



Juin 2015

Notice d'information LTE et LTE-Advanced

"Long Term Evolution" de l'UMTS

Résumé

Le LTE (Long Term Evolution) succède à la norme de radiocommunication mobile UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Son introduction répond à la croissance exponentielle du trafic mobile de données, qui double chaque année en moyenne mondiale. Dans de nombreux pays, y compris la Suisse, il a même doublé en sept mois seulement.

Le LTE comprend une interface aérienne optimisée pour la radiocommunication mobile et qui a déjà fait ses preuves sur les réseaux de radiodiffusion numériques terrestres. Son utilisation implique le réaménagement des stations existantes, la mise en place de stations de base supplémentaires et la création de nouveaux appareils (téléphone portable, tablette, PC, modem, routeur). Le LTE présente de multiples qualités, en particulier des débits élevés sur l'interface aérienne entre la station de base et l'appareil utilisateur. Cela augmente la capacité de transmission et permet ainsi d'offrir le même débit à davantage d'utilisateurs ou de fournir des débits plus élevés au même nombre d'utilisateurs. En outre, la réduction de l'intervalle de transmission des données (latence) améliore considérablement la réactivité du réseau. En outre, le LTE nécessite moins d'énergie que l'UMTS dans les appareils utilisateurs et permet une plus grande autonomie pour les services de données activés.

Le développement de l'interface aérienne est étroitement lié à celui du réseau central (mise en réseau des stations de base). Le développement du réseau central est appelé SAE (Services Architecture Evolution). Le LTE et le SAE visent entre autres à augmenter l'expérience utilisateur et à diminuer les coûts par bit transféré.

La présente notice d'information donne un aperçu de l'interface radio LTE et de ses développements, ainsi que des services et de la construction des réseaux, sans prétendre à l'exhaustivité.



Table des matières

1	Abréviations	1
2	Aperçu	3
3	Fréquences et concessions	5
4	Technologie de l'interface aérienne LTE	5
4.1	Aperçu	5
4.2	Liaison descendante	7
4.3	Liaison ascendante	8
4.4	Efficacité du spectre	9
4.5	Agrégation de porteuse (<i>Carrier Aggregation</i>)	10
4.6	MIMO	11
5	Réseaux de téléphonie mobile	12
6	Services	14
7	Références	15

1 Abréviations

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AIPN	All-IP Network
AMC	Adaptive Modulation and Coding
APN	Access Point Name
bps	Bits par seconde
CDMA	Code Division Multiple Access
CMR	Conférence mondiale sur les radiocommunications (UIT)
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DSL	Digital Subscriber Line
DVB-T	Terrestrial Digital Video Broadcast
eMBMS	Evolved Multimedia Broadcast/Multicast Service
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System (EPS = E-UTRAN + EPC)
E-UTRA	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
EV-DO	Evolution-Data Optimized
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FTTx	Fiber To The x (Home, Building, Curb ...)
GBR	Guaranteed Bitrate
GHz	Giga-Hertz (10^9 Hertz)
GSM	Global System for Mobile Communications
HetNet	Heterogeneous Network
HSPA	High Speed Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMS	IP Multimedia System
IMT	International Mobile Telecommunications
ICIC	Inter Cell Interference Coordination
IP	Internet Protocol
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector
LIPTO	Local Internet Protocol Traffic Offload
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	LTE-Advanced
MBMS	Multimedia Broadcast/Multicast Service
MHz	Mega-Hertz (10^6 Hertz)
MIMO	Multiple Input Multiple Output (procédure multi-antennes)
OFCOM	Office fédéral de la communication
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PER	Packet error rate
PRB	Physical Resource Block
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RAT	Radio Access Technology

RB	Resource Block
RRM	Radio Resource Management
SAE	Services Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SDMA	Space Division Multiple Access
SFN	Single-Frequency Network
SIPTO	Selected Internet Protocol Traffic Offload
SIR	Signal to Interference Ratio
SMS	Short Message Service
SON	Self Organising Network
TDD	Time Division Duplex
TTI	Transmission Time Interval
UIT	Union internationale des télécommunications
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VoIP	Voice over IP
VoLTE	Voice over LTE
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

2 Aperçu

Diverses études de marché indépendantes prédisent un essor fulgurant du trafic de données mobile jusqu'en 2030. Jusqu'ici, le volume des données échangées dans le monde sur les réseaux mobiles a doublé environ chaque année. Cette croissance est même encore plus marquée dans de nombreux pays. La mise à disposition de nouvelles fréquences pour la radiocommunication mobile ne permet pas à elle seule de faire face aux besoins. Il faut augmenter la densité des cellules radio et l'efficacité du spectre.

