

Résumé

Le trafic de données mobile augmente exponentiellement avec le développement de l'internet mobile ce qui provoque une saturation de l'architecture actuelle du réseau d'accès mobile (RAN). Les opérateurs ont du mal à faire face économiquement et techniquement aux exigences des utilisateurs ce qui les pousse à penser à d'autres architectures évolutives et moins coûteuses.

Les chercheurs ont constaté que les plates-formes informatiques puissantes dans le Cloud Computing peuvent être bénéfiques pour les réseaux d'accès radio. Cela a conduit à un nouveau concept nommé le Cloud Radio Access Network (C-RAN) qui fait référence à la virtualisation des fonctionnalités de la station de base au moyen du cloud computing.

L'architecture de C-RAN décompose la station de base traditionnelle en deux entités : des têtes radio distantes (RRH) placées sur les sites cellulaires et des unités de traitement bande de base (BBU) mises en communs dans un pool centralisé. Le lien entre les deux entités est une interface en fibre optique.

Cette nouvelle technologie permet d'augmenter la capacité et la couverture du réseau tout en réduisant les délais de déploiement, la consommation énergétique et les dépenses d'investissement et d'exploitation nécessaires pour déployer et maintenir des réseaux hétérogènes denses. Elle permet également une gestion globale des ressources, une gestion efficace des interférences et une meilleure utilisation de la technologie d'accès radio (RAT).

Ces avantages poussent le C-RAN à être l'une des technologies clés dans le développement des systèmes 5G.

Cependant, le Cloud RAN présente quelques défis à résoudre tel que le coût élevé de la bande passante entre le RRH et BBU pool.

Mots-clés : RAN, RRH, BBU pool, Cloud RAN.

Abstract

The traffic of mobile data is exponentially increasing with the development of mobile internet that provokes saturation of the current architecture of mobile Radio Access Network (RAN). The operators are facing some economical and technical difficulties as far as requirement of the users are concerned and this issue pushes them to think of other evolutionary and less expensive architectures.

Researchers have found that powerful computing platforms existing in “Cloud” might be beneficial for Radio Access networks (RAN). This latter led to a new concept called the Cloud Radio Access Network (C-RAN) that refers to the virtualization of the base station features by means of cloud computing.

The architecture of C-RAN divides the traditional base station into two entities: Remote Radio Heads (RRH) placed on cellular sites and processing baseband units (BBU) gathered in a centralized BBU-pool. The link between the two entities is an optical fiber interface.

This new technology allows the increase and coverage of network by reducing the deployment delay, energetic consumption, investment expenses and the necessary exploitation for deploying and maintaining dense heterogeneous networks. It also allows a global and effective management of resources, interferences and a good use of Radio Access Technology (RAT).

These advantages push the C-RAN well positioned to be one of the key technologies in the development of 5G systems.

Meanwhile, the RAN Cloud presents some challenges to be resolved such as the high cost of the bandwidth between the RRH and the BBU-pool.

Keywords: RAN, RRH, BBU-pool, Cloud RAN.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract	iii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vii
Liste des sigles.....	viii
Remerciements	Erreur ! Signet non défini.
Introduction générale.....	1
I-Les Réseaux d’Accès Radio	2
I-1-Introduction	2
I-2-Propagation en environnement radio mobile.....	2
I-3-Evolution des RAN	3
I-3-1-GERAN	3
I-3-2-UTRAN	9
I-3-3-EUTRAN	14
I-4-le réseau Cœur	17
I-5-Présentation des Interfaces	18
II-Le Cloud Computing	20
II-1-Introduction	20
II-2-Concept de virtualisation	20
II-2-1-Les bénéfices de la virtualisation	21
II-3-La notion du Cloud Computing.....	21
II-4-Caractéristiques de cloud	22
II-5-Modèles en services	22
II-6-Modèles de déploiement	23
II-7-Avantages du cloud	24
II-8-Défis du cloud computing	25
II-9-Conclusion	26
III-Le Cloud RAN	27
III-1-Introduction.....	27
III-2-Le C-RAN.....	27
III-3-Architecture du C-RAN	28
III-3-1-Evolution des stations de base	28
III-3-2-Les types de centralisation.....	29
III-3-3-Les différents parties dans l’architecture C-RAN	30

III-4-Structure logique du Cloud RAN.....	33
III-4-1-Le plan physique.....	33
III-4-2-Le plan de contrôle	34
III-4-3-Le plan de service.....	34
III-5-Les méthodes d'accès dans le C-RAN.....	35
III-5-1-La TD-SCDMA	35
III-5-2-La TD-LTE.....	35
III-6-Les aspects implémenté dans l'architecture Cloud RAN	35
III-6-1-Virtualisation dans le C-RAN	36
III-6-2-Centralisation dans le C-RAN	36
III-6-3-Coordination dans le C-RAN	36
III-7-Core Network.....	36
III-8-Les avantages de l'architecture C-RAN pour les opérateurs de réseau.....	38
III-9-Les défis techniques du C-RAN	39
III-10-Conclusion	40
IV-Simulation	41
IV-1-Introduction	41
IV-2-MATLAB	42
IV-3-Modèle de simulation	43
IV-3-1-Le graphe orienté.....	43
IV-3-2-Fonction de fractionnement et de graphe clustering.....	43
IV-3-3-Cas d'études	44
IV-3-4-L'algorithme d'optimisation (GA)	46
IV-4-Résultats de simulation.....	48
IV-5-Conclusion.....	50
V-Conclusion Générale.....	51
VI-1-Bibliographie	52
VI-2-Webographie.....	53

Liste des tableaux

Tableau 1: Bande de fréquence GSM	4
Tableau 2: Les canaux logiques	8
Tableau 3: Caractéristiques des catégories d'UE LTE	15
Tableau 4: les interfaces des différents réseaux d'accès	19
Tableau 5: l'indice, le type et les poids des nœuds	45
Tableau 6: la fonction du calcul de coût	46
Tableau 7: la fonction du calcul de fronthaul	46
Tableau 8: la fonction de délai	46
Tableau 9: les paramètres d'algorithme génétique	47

Liste des figures

Figure 1: Les réseaux d'accès radio	2
Figure 2: la partie radio GERAN [2]	3
Figure 3: Architecture en couche du GERAN	5
Figure 4: Exemple de hard handover	6
Figure 5: le réseau UTRAN [6].....	9
Figure 6: Types de NodeB.....	10
Figure 7: Vue en couches de l'interface radio UTRAN	12
Figure 8: La modulation dans l'UMTS	12
Figure 9: Exemple de soft handover	13
Figure 10: Effet Near-Far	13
Figure 11: le réseau eUTRAN [11].....	14
Figure 12: Principe de l'OFDM.....	16
Figure 13: Différence entre OFDMA et SC-FDMA [13].....	16
Figure 14: La trame LTE	17
Figure 15: les différents réseaux cœur mobiles.....	18
Figure 16: Concept de virtualisation [16].....	20
Figure 17: Cloud Computing [18]	21
Figure 18: Modèles en services du Cloud Computing [19]	23
Figure 19: Les modèles de déploiement [20]	24
Figure 20: Station de base traditionnelle.....	28
Figure 21: Station de base avec RRH	28
Figure 22: C-RAN avec des RRHs	29
Figure 23: les deux solutions Cloud-RAN	29
Figure 24: Architecture C-RAN complètement centralisé	30
Figure 25: Architecture C-RAN partiellement centralisé.....	30
Figure 26: L'architecture Cloud RAN [24]	32
Figure 27: Structure logique du Cloud RAN	33
Figure 28: les réseaux cœur sans l'utilisation du C-RAN [29]	37
Figure 29: le réseau cœur avec l'utilisation du C-RAN [29].....	37
Figure 30: Fractionnement et placement flexible des fonctions bande de base [34].....	42
Figure 31: L'architecture de traitement en bande de base simplifié	45
Figure 32: Compromis entre les deux coûts	48
Figure 33 : Schéma clustering avec différents α et $Dp = 30$	49
Figure 34: Compromis des deux coûts avec différents contrainte de délai, $\alpha = 0.01$	49

Liste des sigles

1G	1ère Génération
2G	2ème Génération
3G	3ème Génération
4G	4ème Génération
5G	5ème Génération
3GPP	3rd Generation Partnership Project

A

API	Application Programming Interface
ARFC	Absolute Radio Frequency Channel

B

BBU	Base Band Unit
BMC	Broadcast Multicast Control
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Subsystem
BTS	Base Transceiver Station

C

CA	Carrier Aggregation
CAPEX	CAPital EXPenditure
CDMA	Code Division Multiple Access
CM	Connection Management
CoE	CPRI over Ethernet
CoMP	Coordinated MultiPoint
CPRI	Common Public Radio Interface
C-RAN	Cloud-Radio Access Network
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing

D

DCS	Digital Communication System
DL	Down Link
D-Rof	Digital Radio over fiber
DU	Digital Unit

E

EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
eNodeB	evolved NodeB
EPC	Evolved Packet Core
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
eUTRAN	evolved Universal Terrestrial

Radio Access Network

F

FDD	Frequency Division Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FH	Faisceaux Hertiens
FFT	Fast Fourier Transform

G

Gbps	Giga bit par seconde
GE	Gigabit Ethernet
GERAN	GSM Edge Radio Access Network
GMSK	Gaussian Minimum-Shift Keying
GPP	General Purpose Processors
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications

H

HDLC	High-Level Data Link Control
-------------	-------------------------------------

I

IaaS	Infrastructure-as-a-Service
IBM	International Business Machines
IF	Intermediate Frequency
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IP	Internet Protocol
IT	Intervalle de Temps

L

LADP	Link Access Protocol for the D channel
LNA	Low Noise Amplifier
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution-Advanced

M

MAC	Medium Access Control
MAC	Message Authentication Code
MATLAB	MATtrix LABoratory
ME	Mobile Equipment
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MM	Mobility Management
MPLS	Multi Protocol Label Switching

MS Mobile Station
MSC Mobile Switching Center

N

NGN Next Generation Network
NFV Network Function Virtualization
NodeB Station de base en UMTS
NSS Network Sub System

O

OBSAI Base Station Architecture Initiative
OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OPEX OPerational EXpenditure
ORI Open Radio equipment Interface
OSI Open Systems Interconnection
OSS Operation Sub-System
OTN Open Transport Network

P

PA Power Amplifier
PaaS Platform-as-a-Service
PC Personal Computer
PCS Personal Communications Service
PDCP Packet Data Convergence Protocol
PON Réseau Optique Passif
PRB Physical Resource Block
PSK Phase-Shift Keying

Q

QAM Quadrature Amplitude Modulation
QPSK Quadrature Phase Shift Keying

R

RAN Radio Access Network
RAT Radio Access Technology
RF Radio Fréquence
RF Reconfiguration Function
RLC Radio Link Control
RNC Radio Network Controller
RNIS Réseau Numérique à Intégration de Services
RR Radio Ressource
RRC Radio Resource Control
RRH Remote Radio Head

RRM Radio Resource Management
RSF Resource Scheduling Function
RTCP Réseau Téléphonique Commuté Public
RU Remote Unit

S

SaaS Software-as-a-Service
SAE System Architecture Evolution
SC-FDMA Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SDN Software Defined Networking
SDR Software Defined Radio
SGSN Server GPRS Support Node
SIM Subscriber Identity Module
SMM Service Model Management

T

TDD Time Division Duplex
TDMA Time Division Multiple Access
TD-LTE Time Division Long Term Evolution
TD-SCDMA Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
TIC Technologie de l'Information et de la Communication
TRX Transmission / Reception Unit

U

UE User Equipment
UIT Union Internationale des Télécommunications
UL Up Link
UMTS Universal Mobile Telecommunications System
USIM Universal Subscriber Identity Module
UTRAN UMTS Terrestrial Radio Access Network

V

VoIP Voice over IP

W

W-CDMA Wideband-Code Division Multiple Access
WDM Wavelength Division Multiplexing

X

XOR Exclusive OR

Introduction générale

La banalisation de la téléphonie mobile aujourd'hui est due à la conjonction de l'avènement du numérique, à l'accroissement des performances des semi-conducteurs et les différentes avancées technologiques. Mais le facteur déterminant fut sans doute la cristallisation autour de la norme GSM qu'a été la porte d'entrée vers les futures technologies.

Les technologies bien évidemment se développent rapidement mais le principe reste le même, ainsi comprendre une technologie classique est considéré comme un début d'entrée vers la découverte des futures technologies.

Les exigences des utilisateurs ne cessent de s'accroître dans le temps, fournir un haut débit à moindre coût est devenu actuellement un vrai challenge aux entreprises exerçantes dans le domaine de la téléphonie mobile, plusieurs solutions se présentent à l'heure actuelle pour remédier à ce problème.

L'informatique est devenue indispensable au près des télécommunications, d'où l'avancement dans ce domaine implique une nouvelle technologie pour les télécoms. En effet, ces dernières années ont données naissance au Cloud Computing qui représente la nouvelle ère informatique, cependant, cette avancée influera-elle de la même manière dans le domaine des télécommunications ? Peut-on utiliser le Cloud dans les réseaux d'accès mobiles ? Sera-t-il indispensable au futur ? On va essayer dans ce modeste travail de répondre à ces questions.

Dans notre premier chapitre nous présenterons l'évolution des réseaux d'accès mobile et les limitations de ces derniers.

Dans la seconde partie nous nous intéressons principalement à cette nouvelle technologie qu'est le Cloud.

Le troisième chapitre sera consacré essentiellement au Cloud RAN afin de donner une idée générale sur ce nouveau concept, son architecture, ses avantages et ses futurs défis.

Et enfin nous clôturons notre projet par une simulation et une conclusion.

I-Les Réseaux d'Accès Radio

I-1-Introduction

Le radio access network (**RAN**) est la partie radio d'un système de télécommunication mobile. Il met en œuvre une technologie d'accès radio. Sur le plan conceptuel, il permet la connexion entre un terminal tel qu'un téléphone mobile, un ordinateur, ou toute autre machine sans fil accessible à distance et le cœur de réseau (*Core Network*). Les fonctionnalités RAN sont généralement assurées par une puce implantée à la fois dans le réseau cœur ainsi que dans l'équipement d'utilisateur.

Selon la technologie du réseau de téléphonie mobile (2G, 3G, 4G), on peut distinguer le GERAN (le réseau d'accès radio du GSM), l'UTRAN (celui de l'UMTS) ou EUTRAN (le réseau d'accès radio à haut débit du LTE). Il est également possible qu'un seul appareil mobile soit connecté simultanément à plusieurs réseaux d'accès radio.

Les téléphones mobiles capables de tel chose sont parfois appelés combinés bi-mode (GSM et UMTS). De tels dispositifs transfère de façon transparente un appel en cours entre les différents réseaux d'accès sans que l'utilisateur remarquant une interruption de service.

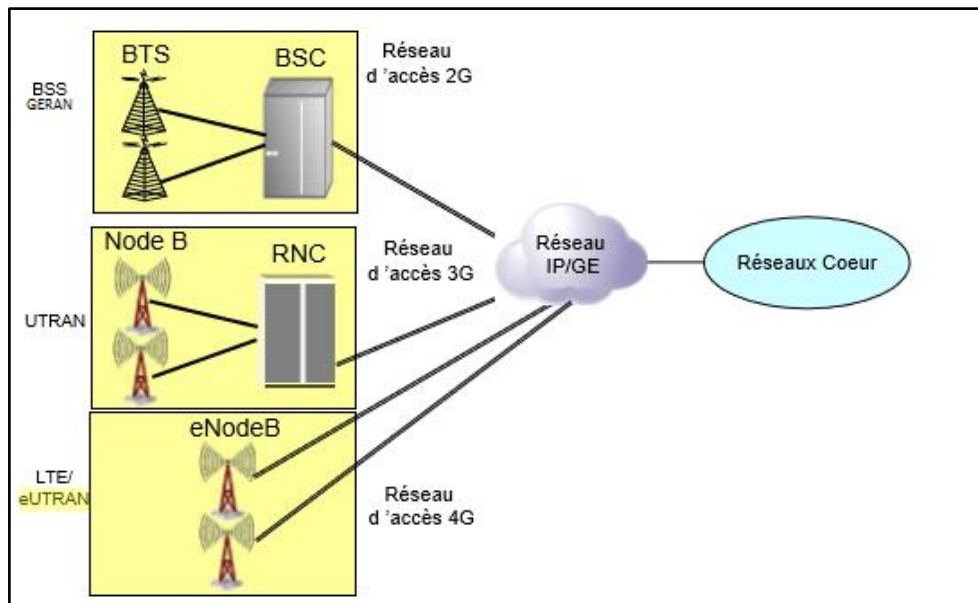


Figure 1: Les réseaux d'accès radio

I-2-Propagation en environnement radio mobile

La propagation des ondes radioélectriques dans les réseaux cellulaires utilisent le canal radio comme un support de transmission qui est fluctuant, de qualité médiocre et moins sécurisé. La propagation de l'onde radio dépend essentiellement de : [1]

- la morphologie du terrain
- la densité de végétation
- la densité et la hauteur des bâtiments
- Les conditions météorologiques.
- Des Interférences des sites voisins, il existe deux types :
 - Interférence **co-canal** due à la réutilisation de la même fréquence pour deux sites éloignés.
 - Interférence **canal adjacent** due aux bruits des autres cellules voisines.
- Des signaux indésirables tels que le bruit ambiant.

Ces derniers peuvent provoquer des phénomènes indésirables qui affectent la qualité du signal reçu tels que :

- Atténuation due aux pertes du trajet parcouru (pathloss)
- Effets de masque où l'effet des obstacles (shadowing effects)
- Evanouissement (fadings) du signal dû aux conditions de propagation des ondes

Pour faire face à ces problèmes on doit faire :

- Un traitement numérique du signal et l'utilisation des codes correcteurs d'erreur.
- Filtrage sélectif et l'égalisation.
- Chiffrement des données pour assurer la confidentialité.
- L'utilisation des antennes plus directives (MIMO)

I-3-Evolution des RAN

I-3-1-GERAN

GERAN est le sigle qui désigne *GSM Edge Radio Access Network*, c'est la partie « accès radio » d'un réseau de téléphonie mobile 2G GSM, Il est composé d'antennes, de stations de base (BTS) réparties sur l'ensemble de la zone géographique couverte par l'opérateur mobile et de contrôleurs de réseau (BSC). Cet opérateur peut avoir un ou plusieurs GERAN en fonction de la largeur de sa zone de couverture. Le 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) est responsable des spécifications relatives au GERAN.

Le GERAN est constitué principalement d'un ou plusieurs sous-systèmes BSS (Base Station Sub-system) qui regroupe chacun un BSC et ses BTS associées. Les BSC sont connectés aux BTS via l'interface Abis comme le montre la figure 03, ainsi le GERAN est un ensemble d'entités, d'interfaces, de canaux et des protocoles basé sur TDMA, Il permet donc de lier l'abonné au réseau cœur afin d'accéder à d'autres réseaux mobiles des autres opérateurs ou vers Internet.

Bien que ce réseau représente le noyau d'un réseau GSM, l'interface radio demeure le maillon faible des réseaux de communications cellulaires. En fonction des contraintes de qualité de service liées aux applications supportées par ces réseaux, il est nécessaire de mettre en œuvre un certain nombre de mécanismes destinés à fiabiliser les échanges de données sur l'interface radio, comme des systèmes de codage des données ou d'autres mécanismes sophistiqués de protection des informations.

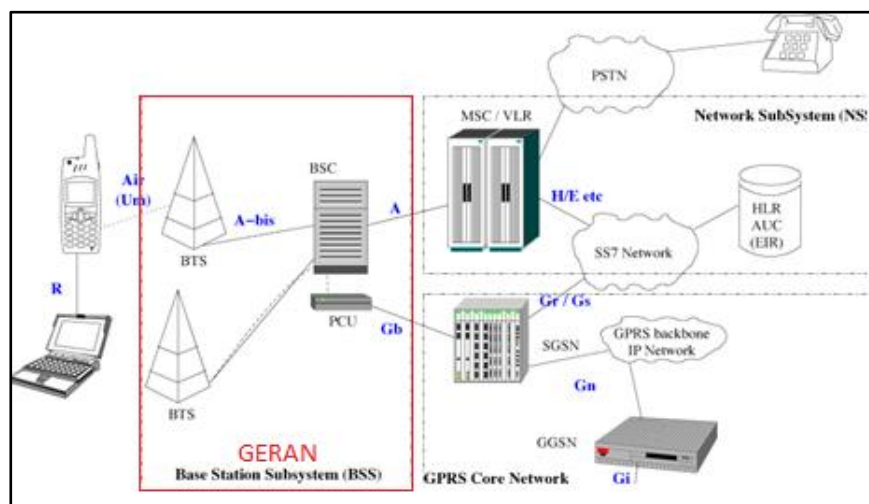


Figure 2: la partie radio GERAN [2]

I-3-1-1-Architecture du réseau d'accès radio GERAN

- **La station mobile MS**

La station mobile est un équipement portable authentifié et autorisé à accéder au réseau. Elle est composée de deux entités un terminal physique (émetteur-récepteur + interface utilisateur) et une carte à puce appelée SIM (Subscriber Identity Module).

- **Base Transceiver Station BTS**

Est un ensemble d'émetteurs/récepteurs appelé TRX qui garantit la transmission/réception radio entre la station mobiles (MS) et le réseau. Chaque BTS est responsable de gérer ces échanges dans une zone géographique bien définie nommé cellule (hexagone) grâce à des antennes directionnelles. Elle assure principalement le multiplexage temporel permettant à plusieurs usagers de communiquer simultanément et le multiplexage des canaux de signalisation vers le BSC.

