre tables de recherche peuvent être utilisées. Encore une fois, ces quatre tableaux de consultation devraient être générés et disponibles pour la conception principale. Les données entrant dans cette implémentation montrées comme données reçues dans le pseudo code suivant sont la concaténation des bits de tous les utilisateurs et par conséquent la taille des données reçues est de

12bits. La taille de chaque tableau sera de 4096 valeurs complexes, qui proviennent du nombre de couches de données/utilisateurs et du nombre de P existant dans cette conception. Par conséquent, des améliorations significatives dans le temps de traitement (1/débit) et le débit ont été obtenus en utilisant . Bien qu'un débit de plus de 1Gbps soit obtenu, les résultats sont quelque peu décevants car les gains sont sous-linéaires. Il semble qu'il n'y ait pas de relation logique raisonnable entre les performances avec différentes valeurs de parallélisme mais la raison pour laquelle ces résultats sont obtenus est que l'algorithme a suffisamment de parallélisme intrinsèque mais que le matériel sur lequel il exécute ne peut pas l'exploiter. Par exemple, lorsque le code est instancié avec un parallélisme de 6, l'algorithme de base sature les ressources matérielles. Après avoir analysé les résultats de la mise en œuvre de l'encodeur SCMA sans adder, une question a été soulevée quant à la quantité d'économies réalisées dans le temps de calcul des données sans conception d'adder. Dans les mises en œuvre signalées, quatre P rés ont été présumées. Pour calculer chaque sortie PRE, des mots de code de différentes couches de données/utilisateurs doivent être ajoutés ensemble et puisque dans l'implémentation du logiciel ces ajouts sont exécutés séquentiellement, il faut le temps maximum pour procéder en comparaison avec d'autres parties. La plus grande partie de la consommation de temps dans la fonction principale de l'encodeur SCMA pour la version Configurable with Short integer est la fonction de codage SCMA qui consiste en adders PRE . Ainsi, il y a un compromis entre le calcul réel et les tables de recherche pré-calculées. Cependant, les résultats Pres sont tout à fait prévisibles, donc lorsque nous utilisons des tables pré-calculées, nous utilisons simplement la

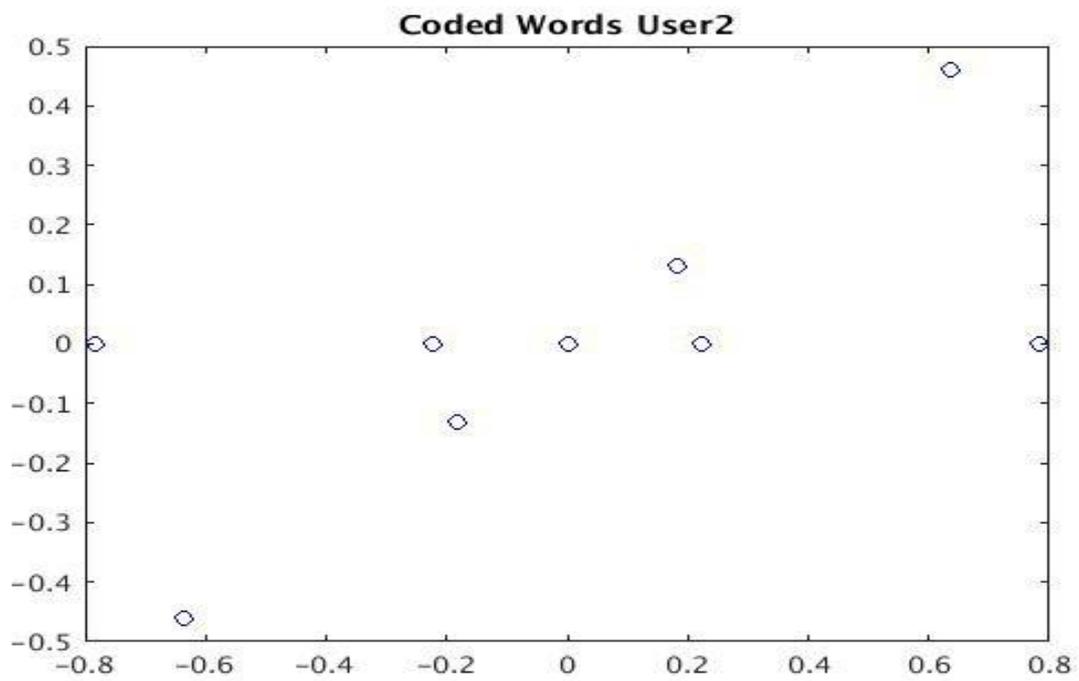
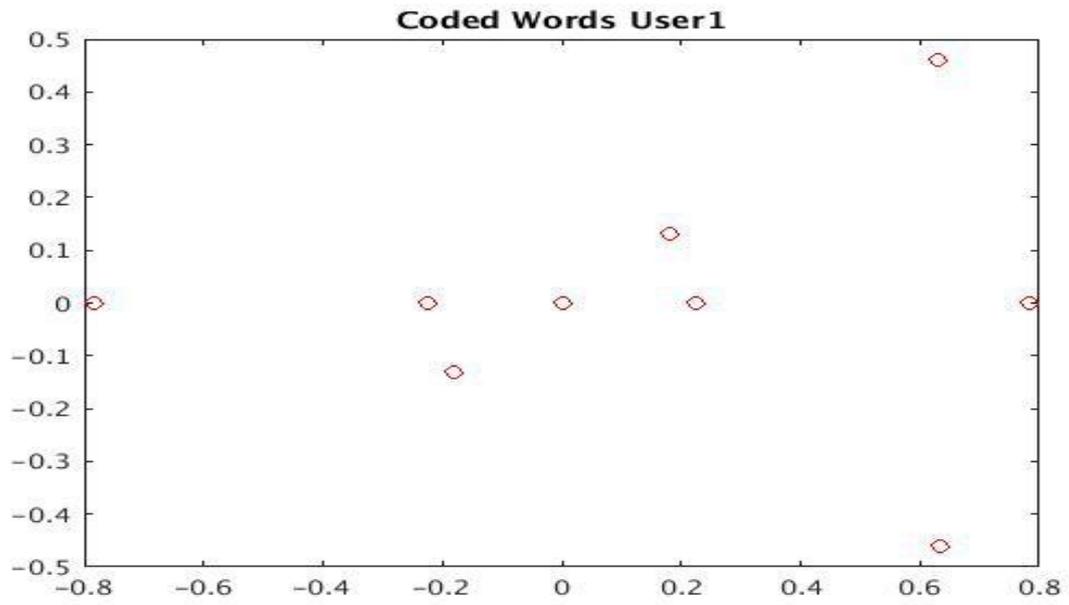
caractéristique inhérente de l'algorithme d'encodeur SCMA pour réduire la complexité du calcul.