Afin d'accroître les capacités, les débits de données et l'efficacité du spectre, l'industrie a développé le nouveau système de radiocommunication mobile LTE (Long Term Evolution), une évolution des technologies 3GPP (UMTS, HSPA, HSPA+). Le LTE visait une efficacité en matière de spectre environ 3 à 4 fois supérieure à l'UMTS HSPA (High Speed Packet Access), pour un coût de réseau relativement bas (c'est-à-dire un faible coût par bit transféré).

L'introduction du LTE sur le marché a débuté en 2010. L'illustration 1 montre la chronologie de l'introduction des versions et des fonctionnalités.

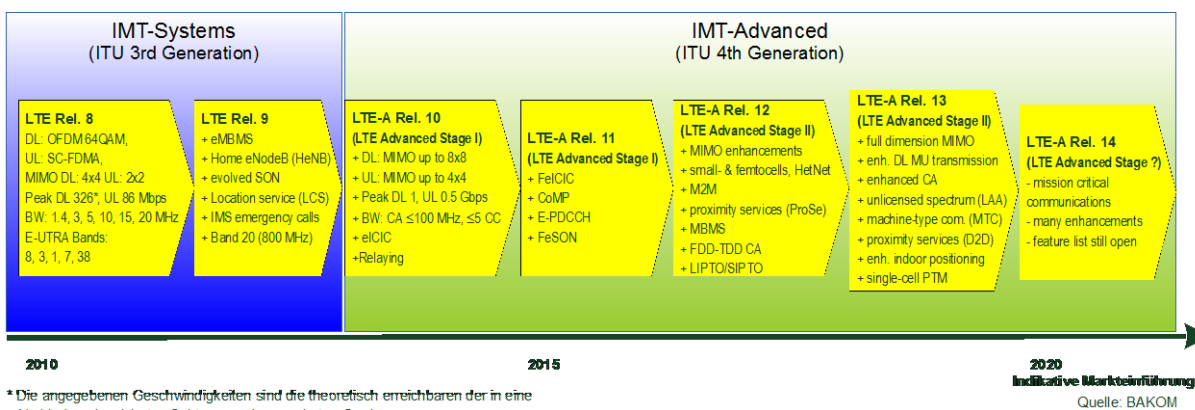


Illustration 1: Chronologie de l'introduction des versions standard et des fonctionnalités

Selon les exigences de l'UIT-R relatives aux interfaces aériennes, les technologies UMTS, HSPA, HSPA+ et LTE font partie des systèmes de radiocommunication mobile de la 3^e génération (3G). Le LTE est donc également considéré comme le "3.9G" ou le "3.99G". La désignation LTE comprend les versions 8 et 9 de la norme. Le développement du LTE est appelé LTE-Advanced (LTE-A) et compte deux phases. Le LTE-A Phase 1 comprend les versions 10 et 11, le LTE-A Phase 2, les versions 12 et 13. Le LTE-A remplit les exigences de l'UIT-R relatives aux interfaces aériennes de la 4^e génération (4G) et est appelé IMT-Advanced. Le développement de la version 12 a été finalisé mi-2015.

Début 2011, 15 réseaux LTE commerciaux étaient exploités dans 11 pays du monde entier, dont huit en Europe de l'Ouest. Quelques autres étaient annoncés.

