

Introduction

L'ère des télécommunications cellulaires et numériques a commencé dans les années 1990 avec les réseaux de mobiles de deuxième génération (2G), basés sur le mode d'accès multiple par répartition temporelle TDMA (*Time-Division Multiple Access*).

Dans les années 2000, les réseaux de troisième génération (3G) se sont développés sur le principe de l'accès multiple par répartition de code à large bande WCDMA (*Wideband Code-Division Multiple Access*). Bien que la troisième génération ait dominé le marché grâce à l'augmentation du débit pour la transmission de données, elle n'a jamais totalement remplacé la deuxième génération.

Le début des années 2010 voit le démarrage des réseaux de quatrième génération (4G) utilisant l'accès multiple par répartition de fréquences orthogonales OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) pour la liaison descendante et de l'accès multiple par répartition de fréquence sur une seule porteuse SC-FDMA (*Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access*) pour la liaison montante.

Le développement des réseaux 4G s'est déroulé en trois phases identifiées par les versions du standard de l'organisme de normalisation 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) :

- les versions 8 et 9 sont la base du standard LTE (*Long Term Evolution*) ;
- les versions 10, 11 et 12 sont la base du standard LTE-Advanced ;
- les versions 13 et 14 sont la base du standard LTE-Advanced Pro.

L'organisme de normalisation 3GPP a défini des modèles de service correspondant à des cas d'utilisation et d'exigences spécifiques :

- le service MBB (*Mobile Broadband*) correspond aux applications et services qui nécessitent une connexion toujours plus rapide, pour permettre par exemple de visionner

des vidéos en ultra haute définition ou d'utiliser des applications de réalité virtuelle ou augmentée ;

- le service LLC (*Low Latency Communication*) regroupe toutes les applications nécessitant une réactivité extrêmement importante ainsi qu'une fiabilité du service de transmission des données, comme la sécurité civile pour des missions critiques ;

- le service MTC (*Machine Type Communication*) regroupe principalement les usages liés à l'Internet des objets. Ces services ne requièrent pas de débits très importants, mais nécessitent une couverture plus étendue ainsi qu'une consommation énergétique plus faible.

1.1. Le standard LTE

La version 8 définit l'architecture du réseau EPS (*Evolved Packet System*) consistant en un nouveau cœur de réseau EPC (*Evolved Packet Core*) couplé à un nouveau réseau d'accès radioélectrique E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*).

La version 8 définit une nouvelle interface radioélectrique basée sur le multiplexage fréquentiel de porteuses orthogonales OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) et le multiplexage spatial de 4 canaux de trafic (MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) 4×4). La fonction MIMO repose sur la disponibilité de signaux de référence propres à la cellule CRS (*Cell-specific Reference Signal*).

Les mobiles de catégorie 4 ont été capables d'atteindre un débit allant jusqu'à 150 Mbit/s en liaison descendante et jusqu'à 50 Mbit/s en liaison montante, avec les caractéristiques suivantes pour l'interface radioélectrique :

- une bande passante du canal radioélectrique de 20 MHz ;
- une modulation 64-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) pour la liaison descendante et 16-QAM pour la liaison montante ;
- multiplexage spatial de 2 canaux (MIMO 2×2) pour la liaison descendante.

Le standard LTE offre uniquement des services en mode paquet PS (*Packet-Switched*), et à ce titre, permet uniquement le transport de paquets IP (*Internet Protocol*). Dans la version 9, le service téléphonique VoLTE (*Voice over LTE*) est de ce fait fourni par le réseau IMS (*IP Multimedia Sub-system*). Si le service VoLTE n'est pas disponible, le mécanisme CSFB (*Circuit-Switched Fallback*) permet de transférer le mobile sur les réseaux 2G/3G en mode CS dans le cas d'un appel téléphonique entrant ou sortant.

1.2. Le standard LTE-Advanced

La version 10 permet l'amélioration du débit grâce à la technique d'agrégation de porteuses CA (*Carrier Aggregation*), qui permettent d'augmenter la bande passante globale du canal radioélectrique.