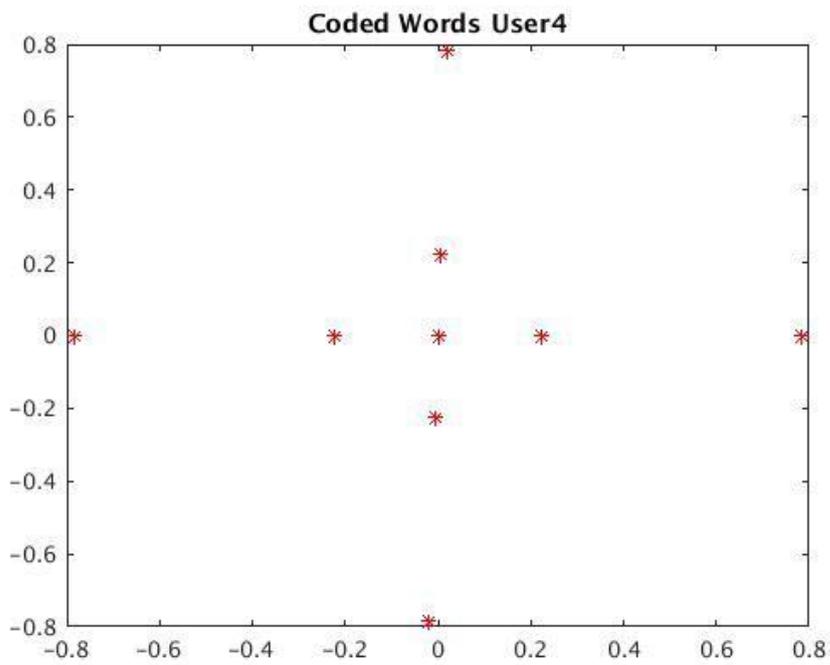
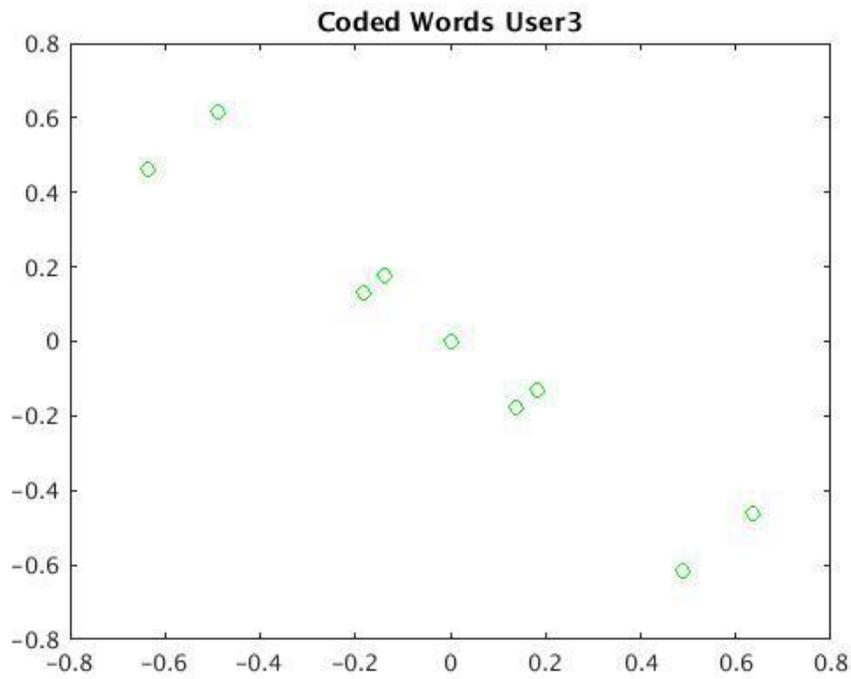
### **3.4 RÉSULTATS DE LA MISE EN ŒUVRE**