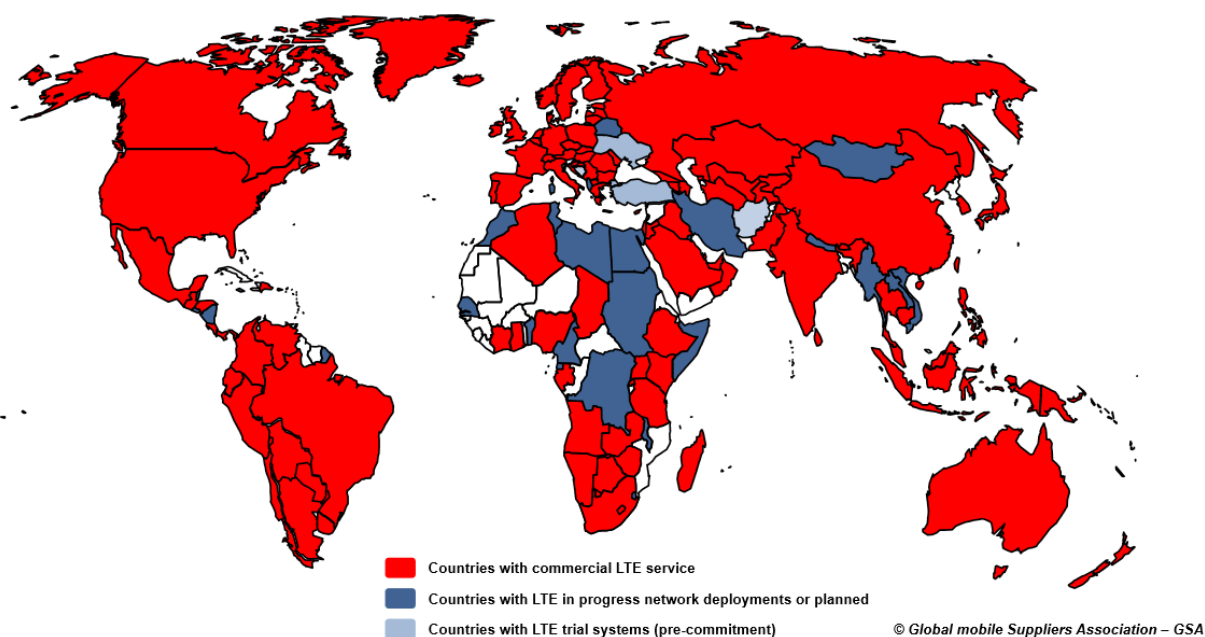
En Suisse, le premier réseau LTE commercial a été mis en service fin 2012, le troisième et jusqu'ici dernier réseau mi-2013. Depuis, les réseaux LTE sont développés et actualisés en permanence. Au premier trimestre 2015, la desserte de la population suisse atteignait plus de 92% chez au moins deux des trois exploitants¹.

Selon la Global Suppliers Association (GSA), en avril 2015, dans le monde entier, 393 réseaux LTE commerciaux sont en service (dont 54 LTE TDD²) et environ 200 exploitants envisagent la construction d'un réseau LTE (voir illustration 2).

¹ Indications fournies par les exploitants, obtenues en mai 2015

² http://www.gsacom.com/downloads/pdf/Snapshot_LTE-TDD_extract_GSA_Evolution_to_LTE_report_090415.php4

Avec actuellement environ 7 milliards d'utilisateurs dans le monde (des cartes SIM ou des contrats de connexion potentiellement compatibles avec le réseau LTE) basés sur des normes 3GPP, le LTE s'est clairement imposé face à d'autres normes de radiocommunication mobile, comme le CDMA2000/EV-DO ou l'IEEE/WiMAX (voir illustration 9).



Source: www.gsacom.com³

Illustration 2: Réseaux commerciaux LTE et réseaux LTE prévus dans le monde – Etat mai 2015

La norme LTE supporte toutes les fréquences de radiocommunication mobile. Elle a tout d'abord été introduite dans la bande 3 E-UTRA (1800 MHz), qui était et continue d'être utilisée au moyen de la norme GSM (voir tableau 1). C'était le début de la substitution progressive du GSM par le LTE. Au début, le choix de la bande 3 pour l'introduction du LTE évitait pour un temps aux exploitants de réseau de devoir installer des panneaux d'antenne supplémentaires aux stations de base, ce qu'ils auraient dû faire avec de nouvelles bandes de fréquences comme la 20 ou la 7 (800 MHz, 2.6 GHz). En outre, avec 2 x 75 MHz de largeur de bande, la bande 3 offre suffisamment de capacité pour une répartition entre le GSM et le LTE. On utilise des stations de base compatibles avec un réseau Multi-RAT, appréciées pour leur grande flexibilité: elles supportent toutes les technologies de téléphonie mobile (GSM, UMTS/HSPA+, LTE-x), qu'elles peuvent mettre à disposition de manière statique ou dynamique selon les besoins. Les premiers appareils utilisateurs supportaient déjà en partie les bandes 20 et/ou 7 (voir tableau 1).

Avec les appareils utilisateurs LTE, contrairement à l'UMTS, deux procédures s'appliquent par défaut à la transmission de données simultanée⁴ de la station de base au terminal et vice-versa: le multiplexage fréquentiel FDD et le multiplexage temporel TDD. Beaucoup d'appareils supportent les deux procédures duplex, ce qui permet de profiter d'économies d'échelle dans la production des composants des terminaux et des appareils utilisateurs. Les utilisateurs finaux peuvent recourir à différentes méthodes duplex pour pratiquer l'itinérance au niveau mondial et les exploitants de réseau disposent potentiellement de plus de spectre.