L'amélioration du débit est obtenue également grâce à l'augmentation du nombre de canaux de trafic multiplexés spatialement (MIMO 8×8). Des ressources supplémentaires sont attribuées spécifiquement à chaque mobile pour les signaux de référence d'informations d'état de cellule CSI-RS (*Cell State Information Reference Signal*).

Le schéma de modulation a été augmenté de 64-QAM à 256-QAM pour l'augmentation du débit de la liaison descendante.

La version 11 introduit de nouvelles fonctionnalités pour améliorer le débit des données et la couverture au bord de la cellule, avec les mécanismes de traitement des interférences eICIC (*enhanced Inter-cell Interference Coordination*) et CoMP (*Coordinated Multipoint Transmission*).

La version 12 définit une nouvelle architecture MTC pour la prise en compte des objets connectés. Une nouvelle catégorie de mobile, catégorie 0, est introduite, permettant un débit de données inférieur et une consommation d'énergie réduite.

Le standard LTE-Advanced définit également l'architecture eMBMS (*evolved Multimedia Broadcast/Multicast Service*), afin de diffuser du contenu partagé entre plusieurs mobiles. De plus, dans les secteurs de la sécurité publique et des communications critiques, le réseau eMBMS permet d'obtenir plus d'efficacité dans le service d'appels MCPTT (*Mission Critical Push-To-Talk*) pour la transmission des flux vocaux à tous les participants du groupe.

En complément, la version 12 introduit les services de proximité, de mobile à mobile D2D (*Device to Device*) afin d'obtenir une latence réduite dans le temps d'établissement de la communication et dans celui du transport de la voix.

1.3. Le standard LTE-Advanced Pro

Le but du standard LTE-Advanced Pro est d'augmenter le débit pour des mobiles afin d'atteindre la valeur du Gigabit/s, d'apporter de nouvelles fonctionnalités aux réseaux EPS, MTC et eMBMS, et d'introduire de nouveaux services de proximité, à savoir les communications de véhicules à tout type de dispositif V2X (*Vehicle to everything*).

1.3.1. Le service MBB

1.3.1.1. L'architecture du réseau

L'architecture CUPS (*Control and User Plane Separation*) a pour objectif de définir une architecture distribuée plus flexible, en tirant parti de l'évolution vers les implémentations SDN (*Software-Defined Network*).

L'architecture CUPS est basée sur la séparation entre la fonctionnalité du plan utilisateur et la fonctionnalité du plan de contrôle pour les entités SGW (*Serving Gateway*) et PGW (*PDN (Packet Data Network) Gateway*). L'architecture CUPS permet de réaliser des déploiements MEC (*Mobile Edge Compute*) tirant parti d'un plan utilisateur distribué, proche des entités eNB (*evolved Node Base station*), et d'un plan de contrôle centralisé.

La double connectivité DC (*Dual Connectivity*) introduite dans la version 12 apporte une amélioration du débit de la liaison descendante. Les paquets IP sont transférés à destination de deux stations radioélectriques eNB (*evolved Node B station*), la station maîtresse MeNB (*Master eNB*) et la station secondaire SeNB (*Secondary eNB*).

La version 13 introduit le transfert du trafic vers deux stations radioélectriques pour la liaison montante, régi par deux paramètres : une liaison principale et une valeur de seuil. Lorsque la mémoire tampon du mobile est inférieure au seuil, le mobile envoie uniquement des données sur la liaison principale. Lorsque la quantité de données en mémoire tampon dépasse le seuil, le mobile peut envoyer des données aux deux entités MeNB et à SeNB.

1.3.1.2. Le multiplexage spatial

Une amélioration importante de la version 13 réside dans l'introduction du système d'antennes actives AAS (*Active Antenna System*), avec des éléments allant de 8 à 64, qui s'avère pertinent pour des fréquences supérieures à 3,5 GHz.

Le mécanisme FD-MIMO (*Full-Dimension MIMO*) permet la formation de faisceaux (*beamforming*) dans les directions horizontale et verticale et la génération de liens spatiaux tridimensionnels.