La répartition géographique et le type de BTS utilisées jouent un rôle primordial pour évaluer la qualité du réseau. Il existe différents types de station de base : rayonnantes, ciblées, micro BTS et amplificateur de signal.

- **Base Station Controller BSC (Contrôleur des stations de base)**

Le BSC est l'organe intelligent de sous-système radio (BSS) qui permet de gérer et de superviser plusieurs BTS (512 au maximum). Il garantit la gestion des ressources radio, l'allocation des canaux RF et le contrôle des puissances d'émission des MS à l'aide des mesures effectuées par La BTS. Il est aussi responsable de la décision et exécution des mécanismes de Handover.

Le BSC assure également la première concentration des circuits vers le MSC et le dispatching vers les BTS.

I-3-1-2-Bandes de fréquence GSM

La partie radio du réseau GSM (GERAN) utilise deux bandes de fréquences, l'une pour la voie montante (TX), l'autre pour la voie descendante (RX) auxquelles s'intègrent des canaux de signalisation. La largeur du canal RF utilisé est de 200 KHz. Ces fréquences sont allouées de façon fixe aux différentes BTS et s'appellent porteuses ou ARFC (*Absolute Radio Frequency Channel*), il faut veiller à ce que 2 BTS voisines n'utilisent pas des porteuses proches. [3]

GSM band	F (MHz)	Uplink (MHz) « Mobile to Base »	Downlink (MHz) « Base to Mobile »
GSM-450	450	450.6 – 457.6	460.6 – 467.6
GSM-850	850	824.2 – 849.2	869.2 – 893.8
P-GSM-900	900	890.0 – 915.0	935.0 – 960.0
DCS-1800	1800	1710.2 – 1784.8	1805.2 – 1879.8
PCS-1900	1900	1850.2 – 1909.8	1930.2 – 1989.8

Tableau 1: Bande de fréquence GSM

I-3-1-3-Architecture en couche du GERAN (modèle OSI)

L'architecture du GSM a été fortement inspirée par la technique numérique RNIS, ce dernier est structuré suivant les trois couches basses du modèle OSI : [4]

- **La couche physique**
Définit l'ensemble des moyens de transmission et de réception physique de l'information.
 - **La couche liaison de données**
A pour objet de fiabiliser la transmission entre deux équipements par un protocole appelé LADP (Link Access Protocol For the D channel) c'est équivalent de HDLC dans un réseau RNIS.
 - **La couche réseau**
Est une couche applicative qui relie un mobile à un centre de communication (MSC). Elle est ensuite divisée en trois sous couches :
 - **La sous couche RR (Radio Ressource)**
Cette couche a des aspects purement radio, son rôle est de gérer l'allocation des ressources radio et le transfert de communication intercellulaire (handover).
 - **La sous couche MM (Mobility management)**
Elle a la responsabilité de tous les aspects touchant la mobilité d'un usager, en particulier la gestion de la localisation et de la sécurité (authentification et chiffrement).
 - **La sous couche CM (Connection Management)**
Elle prend en compte le problème d'itinérance et elle assure également la gestion des usagers, l'acheminement et l'établissement des appels d'un abonné.
- La couche physique et la couche liaison de données sont gérées dans leur intégralité dans le BSS. En revanche, concernant la couche réseau, seul la sous couche RR est gérée au sein du BSS, les sous couches CM et MM ne font que « transiter » par le BSS sans être analysées.

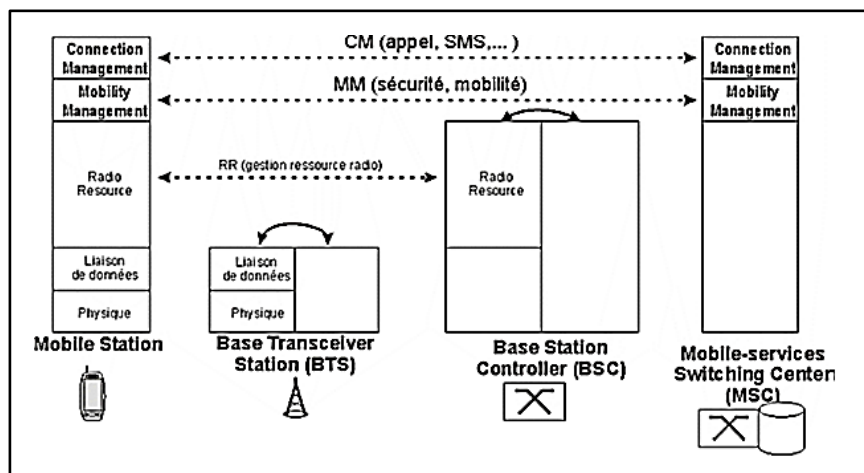


Figure 3: Architecture en couche du GERAN

I-3-1-4-Modulation dans le GERAN

La modulation utilisée dans le GERAN est GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) consiste en une modulation de fréquence à deux états portant non pas sur la séquence originale mais sur une nouvelle séquence dont le bit n est produit comme le résultat de la fonction du OU exclusif (XOR) entre le bit courant et le bit précédent.

Ce type de modulation a été choisi par le GSM car il représentait un bon compromis entre l'efficacité spectrale, la complexité et de faibles radiations nuisibles. Il permet de Diminuer la largeur de bande en atténuant les variations brusques de phase. La largeur de bande utile dans ce type de modulation a été fixée à 200 KHz pour un débit binaire de 270 Kbps.

I-3-1-5-Gestion de handover

Le handover désigne l'ensemble des opérations mises en œuvre pour assurer la continuité des communications tout en assurant une certaine qualité de service lors d'un déplacement qui amène le mobile à changer de canal ou de cellule. Il peut être : [5]

- **Inter-cellulaire** : c'est le passage d'une cellule à une autre. En effet lorsque le signal de transmission entre un téléphone et une station de base (BTS) s'affaiblit, le logiciel du téléphone mobile cherche une autre station de base disponible dans une autre cellule, qui soit capable d'assurer à nouveau la communication dans les meilleures conditions.
- **Intracellulaire** : c'est le Changement du canal d'une même BTS, à cause d'une détérioration du lien radio (trop d'interférences dans la bande de fréquence du canal d'origine) ou changement de secteur (les antennes sont souvent regroupées par trois sur un pylône ou chacune émet dans un angle de 120° et qui sont gérés par une seule BTS)
- **Inter-BSC** : Passage d'une cellule gérée par un BSC à une cellule gérée par un autre BSC dépendant du même MSC. Lors de ce handover le MSC en question intervient dans la procédure.
- **inter-MSC** : Passage d'une cellule gérée par un BSC d'un MSC à une cellule gérée par un autre BSC dépendant d'un autre MSC. Ce type est le plus critique car les temps de transfert des informations pendant la procédure pénalise le handover.

Le handover a pour l'objectif d'optimiser l'utilisation des ressources et d'équilibrer le trafic entre cellules mais il représente des contraintes tels que :

- Obtenir des mesures précises de qualité
- Faire le bon choix pour le changement de cellule
- Réaliser rapidement le handover

Le type de handover utilisé en GSM est le hard-handover qui se produit lorsque la connexion à la cellule source est rompue avant (ou au même moment) l'établissement de la liaison avec la cellule ciblée. Ce type de handover est simple et consomme moins de ressources mais son seul problème est la coupure de communication. Dans ce cas, il est important de minimiser la durée d'interruption de la communication.

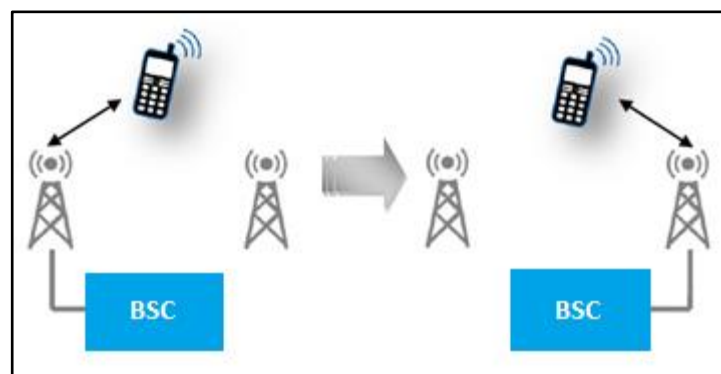


Figure 4: Exemple de hard handover

▪ La procédure de handover

Le mobile mesure la qualité du signal et la distance sur le lien radio avec la cellule serveuse et de même pour les cellules voisines d'une façon périodique. En cas de dégradation de la qualité du signal,

le MS envoie une alarme au MSC. Ce dernier cherche une nouvelle cellule ou un nouveau canal basé sur un algorithme de handover, ensuite le MSC déclenche le handover si c'est possible :

- un nouveau canal est attribué.
- la connexion est transférée.
- l'ancien canal est libéré.
- Sinon la communication continue sur l'ancien canal.

I-3-1-6-Gestion de l'itinérance

L'itinérance ou roaming désigne la faculté pour qu'un abonné d'un opérateur de réseau mobile à utiliser les services (voix ou données) de différents réseaux au fur et à mesure de leurs déplacements. Cette fonctionnalité est utile chaque fois qu'un client est hors de portée du réseau de son opérateur. C'est notamment le cas lors d'un déplacement dans un pays étranger ; mais aussi quand les infrastructures d'un opérateur ne couvrent pas totalement le territoire national.

I-3-1-7-Les canaux de l'interface Radio

On distingue deux grandes catégories de canaux : les canaux physiques et les canaux logiques.

1. Le canal physique

les canaux physiques représentent les ressources radio (physiques) permettant la transmission sur l'interface Um d'une communication téléphonique, il gère l'émission et la réception des signaux radio (informations) de l'émetteur vers le récepteur. Chaque trame TDMA est décomposée en 8 IT, et chaque **IT** constitue un **canal physique**.

Les canaux physiques permettent de transporter différents types de canaux logiques de débits variés, il existe deux types :

- **Un canal physique simplex** se rapporte à un slot par trame TDMA sur une porteuse (en l'absence de saut de fréquence).
- **Un canal physique duplex** correspond à deux canaux physiques simplex.

2. Le canal logique

Contrairement aux canaux physiques, qui ne font que transporter des informations quelles qu'elles soient, les canaux logiques permettent de distinguer les différents types d'informations circulant dans le système. Le contenu de l'information transporté sur les canaux physiques est associé en différents canaux logiques. Selon le type d'information véhiculé, on distingue les canaux suivants :

Catégories des canaux	Types de canaux	Nom du canal	La fonction
Canal de trafic TCH (Traffic CHannel)	Voix	TCH-FR (TCH Full Rate)	Voix plein débit (13 Kbit/s)
		TCH-HR (TCH Half Rate)	Voix demi-débit
	Données	Traffic Channel for data	Données utilisateurs à 2.4 Kbit/s
Canal de contrôle	Diffusion (Voie balise)	BCCH (Broadcast Control CHannel)	Information système

SACCH (Slow Associated Control Channel)	BCH (Broadcast Channel)	SCH (Synchronization Channel)	Synchronisation et identification de la BTS
		FCCH (Frequency Correction Channel)	Calage sur la fréquence porteuse
	Canaux de contrôle commun CCCH (Common Control Channel)	PCH (Paging Channel)	Appel des mobiles
		RACH (Random Access Channel)	Accès aléatoire
		AGCH (Access Grant Channel)	Allocation de ressources
	Canaux de contrôle dédié	SDCCH (Stand-Alone Dedicated Control Channel)	Signalisation
		SACCH (Slow Associated Control Channel)	Supervision de la liaison
		FACCH (Fast Associated Control Channel)	Exécution du Handover

Tableau 2: Les canaux logiques

I-3-1-8-La séparation des bandes FDD

Dans le système GSM comme dans la plupart des systèmes macro- cellulaires, le duplexage se fait en fréquence (**FDD**, *Frequency Division Duplex*).

La bande totale allouée au système est séparée en deux sous -bandes d'égale importance. Ces deux sous -bandes (dédiées aux voies montantes – du mobile vers la station de base – et descendante – de la station de base vers le mobile) sont séparées par un intervalle fréquentiel qui n'est pas attribué au système. Cette séparation entre les bandes montantes et descendantes facilite le filtrage et la séparation de voies (émettre et de recevoir simultanément).

L'écart duplex est de 45 MHz dans GSM 900 et de 95 MHz dans le cas de GSM1800. La bande de fréquences est découpée ensuite en canaux de 200 KHz. Ainsi, il existe 125 canaux montants dans la bande 890-915 MHz et 375 dans la bande 1710-1785 MHz. Ces canaux sont partagés entre les opérateurs.

I-3-1-9-La trame TDMA

Pour éviter que les signaux radio des différents utilisateurs proches ne se perturbent, on a défini des techniques d'accès multiples (TDMA, FDMA, CDMA ...). En GSM, l'accès radio s'appuie sur le F-TDMA. Sur plusieurs bandes de fréquences se trouve une trame TDMA. Pour augmenter la diversité fréquentielle, il est possible de mettre en œuvre des sauts de fréquences.

Dans ce cas, chaque trame TDMA est transmise à une fréquence différente de la précédente, le jeu de fréquences utilisé étant connu à la fois de l'émetteur et du récepteur, et les trames TDMA se partageant les bandes de fréquences disponibles.

Les voies montantes et descendantes utilisent une structure TDMA identique mais avec décalage temporel de trois slots afin d'éviter qu'un mobile reçoive et transmette en même temps (ce qui serait

techniquement réalisable) ainsi simplifier le filtrage duplex présent dans chaque mobile qui a pour rôle de rejeter le signal provenant d'une éventuelle autre station proche émettant pendant une phase de réception du mobile .

I-3-1-10-La sécurité du réseau GERAN

Dans un réseau de téléphonie mobile, tous les utilisateurs partagent le même support de transmission, il est donc nécessaire de mettre en œuvre des mécanismes de sécurité tels que l'authentification des utilisateurs, ainsi que le cryptage et la confidentialité des données de trafic et de signalisation.

- **Confidentialité de l'identité de l'abonné**

Il s'agit d'éviter l'interception de l'IMSI (International Mobile Subscriber Identity) lors de son transfert sur la voie radio par des personnes, entités ou processus non autorisés. Cela permet d'assurer la confidentialité des identités de l'abonné et de renforcer le niveau de sécurité concernant les autres éléments protégés.

- **L'authentification**

Elle empêche l'accès frauduleux par une station mobile clonée. Elle peut être exigée par le réseau à chaque mise à jour de localisation, établissement d'appel (sortant ou entrant) et avant d'activer ou de désactiver certains services supplémentaires.

- **Le chiffrement**

Si l'authentification est acceptée, les informations transmises sur les canaux dédiés sont chiffrées pour empêcher l'écoute par un usager non autorisé.

I-3-2-UTRAN

Le réseau d'accès 3G est appelé UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network). Il est constitué de NodeB et de RNC (Radio Network Controller). Le NodeB est équivalent à la BTS du réseau d'accès 2G. Un RNC contrôle une centaine de NodeB. Il est l'équivalent du BSC du réseau d'accès 2G. Ce réseau d'accès est doté de plusieurs fonctionnalités. Sa fonction principale est de transférer les données générées par l'utilisateur via les interfaces Uu et Iu.

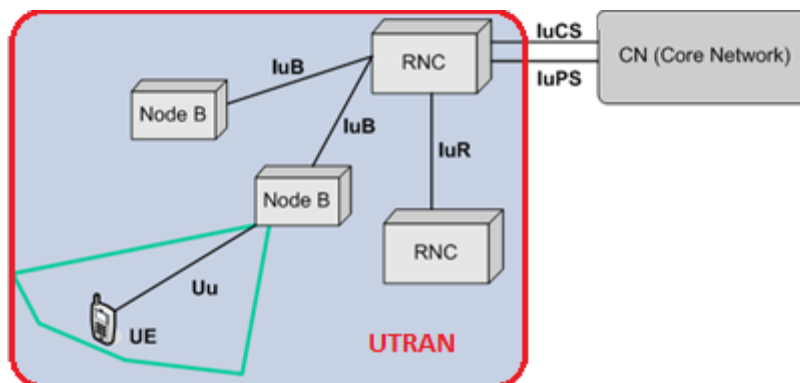


Figure 5: le réseau UTRAN [6]

Cependant, il est chargé d'autres fonctions :

- **Sécurité** : Il permet la confidentialité et la protection des informations échangées par l'interface radio en utilisant des algorithmes de chiffrement et d'intégrité.

- **Mobilité** : Une estimation de la position géographique est possible à l'aide du réseau d'accès UTRAN.
- **Gestion des ressources radio** : Le réseau d'accès est chargé d'allouer et de maintenir des ressources radio nécessaires à la communication.
- **Synchronisation** : Il est aussi en charge du maintien de la base temps de référence des mobiles pour transmettre et recevoir des informations.

I-3-2-1-Architecture du réseau d'accès radio UTRAN

▪ Equipement Utilisateur UE

C'est un élément qui permet aux utilisateurs un accès direct au réseau. Il réalise l'ensemble des fonctionnalités nécessaires à la transmission et à la gestion des déplacements. Il est composé de deux parties :

- **Equipement Mobile ME (Mobile Equipment)** Est un terminal radio utilisé pour les communications à travers l'interface radio Uu (interface radio mobile universel – interface air).
- **USIM (UMTS Subscriber Identity Module)** Est une carte à puce qui contient l'identité de l'abonné, elle permet d'exécuter les algorithmes et stocker les clés nécessaires à l'authentification et au cryptage des données.

▪ NodeB

Est une station de base (ou antenne-relais) du réseau UMTS, basé sur la technologie W-CDMA (*wide code division multiplexing access*). C'est l'équivalent de la BTS dans les réseaux GSM. [7]

Le rôle principal du NodeB est d'assurer les fonctions de réception et de transmission radio pour une ou plusieurs cellules du réseau d'accès de l'UMTS avec un équipement usager. Le NodeB travaille au niveau de la couche physique du modèle OSI (codage et décodage, entrelacement, étalement de spectre et modulation). Nous pouvons trouver deux types de NodeB (figure 6) :

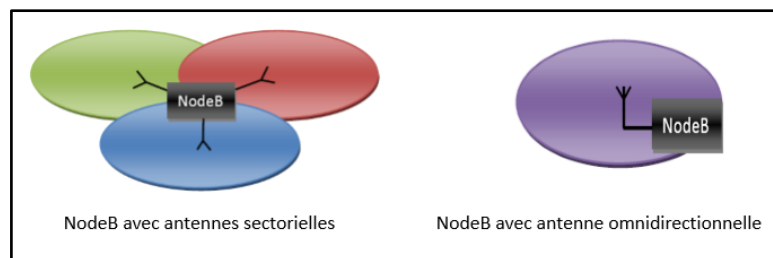


Figure 6: Types de NodeB

▪ RNC (Radio Network Controller)

C'est un élément de l'UTRAN du réseau UMTS qui contrôle les transmissions radio d'un ou plusieurs NodeB. C'est l'équivalent des BSC des réseaux GSM. Il gère la répartition de la ressource radio, le chiffrement des données avant l'envoi au téléphone mobile, ainsi qu'une partie de la localisation des terminaux mobiles des abonnés. [8]

Le RNC s'interface avec le réseau cœur de l'UMTS à fin de réaliser les transmissions en mode paquet (données) et en mode circuit (voix). Il existe deux types de RNC :

- Le **Serving RNC** qui sert de passerelle vers le réseau.
- Le **Drift RNC** qui a pour fonction principale le routage des données.

I-3-2-2-Bandes de fréquence UMTS

Les réseaux 3G utilisent des bandes de fréquences différentes de réseau précédent (GERAN) : [9]

- Duplex temporel TDD : 1885,00 à 1920,00 MHz (bande de 35 MHz de largeur) et 2010,00 à 2025,00 MHz (bande de 15 MHz) ;
- Duplex fréquentiel FDD : 1920,00 à 1980,00 MHz (*uplink* de 60 MHz) et 2110,00 à 2170,00 MHz (*downlink* de 60 MHz) ;
- Bandes satellites : 1980,00 à 2010,00 MHz (*uplink* de 30 MHz) et 2170,00 à 2200,00 MHz (*downlink* de 30 MHz)

I-3-2-3-La séparation temporelle TDD

Par définition, c'est une technique permettant un canal de télécommunication utilisant une même ressource de transmission (un canal radio par exemple) de séparer dans le temps l'émission et la réception.

Le multiplexage de type **TDD** n'utilise qu'une seule bande passante de 5 Mhz divisée en portions de temps (time slot) utilisables aussi bien pour le débit montant que pour le débit descendant. Elle comprend donc une composante TDMA (Time Division Multiple Access) en plus de la séparation par code. Cela permet d'obtenir une large gamme de débits de services en allouant plusieurs codes ou plusieurs intervalles de temps à un utilisateur.

Cette technique présente un avantage certain dans le cas où les débits d'émission et de réception sont variables et asymétriques. Un autre avantage de cette technique concerne les terminaux mobiles se déplaçant à très faible vitesse ou en position fixe, dans ce cas, la technique de "beamforming" est très efficace avec un système TDD.

I-3-2-4-Architecture en couche (modèle OSI)

L'interface radio de l'UTRAN est structurée en couches dont les protocoles se basent sur les 3 premières couches du modèle OSI (respectivement la couche physique, la couche liaison de données et la couche réseau). [10]

- **Couche 1** : Cette couche PHY représente la couche physique de l'interface radio qui réalise les fonctions de codage, décodage, modulation et d'entrelacement via W-CDMA.
- **Couche 2** : Cette couche est divisée en plusieurs sous couches :
 - La sous-couche **MAC** (Medium Access Control) a pour rôle de multiplexer les données sur les canaux de transport radio.
 - La sous-couche **RLC** (Radio Link Control) permet la fiabilité du transport des données entre deux équipements du réseau.
 - La sous-couche **PDCP** (Packet Data Convergence Protocol) permet de compresser les données via des algorithmes de compression. Cela permet d'exploiter plus efficacement les ressources radio.
 - La sous-couche **BMC** (Broadcast/Multicast Control) est en charge d'assurer les fonctions de diffusion de messages sur l'interface radio.