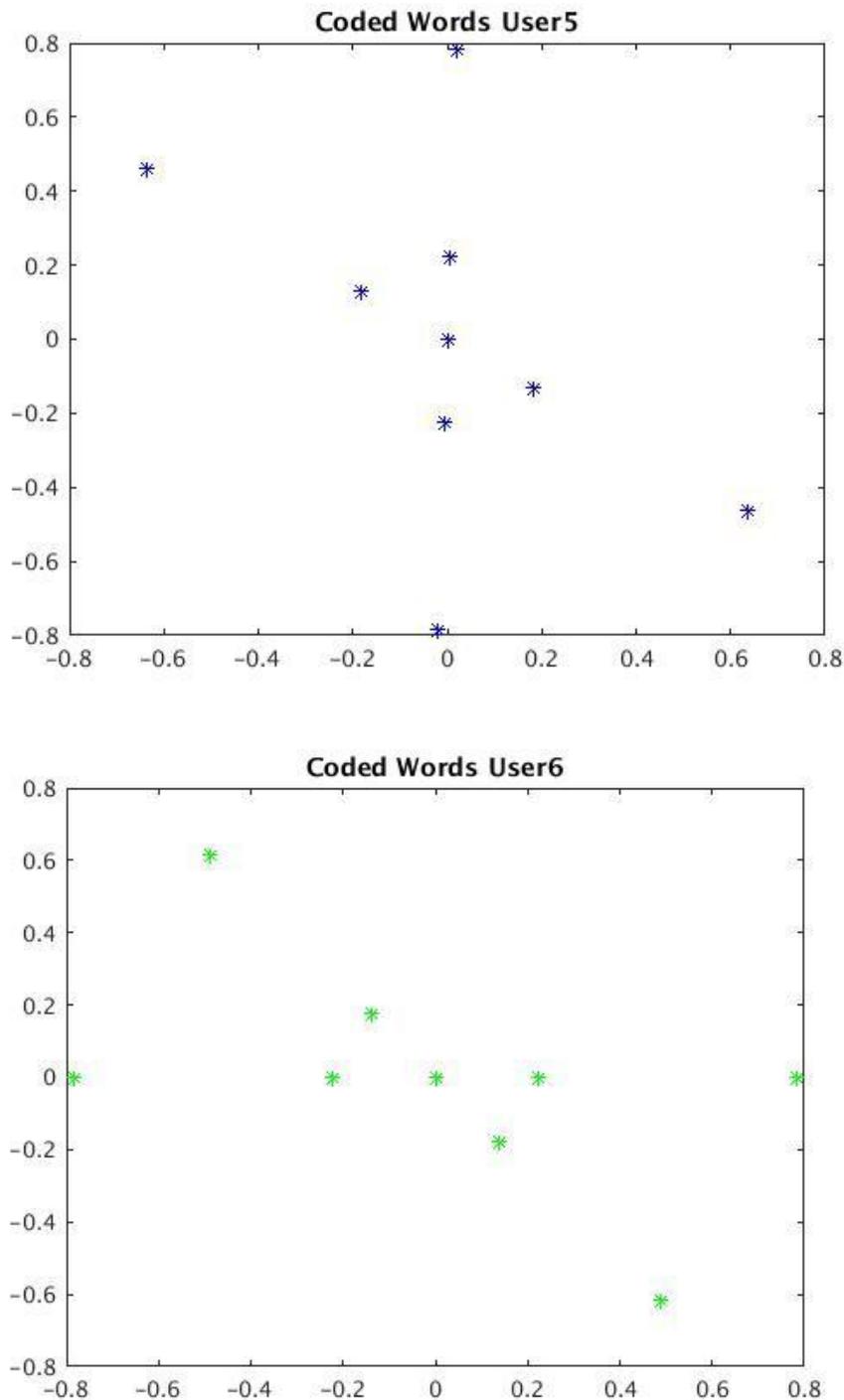
Dans la section 3, diverses conceptions de mise en œuvre de l'encodeur SCMA ont été explorées et expérimentées dans des logiciels. Comme mentionné à la section 3, l'objectif est d'atteindre un débit de plus de 1Gbps qui est considéré en ce qui concerne le débit disponible dans les réseaux 4G LTE. Ce chapitre est dédié à la présentation et à la discussion des résultats des implémentations logicielles et matérielles.

#### **3.4.1 Résultats de la mise en œuvre de MATLAB pour la chaîne d'émetteurs SCMA**

Dans la section 3.1, une simple chaîne d'émetteurs SCMA a été illustrée à la figure 3.3, qui comprend trois modules : le Turbo Encoder, le SCMA Encoder et le PRE Mapper. Cette chaîne d'émetteurs SCMA a été implémentée dans MATLAB comme une étape préliminaire. Comme notre hypothèse dans cette mise en œuvre est d'avoir six couches de données/utilisateurs et quatre ressources physiques, six formes et couleurs différentes ont été utilisées pour afficher les points de constellation liés à chaque utilisateur de données. Les résultats de la simulation sont illustrés aux figures 3.(1.2.3.4.5.6) et aux figures 3.7 et 3.8, qui sont les sorties de l'encodeur SCMA et les sorties de la chaîne d'émission SCMA, respectivement à la figure 3.1 et à la figure 3.2