³ http://www.gsacom.com/downloads/pdf/LTE_World_map_393_LTE_networks_launched_090415.php4

⁴ Au moins approximativement

3 Fréquences et concessions

En février 2012, la Commission fédérale de la communication (ComCom) a mis aux enchères toutes les fréquences de téléphonie mobile alors disponibles⁵. Tous les blocs de fréquences de 5 MHz des bandes de fréquences figurant dans le tableau 1 ont été acquis par les trois entreprises existantes de téléphonie mobile en Suisse. Les recettes réalisées par la Confédération dans le cadre de cette vente ont atteint 996 millions de francs suisses.

Bande de fréquences	E-UTRA operating bands	Largeur de bande	Procédure duplex	Supporté dès la version LTE
800 MHz	20	2x30 MHz	FDD	9
900 MHz	8	2x35 MHz	FDD	8
1800 MHz	3	2x75 MHz	FDD	8
2100 MHz	1	2x60 MHz	FDD	8
2600 MHz	7	2x70 MHz	FDD	8
	38	1x45 MHz	TDD	
	Total	585 MHz		

Tableau 1: Bandes de fréquences pour le LTE en Europe

Dans de nombreux pays sur tous les continents, des bandes de téléphonie mobile supplémentaires sont prévues pour les systèmes IMT dans les bandes des 700 MHz, 1400 MHz et 3.5 GHz, avec une largeur de bande brute potentielle totale allant jusqu'à 525 MHz. La décision à ce propos sera rendue dans le cadre de la Conférence mondiale des radiocommunications⁶ CMR-15 en novembre 2015. Il conviendra ensuite de décider si les bandes de fréquences entre 6 GHz et 100 GHz environ devront aussi être utilisées pour l'IMT.

4 Technologie de l'interface aérienne LTE

4.1 Aperçu

L'organisation de normalisation 3GPP (Third Generation Partnership Project) définit depuis 2005 les exigences pour le LTE et le LTE-Advanced, en se basant sur les exigences de l'UIT-R pour l'IMT-2000 et l'IMT-Advanced. Les principaux objectifs initiaux de performance pour le LTE étaient:

- Augmentation sensible du débit en liaison descendante pouvant atteindre jusqu'à 100 Mbit/s pour une largeur de bande de 20 MHz et donc augmentation de l'efficacité du spectre théoriquement jusqu'à 5 Bit/s/Hz/cell avec une antenne émettrice et deux antennes réceptrices (3 à 4 fois l'efficacité du spectre de l'UMTS/HSDPA version 6)
- Augmentation sensible du débit en liaison ascendante pouvant atteindre jusqu'à 50 Mbit/s pour une largeur de bande de 20 MHz et donc augmentation de l'efficacité du spectre théoriquement jusqu'à 2.5 Bit/s/Hz/cell avec une antenne émettrice et deux antennes réceptrices (3 à 4 fois l'efficacité du spectre de l'UMTS/HSDPA version 6)
- Utilisation flexible du spectre grâce à des largeurs de bande modulables/extensibles de 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz
- Le temps de latence (délai) par l'interface aérienne entre l'appareil utilisateur et la station de base doit être inférieur à 5 ms et le délai de propagation aller-retour inférieur à 10 ms;
- Utilisation flexible du spectre grâce aux procédures duplex FDD et TDD
- Débits de données dans les bords de la cellule plus grands qu'avec l'UMTS
- Mobilité jusqu'à 500 km/h (optimisée pour 0 à 15 km/h);
- Respect de plusieurs exigences relatives à la qualité de services (QoS) et à la mobilité
- Intégration d'antennes intelligentes (MIMO) dans la norme
- Faibles coûts de transmission par *bit* pour l'interface aérienne
- Architecture simple, modulable, éléments de réseau moins nombreux, interfaces ouvertes

⁵ <http://www.comcom.admin.ch/themen/00783/index.html?lang=fr>

⁶ <http://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2015/Pages/default.aspx>

- Consommation d'énergie aussi faible que possible des appareils utilisateurs (grande autonomie)

Au niveau du réseau central, les principales nouveautés sont l'architecture horizontale et décentralisée basée sur le protocole internet ainsi que la suppression de la commutation de circuits. Les réseaux de pure communication de paquets sont les réseaux All-IP (AIPN). La principale caractéristique est une structure hiérarchique simple des éléments de réseau plus horizontale que celle des réseaux à commutation de circuits (2G et 3G). Le but de cette architecture est de faire baisser les prix en offrant une plus grande évolutivité (voir chapitres 5 et 6).