Associés au mécanisme FD-MIMO, deux méthodes d'utilisation des signaux de référence d'informations d'état de cellule CSI-RS sont définies :

- pour la méthode de classe A, le signal CSI-RS est associé à un élément d'antenne, leur nombre étant limité à 16 ;
- pour la méthode de classe B, l'entité eNB peut configurer jusqu'à 8 faisceaux par mobile, chaque faisceau étant formé à partir d'un signal CSI-RS.

La version 14 améliore le mécanisme FD-MIMO, pour la méthode de classe A, par l'augmentation du nombre de signaux CSI-RS jusqu'à 32, et par la diminution de la densité des signaux CSI-RS. Pour la méthode de classe B, l'amélioration porte sur l'efficacité du signal CSI-RS.

1.3.1.3. L'agrégation des canaux

L'agrégation des canaux a augmenté jusqu'à 32, le nombre de composants agrégés. Afin de répondre au trafic croissant de données, le standard LTE-Advanced Pro a également introduit de nouvelles techniques d'agrégation LAA (*Licence Assisted Access*), LWA (*LTE-Wi-Fi Aggregation*) et LWIP (*LTE/WLAN radio level integration with IPsec tunnel*).

L'agrégation LAA est une extension de l'agrégation LTE. La transmission s'effectue sur des bandes de fréquences licenciées (LTE) et non licenciées (Wi-Fi dans la bande U-NNI à 5 GHz), entre le mobile et l'entité eNB, sans point d'accès intermédiaire. L'entité eNB constitue le point d'ancrage de l'agrégation des canaux.

L'agrégation LAA est similaire à la double connectivité DC, pour laquelle la transmission LTE s'effectue sur la station maîtresse MeNB et la transmission Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) sur la station secondaire SeNB.

Dans la version 13, la transmission sur la bande de fréquences non licenciées s'effectue uniquement pour la liaison descendante. La transmission pour la liaison montante est disponible dans la version 14.

Les agrégations LWA et LWIP utilisent les bandes de fréquence LTE et Wi-Fi. La transmission sur le canal radioélectrique Wi-Fi s'effectue entre le mobile et le point d'accès, conformément aux normes 802.11. L'entité eNB constitue le point d'ancrage de l'agrégation des canaux.

La version 14 apporte les améliorations suivantes à la fonctionnalité LWA :

- la transmission de données sur la liaison montante sur le réseau Wi-Fi ;
- la prise en charge de nouvelles bandes de fréquences à 60 GHz et des interfaces 802.11ax, 802.11ad et 802.11ay ;
- la collecte d'informations pour une estimation de la capacité disponible sur le réseau Wi-Fi ;
- la découverte de réseaux Wi-Fi voisins sous la couverture d'entités eNB.

L'agrégation LWIP utilise un tunnel IPSec pour transporter les paquets IP entre l'entité eNB et le point d'accès Wi-Fi. À la différence de l'agrégation LWA, l'agrégation LWIP ne nécessite aucune modification pour la transmission Wi-Fi.

1.3.2. Le service LLC

Pour la communication D2D, l'amélioration principale réside dans la prise en charge du relaying par le mobile. Cela permet aux mobiles de sécurité publique, hors couverture, de communiquer avec le réseau *via* des mobiles sous la couverture radioélectrique.

La fonctionnalité SC-PTM (*Single-Cell Point-to-Multipoint*) a été introduite dans la version 13 pour améliorer l'efficacité de l'interface radioélectrique du réseau eMBMS, par la prise en charge, sur une cellule, du service de diffusion en utilisant des ressources radioélectriques spécifiques.

Avant la version 13, l'organisme de normalisation 3GPP a normalisé des fonctionnalités devant servir par la suite de facilitateur aux services relatifs aux missions critiques. Par exemple, en raison du temps nécessaire pour établir un support sur le réseau eMBMS, un appel vocal de groupe MCPTT doit avoir un support (*bearer*) déjà établi pour une utilisation immédiate.