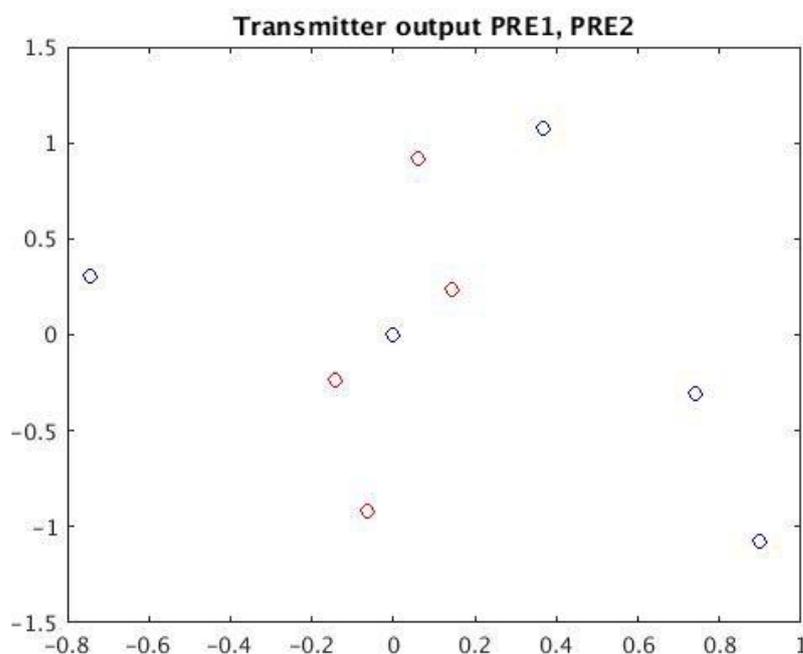


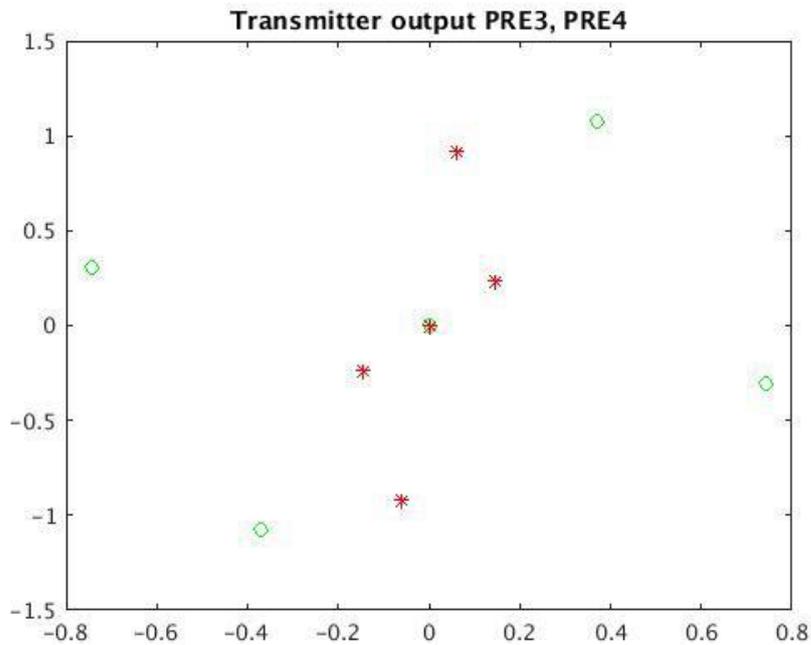


Les différents points des figures 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 montrent des mots codés de différentes couches de données/utilisateurs. Dans cette implémentation il y a six couches de données/utilisateurs, donc dans les figures 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 il y a six formes différentes choisies pour présenter des points de constellation de mots de code pour différents utilisateurs. Il y a des cercles rouges, verts et bleus, des étoiles rouges, vertes et bleues. Chaque figure montre les mots codés

d'une couche de données/utilisateurs. Comme certains points de constellation ont les mêmes valeurs, les figures 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 et 3.6 ont les mêmes points de constellation.

Comme il est expliqué au chapitre 3, section 3.1, chaque mot-code doit être divisé en quatre points de constellation au maximum et chacun d'eux doit être transmis au moyen d'un GER. Par conséquent, afin de transmettre des points de constellation de six couches de données/utilisateurs sur quatre P rés, la somme des points de constellation correspondants de chaque couche de données/utilisateur devrait être transmise sur chaque GER. Selon la figure 3.4, chaque point des figures 3.7 et 3.8 présente la somme de six points de constellation de six mots de code de différentes couches de données/utilisateurs. Les points ronds rouges sont liés à PRE1, et les points ronds bleus, les points ronds verts et les points étoiles rouges présentent les points liés à PRE2, PRE3 et PRE4 respectivement.





### 3.4.2 Résultats de la mise en œuvre du logiciel d'encodeur SCMA

Cette section est dédiée à la présentation des différents résultats des implémentations logicielles SCMA et à la discussion sur la façon dont les résultats observés ont été améliorés par des implémentations successives. La première conception logicielle, en tant qu'encodeur SCMA de base, encode deux bits de chaque couche de données/utilisateur par itération. Dans cette mise en œuvre, le temps de traitement de l'encodage SCMA et de la cartographie PRE a été mesuré. Le temps de traitement de notre implémentation sur un Intel i7 3.4GHz Quad-core est d'environ 12.5ns/bit total. Comme il s'agit loin d'un Gbps.

Pour la conception suivante, le nombre de bits utilisateur de données traités en même temps a été augmenté afin d'améliorer le temps de traitement. Ainsi, on s'attendait à ce que le temps de traitement de deux bits à la fois diminue d'un facteur de deux. Cependant, le temps de traitement observé par bit pour la deuxième implémentation logicielle n'a pas été réduit de moitié, car il est

d'environ 11.11ns/bit. Pour la troisième approche, différents niveaux de parallélisme ont été ajoutés à l'algorithme pour améliorer le temps de traitement du code. Cette version peut être configurée avec différents niveaux de parallélisme de 1,2,3 et 6. Les résultats de la mise en œuvre montrent que le temps de traitement mesuré pour le traitement logiciel lorsque le parallélisme est réglé sur 6 est d'environ 7.65ns/bit. Le tableau 4.1 résume le temps de traitement de ces trois mises en œuvre logicielles.

**Tableau 3.6 : Résumé des trois résultats préliminaires de la mise en œuvre du logiciel**

L'encodeur SCMA	temps de traitement (ns / bit)	Debit (Mbps)
1 <sup>eme</sup>	12.5	80
2 <sup>eme</sup>	11.11	90
3 <sup>eme</sup>	7.56	132.2

Cela montre que les résultats ne se sont pas améliorés linéairement avec le parallélisme lorsque différents niveaux de parallélisme sont utilisés, et il n'y a pas d'autre amélioration significative si le parallélisme est augmenté au-delà de 6. Il a été conjecturé qu'il y a une saturation de la ressource matérielle disponible à un thread unique sur un i7 lorsque le code est instancié avec un parallélisme de 6.