Les principales nouveautés de l'interface aérienne LTE sont l'introduction:

- du type de modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) et du procédé de codage par répartition en fréquences orthogonales sous forme de multiples sous-porteuses OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour les liaisons descendantes,
- du SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) pour les liaisons ascendantes,
- de largeurs de bandes extensibles.

Le SC-FDMA est une méthode utilisée avec l'OFDMA. Elle permet l'exploitation du système avec des largeurs de bande extensibles dans une bande allant de 1.4 MHz à 20 MHz. Elle permet aussi une utilisation flexible du LTE dans les largeurs de bande attribuées et ne suppose pas (contrairement à l'UMTS) un bloc compact d'au moins 5 MHz ou d'un multiple de 5 MHz.

Les largeurs de bande flexibles permettent un refarming⁷ progressif de l'infrastructure et des réseaux ainsi qu'une utilisation avec des attributions de fréquences fragmentées telles qu'elles résultent de la coordination aux frontières, par exemple pour les fréquences préférentielles GSM.

La technique qui sous-tend le LTE est complexe: grâce à une division très fine et souple des signaux porteurs dans le domaine temps-fréquences, le LTE est plus efficace que les interfaces aériennes utilisées jusqu'ici dans les réseaux mobiles publics.

Cette technique permet d'adapter rapidement les paramètres radio aux caractéristiques actuelles du canal radio, en recourant aux nouveaux procédés d'accès aux canaux OFDMA et SC-FDMA à la cadence de l'intervalle de transmission (TTI) d'une milliseconde de (voir illustration 3).

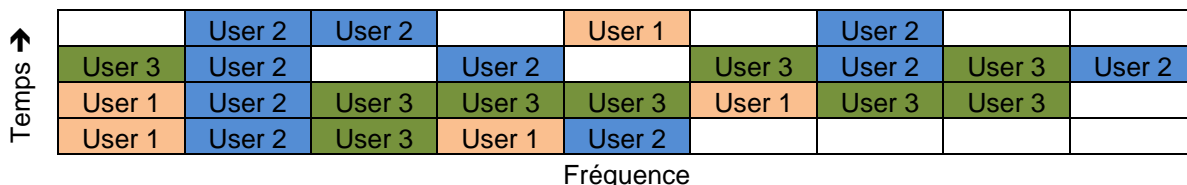


Illustration 3: Exemple de répartition des blocs de ressources (fréquence et temps) entre 3 utilisateurs

L'attribution est effectuée dans la station de base par un algorithme de programmation qui gère l'allocation des ressources. En outre, l'appareil utilisateur transmet les valeurs de mesure à la station de base dans le canal de contrôle correspondant. En contrepartie, la station de base signale les allocations des ressources aux appareils utilisateurs de la cellule radio dans le canal de contrôle correspondant. L'algorithme de programmation n'est pas standardisé, contrairement à la représentation des valeurs de mesure et au protocole sur les interfaces aériennes.

En outre, le LTE Version 8/9 a permis pour la première fois de franchir la barre des 100 MBit/s en liaison descendante: la nouvelle norme promet – du moins en théorie – des débits pouvant aller jusqu'à 326 MBit/s en liaison descendante et 86 MBit/s en liaison ascendante. Toujours en théorie, avec le LTE Version 10/11, on doit pouvoir atteindre 1 Gbps en liaison descendante et jusqu'à 500 Mbps en liaison ascendante. Cette augmentation est possible surtout grâce à des antennes multiples (MIMO) et à l'exploitation d'un multiplexage spatial (SDMA) (voir chapitres 4.4 et 4.6). On peut utiliser jusqu'à 8

⁷ Le refarming signifie la migration d'une technologie radio à une autre, notamment plus récente.

antennes dans la station de base et le terminal (8x8 MIMO) en liaison descendante et jusqu'à 4 antennes dans la station de base et l'appareil utilisateur en liaison ascendante (4x4 MIMO).