- **Couche 3** : Cette couche RRC (Radio Resource Control) gère la connexion de signalisation établie entre le réseau d'accès UTRAN et l'équipement usager, utilisée lors de l'établissement ou de la libération de la communication.

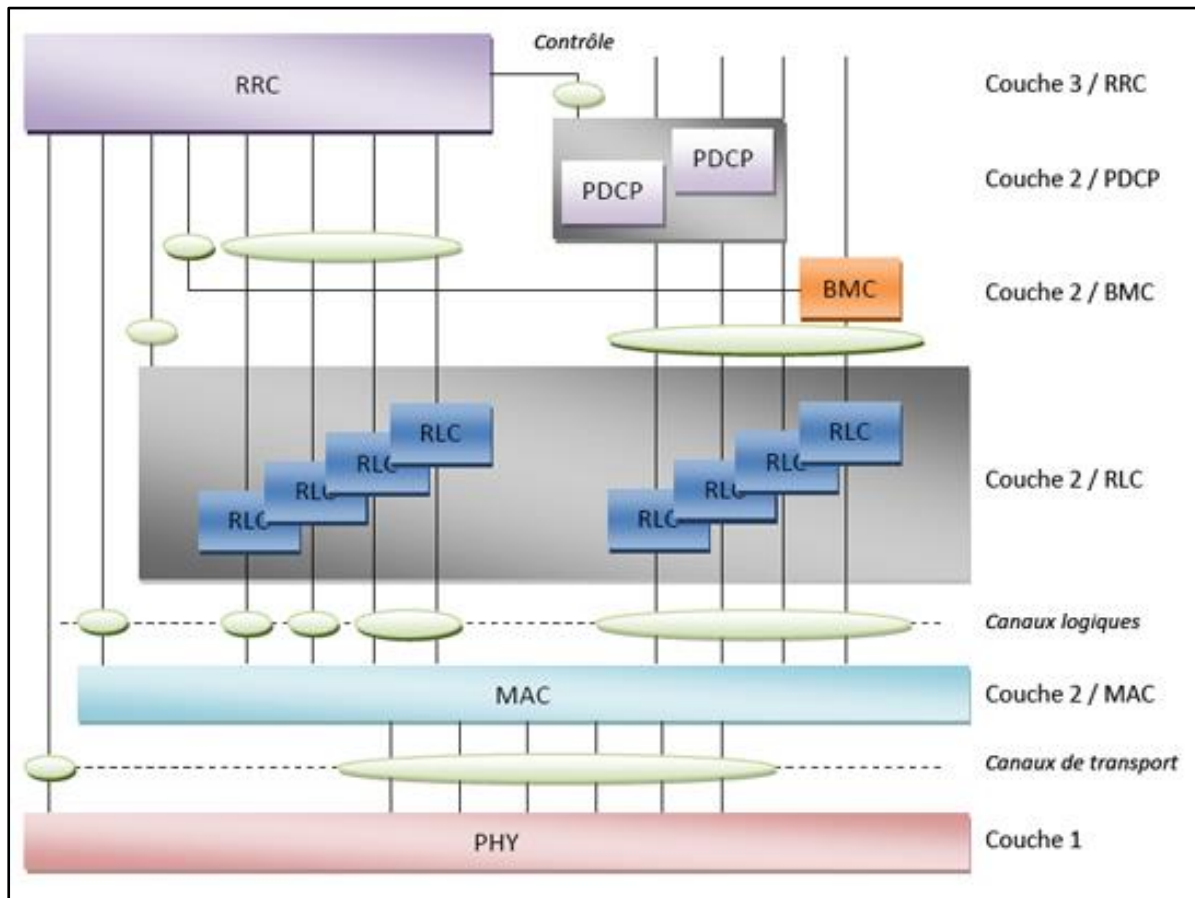


Figure 7: Vue en couches de l'interface radio UTRAN

I-3-2-5-La modulation dans l'UTRAN

La modulation utilisée dans l'UTRAN est de type QPSK (Quadrature phase-shift keying) et elle permet la transmission de deux bits par symbole ou, plutôt de deux chips par symbole puisque le signal binaire a déjà été étalé. Ces opérations adaptent les données binaires à la transmission sur l'interface radio. L'étalement de spectre va permettre à plusieurs utilisateurs d'être présents simultanément sur une même bande de fréquence.

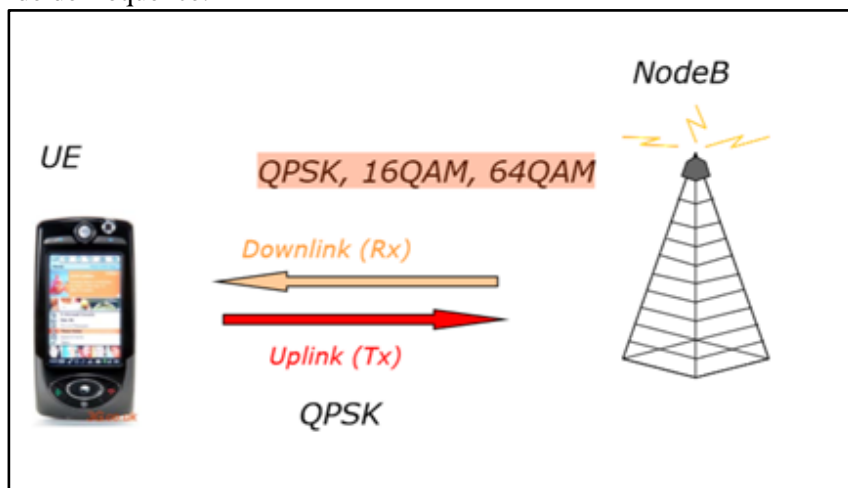


Figure 8: La modulation dans l'UMTS

I-3-2-6-Les handovers

Les appareils mobiles permettent de communiquer en mouvement. Cela implique qu'il arrive que ceux-ci se retrouvent dans une zone de chevauchement de deux cellules. Il ne faut en aucun cas couper une communication. Il existe plusieurs sortes de handovers dans le réseau UMTS : [10]

- **Softer handover** : lorsqu'un appareil mobile se trouve dans une zone commune de deux secteurs couverts par la même station de base.
- **Soft handover** : lorsqu'un appareil mobile se trouve dans une zone de couverture commune à deux stations de base. Les communications du mobile empruntent simultanément deux canaux différents pour atteindre les deux stations de base.

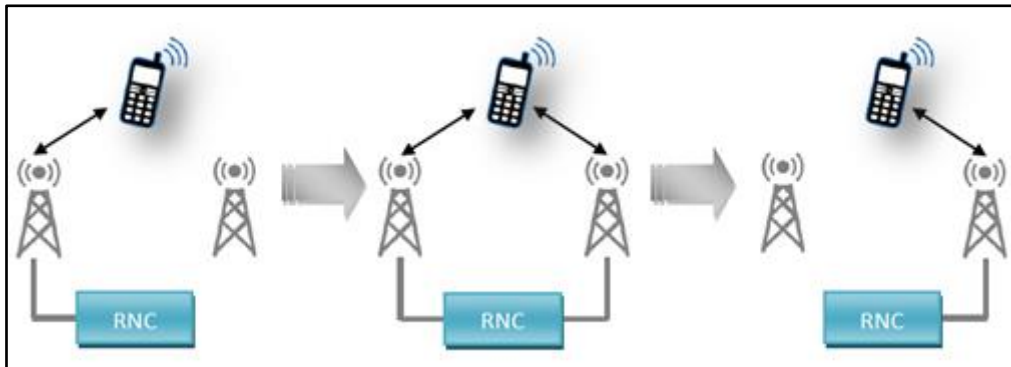


Figure 9: Exemple de soft handover

I-3-2-7-L'effet near-far

On parle d'effet near-far lorsqu'un appareil mobile émet à une puissance trop élevée qui perturbe tous les autres appareils mobiles du voisinage.

Pour remédier à ce problème, il est possible de mettre en place un système de contrôle de puissance. Le système de contrôle rapide en boucle fermée (Closed-loop Power Control) a été retenu pour le W-CDMA. Ce système permet à la station de base de réaliser des estimations régulières (1500 fois par seconde pour chaque mobile) du rapport signal à interférence (Signal to Interference Ratio) en le comparant avec la valeur du rapport signal à interférence du destinataire. Si l'estimation de cette valeur est supérieure à la valeur du destinataire, la station de base demande à l'appareil mobile concerné de réduire sa puissance d'émission ou de l'augmenter. [10]

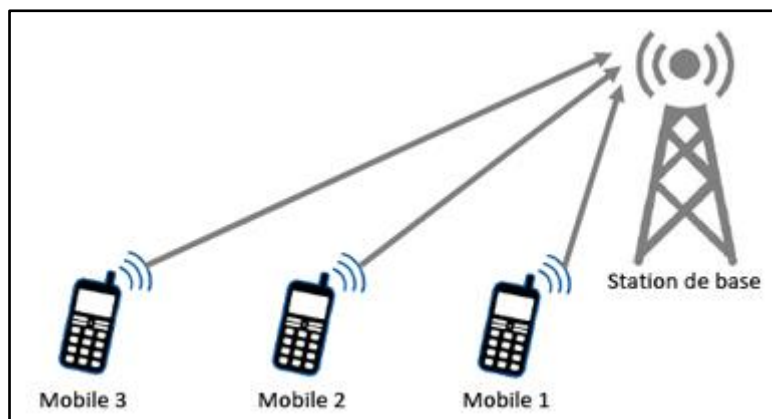


Figure 10: Effet Near-Far

I-3-2-8-Multiplexage W-CDMA

Le W-CDMA est une technique de multiplexage utilisée dans l'interface radio du réseau UTRAN, elle repose sur deux types de multiplexage : le FDD (Frequency Division Duplex) et le TDD (Time Division Duplex). C'est la combinaison entre la CDMA et FDMA

Le mode de fonctionnement W-CDMA utilise un accès CDMA à 3.84 Mchips/sec dans une canalisation fréquentielle de 5 MHz. L'intérêt d'une telle largeur de bande est qu'elle est compatible avec la fourniture de débits à 384 Kbits/s, comme requis dans les spécifications de l'IMT 2000, voire même 2 Mbits/s sous certaines conditions.

I-3-2-9-La sécurité du réseau UTRAN

Les mécanismes de sécurité du réseau UTRAN ont également subis des évolutions pour permettre une migration progressive ou une cohabitation avec des systèmes 2G (GERAN) dont les mécanismes d'authentification et de confidentialité ont déjà été cités.

○ Authentification mutuelle

Le principe de l'authentification mutuelle est une innovation majeure des systèmes de troisième génération (UTRAN), trois entités de base sont prises en compte dans le processus d'authentification : Le mobile, le réseau d'accès et le réseau nominal d'origine de l'abonné.

○ Intégrité des messages

Une des nouveautés de l'UMTS est l'utilisation de mécanismes de vérification de l'intégrité des messages. La solution utilisée est basée sur le calcul de MAC (Message Authentication Code) appliqué à chaque message transmis.

○ Confidentialité

Une fois que l'utilisateur et le réseau se soient authentifiés mutuellement, ils peuvent initier une communication sécurisée.

I-3-3-EUTRAN

Le réseau d'accès 4G appelé **eUTRAN** (Evolved **UTRAN**) est simplifié par rapport aux réseaux précédents (GERAN et UTRAN). Il ne comporte qu'un seul type d'entité, l'**eNodeB**.

La station de base **eNodeB** est fonctionnellement équivalente à un NodeB et un RNC, elle est constituée d'antennes qui relient les UE avec le réseau cœur du LTE via l'interface air (RF). Des liaisons en fibres optiques et des liens IP sert à relier les eNodeB entre eux (liens X2). Ainsi, elle permet d'offrir les fonctions de contrôle implémentées auparavant dans le RNC des réseaux 3G.

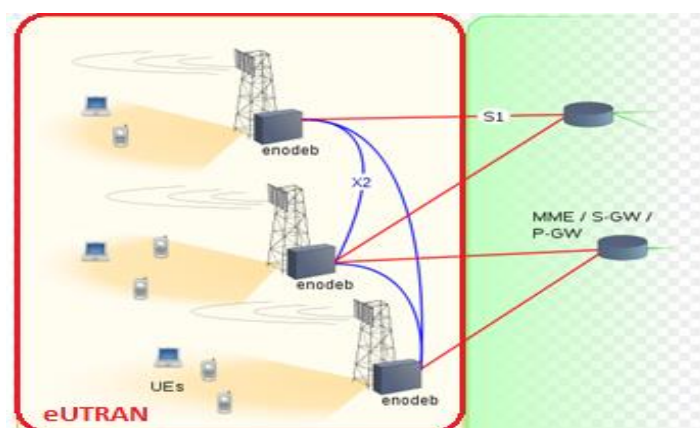


Figure 11: le réseau eUTRAN [11]

L'EUTRAN est responsable de toutes les fonctions liées à l'interface radio, qui peuvent être résumées brièvement :

- **la gestion des ressources radio (RRM)** : Cela couvre toutes les fonctions liées aux supports radio, tels que le contrôle radio des porteuses, le contrôle d'admission radio, le contrôle de la mobilité, la planification et allocation dynamique des ressources pour les UE à la fois pour la liaison montante et descendante.
- **Compression des en-têtes** : Cela permet d'assurer une utilisation efficace de l'interface radio par compression des en-têtes de paquets IP qui pourraient représenter une surcharge importante tels que les paquets VoIP.
- **Sécurité** : Toutes les données envoyées sur l'interface radio sont cryptées.
- **Connexion au réseau cœur EPC**

I-3-3-1-Bandes de fréquence et débit du LTE

La technologie LTE fonctionne dans une variété de fréquences selon la zone géographique couverte : 700 MHz aux Etats-Unis pour le réseau de Verizon Wireless, 2,6 GHz et 800 MHz en Europe, et 2,1 GHz pour le réseau japonais de NTT Docomo (opérateur japonais).

Les objectifs de débit maximal définis pour le LTE sont les suivants :

- 100 Mbit/s en voie descendante (antenne relais vers mobile) pour une largeur de bande allouée de 20 MHz, soit une efficacité spectrale crête de 5 bit/s/Hz.
- 50 Mbit/s en voie montante (mobile vers antenne relais) pour une largeur de bande allouée de 20 MHz, soit une efficacité spectrale crête de 2,5 bit/s/Hz.

Ces chiffres sont valables pour un UE de référence comprenant : deux antennes en réception et une antenne en Émission.

I-3-3-2-La modulation dans le eUTRAN

La modulation utilisée dans le LTE (eUTRAN) est une modulation adaptative qui varie en fonction de la distance qui sépare l'abonné de NodeB. Chaque sous-porteuse est modulée à l'aide de différents niveaux de modulation : QPSK, 16QAM, 64 QAM (voir tableau 03). [12]

La modulation du LTE est essentiellement basée sur l'utilisation de la technologie OFDM et des technologies d'accès associés, OFDMA/SC-FDMA.

Catégorie d'UE	Débit crête (Mbit/s)		DL	UL	Nombre d'antennes de réception
	DL	UL			
1	10	5	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM	2
2	50	25		QPSK, 16QAM	2
3	100	50			2
4	150	50			2
5	300	75		QPSK, 16QAM, 64QAM	4

Tableau 3: Caractéristiques des catégories d'UE LTE

I-3-3-Multiplexage OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing)

Les Systèmes OFDM subdivisent la bande passante en plusieurs sous-porteuses étroites et transmettent les données en flux parallèles, qui sont orthogonales entre-elles, ce qui leur permet d'être très proches les unes des autres (Espacement entre sous-porteuses de 15 KHz). Un intervalle de garde est ajouté après chaque symbole pour contrer les effets du multi trajets.

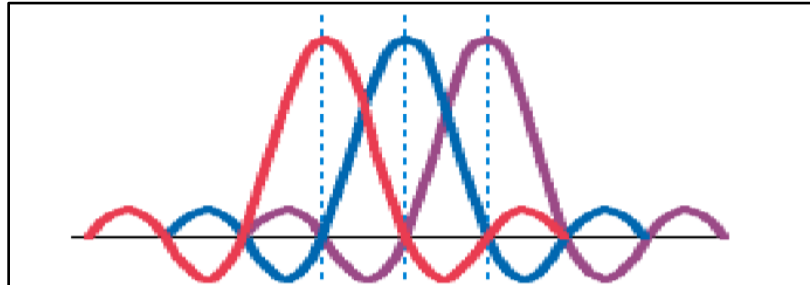


Figure 12: Principe de l'OFDM

La figure 12 présente la technique OFDM où chaque symbole est une combinaison linéaire des signaux instantanés sur chacune des sous-porteuses dans le canal. Lors des transmissions, chaque utilisateur se voit attribuer une portion du spectre.

- **OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)**

En OFDMA, les utilisateurs se voient attribuer un nombre précis de sous-porteuses pour un time slot prédéterminé, appelées PRBs, (Physical Resource Blocks). Ces derniers ont chacun une dimension temps et fréquence. La Répartition des PRBs est géré par une fonction de planification à la station de base.

- **SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access)**

En LTE Uplink, un concept différent est utilisé en technique d'accès. Bien qu'on utilise encore une forme de technologie OFDMA. Elle offre des performances et une complexité globale similaire à l'OFDMA mais utilise en revanche une technique de multiplexage fréquentiel à une seule porteuse.

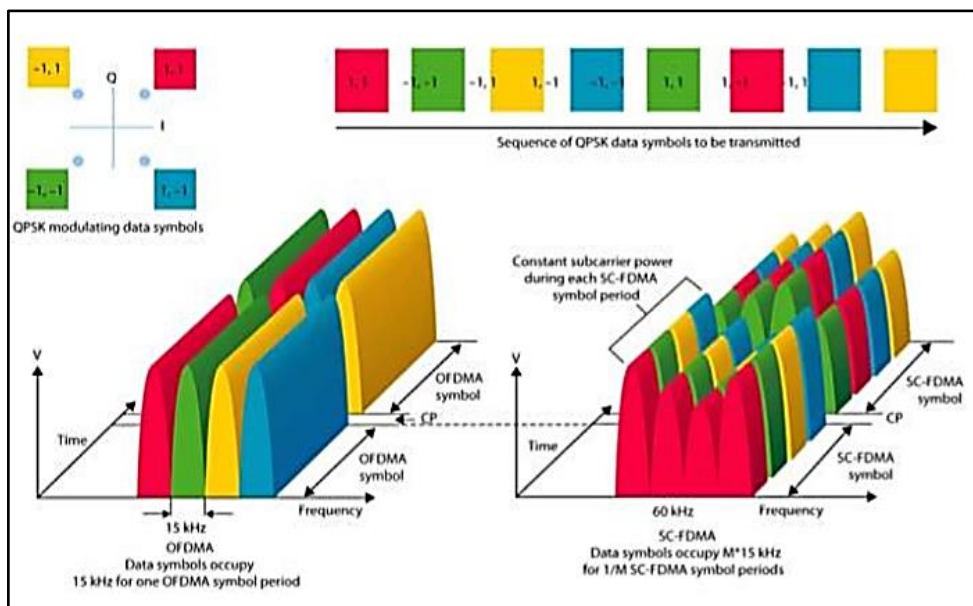


Figure 13: Différence entre OFDMA et SC-FDMA [13]

I-3-3-4-Structure d'une trame LTE

Une trame LTE dure 10 ms. Elle est découpée en 10 sous trames d'une durée de 1 ms. Chaque Sous trame est divisée en deux slots de 0,5ms. Un slot dure donc 0,5 ms, durée pendant laquelle est transmis 7 symboles par bande OFDM. Or, Les blocs de ressources comprennent 12 sous-porteuses, quelle que soit la bande passante globale du signal LTE.

Par conséquent, $7 \text{ symboles} \times 12 \text{ sous porteuses} = 84 \text{ symboles}$ sont transmis en 0,5 ms. La figure 14 présente la trame radio dans le réseau LTE. [14]

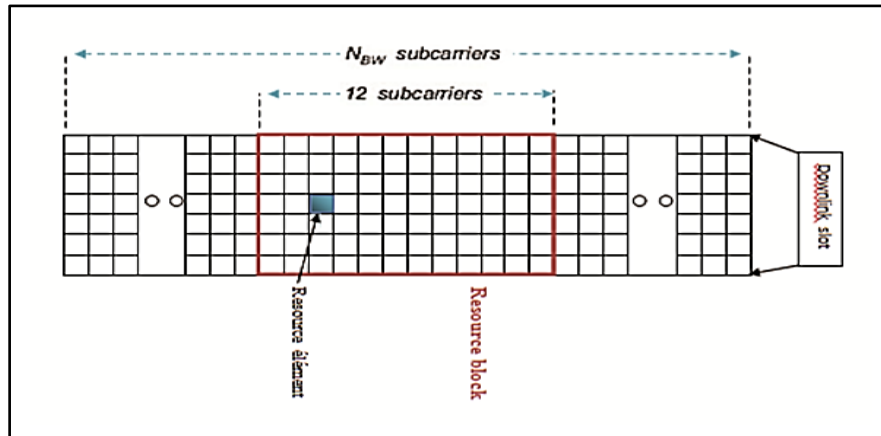


Figure 14: La trame LTE

I-3-3-5-La sécurité du réseau eUTRAN

La 4G a pour but de fournir une connexion IP toujours plus performante entre les équipements des usagers et les réseaux de paquets (Packet Data Network). Comme pour tous les réseaux, des procédures de sécurité ont été mise en place pour garantir la fiabilité du réseau.