### 3.4.2.1 Amélioration des résultats de la mise en œuvre du logiciel d'encodeur SCMA

Les résultats qui seront abordés dans cette section sont liés à l'amélioration des implémentations logicielles de l'encodeur SCMA. Cette implémentation a été expliquée à la section 3.3.1 où elle a été appelée un encodeur SCMA configurable sans addendum et plusieurs tableaux. Dans cette mise en œuvre, au lieu d'utiliser des addendas pour générer des extraits de la P rés, on a utilisé des tableaux de recherche pré-compilés qui ont été produits à l'aide d'un code C. De plus, le type de données entier court a été utilisé pour les entrées et les sorties au lieu du type de données à virgule flottante pour réduire davantage la complexité. Les résultats observés (Tableau 3.7) montrent qu'un débit de plus de 1Gbps est obtenu, ce qui est la cible assignée, mais les gains sont sous-linéaires avec le niveau de parallélisme. L'une des raisons probables de l'amélioration des performances sous-proches est que lorsque le code est instancié avec un parallélisme de 6, l'algorithme de base sature les ressources matérielles disponibles pour un thread unique sur un i7. Une autre raison peut être un effet de cache, la taille des LUT précompilés sont 4096 x 4 valeurs complexes qui peuvent affecter les performances du cache L1.

*Tableau 3.7: Mise en œuvre du logiciel d'encodeur SCMA sans ajout et résultats de tableaux multiples*

<b>PARALLELISM</b>	<b>Valeur Temps de traitement / s)</b>	<b>Débit (Gbit / s)</b>
<b>1</b>	0.55	1.79
<b>2</b>	0.35	2.88
<b>3</b>	0.27	3.59
<b>6</b>	0.5	2.00

<b>Profilage de la durée d'exécution sur 6000000</b>	<b>Fonction principale (ms)</b>	<b>Initialisation d'entrée (ms)</b>	<b>Fonction de codage SCMA (ms)</b>
<b>Configurable avec un entier court</b>	1324 ms	381 ms	759 ms
<b>Configurable sans additionneur - Tables multiples et nombre entier court</b>	657 ms	358 ms	39 ms

Après avoir analysé les résultats de la mise en œuvre de l'encodeur SCMA sans Ader, il est devenu évident que dans un encodeur SCMA configurable sans Ader, 94.8% du temps de traitement a été économisé sur la fonction principale de codage SCMA qui a pris 720ms moins par rapport à l'encodeur SCMA configurable avec un nombre entier court. Cette quantité est obtenue en soustrayant la durée de la fonction de codage SCMA de l'encodeur SCMA configurable sans ajout de la valeur durée de la fonction d'encodage SCMA de l'encodeur SCMA configurable avec un nombre entier court.

## **CONCLUSION**

Les expériences avec le système de codage SCMA ont commencé avec les implémentations MATLAB et se sont poursuivies avec l'implémentation de logiciels utilisant le langage C qui ont finalement été suivies par des implémentations matérielles. L'objectif des implémentations logicielles et matérielles était de réduire le temps de traitement. Par conséquent, différentes versions de ces implémentations ont été réalisées pour réduire le temps de traitement et améliorer le débit de chaque couche/utilisateur de données. Bien qu'un exemple de paramètres et d'ensembles de livre de code soient pris en compte dans ces implémentations, le modèle proposé est flexible pour d'autres livre de code, et même un dictionnaire de livre de code si la fonction d'encodage SCMA est rendue suffisamment générique. Différents livre de code pourraient être utilisés pour l'encodage SCMA. L'utilisation de livres de codes plus complexes pour encoder une plus grande quantité de données en même temps peut produire de meilleures performances d'erreur ainsi que des temps de traitement et de latence inférieurs.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

L'accès multiple par code fragmenté (SCMA) est une nouvelle technique d'accès multiple non orthogonal dans le domaine fréquentiel qui peut améliorer l'efficacité spectrale de l'accès radio sans fil. Avec SCMA, différents flux de données entrants sont directement mappés aux mots de code de différents livres de recettes multidimensionnels, où chaque mot de code représente une couche de transmission étalée.

Plusieurs couches SCMA partagent les mêmes ressources temps-fréquence que OFDMA. La rareté des mots de code rend la détection presque optimale possible grâce à un algorithme itératif de passage de messages (MPA). Cette faible complexité de détection multicouche permet une surcharge excessive de mots de code dans laquelle la dimension des couches multiplexées dépasse la dimension des mots de code.

L'optimisation du facteur de surcharge ainsi que les niveaux de codage de modulation des couches fournissent un mécanisme d'adaptation de liaison plus flexible et efficace. D'un autre côté, la fonction d'étalement du signal de SCMA peut améliorer l'adaptation de liaison en raison de moins d'interférences colorées.

Dans cet article, une technique est développée pour permettre le SCMA multi-utilisateurs (MU-SCMA) pour l'accès sans fil en liaison descendante.

Les algorithmes d'appariement, de partage de puissance, d'ajustement de débit et de planification des utilisateurs sont conçus pour améliorer le débit de liaison descendante d'un réseau fortement chargé. L'avantage de l'étalement SCMA pour les réseaux peu chargés est également évalué.