La version 13 définit les différents services applicatifs de la fonction MCPTT : l'authentification de l'utilisateur, l'affiliation à un groupe, les appels de groupe et les appels privés, le contrôle de la prise de parole.

La version 14 complète les fonctions MCPTT avec différents services de gestion : la gestion de la configuration, la gestion du groupe, la gestion de l'identité et la gestion des clés.

La version 14 introduit la communication de véhicule à tout type de dispositif V2X (*Vehicle to everything*) qui se décline en quatre applications selon les différents types de dispositifs avec lesquels le véhicule se connecte :

- la communication de véhicule à véhicule V2V (*Vehicle to Vehicle*) ;
- la communication de véhicule à infrastructure V2I (*Vehicle to Infrastructure*) ;
- la communication de véhicule à piéton V2P (*Vehicle to Pedestrian*) ;
- la communication de véhicule à réseau V2N (*Vehicle to Network*).

1.3.3. Le service MTC

La version 13 fait évoluer l'architecture du réseau afin d'optimiser le transfert des données utilisant les différents plans :

- le plan de contrôle afin de réduire le nombre de messages lors du traitement d'une procédure d'établissement de session ;

– le plan utilisateur pour lequel la gestion de la connexion évite de supprimer le contexte lorsque le terminal n'a plus de données à transmettre.

La fonction AESE (*Architecture Enhancements for Service capability Exposure*) permet d'exposer à des tiers les services et les capacités du réseau et de fournir un accès aux capacités du réseau :

- la communication à haute latence, pour prendre en charge le scénario dans lequel les applications communiquent avec des terminaux temporairement inaccessibles ;
- la communication point-multipoint ;
- l'augmentation du cycle de réception discontinuée DRX ;
- la surveillance des événements affectant le fonctionnement du terminal.

Les terminaux Cat.1 et Cat.0 ont été introduits respectivement dans les versions 8 et 12 pour le service MTC. Ces terminaux ont des fonctionnalités réduites, mais peuvent fonctionner dans une bande passante de 20 MHz.

Pour diminuer la complexité du terminal et améliorer la durée de vie de la batterie et la couverture radioélectrique, la version 13 introduit deux nouvelles technologies pour l'interface radioélectrique :

- LTE-M fonctionnant dans une bande passante de 1,4 MHz, avec des terminaux Cat. M1 ;
- NB-IoT (*Narrow Band-Internet of Things*) fonctionnant dans une bande passante de 180 kHz, avec des terminaux Cat. NB1.

Afin d'augmenter le débit sur l'interface radioélectrique, la version 14 introduit deux nouvelles catégories de terminaux : Cat. M2 pour la technologie LTE-M et Cat. NB2 pour la technologie NB-IoT.

1.4. L'intégration du Wi-Fi

La version 8 définit l'intégration du réseau d'accès radioélectrique Wi-Fi au cœur de réseau EPC, en traitant tous les aspects de l'interfonctionnement : la mobilité entre les accès Wi-Fi et LTE, la sécurité (authentification, protection des données). En revanche, la version 8 n'autorise pas les connexions simultanées à plusieurs réseaux d'accès. En outre, la version 8 spécifie la fonction de découverte et de sélection du réseau ANDSF (*Access Network Discovery and Selection Function*).

Plusieurs architectures d'accès au cœur de réseau EPC sont définies :

- l'architecture basée sur l'interface S2a, pour laquelle le réseau d'accès radioélectrique Wi-Fi est contrôlé par l'opérateur et la mobilité est gérée par le réseau ;
- l'architecture basée sur l'interface S2b, pour laquelle le réseau d'accès radioélectrique Wi-Fi n'est pas contrôlé par l'opérateur et la mobilité est gérée par le réseau ;
- l'architecture basée sur l'interface S2c, pour laquelle la mobilité est gérée par le mobile, le réseau d'accès radioélectrique Wi-Fi pouvant être contrôlé ou non.

La version 9 améliore la fonction ANDSF qui fournit des informations de découverte et de sélection du réseau d'accès pour les scénarios d'itinérance.