Il existe 5 niveaux de sécurité :

1. **Network Access Security** : Mesure de sécurité permettant une connexion sécurisée entre l'EPC et les UE
2. **Network Domain Security** : Mesure de sécurité permettant de sécuriser la partie filaire du réseau et permettant d'envoyer les messages de signalisations en toute sécurité
3. **User Domain Security** : Mesure de sécurité permettant une authentification mutuelle entre l'USIM et le ME avant que l'USIM n'accède au ME.
4. **Application Domain Security** : Mesure de sécurité définissant les procédures et les applications de sécurité au niveau de l'équipement utilisateur (UE) et dans le domaine du fournisseur (Core Network) pour échanger en toute sécurité des messages
5. **Non 3GPP Domain Security** : Mesure de sécurité permettant aux usagers d'accéder en toute sécurité à l'EPC par des réseaux d'accès non-3GPP, et assurant aussi la protection des liens d'accès radio

I-4-le réseau Cœur

Un réseau cœur assure principalement les fonctions de commutation et de routage. C'est donc lui qui permet l'accès au réseau public RTCP ou RNIS ou à d'autres réseaux intranet. En plus des fonctions indispensables de commutation, on y retrouve les fonctions de gestion de la mobilité, de la sécurité et de la confidentialité qui sont implantées dans les normes appropriées.

Le réseau cœur 2G/3G consiste en deux domaines : Domaine circuit et domaine paquet. Le **domaine circuit** offre des services de téléphonie. Au départ constitué de commutateurs voix, il a évolué vers une structure NGN Mobile (Release 4).

Le **domaine paquet** appelé GPRS (General Packet Radio Service) offre un accès plus (3G) ou moins (2G) haut débit au monde IP et à ses services. Le réseau cœur paquet GPRS est constitué de commutateurs de paquets et sert à transférer les paquets émis depuis des accès 2G ou 3G vers l'Internet et les Intranets d'entreprise. Par ailleurs ce réseau sert à remettre au mobile des paquets émis par l'Internet ou par les Intranets.

La 4G fait apparaître un nouveau réseau cœur pour les services de données et services conversationnels appelé **ePC** (Evolved Packet Core). Il est parfois appelé **SAE** (System Architecture Evolution). Les services conversationnels (téléphonie) seront offerts par la plateforme de service d'opérateur IMS (IP Multimedia Subsystem) à la différence d'aujourd'hui où il y a un réseau cœur dédié pour offrir ces services.

Le trafic entre le réseau d'accès et le réseau cœur est transporté via un backbone IP sur un lien Gigabit Ethernet (GE). La figure 15 montre les différents réseaux cœur des différents réseaux d'accès radio mobiles.

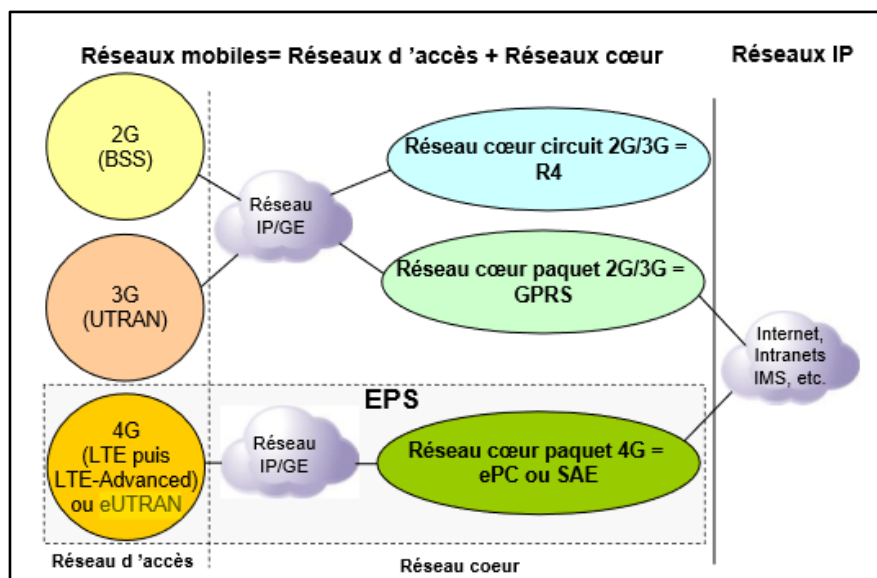


Figure 15: les différents réseaux cœur mobiles.

I-5-Présentation des Interfaces

Un certain nombre d'interfaces ont été normalisées, pour les réseaux d'accès des trois générations mobiles citée auparavant, par l'ETSI, permettant à un opérateur de faire appel à des fournisseurs différents pour la fourniture de son réseau. Chaque interface, désignée par une lettre (ou groupe de lettre) est totalement spécifiée à sa norme, le tableau suivant va présenter les principales interfaces que utilisent ces réseaux :

Génération	Interface	Equipements	Fonctions principales
La deuxième génération 2G	Um (radio)	BTS-MS	Gère les communications entre le mobile et les BTS pour tout ce qui concerne la transmission radio (transport du trafic et de signalisation).
	Abis	BSC – BTS	- Utilise au niveau physique des liens à 2 Mbit/s - Le protocole LAPD (Link Access Protocol for the D channel) du RNIS est utilisé pour le transport de la signalisation.
La troisième génération 3G	Uu	NodeB - MS	Il s'agit de l'interface air WCDMA grâce à laquelle le terminal utilisateur a accès à la partie fixe du système. Cette interface est ouverte .ce qui permet à de nombreux constructeurs de terminaux de proposer leurs produits sans nécessairement développer leurs propres stations de base.
	Iub	RNC - NodeB	L'interface Iub relie les NodeB au RNC. L'UMTS et le premier système de téléphonie mobile à proposer une interface ouverte à ce niveau .cela permettront de dynamiser le marché et d'offrir la possibilité a de nouveau constructeur de se spécialiser dans le développement et la commercialisation de NodeB.
	Iur	RNC – RNC	Interface Iur permet à deux contrôleurs radio RNC de communiquer. Elle permet aussi le soft handover entre des RNC de différents constructeurs
La quatrième génération 4G	X2	eNodeB - eNodeB	Elle représente les liens entre les stations de base « eNodeB » au moyen des liaisons en fibres optiques et des liens IP. Permet l'échange d'information.

Tableau 4: les interfaces des différents réseaux d'accès

II-Le Cloud Computing

II-1-Introduction

Après l'ère Windows des années 90, la révolution Web des années 2000, nous rentrons dans une nouvelle décennie de rupture, celle du Cloud Computing. Cela est en grande partie dû au fait que le Cloud computing est la nouvelle révolution dans le domaine des technologies de l'information. Il s'agit d'une tendance lourde qui va fortement modifier la manière d'intégrer les solutions technologiques.

Avant l'existence du cloud computing les entreprises fondées leurs propres infrastructures avec l'implémentation des serveurs physiques locales afin d'effectués des traitements, des calculs et de fournir des capacités de stockages .Mais cela est très couteux et freine l'évolution de ces entreprises. Les utilisateurs finaux ont aussi des problèmes tels que la capacité de stockage limitée, la disponibilité des services et des applications.

L'arrivé du cloud a permis une variété de services disponibles sur Internet qui offrent des fonctionnalités de calcul et des capacités de stockages à travers l'infrastructure virtuelle du fournisseur, ces services sont fournis suivant la demande et les exigences des utilisateurs à n'importe quel moment.

Le Cloud computing propose une réponse à court terme à des enjeux très actuels tels que la réduction des coûts, la solution aux besoins de plus en plus précis et évolutifs des entreprises, la flexibilité, la fiabilité et une réactivité accrue.

Au cours de ce chapitre, nous allons donner une idée générale sur le cloud computing en lui-même, sur ce qu'il est, a quoi il sert, ses modèles en services, ses types, ses avantages et ses inconvénients (qu'ils soient économiques où techniques). A la fin on va essayer de présenter quelques futurs défis de cette nouvelle technologie.

II-2-Concept de virtualisation

Le concept de virtualisation a vu le jour dans les années 1960 (par IBM mainframe systèmes). Depuis, le concept a mûri considérablement et a été appliqué à tous les aspects de l'informatique (mémoire, stockage, processeurs, logiciels, réseaux).

Il fait référence à « *l'abstraction physique des ressources informatiques* ». En d'autres termes, c'est le partage d'une même infrastructure physique (puissance de calcul, disque dur, mémoire, réseau...) par plusieurs machines virtuelles complètement séparées et indépendantes.

La machine physique "voit" ces machines virtuelles comme des applications auxquelles il dédie ou distribue ses ressources.

Les machines virtuelles sont construites à partir de l'excès de ressources de la machine hôte et sont gérées par un hyperviseur (gère les machines virtuelles et allouent dynamiquement les ressources à ces machines) en plus chaque machine virtuelle à son propre système d'exploitation. [15]

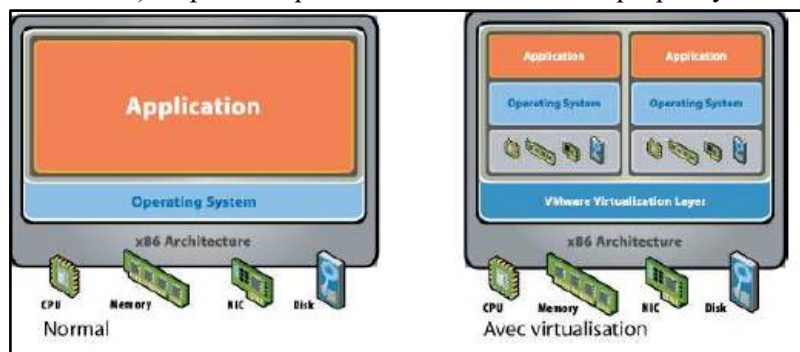


Figure 16: Concept de virtualisation [16]

II-2-1-Les bénéfices de la virtualisation

Les intérêts de la virtualisation sont : [17]

- L'utilisation optimale des ressources informatique.
- L'installation, le déploiement et la migration facile des machines virtuelles dans une machine physique.
- L'économie vis-à-vis du matériel par mutualisation (consommation électrique, entretien physique, surveillance, support, compatibilité matérielle, etc.)
- La sécurisation et isolation d'un réseau.
- L'allocation dynamique de la puissance de calcul en fonction des besoins de chaque application à un instant donné.
- La machine virtuelle ne tombe pratiquement jamais en panne ce qui accroît sérieusement la fiabilité des systèmes.
- Lorsqu'une configuration est utilisée pour des développements ou des tests de charge, il est possible de libérer les ressources en archivant seulement la configuration.
- La remise en ligne du système lorsque c'est nécessaire se fait en quelques minutes.
- Elle permet aux entreprises d'organiser leurs infrastructures informatiques de manière à être plus efficaces et rentables que jamais.

II-3-La notion du Cloud Computing

Le *cloud computing* est un néologisme utilisé pour décrire l'association de l'internet <<cloud>>, et l'utilisation de l'informatique << computing >>. Cette technologie permet de délocaliser les données et les applications disponibles dans des Datacenter extensibles et accessible d'une manière transparente depuis des appareils (ordinateurs, téléphones, tablettes, ...) connectés à Internet.

Le cloud computing est un modèle qui permet un accès facile et à la demande à un pool partagé de ressources informatiques configurables (réseaux, serveurs, stockage, applications et services) et qui peuvent être rapidement fournis et libérées par un minimum de traitement, de gestion et d'interaction avec le fournisseur de services.

Au niveau du cloud les informations sont stockées de façon permanente sur un grand réseau (internet), au sein des puissants serveurs dédiés. Les utilisateurs ne font que louer ce matériel auprès des fournisseurs de service qui peuvent alors servir des millions de clients avec quelques centaines ou milliers de machines.

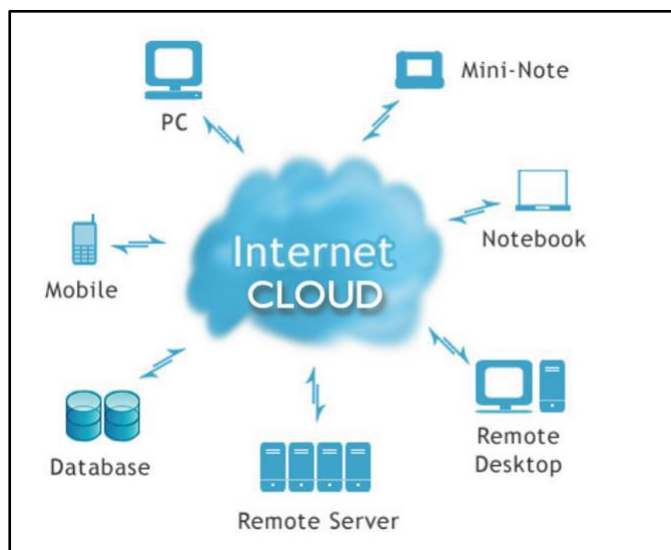


Figure 17: Cloud Computing [18]

Ce qui est intéressant dans ce modèle c'est que l'évolution de la plateforme vers le Cloud n'entraîne pas une transformation de l'existant mais est plutôt perçue comme un ajout de ressources supplémentaire, c'est une extension du système d'information vers un modèle adaptatif d'où les fournisseurs de services sont personnalisés et correspondant réellement aux besoins du client.

II-4-Caractéristiques de cloud

Cloud Computing a une variété de caractéristiques dont on peut citer :

- **Ressources partagées** : Les ressources informatiques du fournisseur sont regroupées dans des centres pour servir plusieurs consommateurs à l'aide d'un modèle multi-locataire, avec différentes ressources physiques et virtuelles dynamiquement attribuées suivant la demande des consommateurs.

Les ressources comprennent entre autres le stockage, le traitement, la mémoire, la bande passante réseau, les machines virtuelles et les services de messagerie.

Service à la demande : les services sont obtenus suivant la demande des utilisateurs et en fonction de ces exigences actuelles. Cela se fait automatiquement à l'aide d'un logiciel d'automatisation et c'est l'utilisateur, au moyen d'une console de commande, qui met en place et gère la configuration à distance. Cette mise à l'échelle dynamique doit être faite tout en maintenant des niveaux élevés de fiabilité et de sécurité.

- **Large accès au réseau** : on peut accéder au réseau en utilisant des smartphones, des tablettes, des ordinateurs portables ou des ordinateurs de bureau. Ces appareils sont utilisés partout où ils se trouvent avec un point d'accès en ligne simple. Cette mobilité est particulièrement intéressante pour les entreprises de sorte que pendant les heures de repos ou pendant la route, les employés peuvent rester en contact avec tout ce qui passe dans le réseau de l'entreprise

- **Elasticité rapide** : le cloud est flexible et évolutif afin de répondre aux besoins commerciaux immédiats. Il permet d'ajouter ou de supprimer des utilisateurs, des fonctionnalités du logiciel, et d'autres ressources rapidement.

- **Tarification mesuré (Pay per use)** : les systèmes de Cloud contrôlent et optimisent automatiquement l'utilisation des ressources en tirant parti d'une capacité de mesure à un certain niveau d'abstraction approprié pour le type de service. De cette façon, les consommateurs sont facturés pour les services en fonction de combien ils ont effectivement utilisés ce service.

II-5-Modèles en services

Il existe trois modèles en services dans le cloud Computing qui se différencient entre eux par la simplicité et la flexibilité.

- **Infrastructure-as-a-Service (IaaS)**

Cela se caractérise par une infrastructure physique souvent mise à disposition par un fournisseur de services, de cela, on y trouvera une solution de virtualisation permettant la création de « Datacenter virtuels ».

- **Platform-as-a-Service (PaaS)**

Il s'agit d'offrir une solution comprenant généralement un système d'exploitation, une plateforme d'exécution pour un logiciel, une base de données et un serveur web aux développeurs qui souhaitent créer leurs propres services, mais ne veulent pas construire leur propre cloud.

Le consommateur n'a que gérer et contrôler ses applications déployées sans se soucier de l'infrastructure cloud offerte.

- **Software-as-a-Service (SaaS)**

C'est un modèle de déploiement d'application dans lequel un fournisseur loue une application clé en main à ses clients en tant que service à la demande accessibles à partir de divers périphériques clients par le biais d'une interface client léger comme un navigateur Web (par exemple, le courrier électronique basé sur le Web). De cette façon, l'utilisateur final n'a plus besoin d'installer tous les logiciels existants sur sa machine de travail. Cela réduit également la maintenance en supprimant le besoin de mettre à jour les applications.

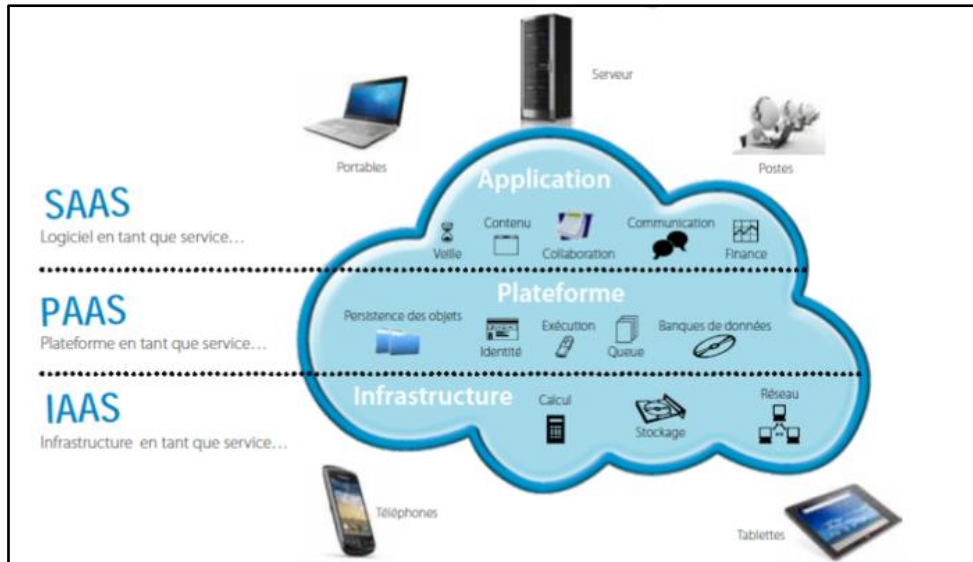


Figure 18: Modèles en services du Cloud Computing [19]

II-6-Modèles de déploiement

Le déploiement de cloud computing peut différer en fonction des besoins, d'où ces quatre modèles de déploiement suivants ont été identifiés :

- **Cloud Privés**

L'infrastructure cloud est exploitée uniquement par une organisation spécifique. Dans ce type les ressources physiques peuvent être hébergées dans une infrastructure propre à l'entreprise et étant sous son contrôle comme elle peut aussi désigner un Cloud déployé sur une infrastructure physique dédiée et mise à disposition par fournisseur de services.

Le déploiement du cloud privé est plus cher par rapport au d'autres types de cloud mais il est plus sécurisé.

- **Cloud communautaires**

L'infrastructure cloud est partagée entre un certain nombre d'organisations ayant des intérêts et des exigences similaires. Les coûts de déploiement sont partagés entre les organisations. Cela peut aider à réduire les dépenses de ces dernières. Le fonctionnement peut être en interne ou avec une troisième partie sur les lieux.

- **Cloud publics**

L'infrastructure cloud est ouverte au public et aux grands groupes industriels sur une base commerciale gérée par un fournisseur de services en cloud. Elle permet donc à n'importe quel particulier ou à n'importe quelle entreprise d'héberger ses applications, ses services ou ses données.

Pour les consommateurs, il n'y a donc aucun investissement initial fixe et aucune limite de capacité.

- **Cloud hybride**

L'infrastructure cloud se compose de plusieurs types de cloud différents. Ces infrastructures sont liées entre elles par la même technologie afin d'autoriser l'accès aux applications et aux données. Ce type est vu comme une excellente solution pour répartir ses moyens en fonction des avantages recherchés.