## **Bibliographie**

### BIBLIOGRAPHY

- [1] Woon Hau Chin, Zhong Fan, and Russell Haines, “Emerging Technologies and Research Challenges for 5G Wireless Networks,” IEEE Wireless Communications, April 2014
- [2] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, and John Skold, “LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband”,  
Academic Press 2011, p1-14
- [3] Akhil Gupta, Rakesh Kumar Jha,” A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies,” IEEE Access, August 2015
- [4] Shanzhi Chen and Jian Zhao, “The Requirements, Challenges, and Technologies for 5G of Terrestrial Mobile Telecommunication,” IEEE Communications Magazine, May 2014, p 36-43
- [5] A. Osseiran et al., “The Foundation of the Mobile and Wireless Communications System for 2020 and Beyond Challenges, Enablers and Technology Solutions,” VTCSpring 2013, June 2–5, 2013.
- [6] NGMN Alliance, “Next Generation Mobile Network,” White Paper, February 2015.
- [7] Shilpa Talwar et al, “Enabling Technologies and Architectures for 5G Wireless,” IEEE Microwave Symposium , Tampa, pp. 1!4, June 2014
- [8] Mohammed Al-Imari, “Uplink Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Wireless Networks,”  
IEEE, 2014, p781-785
- [9] Li-Chun Wang et al., “A Survey on Green 5G Cellular Networks,” IEEE, 2012

## **Bibliographie**

[10] Saurabh Patel et al., “5G: Future Mobile Technology-Vision 2020,” International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 54– No.17, September 2012

[11] Kelvin Au, Liqing Zhang, Hosein Nikopour, Eric Yi, Alireza Bayesteh, Usa Vilaipornsawai, Jianglei Ma, and Peiying Zhu, “Uplink Contention Based SCMA for 5G Radio Access,” Globecom 2014 Workshop ! Emerging Technologies for 5G Wireless Cellular Networks, pp. 900!905, 2014

[12] Zhang S, Xu X, Lu L, et al. “Sparse code multiple access: An energy efficient uplink approach for 5G wireless systems,” in Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014, pp. 4782-4787.

[13] Y. Grunenberger et al., “Wireless card virtualization: From virtual NICs to virtual MAC

machines,” Proc. FutureNetw, Berlin, pp. 4!6, July 2012.

[14] N. Chowdhury and R. Boutaba, “Network virtualization: state of the art and research challenges,” IEEE Commun. Mag. Volume 47, Issue 7, pp.20! 26, Jul. 2009.

[15] G. Schaffrath et al, “Network virtualization architecture: proposal and initial prototype,” Proc. 1st ACM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures (VISA), pp. 63!72, 2009.

[16] J. Turner and D. Taylor, “Diversifying the Internet,” Proc. GLOBECOM ‘05, vol. 2, pp. 760! 766, 2005.

[17] N. Feamster, L. Gao, and J. Rexford, “How to Lease the Internet in your Spare Time,”

SIGCOMM Comp. Commun. Revi., vol. 37, no. 1, pp. 61–64, 2007

## **Bibliographie**

[18] P. Marsch et al, “Future communication networks: challenges in the design and operation,” IEEE Vehic. Tehno. Mag., Volume 7, Issue 1, pp. 16!23, Mar. 2012.

[19] S. Perez, J. Cabero, and E. Miguel, “Virtualization of the wireless medium: A simulation! based study,” Proc. IEEE 69th VTC!Spring, Barcelona, pp. 1!5, April 2009.

[20] M. Ott, I. Seskar, R. Siraccusa, M. Singh, “ORBIT testbed software architecture: supporting experiments as a service,” Tridentcom 2005, pp. 136!145, Feb. 2005

[21] M. Hibler, R. Ricci, L. Stoller, J. Duerig, S. Guruprasad, T. Stack, K. Webb, and J. Lepreau, “Largescale virtualization in the Emulab network testbed,” Proceedings of the 2008 USENIX Annual Technical Conference, Boston, MA, pp. 113!128, June 2008.

[22] <http://en.wikipedia.org/wiki/Jitter>

[23] Yaping Zhu, Rui Zhang!Shen, Sampath Rangarajan, and Jennifer Rexford “Cabernet: connectivity architecture for better network services”. In Proceedings of the 2008 ACM CoNEXT Conference, Spain, page 64. ACM, 2008.

[24] Yonghua Lin, Ling Shao, Zhenbo Zhu, Qing Wang, and Ravie K Sabhikhi, “Wireless network cloud: Architecture and system requirements,” IBM Journal of Research and Development, Volume 54, Issue 1, pp. 1!12, 2010.

[25] Cisco Systems, “Cisco VN!Link: Virtualization!Aware Networking”. White Paper, 2009.

[26] InterDigital. Analysis of feedback mechanisms for CoMP. 2009.

[27] Andy Bavier, Nick Feamster, Mark Huang, Larry Peterson, and Jennifer Rexford, “In vini veritas: realistic and controlled network experimentation,” In ACM SIGCOMM Computer Communication Review, volume 36, pp. 3–14. ACM, 2006.

[28] Huawei Technologies, “Consideration on CoMP for LTE!Advanced,” 3GPP/R1!083049.

[29] A. Y. Panah et al., “Utility!Based Radio Link Assignment in Multi!Radio Heterogeneous Networks,” IEEE Globecom workshop on LTE and Beyond 4G Technologies, pp. 618!623, Dec. 2012.

[30] Cheng!Xiang Wang et al, “Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks,” IEEE Communications Magazine, Volume 52, Issue 2, pp. 122!130, February 2014

[31] S. Rangan et al., “Millimeter wave cellular wireless networks: potentials and challenges,” Proceedings of the IEEE, Volume 102, Issue 3, NYU Wireless Center, pp. 366!385, January 2014.

[32] F. Rusek et al., “Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays,”

IEEE Sig. Proc. Mag., volume 30, Issue 1, pp. 40–60, Jan. 2013

[33] Erik Dahlman et al, “5G WIRELESS ACCESS: REQUIREMENTS AND REALIZATION,”

IEEE Communications Magazine — Communications Standards Supplement, Volume 52, Issue 12, pp. 42!47, December 2014

[34] <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa925764.aspx>

[35] Aaron Zinman and Judith Donath, “Signs: Increasing Expression and Clarity in Instant Messaging,” 42nd Hawaii International Conference on System Sciences, MIT Media Lab Sociable Media Group, pp. 1!10, 2009

[36] Parameswaran Ramanathan and Kang G. Shin, “Delivery of Time!Critical Messages, Using a Multiple Copy Approach,” ACM Transaction on Computer Systems, Volume 10, Issue 2, pp. 144! 166, 1992

[37] Jose F. Monserrat et al, “Rethinking the Mobile and Wireless Network Architecture, The METIS Research into 5G,” 2014 European Conference on Networks and Communications, Bologna, pp. 1! 5, June 2014

[38] Saddam Hossain, “5G Wireless Communication Systems,” American Journal of Engineering Research (AJER), Volume 02, Issue 10, pp. 344!353, 2013

[39] Chih!Lin I et al, “Toward Green and Soft:A 5G Perspective,” IEEE Communications Magazine, Volume 52, Issue 2, pp. 66!73, February 2014

[40] C. M. R. Institute, “C!RAN: The Road Towards Green RAN,” White Paper, Oct. 2011, available: [labs.chinamobile.com/cran](http://labs.chinamobile.com/cran).