La version 10 introduit les connexions simultanées à plusieurs technologies d'accès radioélectriques.

La fonction NSW0 (*Non-Seamless WLAN Offload*) autorise l'acheminement du trafic directement vers le réseau Internet, sans traverser le cœur de réseau EPC.

La fonction MAPCON (*Multi-Access PDN Connectivity*) supporte diverses connexions au réseau PDN transitant soit par l'interface LTE (par exemple le service téléphonique) soit par l'interface Wi-Fi (par exemple le service Internet), en fonction de la politique de l'opérateur.

La version 12 améliore la solution S2a avec trois modes de fonctionnement de déchargement du trafic (*offload*) :

- le mode de connexion unique SCM (*Single-Connection Mode*) prend en charge la mobilité entre les accès LTE et Wi-Fi et la fonction NSW0 *via* l'accès Wi-Fi ;
- le mode de connexion multiple MCM (*Multi-Connection Mode*) prend en charge simultanément une ou plusieurs connexions PDN et la fonction NSW0 *via* l'accès Wi-Fi ;
- le mode de connexion transparente TSC (*Transparent Single-Connection*) fournit une connexion unique (LTE ou Wi-Fi) et ne prend pas en charge la mobilité entre les accès LTE et Wi-Fi.

Les fonctions de découverte et de sélection sont également définies dans la spécification 802.11u de l'organisme IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), intégrée et complétée par la spécification HotSpot 2.0 de l'organisme WFA (*Wi-Fi Alliance*). La version 12 permet d'aligner la fonction ANDSF sur les fonctionnalités HotSpot 2.0.

La version 13 complète les modes de transfert des paquets IP en introduisant la fonction IFOM (*IP Flow Mobility*) permettant d'acheminer les différents flux IP d'une

connexion au réseau PDN, qui correspond à un point d'accès APN (*Access Point Name*), par l'intermédiaire des deux interfaces LTE et Wi-Fi.

1.5. L'intégration de la 5G

La cinquième génération (5G) de réseaux de mobiles, dont la première phase est définie dans la version 15, doit être plus flexible et plus évolutive pour permettre une gamme plus large de services. Elle permettra de passer à une architecture basée sur la virtualisation des fonctions de réseau NFV (*Network Function Virtualization*) où les éléments du réseau sont hébergés dans des environnements virtuels et où le découpage en tranches de réseau (*Network Slicing*) permet une adaptation aux différentes exigences.

Comme pour les générations précédentes, la cinquième génération définit un cœur de réseau 5GC et un réseau d'accès radioélectrique 5G NR (*New Radio*). Contrairement aux générations précédentes qui nécessitaient le déploiement du cœur de réseau et du réseau d'accès radioélectrique d'une même génération, la cinquième génération permet d'intégrer des éléments de générations différentes dans différentes configurations.

Le réseau d'accès radioélectrique 5G NR est défini pour prendre en charge deux modes opérationnels, le mode autonome et le mode non autonome :

- le réseau d'accès radioélectrique 5G NR non autonome se raccorde au cœur du réseau 4G uniquement pour le plan utilisateur, le plan de contrôle étant traité par le réseau d'accès radioélectrique 4G ;
- le réseau d'accès radioélectrique 5G NR autonome se raccorde au cœur du réseau 5G pour les données du plan utilisateur et du plan de contrôle.

En dépit du fait que les deux modes de fonctionnement auraient dû coexister dès le début, un consensus s'est dégagé pour déployer en priorité le mode non autonome afin de répondre rapidement au besoin de débit. Ce mode permet d'exploiter les déploiements 4G existants, en combinant les ressources radio LTE et NR avec les cœurs de réseau 4G.

La version 15 n'apporte pas de rupture technologique fondamentale sur l'interface radioélectrique 5G NR par rapport à l'interface radioélectrique 4G LTE, le mode d'accès multiple étant identique, mais plutôt quelques aménagements en ce qui concerne les structures de multiplexage temporel et fréquentiel et les codes de correction d'erreurs.