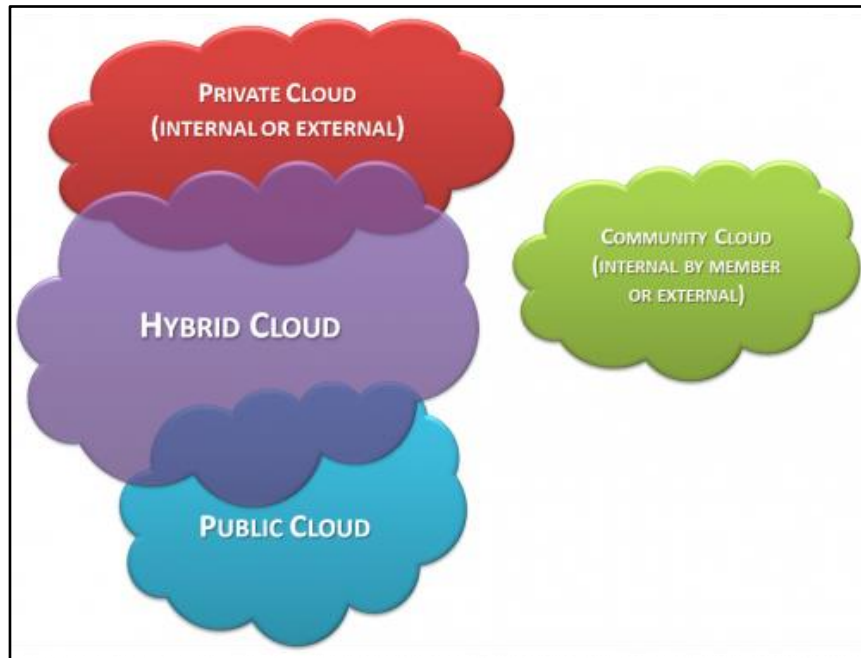


Figure 19: Les modèles de déploiement [20]

II-7-Avantages du cloud

- **Économies de coûts** : Le cloud nécessite moins de ressources informatiques internes pour fournir un soutien du système. Les entreprises n'ont pas besoin de faire de gros investissements dans les centres de données ce qui permet de réduire leurs dépenses.
- **Evolutivité / Souplesse** : Le cloud permet aux entreprises de commencer petit et d'accroître leur investissement dans les ressources selon les besoins (pay-as-you-go). En outre, la flexibilité du cloud Computing permet aux entreprises d'utiliser des ressources supplémentaires aux heures de pointe, ce qui leur permet de satisfaire les exigences des consommateurs.
- **Fiabilité** : Les services utilisent plusieurs sites redondants qui peuvent soutenir la continuité des activités.
- **Maintenance** : Les fournisseurs de services de Cloud font l'entretien du système, et l'accès est via des API (Application Programming Interface) donc l'utilisateur n'a pas besoin d'application installer sur son PC, ce qui réduit encore les besoins de maintenance.
- **Accessibilité mobile** : travailleurs mobiles ont une productivité accrue grâce à des systèmes accessibles dans une infrastructure disponible n'importe où.
- **Mises à jour logicielles instantanées.**
- **Capacité de stockage illimité.**
- **Indépendance des équipements des machines.**

II-8-Défis du cloud computing

Ils existent plusieurs défis liés au cloud computing, et bien que certains d'entre eux peuvent causer un ralentissement de livraison de services du cloud, la plupart peuvent offrir une opportunité s'ils sont résolus avec une grande attention dans les étapes de la planification.

On peut donc citer cinq défis majeurs qui sont :

- **Sécurité et confidentialité**

Ils représentent les deux grands défis du cloud. Le fait que les données se trouvent chez le fournisseur de service et en dehors du pare-feu de l'entreprise soulève des graves préoccupations. Le risque de voir vos données finir en situation de vol ou de mauvaise utilisation demeure donc une possibilité.

Ces risques peuvent être atténués en utilisant des applications de sécurité, logiciel de perte de données, et l'achat de matériel de sécurité pour suivre le comportement inhabituel sur les serveurs.

- **La facturation des services fournis**

Il est difficile d'évaluer les coûts des services à la demande à moins que le fournisseur à quelques bons repères comparables à offrir. Les accords de niveau de service du fournisseur ne sont pas suffisants pour garantir la disponibilité et l'évolutivité. Les entreprises seront réticentes à passer au cloud sans une forte garantie de qualité de service.

- **Fiabilité et disponibilité**

Les fournisseurs de Cloud manquent encore un service round-the-clock (H24 et 7j\7) ; cela se traduit par des pannes fréquentes. Il est important de surveiller le service fourni à l'aide des outils internes. Il est essentiel d'avoir des plans pour superviser l'utilisation, la performance, la robustesse, et la dépendance économique de ces services.

- **Performances et coût de la bande passante**

Au niveau du cloud les entreprises peuvent économiser de l'argent sur le matériel, mais elles doivent dépenser plus pour louer la bande passante. Cela peut avoir un faible coût pour les petites applications, mais peut être nettement plus élevé pour les applications de données intensives. De ce fait, de nombreuses entreprises sont en attente d'un coût réduit avant de passer au cloud.

- **Manque de normes**

Aucune norme n'est associée au cloud computing, et il est donc peu probable que la plupart des nuages seront interopérables. Le Forum Open Grid et Open Cloud Consortium travaillent sur les normes pratiques de cloud computing et développent une interface Open Cloud Computing pour résoudre ce problème.

Tous ces défis ne doivent pas être considérés comme des barrages routiers dans la poursuite de l'informatique en Cloud. Il est assez important de songer sérieusement à ces questions et les solutions possibles avant l'adoption de cette technologie.

II-9-Conclusion

Le cloud computing n'est pas une nouvelle technologie en soi, il utilise des technologies existantes sous une forme nouvelle et un concept marketing innovant. Le cloud est disponible sous différentes formes, chacune s'insérant à un niveau différent de l'architecture d'un système d'information, il augmente la rentabilité en améliorant l'utilisation des ressources. Les coûts sont tirés vers le bas en fournissant des ressources appropriées seulement pour le temps que ces ressources sont nécessaires. Mais il comporte un certain nombre de risques qui peuvent être importants selon le domaine d'activité de l'entreprise.

Le Cloud Computing a permis aux équipes et aux organisations de rationaliser les processus d'approvisionnement à longue durée.

Actuellement, le marché du cloud est dans une phase d'expansion très importante et plusieurs acteurs tentent l'aventure en tant que fournisseur de cloud même si quelques acteurs majeurs occupent la majorité du marché.

A ce niveau de concurrence, c'est la sécurité qui fera la différence entre les concurrents dans les années à venir.

III-Le Cloud RAN

III-1-Introduction

Avec l'arrivée de l'internet mobile et la croissance rapide du trafic de données, l'architecture traditionnelle du réseau d'accès a du mal à faire face aux exigences accrues des utilisateurs. L'idée d'installer d'autres stations de bases n'est plus acceptable par peur de causer des problèmes tels que :

- Le coût pour construire, exploiter et mettre à niveau un réseau d'accès radio (RAN) devient très cher alors que le chiffre d'affaires ne progresse pas au même rythme.
- Quand il y a beaucoup de BTS dans les zones concentrées, l'utilisation moyenne de chaque BTS descend de manière significative bien que le coût de chaque BTS reste le même.
- Augmentation de la consommation d'énergie.
- La rareté du spectre radio électrique.
- Des interférences Co-canal et intercellulaires dues à la réutilisation de fréquence.
- La planification est devenue très difficile.

Pour surmonter ces problèmes, les opérateurs ont besoin de manière rentable de combiner plusieurs normes (GSM, CDMA, WCDMA, LTE et Wi-Fi, entre autres), des bandes de fréquences, des couches cellulaires et de solutions de réseau de transport, tout en réduisant en même temps les latences et le taux de manipulation de données. Cela signifie que, avant tout, l'infrastructure cellulaire doit être souple et peut soutenir un déploiement et une gestion simplifiée des réseaux d'accès radio de plus en plus hétérogènes.

L'application du Cloud dans les réseaux d'accès mobiles représente la nouvelle ère du réseau mobile haut débit qui pourra répondre aux problématiques actuelles à l'aide d'un nouveau concept nommé Cloud Radio Access Network (C-RAN).

La question est maintenant de savoir comment les opérateurs peuvent faire le meilleur usage des technologies de virtualisation dans RAN ?

III-2-Le C-RAN

Le C-RAN (Cloud-RAN), parfois appelé RAN-centralisé, est un nouveau paradigme pour les réseaux d'accès mobile. Il a été introduit par *China Mobile Research Institute* en Avril 2010 à Beijing (Chine), 9 ans après qu'il a été décrit dans les demandes de brevet déposées par des sociétés américaines.

Le C-RAN fait référence à la virtualisation des fonctionnalités de la station de base au moyen du cloud computing et qui prend en charge 2G, 3G, 4G et futures normes de communication mobiles. Le C-RAN est basé sur le concept des quatre « C » :

- Déploiement centralisé « Centralized processing ».
- La radio collaborative « Collaborative radio ».
- Le C-RAN en temps réel « real-time Cloud Radio Access Network ».
- Nettoyage du système « Clean ».

Il vise à réduire le nombre de sites cellulaires tout en conservant une couverture similaire.

Contrairement aux réseaux cellulaires existants, où les ressources informatiques pour le traitement bande de base sont situées au niveau de chaque site de cellule, en C-RAN, les ressources

informatiques sont situées dans un Cloud où l'infrastructure est centralisée ce qui permet de réduire les frais d'installation et de maintenance tout en offrant de meilleurs services.

III-3-Architecture du C-RAN

L'architecture de réseau Cloud-RAN exploite une combinaison de virtualisation, de centralisation et de coordination technique, lesquels interagissent les uns avec les autres pour améliorer les performances du réseau dans une variété de façons dans le réseau.

III-3-1-Evolution des stations de base

1. Dans l'architecture traditionnelle, les fonctionnalités radio et de traitement bande de base sont intégrées à l'intérieur de la station de base. Le module d'antenne se trouve généralement à proximité (quelques mètres) du module radio comme représenté sur la figure 20. Les câbles coaxiaux utilisés pour relier les BS entre eux présentent des pertes élevées. Cette architecture a été populaire pour le déploiement des réseaux mobiles 1G et 2G. [21]

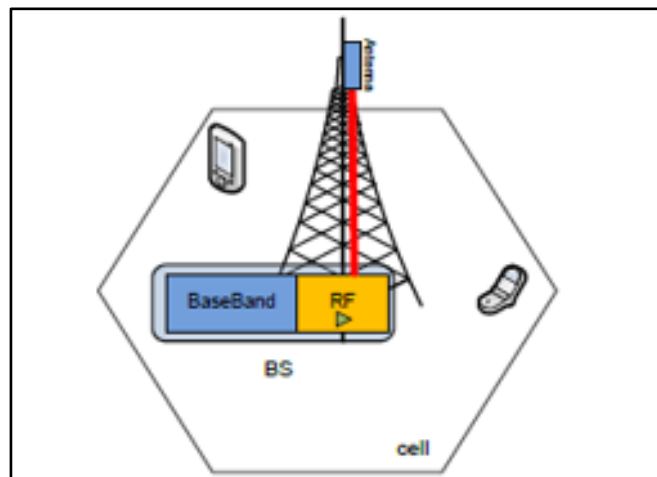


Figure 20: Station de base traditionnelle

2. Dans une architecture avec tête radio distante RRH (Remote Radio Head), la station de base est divisée en une unité radio appelée RU (Remote Unit) ou RRH et une unité de traitement de signal bande de base appelée DU (Digital Unit) ou BBU (Base Band Unit), comme représenté sur la figure 21. Le lien entre les deux est en fibre optique. [21]

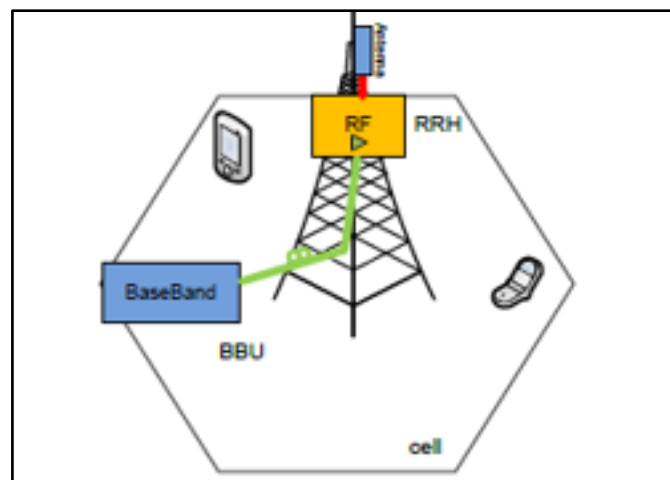


Figure 21: Station de base avec RRH

3. En C-RAN, afin d'optimiser l'utilisation des BBU fortement et faiblement chargés, les BBU sont centralisés en une seule entité appelée un pool BBU. [21]

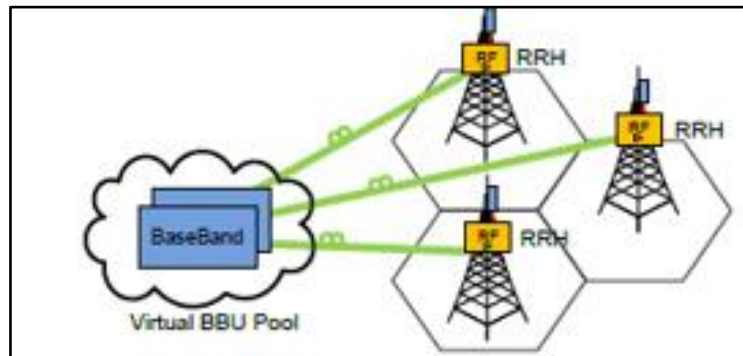


Figure 22: C-RAN avec des RRHs

III-3-2-Les types de centralisation

Selon les différents fractionnements de fonctions bande de base entre BBU et RRH, il existe deux types de solutions Cloud-RAN : [22]

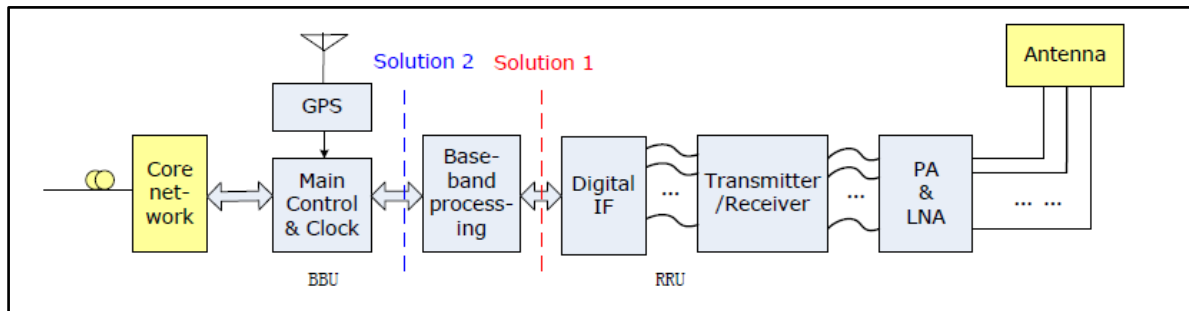


Figure 23: les deux solutions Cloud-RAN

- **Solution 1 : Centralisation Complète**

Dans l'architecture C-RAN "Complètement Centralisée", Les fonctions bande de base du BTS à savoir la couche 1, la couche 2 et la couche 3 sont intégrées dans BBU.

Elle facilite la mise à niveau et l'expansion de la capacité du réseau. Elle a également une meilleure capacité pour supporter le fonctionnement multistandard et le maximum de partage des ressources ainsi elle est plus commode pour supporter le traitement de signal collaboratif de plusieurs cellules. [22]

Son inconvénient majeur est l'exigence d'une bande passante élevée entre le RRH et le pool BBU. Dans le cas extrême, une antenne 8 TD-LTE avec une bande passante de 20MHz aura besoin d'un taux de transmission de 10Gpbs.

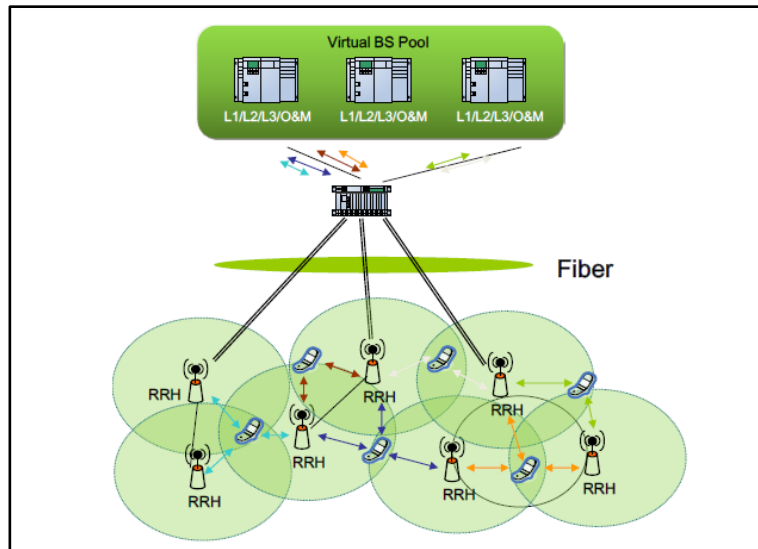


Figure 24: Architecture C-RAN complètement centralisé

- **Solution 2 : Centralisation partielle**

Dans cette solution, le RRH intègre non seulement la fonction radio, mais aussi la fonction de bande de base, tandis que toutes les autres fonctions des couches supérieures sont toujours situées dans le pool BBU. Dans ce cas, même si le BBU n'inclue pas la fonction de bande de base, il est toujours appelé BBU pour la simplicité. [22]

L'avantage de cette architecture est la nécessité d'une bande passante de transmission beaucoup plus faible entre le BBU et RRH.

Cependant, elle a aussi ses propres insuffisances. Elle est moins souple dans la mise à niveau, et moins pratique pour le traitement de signal collaboratif pour plusieurs cellules.

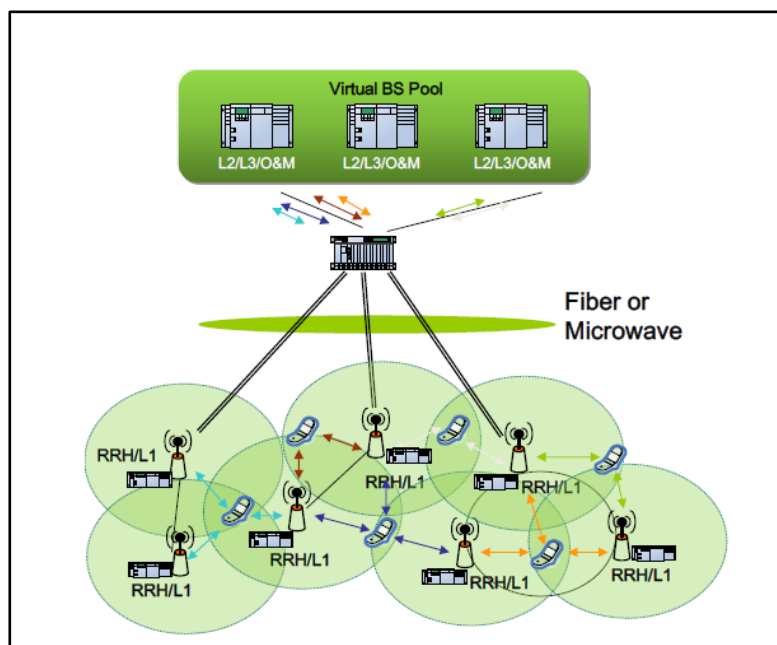


Figure 25: Architecture C-RAN partiellement centralisé

III-3-3-Les différents parties dans l'architecture C-RAN

Comme tout autre réseau mobile, l'architecture Cloud RAN est divisée en deux parties, une partie Fronthaul et une partie Backhaul (voir figure 26) :

1. La partie Fronthaul du réseau : Cette partie est composée de :

○ **RRH (Remote Radio Head)**

Le RRH (Remote Radio Head ou tête radio distante) est un réseau d'antennes intelligentes et des circuits RF placés ensemble afin de réduire les pertes de câble. Il gère également la conversion entre les données numériques et les données modulées, le filtrage de fréquence, l'amplification de puissance et transmet les signaux vers le mobile adéquat.

Le RRH est déployé dans les sites cellulaires et souvent installé sur des poteaux ou des toits des bâtiments avec seulement une batterie de faible consommation d'énergie afin d'optimiser le coût de construction.

○ **D-Rof (Digital Radio Over Fiber)**

Il représente le réseau de transport optique à large bande et à faible latence qui relie le pool BBU aux RRHs. Il coexiste plusieurs interfaces propres à ce réseau telles que CPRI (Common Public Radio Interface), Open Base Station Architecture Initiative (OBSAI) et Open Radio equipment Interface (ORI).

L'interface souvent utilisée pour joindre le pool BBU au RRHs est la CPRI. Elle prend en charge la version numérique du signal bande de base analogique. En d'autres termes, le signal bande de base complexe est échantillonné, puis quantifié et transmis dans une structure de trame spécifique. Ce flux doit être transmis avec une faible latence, une faible gigue et une contrainte de synchronisation.

La capacité requise du CPRI est de l'ordre de 10 Gbps, avec des distances allant jusqu'à 40 km entre le RRH et BBU.

Un certain nombre d'options de transport CPRI sont valables pour la nouvelle architecture C-RAN. En fonction de la latence, la gigue, le coût et la distance, le mode approprié de transport est défini. Les options disponibles sont : [23]

• **La fibre dédiée**

Elle peut être une option intéressante pour les scénarios impliquant la disponibilité d'une grande base des fibres installées. Le coût du déploiement des nouvelles fibres limite l'applicabilité de cette option.

• **Open Transport Network (OTN)**

L'OTN apporte des méthodes bien connues de la correction d'erreur et peut augmenter la portée des réseaux optiques métropolitains. L'utilisation de l'OTN pour le transport CPRI exige des considérations de prudence comme la latence élevée dans le système.

• **Réseau optique passif (PON)**

Le PON est une option potentiellement intéressante pour le transport CPRI dans les zones à fort trafic où le déploiement des petites cellules (Small-Cell) est plus susceptible de se produire. En raison de la nécessité de mettre des dispositifs de séparation optiques pour séparer et collecter des signaux optiques, le PON est vulnérable à la latence supplémentaire et la perte de puissance, ce qui réduit encore le rayon de la cellule et affecte de façon directe la couverture du réseau et rend difficile l'isolement des pannes.

• **Faisceaux hertziens (FH)**

Pour les courtes distances (1 km ou moins), le transport FH est vu comme une option possible. La distance est limitée à cause des interférences et les exigences de la bande passante et de la visibilité directe.

• **CPRI over Ethernet (CoE)**

L'utilisation d'une telle option n'est pas souhaitable car elle s'avère très coûteuse pour ce genre de transport. Dans ce type de lien, les données ne sont pas envoyées en continu, mais en discret comme dans une trame Ethernet 802.3.

Pour répondre aux exigences de latence et de la gigue, le CoE exige parfois des liens Ethernet dédiés entre les extrémités, aussi des capacités de surveillance Ethernet intégrées pour maintenir ces exigences strictes qui ne sont pas incorporées dans la norme CPRI.