[41] Mahmoud Taherzadeh, Hosein Nikopour, Alireza Bayesteh, and Hadi Baligh, “SCMA Codebook Design,” Ottawa Wireless R&D Centre, Huawei Technologies Canada Co., LTD. in Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2014 IEEE 80th, pp. 1-5, IEEE, 2014.

[42] Hosein Nikopour, Eric Yi, Alireza Bayesteh, Kelvin Au, Mark Hawryluck, Hadi Baligh, and Jianglei Ma, "SCMA for Downlink Multiple Access of 5G Wireless Networks," Globecom 2014 !

Wireless Communications Symposium, pp. 3940!3945, 2014

[43] Hosein Nikopour and Hadi Baligh, "Sparse Code Multiple Access," in in Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 IEEE 24th International Symposium on, pp. 332- 336, IEEE, 2013.

[44] Tingting Liu, Xinmin Li, Ling Qiu, "Capacity for Downlink Massive MIMO MU-SCMA System," Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), 2015

[45] D.J. Love, R.W. Heath, V.K.N. Lau, D. Gesbert, and M. Andrews, "An overview of limited feedback in wireless communication systems," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 26, no. 8, pp. 1341!1365, October 2008.

[46] ICT-317669, "D4.3: Final Report on Network-Level Solutions." Feb, 2015. [Online] <https://www.metis2020.com/documents/deliverables/>.

[47] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, and Johan Skold, "4G: LTE/LTEAdvanced for Mobile Broadband," 2nd ed. Waltham, MA, USA: Elsevier, 2014.

[48] R. Hoshyar, F.P. Wathan, R. Tafazolli, "Novel Low!Density Signature for Synchronous CDMA Systems Over AWGN Channel," IEEE Trans. On Signal Processing, vol. 56, No. 4, pp.

1616!1626, April 2008

[49] D. Guo, C.C. Wang, "Multiuser Detection of Sparsely Spread CDMA," IEEE J. Selected Areas Communication, Special Issue on Multiuser Detection

for Advanced Communication Systems and Networks, vol. 26, pp. 421-431, April 2008

[50] A. Mathur, M. Fujita, E. Clarke, and P. Urard, “Functional equivalence verification tools in high-level synthesis flows,” *IEEE Design & Test of Computers*, no. 4, pp. 88-95, 2009.

[51] Xilinx, Inc., “Ug871 - vivado design suite tutorial: High level synthesis.”

[http://www.xilinx.com/support/documentation/sw\\_manuals/xilinx2014\\_1/ug871-vivado-high-level-synthesis-tutorial.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx2014_1/ug871-vivado-high-level-synthesis-tutorial.pdf), May 2014.

[52] Huawei, The 1st 5G Algorithm Innovation Competition SCMA. Altera University Program, 2015.

[53] Xilinx, inc., “DS701 – LogiCORE IP 3GPP LTE Turbo Encoder”, V3.1, June 2014

[54] Xilinx, Inc., “UG902 – Vivado Design Suite User Guide : High Level Synthesis”, v2014, May 2014.

[55] Louise H. Crockett, Ross A. Elliot, Martin A. Enderwitz and Robert W. Stewart, “The Zynq Book-Embedded Processing with the ARM® Cortex®-A9 on the Xilinx® Zynq®-7000 All Programmable SoC,” Department of Electronic and Electrical Engineering University of Strathclyde Glasgow, Scotland, UK 1st Edition, Strathclyde Academic Media, July 2014

1. H. Nikopour, H. Baligh, Sparse code multiple access, in *IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'13)* (2013), pp. 332–336

2. S. Zhang, X. Xu, L. Lu, Y. Wu, G. He, Y. Chen, Sparse code multiple access: an energy efficient uplink approach for 5G wireless systems, in *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'14)* (2014), pp. 4782–4787
3. Y. Wu, S. Zhang, Y. Chen, Iterative multiuser receiver in sparse code multiple access systems, in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'15)* (2015), pp. 2918–2923
4. J. Zhang, L. Lu, Y. Sun et. al., PoC of SCMA-Based Uplink Grant-Free Transmission in UCNC for 5G. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **35**, 1353–1362 (2017)
5. R. Hoshyar, F.P. Wathan, R. Tafazolli, Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel. *IEEE Trans. Signal Process.* **56**, 1616–1626 (2008)
6. D. Guo, C. Wang, Multiuser detection of sparsely spread CDMA. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **26**, 421–431 (2008)
7. R1-166098: Discussion on feasibility of advanced MU-detector. Huawei, HiSilicon, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #86 (2016)

8. X. Meng, Y. Wu, Y. Chen, M. Cheng M, Low complexity receiver for uplink SCMA system via expectation propagation, in *Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference (WCNC' 17)*, (2017), pp. 1–5
9. J. Bao, Z. Ma, G.K. Karagiannidis, M. Xiao, Z. Zhu, Joint multiuser detection of multidimensional constellations over fading channels. *IEEE Trans. Commun.* **65**, 161–172 (2017)
10. D. Tse, P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communications* (Cambridge University Press, 2005)
11. J.G. Proakis, M. Salehi, *Digital Communications* (McGraw-Hill, New York, 2008)
12. E. Björnson, D. Hammarwall, B. Ottersten, Exploiting quantized channel norm feedback through conditional statistics in arbitrarily correlated MIMO systems. *IEEE Trans. Signal Process.* **57**, 4027–4041 (2009)

- 13.M. Chiani, D. Dardari, M.K. Simon, New exponential bounds and approximations for the computation of error probability in fading channels. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* **2**, 840–845 (2003)
- 14.S.J. Grant, J.K. Cavers, Performance enhancement through joint detection of cochannel signals using diversity arrays. *IEEE Trans. Commun.* **46**, 1038–1049 (1998)
- 15.X. Zhu, R.D. Murch, Performance analysis of maximum likelihood detection in a MIMO antenna system. *IEEE Trans. Commun.* **50**, 187–191 (2002)
- 16.M. Taherzadeh, H. Nikopour, A. Bayesteh, H. Baligh, SCMA codebook design, in *Proceedings of IEEE 80th Conference on Vehicular Technology (VTC Fall'14)* (2014), pp. 1–5
- 17.A. Montanari, D. Tse, Analysis of belief propagation for nonlinear problems: the example of CDMA (or: How to prove Tanaka's formula), in *Proceeding IEEE Information Theory Workshop (ITW)* (2006), pp. 122–126

- 18.C.C. Wang, D. Guo, Belief propagation is asymptotically equivalent to MAP estimation for sparse linear systems, in *Proceedings of 44th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing* (2006), pp. 926–935
- 19.L. Li, Z.Ma, L.Wang, P. Fan, L. Hanzo, Cutoff rate of sparse code multiple access in downlink broadcast channels. *IEEE Trans. Commun.* **65**, 3328–3342 (2017)
- 20.J. Boutros, E. Viterbo, C. Rastello, J.C. Belfiore, Good lattice constellations for both Rayleigh fading and Gaussian channels. *IEEE Trans. Inf. Theory.* **42**, 502–518 (1996)
- 21.J. Boutros, E. Viterbo, Signal space diversity: a power- and bandwidth-efficient diversity technique for the rayleigh fading channel. *IEEE Trans. Inf. Theory* **44**, 1453–1467 (1998)
- 22.J. Bao, Z. Ma, Z. Ding, G.K. Karagiannidis, Z. Zhu, On the design of multiuser codebooks for uplink SCMA systems. *IEEE Commun. Lett.* **20**, 1920–1923 (2016)

- 23.Y. Xin, Z. Wang, G.B. Giannakis, Space-time diversity systems based on linear constellation precoding. *IEEE Trans. Wireless Commun.* **2**, 294–309 (2003)
- 24.G.H. Golub, C.F. Van Loan, *Matrix Computations* (Johns Hopkins University Press, 1996)
- 25.S.P. Herath, N.H. Tran, T. Le-Ngoc, Rotated multi-D constellations in rayleigh fading: mutual information improvement and pragmatic approach for near-capacity performance in high-rate regions. *IEEE Trans. Commun.* **60**, 3694–3704 (2012)
- 26.J. Bao, Z. Ma, M.A. Mahamadu, Z. Zhu, D. Chen, Spherical codes for SCMA codebook, in *Proceedings of IEEE 83th Conference on Vehicular Technology (VTC Spring'16)* (2016), pp. 1–5
- 27.L. Yu, X. Lei, P. Fan, D. Chen, An optimized design of SCMA codebook based on star-QAM signaling constellations, in *Proceedings of International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP'15)* (2015), pp. 1–5

- 28.S.T. Brink, Convergence behavior of iteratively decoded parallel concatenated codes. *IEEE Trans. Commun.* **49**, 1727–1737 (2001) 416 Z.  
Ma and J. Bao
- 29.J.V.D. Beek, B.M. Popović, Multiple access with low-density signatures, in *Proceedings of IEEE Conference on Global Communications (GLOBECOM)* (2009)
- 30.A. Ashikhmin, G. Kramer, S.T. Brink, Extrinsic information transfer functions: model and erasure channel properties. *IEEE Trans. Inf. Theory.* **50**, 2657–2673 (2004)
- 31.N.H. Tran, H.H. Nguyen, Design and performance of BICM-ID systems with hypercube constellations. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* **5**, 1169–1179 (2006)
- 32.A. Seyedi, Multi-QAM modulation: a low-complexity full rate diversity scheme, in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)* (2006), pp. 1470–1475
- 33.C.M. Thomas, M.Y. Weidner, S.H. Durrani, Digital amplitude-phase keying with  $M$ -ary alphabets. *IEEE Trans. Commun.* **22**, 168–180 (1974)

- 34.Q. Xie, Z. Yang, J. Song, L. Hanzo, EXIT-chart-matching-aided near-capacity coded modulation design and a BICM-ID design example for both gaussian and rayleigh channels. *IEEE Trans. Veh. Tech.* **62**, 1216–1227 (2013)
- 35.F. Schreckenbach, N. Görtz, J. Hagenauer, G. Bauch, Optimization of symbol mappings for bit-interleaved coded modulation with iterative decoding. *IEEE Commun. Lett.* **7**, 593–595 (2003)
- 36.M.T. Boroujeni, A. Bayesteh, H. Nikopour, M. Baligh, System and method for generating codebooks with small projections per complex dimension and utilization thereof, U.S. Patent 0,049,999, 18 Feb 2016
- 37.A. Bayesteh, H. Nikopour, M. Taherzadeh, H. Baligh, J. Ma, Low complexity techniques for SCMA detection, in *Proceedings of IEEE Globecom Workshops* (2015), pp. 1–6
- 38.R1-164037: LLS results for uplink multiple access. Huawei, HiSilicon, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #85 (2016)