- **Wavelength-division multiplexing (WDM)**

WDM représente une bonne option grâce aux offres liées à ces caractéristiques pour ce type de transport. En particulier, le CWDM (Coarse Wavelength-Division Multiplexing) prend en charge les délais de propagation faibles et le débit élevé des données, tout en étant un choix économique.

2. **La partie Backhaul du réseau** : c'est la partie située entre le Fronthaul et le réseau cœur Ip/Mpls (EPC), elle est composée essentiellement de :

- **Le Pool BBU**

Un pool BBU (une pile BBU) est un cluster virtuel composé de processeurs programmables de hautes performances apte à la technologie de virtualisation en temps réel tel que le processeur GPP (general purpose processors).

Le pool est partagé entre plusieurs RRH distants placés sur les sites cellulaires afin de les gérer et les contrôler. L'interface X2 (souvent désigné par X2+) organise la communication inter-cluster (inter-pool). Il est responsable des principales fonctions de traitement bande de base telle que : le codage, la modulation...

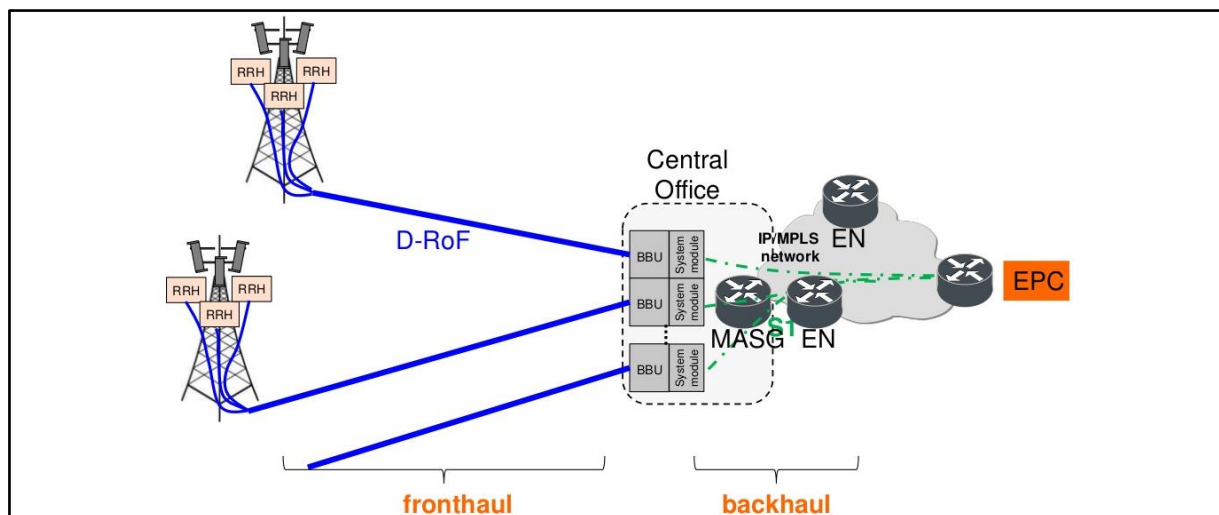


Figure 26: L'architecture Cloud RAN [24]

L'architecture Cloud-RAN permet ainsi aux opérateurs une grande souplesse et rapidité dans le déploiement de leur réseau.

Pour étendre la couverture ou améliorer la capacité du réseau, l'opérateur n'a qu'à installer des nouveaux RRH et les connecter au pool BBU.

Si la charge du réseau se développe, l'opérateur n'a besoin que de mettre à niveau le pool BBU pour accueillir le traitement de la capacité accrue.

En faisant de la RRH une unité active capable de convertir de l'analogique au numérique, les opérateurs peuvent désormais placer de nombreux BBU en un point géographique unique tout en distribuant les têtes Radio à distance (RRU) en fonction des plans de la fréquence radio (RF) (planification).

III-4-Structure logique du Cloud RAN

Le concept de C-RAN est basé sur une architecture orientée services ce qui permet une gestion de contenu des services Cloud. L'objectif est de servir les terminaux et les opérateurs avec une meilleure performance du réseau. La structure logique proposée est illustrée sur la figure 27, qui se compose de trois plans : physique, contrôle et service. [25]

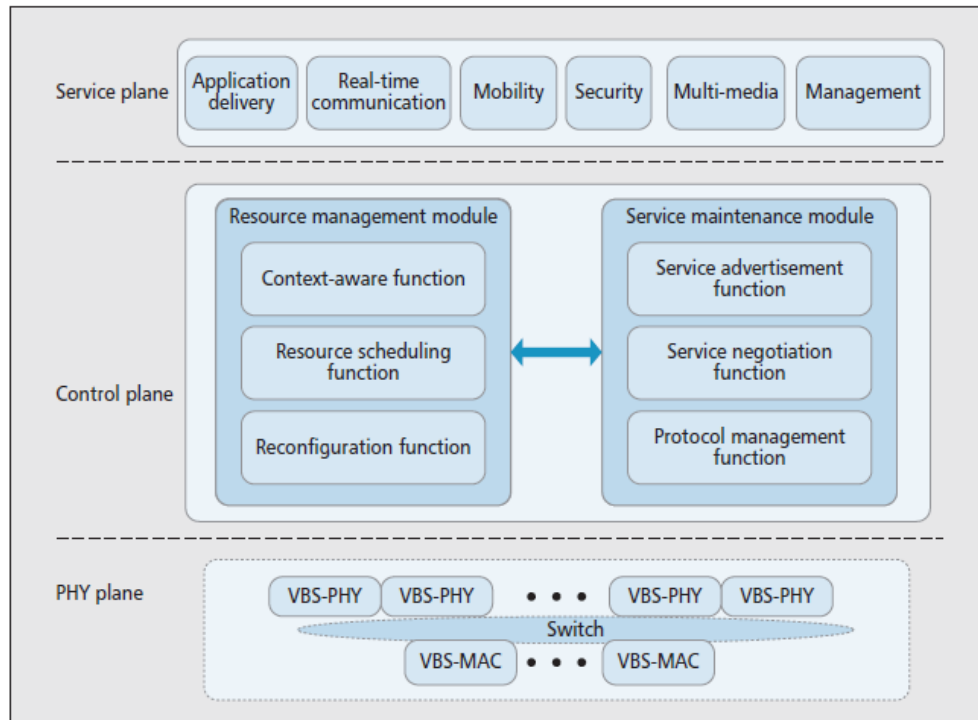


Figure 27: Structure logique du Cloud RAN

III-4-1-Le plan physique

Basé sur les derniers développements du cloud computing et des techniques SDR (Software Defined Radio), le C-RAN est capable d'utiliser des processeurs d'utilisation universelle GPPs (general-purpose processors) avec des techniques multi cœurs et multithread pour mettre en œuvre une bande de base virtualisée et centralisée en plus des protocoles de traitement, telles que la couche physique et la couche MAC (medium access control).

Afin de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer la capacité de traitement, des accélérateurs matériels sont utilisés pour des tâches de calcul intensif dans le C-RAN comme les turbo décodeurs, FFT (Fast Fourier Transform), et décodeurs MIMO. [25]

Le plan physique traite principalement les trois tâches suivantes :

- **Virtualisation pour le Provisionnement des ressources**

Dans le pool-BS virtuel, chaque BS peut être desservie par plusieurs nœuds GPP (general-purpose processors) et plusieurs accélérateurs. La couche physique et MAC d'une même BS peuvent fonctionner sur différents nœuds GPP.

- **L'interconnexion du pool-bande de base**

Afin de faciliter la planification dynamique des ressources de calcul et des accélérateurs pour les stations de base virtuelles, certains schémas de la topologie sont nécessaires pour l'interconnexion

entre les processeurs du même BS et les BS du même rack ainsi entre les différents racks. Les interconnexions sont censées d'être avec une bande passante élevée, une faible latence et un faible coût.

- **Traitement de signal**

La totalité du RAN est censée être mis en œuvre dans un centre de données (Data center), qui est principalement composé par des GPP et des accélérateurs. Après avoir reçu les signaux venus du réseau de transmission optique OTN (Optical Transport Network), les GPP et les accélérateurs de coordonnées ont pour objectif d'effectuer des tâches de traitement du signal telles que le décodage du canal, le démultiplexage et transformée de Fourier rapide (FFT).

III-4-2-Le plan de contrôle

Ce plan met en œuvre des fonctionnalités basées sur le plan physique sous-jacent, et soutient le plan de service. Ce plan contient principalement le module de gestion de ressources RMM (resource management module) et le module de maintenance des services SMM (service maintenance module).[25]

- a. **Module de gestion de ressources (RMM)**

Ce module prend en charge les ressources radio disponibles et les ressources de calcul coté réseau et coté de terminal mobile pour réaliser une meilleure qualité de service, une mobilité transparente et l'efficacité de l'utilisation d'énergie.

Il est composé de ces trois fonctions :

- La fonction Context-Aware
- La fonction de planification des ressources RSF
- La fonction de reconfiguration RF

- b. **Module de maintenance des services (SMM)**

Ce module prend en charge les services disponibles au niveau du réseau, ainsi que la négociation et la réalisation des services entre les fournisseurs de réseaux et les consommateurs finaux. Il est composé de trois fonctions :

- Fonction de service de diffusion
- Fonction de service de négociation
- Fonction de protocole de gestion

III-4-3-Le plan de service

Ce plan représente une plate-forme où les services fixes et mobiles sont fournis et gérés par les acteurs des télécommunications et TIC. Les abonnés obtiennent les services à partir du cloud comme si elle est une boîte noire, tandis que chaque service peut être pris en charge par plusieurs RAT (radio access technology) simultanément. Ce plan comprend une bibliothèque évolutive de services basés sur le réseau pour fournir des services voix, données et applications multimédias d'une manière cohérente, robuste et efficace. [25]

Il existe plusieurs services dont on peut citer :

- Service de livraison des applications
- Service de communication
- Service de la mobilité
- Service Multimédia
- Service de gestion
- Service de sécurité

III-5-Les méthodes d'accès dans le C-RAN

L'architecture de C-RAN permet d'installer un grand nombre des têtes radio distantes RRH dans une zone géographique étroite. Pour cela elle doit utiliser des méthodes d'accès très sophistiqué afin d'accueillir le nombre accru des utilisateurs de données mobile tout en évitant les interférences entre les sites cellulaires.

III-5-1-La TD-SCDMA

La TD-SCDMA (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access) est une technique de transmission pour la téléphonie mobile, dite de troisième génération (3G), développée par la Chine. Elle avait pour but de concurrencer les normes déjà bien installées dans le monde de la téléphonie mobile telles que la WCDMA ou la CDMA 2000 et d'éviter les dépendances aux technologies occidentales. [26]

L'un des éléments clés du TD-SCDMA est le fait qu'elle utilise un TDD, cela lui permet d'équilibrer l'échange entre les liaisons montantes et descendantes pour tenir compte des différents niveaux de transfert de données. Il présente également des avantages en termes d'utilisation du spectre non apparié, l'efficacité du spectre pour certaines charges, et elle ne nécessite pas de duplexeurs coûteux dans les mobiles pour permettre une transmission simultanée sur la liaison montante et descendante.

La TD-SCDMA est capable de supporter des services IP, et elle a été conçue pour intégrer de nouvelles technologies telles que la détection conjointe, des antennes adaptatives, et l'allocation dynamique de canal.

Comme avantage supplémentaire, la TD-SCDMA utilise le même RAN que celui utilisé pour l'UMTS. De cette façon, il est possible de faire fonctionner TD-SCDMA aux côtés de l'UMTS, et ainsi simplifier les conceptions multi-système.

III-5-2-La TD-LTE

Long Term Evolution Time-Division Duplex (LTE-TDD), aussi appelé Time-Division à Long Terme Evolution (TD-LTE), est l'une des technologies utilisée dans la 4G pour la transmission des données mobiles. Elle permet d'utiliser la même fréquence dans le sens montant et descendant de la communication (UL et DL) en alternance temporelle entre les deux. [27]

La TD-LTE utilise la bande 1850 MHz à 3800 MHz, l'accès à cette bande est facile et moins cher, mais peut engendrer une interférence cellulaire due aux utilisations de la même fréquence dans les deux sens de communication ce qui rend difficile le déploiement de cette technologie malgré ces nombreux avantages.

L'arrivée du C-RAN qui comporte des techniques de gestion efficace des interférences tel que CoMP nous a permis de bénéficier des avantages du TD-LTE pour augmenter la capacité du réseau.

III-6-Les aspects implémenté dans l'architecture Cloud RAN

L'architecture du C-RAN permet l'utilisation des techniques NFV (Network Function Virtualization) et des capacités de traitement des centres de données (Data center) telles que la coordination, la centralisation et la virtualisation dans les réseaux mobiles. Cela a permis la mise en commun des ressources, l'évolutivité (extension plus souple de la capacité du matériel), la couche interfonctionnement (couplage serré entre la couche d'application et le RAN) et une meilleure efficacité spectrale. [28]

III-6-1-Virtualisation dans le C-RAN

Les termes de virtualisation et de cloud sont souvent utilisés de manière interchangeable. Ils fonctionnent bien ensemble dans de nombreux cas, y compris dans un contexte de RAN. Cependant, chaque concept apporte des choses différentes à la table.

En général, la virtualisation du réseau d'accès RAN impose un grand nombre des exigences de synchronisation qui assurent l'exécution des protocoles d'accès radio en quelques microsecondes, et dans certains cas, en quelques nanosecondes. Ainsi, la fonctionnalité du RAN n'est pas facilement hébergée par un modèle virtualisé PaaS (platform as a service), comme cela est possible avec des applications simples et les fonctions de type serveur.

D'autre part, il n'est plus besoin de virtualiser toutes les fonctionnalités du RAN pour fournir les avantages du Cloud RAN. La virtualisation comme technique d'exécution de l'environnement peut être utilisée pour assurer l'isolation, l'évolutivité et l'élasticité, ainsi que pour la couche de protocole RRC (Radio Resource Control). Lorsqu'elle est appliquée de cette manière, la virtualisation peut être utilisée pour simplifier la gestion et le déploiement des nœuds radio. [28]

III-6-2-Centralisation dans le C-RAN

La centralisation du traitement des stations de bases avec le C-RAN simplifie la gestion du réseau et permet la mise en commun (pooling) et une meilleure coordination des ressources radio.

Le Pooling, ou le multiplexage statistique, offre une plate-forme d'exécution pour effectuer les mêmes tâches avec moins de matériels et de capacité. Ceci est le plus grand intérêt pour des tâches qui nécessitent un grand nombre de ressources de calcul. Cela signifie également que la configuration la plus souhaitée du pooling est une approche en bande de base entièrement centralisée avec une connexion en étoile CPRI entre la bande de base mis en commun et les têtes radio distantes (RRH) distribuées. Ceci est parce que le traitement effectué au niveau des couches inférieures constitue une grande partie de l'effort de calcul. [28]

III-6-3-Coordination dans le C-RAN

La coordination radio entre les cellules et les bandes est utilisée pour maximiser l'efficacité spectrale et l'expérience de l'utilisateur. Il est prévu qu'il y aura un besoin de différentes largeurs de bandes de cellules dans différentes bandes, ainsi que le déploiement des réseaux de plus en plus hétérogènes, ce qui fera un interfonctionnement plus étroit entre les technologies et les couches cellulaires pour assurer une expérience transparente aux utilisateurs.

La coordination centralisée permet de simplifier et d'optimiser les performances du réseau, y compris handover, agrégation de porteuses et la gestion des interférences. [28]

III-7-Core Network

Le réseau cœur du C-RAN va être totalement différent des autres backbone des autres architecture réseau car le réseau d'accès a connu un changement radical vu la naissance d'une nouvelle entité qui n'existait pas avant (le pool BBU)

Des recherches sont en cours en ce moment pour définir une architecture bien spécifique et surtout qui permet de répondre le plus possible aux exigences du C-RAN. Certain architecture ont été proposé dans ce contexte mais ça reste des propositions et non pas une architecture standardisée tel que :

- Backbone basé sur le modèle SDN : le Software-Defined Networking ajoute un niveau d'abstraction aux fonctionnalités des équipements réseau (commutateurs, routeurs,...) afin de pouvoir les gérer de façon globale.
- Le backbone sera introduit directement dans le réseau Internet.
- Le réseau cœur se basera aussi sur les principes de la virtualisation et la centralisation et aura une architecture en Cloud.
- Gardé le même backbone IP/MPLS de la 4G pour un premier temps.

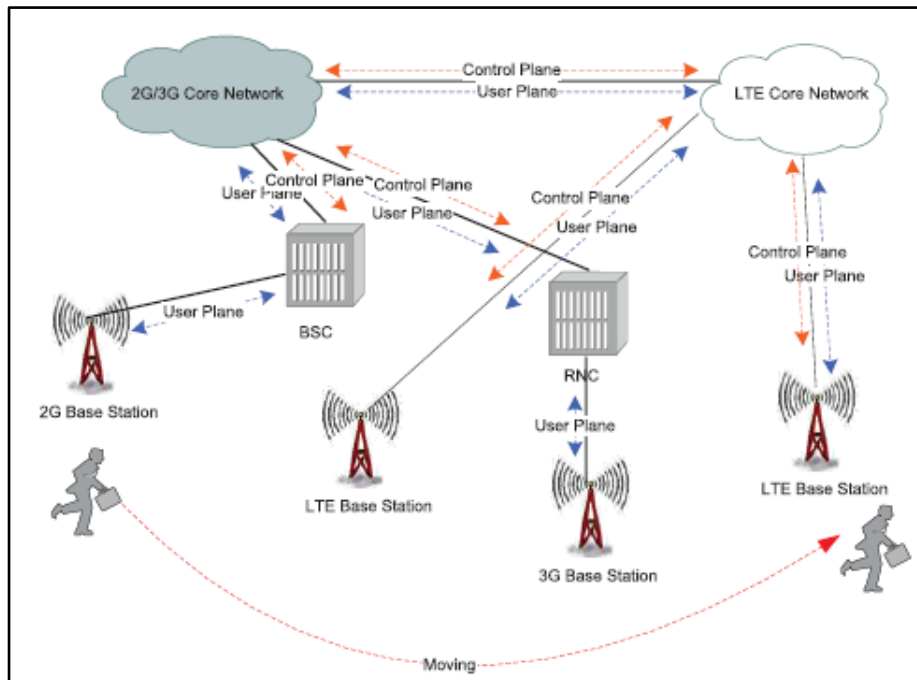


Figure 28: les réseaux cœur sans l'utilisation du C-RAN [29]

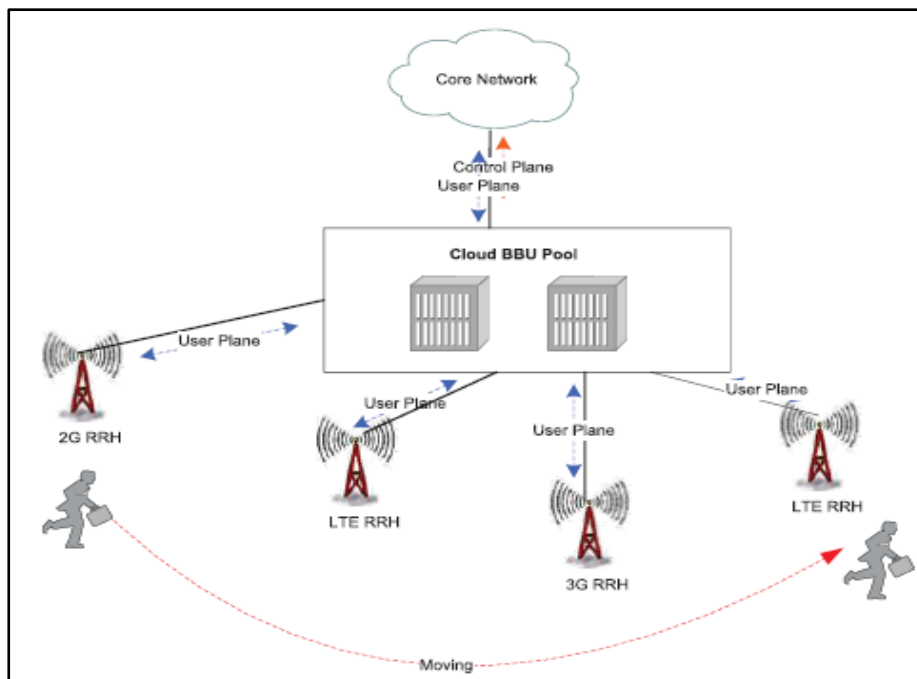


Figure 29: le réseau cœur avec l'utilisation du C-RAN [29]

III-8-Les avantages de l'architecture C-RAN pour les opérateurs de réseau

- **Une faible consommation d'énergie**

Etant donné que dans le C-RAN les stations de base sont centralisées dans un lieu commun, le nombre de sites de cellules peut être réduit par un facteur de 10. Ainsi, la climatisation et d'autres équipements consommateurs d'électricité sur le site peuvent être considérablement réduits.

- **Économie de coût**

Etant donné que dans le C-RAN tous les BBUs et les équipements d'assistance d'une grande région sont co-localisés dans un centre de données (data center) commun, il est beaucoup plus facile et rentable pour la gestion centralisée, l'exploitation et la maintenance par rapport au RAN traditionnel.

Les fonctionnalités des RRH dans l'architecture C-RAN sont beaucoup plus simples, ce qui réduit à la fois leur taille et leur consommation d'énergie de sorte qu'ils peuvent être installés sur les toits des bâtiments avec un minimum de gestion. En outre, les RRH ont besoin seulement de l'installation des systèmes d'antenne et une alimentation auxiliaire. Les opérateurs peuvent obtenir de grandes économies sur la location du site, l'exploitation et la maintenance, entraînant une baisse des OPEX (*operational expenditure*) (-50%) et *capital expenditure*) (-15%).

- **L'amélioration de la capacité et l'efficacité spectrale**

Avec l'intégration de BS dans un pool BBU centralisé, les BBUs du même pool peuvent communiquer entre eux avec des vitesses de l'ordre de Gbps et des faibles latences. Les communications à haut débit entre les stations de base peut apporter un plus pour prendre des décisions optimales et d'exploiter pleinement le potentiel des techniques de coopération afin d'améliorer la capacité et l'efficacité spectrale pour cela la technologie Cooperative Multipoint Processing (CoMP dans LTE-Advanced), peut facilement être mise en œuvre au sein de l'infrastructure C-RAN.

- **Adaptabilité aux trafics non uniforme**

L'architecture C-RAN peut gérer efficacement le trafic de données non uniforme en raison de la capacité d'équilibrage de charge dans le pool BBU distribué. A titre d'exemple, en raison de la mobilité des utilisateurs, le RRH serveur peut changer dynamiquement, tandis que le BBU serveur est toujours dans le même pool BBU.

- **Le déchargement intelligent du trafic internet**

Agrégation des fonctionnalités de bande de base en C-RAN fournit maintenant un port central pour le déchargement de la circulation et de gestion de contenu pour gérer la croissance du trafic Internet à partir des smartphones et autres appareils portables. Ceci réduit le trafic Backhaul et le trafic du cœur de réseau ainsi que la latence et la gigue, toute a conduit vers une meilleure qualité pour utilisateur.

- **L'extensibilité du réseau**

L'opérateur doit installer seulement des nouveaux RRHs et les connecter au pool-BBU pour étendre la couverture du réseau ou diviser la cellule pour améliorer la capacité. Donc si la charge du réseau augmente, l'opérateur n'a besoins que de mettre à niveau le pool-BBU pour accueillir la capacité accrue de traitement.

En plus afin d'ajouter des nouvelles normes, ils n'ont pas besoin de remplacer l'équipement. À l'inverse, il suffirait ajouter un nouveau BBU dans la plate-forme.

III-9-Les défis techniques du C-RAN

Le C-RAN apporte beaucoup d'avantages comme le coût, la capacité et la flexibilité par rapport au RAN traditionnelle, cependant, il a aussi quelques défis techniques qui doivent être résolus avant le déploiement par les opérateurs mobiles.

- **Radio via le réseau optique à faible coût**

Dans l'architecture C-RAN, la fibre optique entre le pool BBU et le RRH doit transporter une grande quantité de données bande de base échantillonnées en temps réel. En raison de l'exigence de large bande des systèmes LTE / LTE-A et la technologie multi-antenne, la bande passante nécessaire au transport est de niveau 10 gigabit avec des exigences strictes de la latence.

- **La Coopération avancée de la Transmission / Réception**

Le traitement conjoint est la clé pour obtenir une plus grande efficacité spectrale du système. Pour atténuer les interférences du système cellulaire, des algorithmes de traitement multipoint qui peuvent utiliser des informations spéciales du canal et exploitent la coopération entre les multiples antennes à différents sites physiques devrait être développé. Une planification conjointe des ressources radio est également nécessaire pour réduire les interférences et augmenter la capacité.

Pour supporter des algorithmes de traitement commun de la coopération multipoint, les données de l'utilisateur final et de l'information du canal UL / DL doivent être partagées entre les stations de base virtuelle.

L'interface entre les stations de base virtuelles qui doit porter cette information devrait supporter une bande passante élevée et une faible latence pour assurer le traitement coopératif en temps réel. Les informations échangées dans cette interface comprend un ou plusieurs des types suivants :

- Le paquet de données de l'utilisateur final.
- Les informations de rétroaction (feedback) du canal UE
- L'information de planification des BS virtuelles.

- **L'interconnexion du pool BBU (bande de base)**

L'architecture C-RAN centralisée à un grand nombre de BBU dans un seul emplacement physique, donc sa sécurité est cruciale pour l'ensemble du réseau.

Pour obtenir une grande fiabilité en cas de défaillance de l'unité et pour permettre une allocation flexible des ressources de BBU, il doit y avoir une bande passante élevée, une faible latence, une faible gigue, un réseau de commutation flexible et extensible qui interconnecte le BBU dans le pool.

Grâce à ce réseau de commutation, le signal numérique en bande de base de n'importe quel RRH peut être acheminé vers n'importe quel BBU dans le pool pour le traitement. Ainsi, toute défaillance individuelle du BBU n'affecter pas le fonctionnement du système.

- **Technologie de Virtualisation des stations Bases**

Après que les unités de traitement bande de base ont été mis dans un pool centralisé, il est essentiel de concevoir des technologies de virtualisation pour distribuer/regrouper les unités de traitement dans des entités BS virtuelles. D'où les défis majeurs de la virtualisation qui sont :

- La mise en œuvre des algorithmes de traitement en temps réel.
- La virtualisation du pool de traitement bande de base.
- l'allocation dynamique des capacités de traitement pour faire face à la charge dynamique des cellules dans le système.

III-10-Conclusion

Le Cloud RAN est une solution prometteuse pour répondre aux problèmes liés à l'architecture actuelle de réseau d'accès. En utilisant cette nouvelle technologie, nous pouvons changer fondamentalement la construction et les moyens de déploiement des réseaux d'accès, afin de fournir des services plus souples et efficaces pour les utilisateurs finaux.

C- RAN sera en mesure de fournir aujourd'hui aux opérateurs de téléphonie mobile une infrastructure compétitive pour maintenir une croissance rentable dans l'environnement du marché dynamique.

Malgré ces avantages le C-RAN est face aux plusieurs défis qui doivent d'être résolus dans le futur proche afin d'atteindre une meilleure performance de cette technologie.

IV-Simulation

IV-1-Introduction

L'architecture centralisée du Cloud-RAN [22] est une solution prometteuse à de nombreux problèmes de l'architecture traditionnelle. Elle permet la réduction du CAPEX et OPEX [22] et [30], l'échange d'informations efficace pour les communications coopératives, et une grande flexibilité en raison de l'utilisation des processeurs de type (GPP) [31].

En dépit de ces avantages, le défi majeur de cette architecture centralisée est l'énorme exigence de bande passante d'agrégation pour le réseau fronthaul. Par exemple, pour une configuration cellulaire LTE de 20 MHz de bande passante et 8 antennes, une bande passante fronthaul de 10 Gbps est nécessaire dans la liaison descendante (DL) ou la liaison montante (UL) pour transporter des échantillons de bande de base. La demande pour la bande passante du fronthaul serait plus élevée avec encore une plus grande bande passante sans fil et d'autres antennes.

En dépit de ces avantages, le défi majeur de cette architecture centralisée est l'énorme exigence de bande passante d'agrégation pour le réseau fronthaul. Par exemple, pour une configuration cellulaire LTE de 20 MHz de bande passante et 8 antennes, une bande passante fronthaul de 10 Gbps est nécessaire dans la liaison descendante (DL) ou la liaison montante (UL) pour transporter des échantillons de bande de base. La demande pour la bande passante du fronthaul serait plus élevée avec encore une plus grande bande passante sans fil et d'autres antennes.

Pour faire face à ce problème, nombreux algorithmes de compression de bande de base ont été proposés. Les algorithmes de compression dans le domaine temporel [32] sont simples et rapides, mais ils fournissent des performances de compression limitées (2-3×). Il existe un autre type d'algorithmes qui peut effectuer la compression dans le domaine fréquentiel, et peut atteindre un taux de compression de (20 ×). Cependant, les méthodes du domaine fréquentiel nécessitent une grande quantité de calcul pour effectuer la FFT / IFFT qui peuvent causer des retards.

Lorca et Cucala [33] proposent une nouvelle méthode qui peut réduire considérablement la bande passante DL dans le fronthaul (30*) en déplaçant la modulation et les fonctions de traitement du pré-codage du pool BBU vers les sites distants (RRH).

Cette nouvelle méthode se base sur l'un des paramètres de la chaîne de traitement bande de base. En effet, Les fonctions de traitement bande de base DL sont conçues pour ajouter des redondances artificielles dans les signaux de communication pour lutter contre les déficiences de canaux sans fil, ainsi ces redondances sont accumulées fonction par fonction au long de la chaîne de traitement et transportées par le réseau Fronthaul.

En revanche, cette méthode n'a plus besoin de transporter les redondances introduites par la modulation et le pré codage ce qui réduit considérablement la bande passante dans le fronthaul.

Néanmoins, la méthode ci-dessus ne tient pas compte du coût de logement des fonctions bande de base supplémentaires (appelé coût de calcul) sur les sites distants.

En réalité, le coût de calcul peut devenir une contrainte majeure sur les sites distants en raison de l'augmentation de la consommation d'énergie et d'autres facteurs. En outre, certains protocoles sans fil ont des exigences très strictes en temps réel pour les tâches de traitement bande de base. Par conséquent, l'influence sur le délai de traitement doit également être envisagée.

Pour ces raisons, nous proposons dans cette simulation un fractionnement de manière flexible. Le placement des fonctions bande de base dans un réseau sera basé sur des exigences de coût et de délai de différentes applications. Mais un cadre analytique et un régime de fractionnement sont nécessaires pour décider une segmentation optimale.

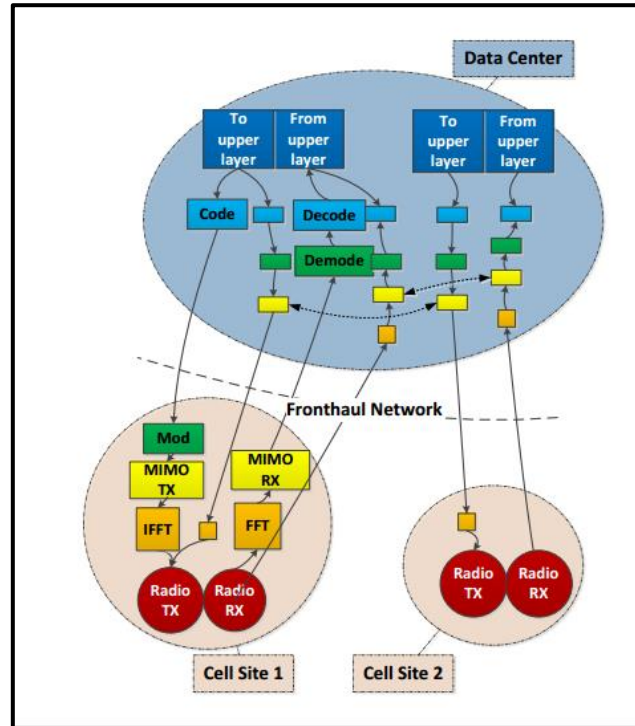


Figure 30: Fractionnement et placement flexible des fonctions bande de base [34]

Dans cet article, nous présentons un cadre à base de graphes pour la fonction de fractionnement et du placement des blocs de bande de base. Nous traduisons d'abord les structures d'émetteur-récepteur en bande de base en des graphes orientés de sorte que les problèmes de fractionnement et de placement peuvent être formulés sous forme de problèmes graph-clustering (comme illustré sur la figure 30).

Nous proposons ensuite un algorithme génétique avec la fonction de remise en forme sur mesure et un module de mutation pour le problème graph-clustering. Les résultats de simulation montrent que l'algorithme proposé peut effectivement réduire le coût fronthauling.

Notre simulation se déroulera dans un environnement de développement nommé MATLAB car il répond aux exigences de notre problème d'optimisation grâce à ses fonctions prédéfinies et de nombreux privilèges qu'il procure dans ce contexte.

IV-2-MATLAB

MATLAB « *MAT*rix *laboratory* » est un logiciel de développement développé par la société The MathWorks et qui travaille avec un langage de programmation de quatrième génération. Cette plateforme de développement est utilisée pour des calculs numériques et scientifiques. [35]

Il permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran.

Cet environnement peut s'utiliser seul ou bien avec des boîtes à outils « toolbox ». Il fonctionne sur plusieurs environnements tels que Windows, macintosh ou autres. [36]

L'interface en ligne de commande, qui est un des éléments du bureau MATLAB, permet d'exécuter des commandes simples. Les séquences de commandes peuvent être sauvegardées dans un fichier texte, typiquement avec l'éditeur MATLAB, sous la forme d'un « script » ou encapsulé dans une fonction. Il existe deux modes de fonctionnement sur MATLAB :

1. Mode interactif : Matlab exécute les instructions au fur et à mesure qu'elles sont données par l'utilisateur
2. Mode exécutif : Matlab exécute ligne par ligne un fichier.m (programme écrit par l'utilisateur en langage Matlab)

MATLAB présente certains avantages tels que :

- C'est un langage interprété (exécute les commandes ligne par ligne sans passer par une étape de compilation)
- il intègre les fonctions mathématiques élémentaires
- il fournit les méthodes numériques pour le calcul matriciel
- Procure plusieurs outils de représentation graphique en 2D ou 3D

IV-3-Modèle de simulation

Dans cette section, nous présenterons les problèmes de fractionnement des fonctions bande de base sous forme d'une base graphique. Pour une meilleure compréhension, nous évoquerons également un exemple concret pour ce type de problème.

IV-3-1-Le graphe orienté

Nous représentons une structure de traitement bande de base avec un graphe orienté $G = (N, L)$. Chaque nœud $n \in N$ représente une fonction de traitement bande de base, tels que la FFT, la modulation ou une détection MIMO. On va associer à chacun un poids en fonction de sa complexité de calcul nommé $C: N \rightarrow \mathbb{R}$. Chaque liaison dirigée $l \in L$ représente une connexion logique entre deux nœuds. Ces liens se verront attribuer un poids qui sera en fonction de la bande passante de la liaison $\omega: L \rightarrow \mathbb{R}$, ce poids indiquera la quantité d'informations échangées entre deux nœuds connectés. On note aussi que certains nœuds sont des sources (pas de liaisons entrantes) ou des puits (pas de liaisons sortantes). Chaque chemin différent $p \in P$ provenant d'une source vers un dispatcheur représente une chaîne complète des fonctions de traitement bande de base.

Ces cycles sont des caractéristiques importantes dans l'ensemble du système et ils ont une influence significative sur le choix du fractionnement et de placement des fonctions bande de base.

IV-3-2-Fonction de fractionnement et de graphe clustering

Avec cette représentation, nous pouvons exprimer la fonction de fractionnement et de placement comme des systèmes graph clustering $f: N \rightarrow \mathbb{Z}$, qui assignent les nœuds à une collection clusters. On notera que dans notre simulation, les clusters ont des significations physiques explicites. Différents clusters correspondent à des emplacements physiques différents (par exemple les têtes radio distantes RRH ou les unités de traitement bande de base BBU), ainsi les nœuds du même cluster correspondent aux fonctions de traitement bande de base placés dans le même emplacement physique. Les liens entre les clusters correspondent au flux d'informations à transporter par le réseau fronthaul.

Dans notre étude des graphs clustering, nous allons définir une paire de mesure de coût pour chercher le meilleur fractionnement et placement des fonctions bande de base. La première mesure est le coût de calcul $c_c(i; f)$, Où i est l'indice du cluster, et f est le schéma de clustring en cours d'examen.

Le coût de calcul représente le coût de la mise en œuvre des fonctions de traitement bande de base dans un emplacement physique et devrait donc être en fonction de la complexité totale du nœud à l'intérieur du cluster. En outre, puisque le coût de calcul dans le cas réel diffère souvent d'un endroit à un autre, alors les clusters sont autorisés à avoir différents profils de coûts.

La deuxième mesure est le coût fronthaul $c_f(i, j; f)$, Où i et j indiquent les indices de deux clusters, et f est le schéma de clustring en cours d'examen. Le coût de fronthaul reflète la quantité d'informations échangées entre deux clusters via le réseau fronthaul.

Le coût de calcul et le coût de fronthaul sont en contradiction dans ce cas. Ainsi, différentes schémas de clustring seront traduits par différents compromis entre les deux coûts. Et une caractérisation de ce compromis s'avère nécessaire.

Dans notre modèle, il existe une autre caractéristique importante appelé la contrainte de délais du trajet. Elle est imposée pour garantir un traitement en temps réel des signaux de communication. Nous supposons que chaque nœud sur le chemin va imposer un délai supplémentaire $d(n, p; f)$, où n est l'indice du nœud, et p est le chemin emprunté. Cette fonction de délais prend en charge les latences et la mise en mémoire tampon des traitements bande de base.

Tout schéma de clustring valide devrait donc garantir un délai total d'un chemin inférieur à un seuil prédéfini $D(p)$: $d(p; f) = \sum_{n \in p} d(n, p; f) < D(p)$.

IV-3-3-Cas d'études

La structure de traitement bande de base utilisée dans notre simulation est représentée sur la figure 31. Nous utilisons deux de ces structures pour représenter deux cellules. Cette structure est juste une simplification de la structure réelle de la couche physique bande de base qui utilisera seulement les fonctions les plus importantes des chaînes DL / UL. D'autres fonctions telles que le mappage / dé-mappage des ressources, l'estimation du canal et le brouillage sont ignorées.

Noté que les paramètres affichés dans la figure 34 tels que la complexité du nœud et poids de liaison sont des approximations des valeurs réelles.

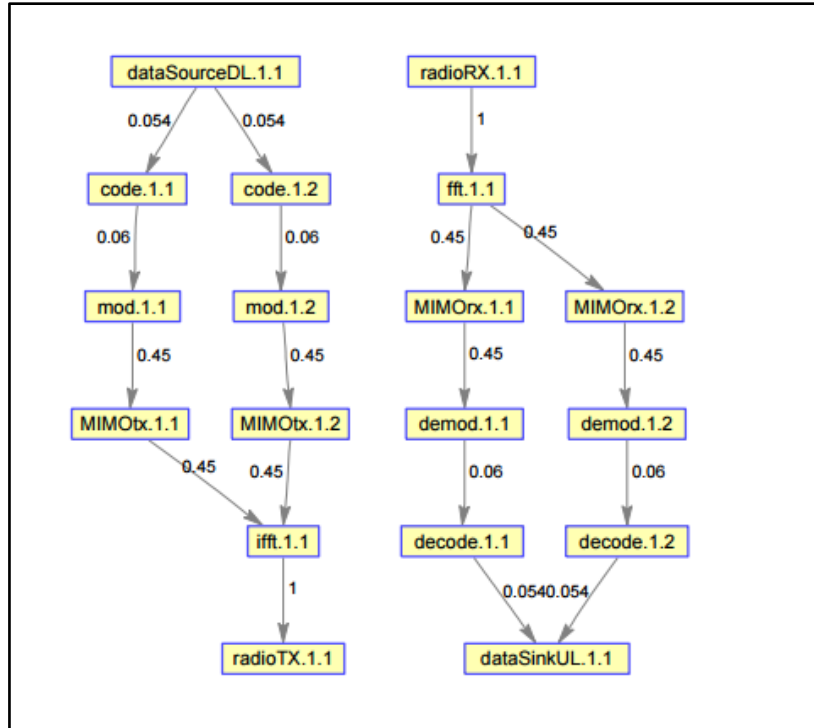


Figure 31: L'architecture de traitement en bande de base simplifié

En fonction de leurs types et des cellules auxquelles ils appartiennent, les nœuds sont étiquetés. Par exemple, le nœud mod.1.2 est un modulateur qui réside dans la deuxième DL (chaîne traitement) de la première cellule. Chaque nœud est associé d'un poids basé sur son type qui reflète sa complexité de calcul. Le poids de chaque type est indiqué dans le tableau 05. Les valeurs du poids sont issues des résultats expérimentaux dans [31].

Indice	1	2	3	4	5	6
Type	Radio TX	Radio RX	FFT	IFFT	MIMO TX	MIMO RX
Poids	0	0	1	1	0.5	0.5
Indice	7	8	9	10	11	12
Type	Mod	Demod	Code	Decode	sourceDL	sinDL
Poids	0.1	0.1	0.1	2	0	0

Tableau 5: l'indice, le type et les poids des nœuds

Les poids des liaisons représentés sur la figure 31 reflètent donc le flux d'informations échangés entre les nœuds de traitement. Par exemple, chaque nœud MIMOrx reçoit une liaison à partir du nœud FFT avec un poids de 0,45 car on suppose que l'en-tête de préfixe cyclique est de 10%.

Nous remarquons aussi que le poids de la liaison a fortement augmenté/réduit après la modulation/démodulation car on utilise une modulation 16-QAM où chaque 30 bit d'échantillon bande de base est transformé en un code d'une constellation de 4 bits.

Nous exprimons les fonctions des deux coûts sous forme exponentielles comme il est indiqué dans le tableau 6 et le tableau 7.

RRH	Pool BBU
$2^{\sum_{f(n)=i} C(i)}$	0

Tableau 6: la fonction du calcul de coût

Clusters	Le coût
A l'intérieur du RRH	0
A l'intérieur de pool BBU	0
Entre deux RRH i et j	$4^{\sum_{f(l)=(i,j)} \omega(l)}$
Entre RRH et pool BBU	$2^{\sum_{f(l)=(i,j)} \omega(l)}$

Tableau 7: la fonction du calcul de fronthaul

RRH	BBU
$\sum_{n \in p} (C(n) \sum_{f(\omega)=f(n)} C(n))$	0

Tableau 8: la fonction de délai

Dans le tableau 6, le coût de calcul à l'intérieur du pool BBU est nul car que le déploiement des ressources informatiques dans le pool-BBU est moins coûteux. Le coût de fronthaul au sein des RRH est nul car l'échange d'informations internes n'a pas besoin d'utiliser le réseau fronthaul.

Le coût de fronthaul entre les RRH est plus élevé que celui entre le RRH et le pool BBU parce que les réseaux fronthaul sont généralement optimisés pour la centralisation.

Par ailleurs, nous supposons que les tâches bande de base dans un cluster divise les ressources de calcul, ainsi le délai d'une fonction de traitement peut être représenté par le produit du poids correspondant au nœud et le poids total des nœuds dans un cluster (tableau 8).

IV-3-4-L'algorithme d'optimisation (GA)

Le schéma de clustering peut également être représenté par un vecteur d'une valeur discrète $f \in \mathbb{Z}^s$, où s est le nombre total de fonctions de traitement bande de base. Avec cette représentation, les fonctions de coût sont paramétrées par f et les problèmes de graph clustering sont transformés en un problème d'optimisation combinatoire de 2-objectif :

$$\min_f \left(\sum_i c_c(i; f), \sum_i \sum_j c_f(i, j; f) \right) \text{ tel que } d(p; f) = \sum_{n \in p} d(n, p; f) < D(p) \cdots (1)$$

Il est difficile de donner une solution analytique générale à un tel problème. Donc, nous nous tournons vers l'algorithme génétique (GA) pour trouver des solutions sous-optimales.

L'algorithme génétique est constitué de trois blocs : la sélection, le croisement et la mutation. Son traitement est basé sur une boucle itérative afin de converger vers une solution optimale.

L'adaptation et la personnalisation du GA pour notre problème est décrits ci-dessus :

IV-3-4-1-L'encodage et les nœuds de semences

Le problème clé de GA est comment représenter des solutions comme une combinaison de gènes (chromosome). Ce processus est également appelé l'encodage. Un meilleur encodage devrait rendre

facile à reproduire des descendants légitimes par le croisement et la mutation. Dans notre simulation nous utilisons directement le vecteur de clustering f pour l'encodage. On garde certains nœuds fixes dans un cluster pour tenir compte du fait que certaines fonctions peuvent être seulement placées à des endroits précis. Ci-après nous nous référons à ces nœuds comme «nœuds de semence». Nous les nommons de cette manière parce que l'ensemble du schéma de clustering est généré sur la base des affectations initiales des nœuds de semences.

IV-3-4-2-La fonction de remise en forme

Nous devons savoir comment évaluer les solutions avec une fonction de remise en forme. Ce problème est compliqué parce qu'on a deux objectifs d'optimisation (éventuellement contradictoires).

Pour obtenir différents compromis entre les coûts, nous combinons linéairement les coûts de calcul et ce du fronthaul pour former une seule fonction de coût total sans oublier les contraintes de délai de chemin sous forme d'une fonction de pénalité.

La forme globale de la fonction de remise en forme est la suivante :

$$F(f; \alpha, \beta) = \alpha \sum_i c_c(i; f) + (1 - \alpha) \sum_i \sum_j c_f(i, j; f) + \beta \sum_p (d(p; f) - D(p))^+$$

Où $0 \leq \alpha \leq 1$ est le coefficient d'arbitrage, $\beta > 1$ est le coefficient de pénalité, et $(\cdot)^+$ Est la fonction de coupure non - négative.

IV-3-4-3-Le croisement aléatoire

La fonction de croisement qu'on va choisir est une fonction aléatoire. Cette fonction sélectionne les gènes d'une descendance de ses parents avec une probabilité égale. Avec le l'encodage, nous garantirons que les descendants de parents légitimes seront naturellement légitimes.

IV-3-4-4-la mutation

Basé sur la structure de notre problème, nous avons adaptés une fonction de mutation personnalisée appelée mutation graph based. On a définis d'abord la matrice de connexion C , ces entrées prennent des valeurs de 0 ou 1 sachant que $C(i, j) = 1$ si et seulement si les nœuds i et j sont connectés. On utilisant C , on peut définir l'ensemble des mutations utilisées comme $M(i) = \{f(j) \mid C(i, j) = 1, j \text{ est une semence}\}$ qui donne tous les clusters à qui le nœud i est actuellement connecté.

En gros, la mutation graph-based peut être décrite comme suite : nous changeons de façon aléatoire la valeur du chromosome d'un individu de la position i à une valeur sélectionnée à partir de $M(i)$. De cette façon, nous évitons des mauvaises mutations parce que placer un nœud à un cluster non connecté ne fera qu'augmenter le coût total.

Paramètres	Valeur/type
Initialisation	Initialisation aléatoire
Semences	RadioTx, RadioRx, SourceDL, SinkUL
Sélection	Sélection Rolling-wheel
Croisement	Croisement dispersive
Mutation	Mutation Graph-based (Prob. = 0.4)
Facteur de délais de pénalité	10

Tableau 9: les paramètres d'algorithme génétique

IV-4-Résultats de simulation

Dans cette section, nous allons appliquer l'algorithme génétique personnalisé et discuter des résultats de simulation. Nous utilisons les paramètres dans le cas d'études IV-3-3 dans notre simulation. Pour éviter un petit intervalle de α , Nous redimensionnons le coût de calcul et de fronthauling tout en respectant leur valeur maximale. D'autres paramètres importants de GA sont présentés dans le tableau 9. Notez que la fonction d'initialisation est également graph-based, à savoir qu'on initialise les nœuds aux clusters adéquats.

IV-4-1-Compromis entre le coût de calcul et le coût Fronthauling

Nous allons montrer comment l'algorithme proposé peut atteindre différents compromis entre le coût de calcul et le coût de fronthauling en fonction de la variation du paramètre variable α .

La figure 32 montre la moyenne (plus de N=10 simulation) des coûts de calcul et des coûts de fronthauling utilisant $\alpha \in [0.01; 0.3]$. Le compromis entre ces deux coûts peut être clairement observé quand α augmente, le coût de calcul est réduit tandis que le coût fronthauling augmente.

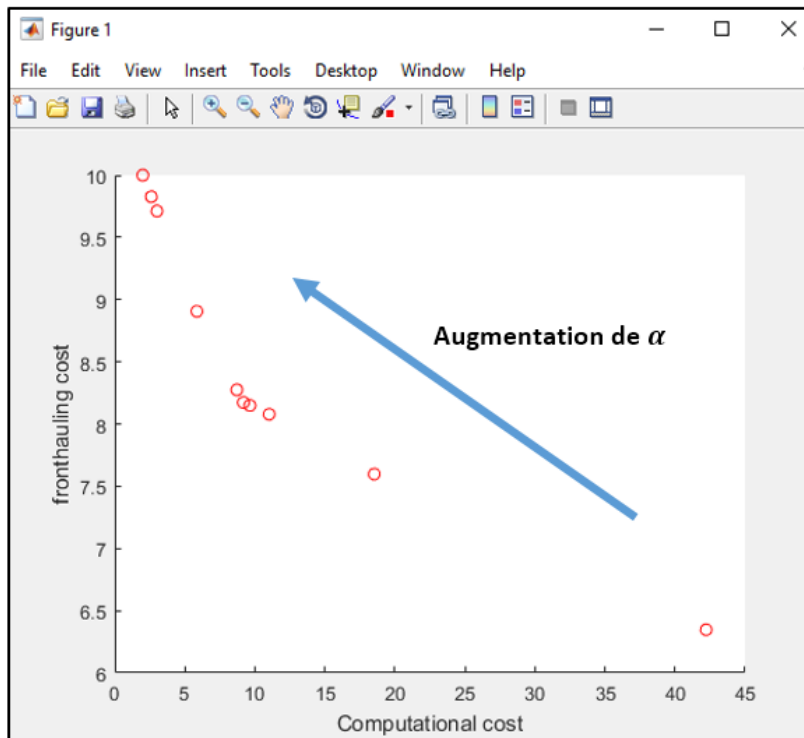


Figure 32: Compromis entre les deux coûts .

Pour comprendre comment ce compromis est possible, nous montrons les schémas de clustering correspondants dans la figure 33. L'axe « x » indique les indices des nœuds, tandis que l'axe « y » indique la probabilité pour que certain type de nœud est distribué à des sites cellulaire.

Quand α augmente (la couleur devient plus chaude), le coût de calcul global des fonctions de traitement de placées sur des sites distants augmente également. En conséquence, plus de nœuds sont centralisés dans pool BBU pour optimiser les ressources de calcul au prix de l'augmentation du coût de fronthauling.

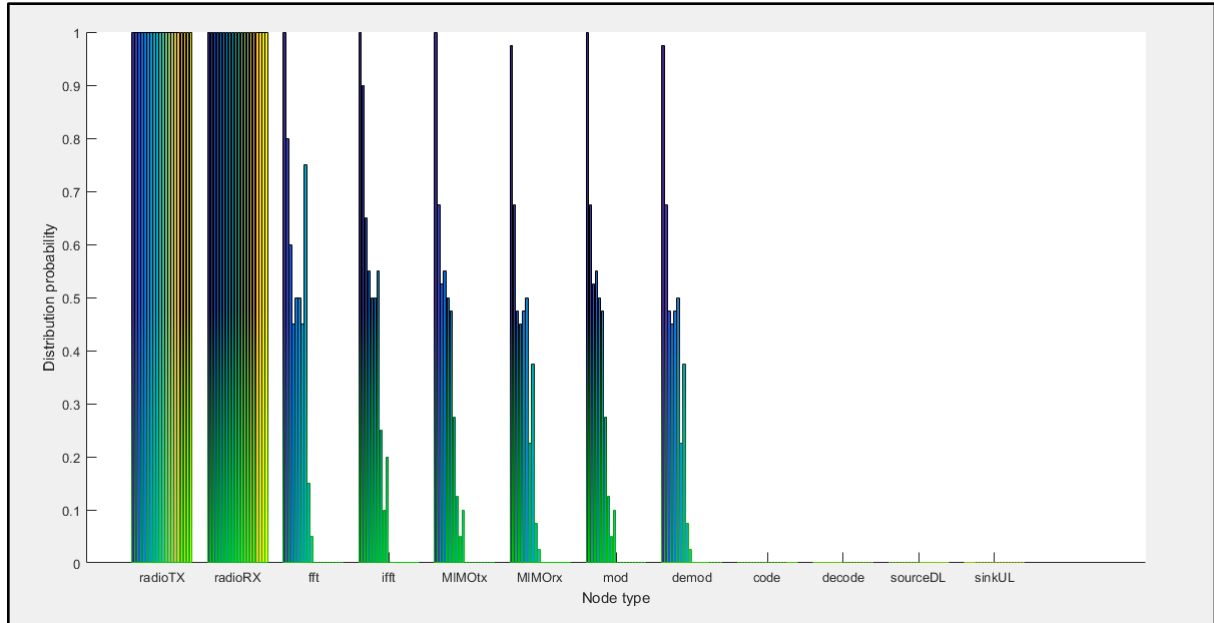


Figure 33 : Schéma clustering avec différents α et $D(p) = 30$

Notez également que, peu importe la valeur qu'elle prend α , les nœuds de codage et de décodage sont toujours centralisés. Ceci est parce que ces nœuds ont une complexité de calcul très élevée, les schémas qui les placent sur des sites distants ont une grande pénalité de retard (délai) et elle est interdite. Ce phénomène constitue une ligne directrice intuitive de centraliser les fonctions de calcul intensif.

IV-4-2-Influence des contraintes de délais

Nous étudions également l'influence de la contrainte de délais. Figure 34, nous afficherons la moyenne (plus de 10 simulations exécutées) des coûts de calcul et des coûts fronthauling sous les seuils de délai allant de 1 à 20.

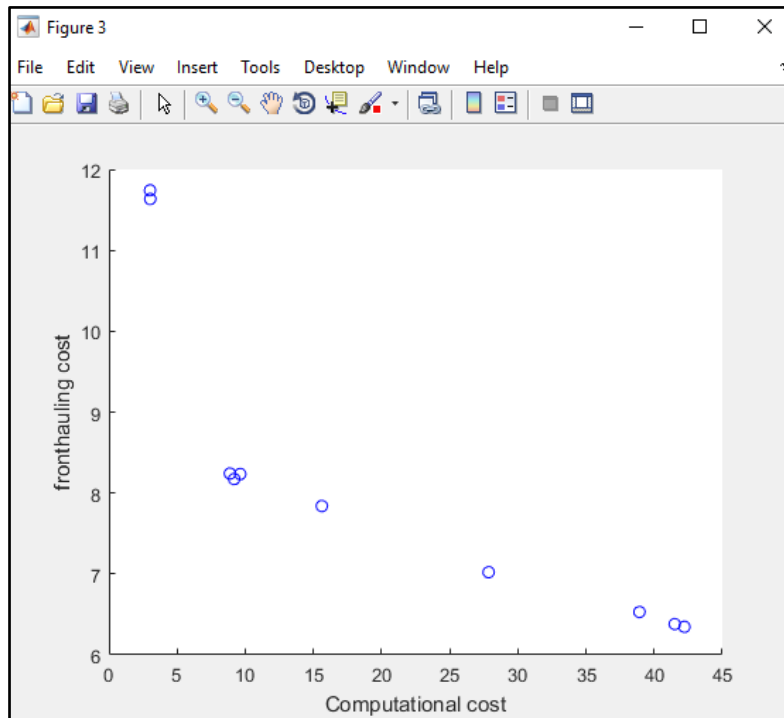


Figure 34: Compromis des deux coûts avec différents contrainte de délai, $\alpha = 0.01$

Comme on peut le remarquer sur cette figure, différents seuils de délai seront résultés par des compromis différents. Donc les schémas de clustering résultants favorisent la centralisation dans le cas où le coût fronthauling est plus élevé. En revanche, nous pouvons placer plus de fonctions sur les sites distants lorsque les limites de délais obtenus diminuent.

IV-5-Conclusion

Dans cette simulation, nous avons analysés les problèmes de fractionnement et de placement des fonctions bande de base sous l'architecture C-RAN. Nous avons exprimés les structures de traitement bande de base à l'aide d'un modèle graphique afin de transformer la stratégie de fractionnement et de placement dans les schémas de graph-clustering.

Pour résoudre les compromis rencontrés entre les coûts de calcul et fronthauling, nous avons personnalisés un algorithme génétique avec une fonction de remise en forme et un module de mutation. Les résultats de simulation montrent que nous pouvons parvenir à des compromis arbitraires de coûts en faisant varier le paramètre de l'algorithme.

L'utilisation d'un tel processus d'optimisation s'avère très important dans le cas d'une architecture centralisée en raison de ces avantages et ces méthodes employés pour ce genre d'optimisation.

Les résultats de cette simulation sont très prometteurs et peuvent influencer le déploiement du concept C-RAN car l'influence du fractionnement et du déplacement des fonctions bande de base est très cruciale pour améliorer le coût du Fronthaul qui impacte directement le débit et la surface du déploiement.

V-Conclusion Générale

Notre projet nous a permis d'étudier, de simuler et de se familiariser avec les réseaux mobiles en particulier avec le développement de la technologie des réseaux d'accès radio vers la centralisation de cette partie du réseau ou le Cloud-RAN.

Avec l'arrivée de la 5G et l'augmentation du nombre d'abonné et la popularisation des appareils connectés dans le monde pousse le réseau d'accès à dépasser ces limites et changer de dimension vers d'autre architecture afin de réduire principalement les coûts et élargie les zones de couvertures

Inspiré du Cloud Computing, cette technologie récente des cinq dernières années, le C-RAN se présente comme une alternative des RANs qui va sans doute avoir un impact de grande ampleur dans l'architecture du réseau mobile en générale et aura un impact direct sur le coût et le déploiement qui sera plus facile et par conséquent sur la facture de l'abonné final .

La distribution du RRH, la centralisation du BBU qui utilise des processeurs virtualisé, pour un rendement plus efficace, et une paire de fibre optique sont les principaux acteurs du Cloud RAN et qui peuvent faire face aux problématiques des réseaux d'accès actuels et accroître le nombre d'utilisateurs à travers le monde dans les années à venir

Différent entreprises acteurs dans le domaine des télécommunications ont misé gros sur cette nouvelle alternative ainsi on peut dire que le temps est venu de prendre au sérieux et réfléchir à l'avenir des réseaux d'accès mobiles, et c'est là toute la vocation et l'engagement du C-RAN

VI-1-Bibliographie

[4] E.TONYE et L.EWOUSSOUA, « Architecture GSM, GPRS et UMTS », Mémoire de MASTER PRO 2 en télécommunication, Spécialité : Planification et ingénierie des réseaux télécoms, Université de YAOUNDE 1 de Cameroun, 2007 (Page 9)

[14] H.BOUCHENTOUF et R.BOUDGHENE STAMBOULI, « Etude des performances des réseaux 4G (LTE) ». Mémoire de master, Département de génie électrique et électronique, Option : réseaux mobiles et services (RMS), Faculté de technologie, université Aboubaker Belkaid de Tlemcen, 2013.

[15] Juvénal CHOKOGOUE, Consultant d'analyse des affaires et les Big Data, « La virtualisation », slide publié le 10/01/2015 en France.

[21] A. Checko; H.L. Christiansen ; Y. Ying; L. Scolari; G.Kardaras; M.S. Berger et L. Dittmann, « Cloud RAN for Mobile Networks - a Technology Overview », MTI Radiocomp, Hillerød, Denmark, Article IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS

[22] K.CHEN, “C-RAN The Road Towards Green RAN, White Paper, China Mobile Research Institute”, Octobre 2011 China

[23] FUJITSU NETWORK COMMUNICATIONS INC, “The Benefits of Cloud-RAN Architecture in Mobile Network Expansion”, article publié le 11 février 2014

[25] W.Jun; Z. Zhang; Yu Hong et Y. Wen, “Cloud Radio Access Network (C-RAN): A Primer », article publié à IEEE Network en février 2015

[28] Ericsson, « Cloud RAN », Article publié en Septembre 2015

[29] R.WANG, H.HONGLIN (Senior Member, IEEE) et Y.XIUMEI, “Potentials and Challenges of C-RAN Supporting Multi-RATs Toward 5G Mobile Networks”, Shanghai Research Center for Wireless Communications; Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Article publié le 21 Octobre 2014

[30] J. Liu, S. Zhou, J. Gong, Z. Niu, and S. Xu, “On the statistical multiplexing gain of virtual base station pools,” in *GlobeCom’14*, Austin, USA, 2014, to be published. [Online].

[31] S. Bhaumik, S. P. Chandrabose, M. K. Jataprolu, G. Kumar, A. Muralidhar, P. Polakos, V. Srinivasan, and T. Woo, “CloudIQ: a framework for processing base stations in a data center,” in *Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking*. Istanbul, Turkey: ACM, 2012, pp. 125–136.

[32] D. Samardzija, J. Pastalan, M. MacDonald, S.Walker, and R. Valenzuela, “Compressed transport of baseband signals in radio access networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 9, pp. 3216–3225, September 2012.

[33] J. Lorca and L. Cucala, “Lossless compression technique for the fronthaul of lte/lte-advanced cloud-ran architectures,” in *IEEE 14th International Symposium and Workshops on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, June 2013, pp. 1–9.

[34] L.Jingchu, Z.Sheng, G.Jie et N.Zhisheng “Graph-based Framework for Flexible Baseband Function Splitting and Placement in C-RAN, Jingchu Liu, Sheng Zhou, Jie Gong, Zhisheng Niu Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China, 20 janvier 2015

[36] M.ARHOUDJAM, Mise en œuvre d'une régulation de vitesse d'un moteur à courant continu, mémoire de projet fin d'études dans génie industriel et maintenance, école normale supérieure de l'enseignement technique, département génie électrique, 2015 Maroc

VI-2-Webographie

- [1] <http://fr.slideshare.net/fatimasalahdine5/cours-gsm>
- [2] https://fr.wikipedia.org/wiki/GERAN#/media/File:Gsm_network.png
- [3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Global_System_for_Mobile_Communications
- [5] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Handover>
- [6] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3f/UTRAN_en.png/350px-UTRAN_en.png
- [7] https://fr.wikipedia.org/wiki/Node_B
- [8] https://fr.wikipedia.org/wiki/Radio_Network_Controller
- [9] https://fr.wikipedia.org/wiki/Universal_Mobile_Telecommunications_System#Fr.C3.A9quences_at_tribu.C3.A9es_.C3.A0_1.27UMTS
- [10] http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2006/eric_meurisse/umts.php
- [11] https://fr.wikipedia.org/wiki/EUTRAN#/media/File:EUTRAN_arch.op.svg
- [12] [https://fr.wikipedia.org/wiki/LTE_\(r%C3%A9seaux_mobiles\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/LTE_(r%C3%A9seaux_mobiles))
- [13] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/78/OFDMAandSC-FDMA.png/330px-OFDMAandSC-FDMA.png>
- [16] http://img.bhs4.com/af/5/af5bc3003b63a3b2b04d966709aa695d6a9943ae_large.jpg
- [17] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Virtualisation>
- [18] <http://tecnato.com/wp-content/uploads/2013/03/nube.jpg>
- [19] <http://image.slidesharecdn.com/cequifautsavoirsurlecloud-130404103223-phpapp02/95/ce-quil-faut-savoir-sur-le-cloud-computing-7-638.jpg?cb=1365071833>
- [20] <http://www.yeswecloud.fr/wp-content/uploads/types-de-cloud.png>
- [24] <http://image.slidesharecdn.com/day-1-1450-anna-pizzinat-orange-backhaul-summit-130812023923-phpapp02/95/cran-architecture-and-fronthaul-challenges-7-638.jpg?cb=1376275264>
- [26] https://fr.wikipedia.org/wiki/Time_Division_Synchronous_Code_Division_Multiple_Access
- [35] <https://fr.wikipedia.org/wiki/MATLAB>