Dans la première phase de construction déjà, on pouvait atteindre des débits de 100 MBit/s. Le LTE offre non seulement des débits nettement plus élevés et une meilleure utilisation du spectre que ses prédécesseurs, mais aussi un temps plus court de transfert des paquets de l'expéditeur au destinataire. Ce temps de latence ne dépasse pas 5 millisecondes, alors qu'avec l'UMTS, il atteint en moyenne entre 70 et 140 millisecondes. Avec le LTE, la variation du temps de latence (delay jitter) a également été réduite.

Pour bien fonctionner, les services en temps réel comme le VoIP et les jeux exigent un temps de latence court et une variation du temps de latence faible. C'est pourquoi le temps nécessaire pour le transfert entre les cellules radio a également dû être abaissé, ce que permettent l'EPS et la hiérarchie horizontale du réseau central. La meilleure réactivité du réseau est déterminante pour la vitesse ressentie car un haut débit de données ne suffit pas à lui seul pour cette expérience. Le LTE doit même favoriser la consommation de contenus vidéo par rapport à l'UMTS⁸.

Avec des améliorations de MBMS, le LTE doit à l'avenir être positionné en tant que plateforme de diffusion de services radio sur les réseaux de téléphonie mobile. A partir de la version 10, le développement de l'eMBMS est appelé "LTE-Broadcast". Dans certains marchés, il constitue potentiellement une alternative au DVB-T et à d'autres technologies de radiocommunication.

4.2 Liaison descendante

Pour la liaison descendante, avec le LTE, le choix s'est porté sur l'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), soit l'utilisation de l'OFDM pour un procédé d'accès multiple. A la différence de l'OFDM, avec l'OFDMA, les blocs des sous-porteuses sont attribués à un utilisateur, à un moment précis (voir illustration 3).

Les attributions des ressources se succèdent rapidement (1ms) et sont donc très flexibles. Ces fragments de fréquence et de plages temporelles de sous-porteuse sont appelés "blocs de ressources physiques" (Physical Resource Blocks-PRB). Vous trouvez d'autres détails sur la structure et les paramètres dans les encadrés.

⁸ http://business.chip.de/news/LTE-Treiber-fuer-mobile-Netflix-und-Co._72556383.html

Comparé à d'autres systèmes à large bande, les récepteurs sont considérablement simplifiés par l'OFDM car la correction des distorsions du canal est plus facile à effectuer. Le choix de l'OFDM a notamment été dicté par le fait que l'utilisation des fréquences doit se faire dans des largeurs de bande variables de 1,4 MHz à 20 MHz. Avec des largeurs de bandes relativement étroites et des débits élevés, le CDMA perd ses avantages.

Autre atout de l'OFDM en liaison descendante: la construction de réseaux iso-fréquence (SFN), à savoir l'utilisation de la même fréquence dans les cellules adjacentes, est relativement simple. Ces réseaux sont performants pour la transmission de services de radiodiffusion au moyen d'eMBMS. L'utilisation de bandes de fréquences TDD uniquement en liaison descendante et de nouvelles bandes de fréquences uniquement en liaison descendante résulte du trafic asymétrique généré par le flux vidéo. L'augmentation de la consommation vidéo engendre une asymétrie du trafic entre les liaisons descendantes et les liaisons ascendantes. Les asymétries observées ont atteint des facteurs entre 7 et 11.

Les exigences élevées en matière de linéarité de l'amplificateur d'émission constituent un désavantage de l'OFDM. Ces exigences sont dictées par le PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) élevé du signal de modulation. Les amplificateurs qui présentent une haute linéarité sont relativement gourmands en électricité et plus onéreux. Ces deux aspects impliquent des coûts d'acquisition et d'exploitation d'une station de base plus élevés, mais les avantages qu'offrent des appareils utilisateurs plus simples restent prépondérants.

Autres paramètres radio du LTE en liaison descendante

Les blocs de ressources (PRB) sont composés de 12 sous-porteuses OFDM de 15 kHz chacune et d'une largeur de bande de 180 kHz; la durée d'un intervalle (slot) est de 0,5 ms.

7 symboles forment un intervalle; un bloc de ressources comprend au moins 84 symboles. Ensemble, 2 intervalles (14 symboles) forment une sous-trame, avec laquelle l'intervalle de transmission minimum (TTI) de 1 ms est défini. Une trame radio est composée de 10 sous-trames (20 intervalles) et dure 10 ms.

Les types de modulation des sous-porteuses utilisées sont le QPSK, le 16-QAM et le 64-QAM, avec 2, 4 et 6 bits par symbole. Le choix du type de modulation (AMC) est effectué de manière dynamique au moyen d'une programmation temporelle sélective (selective scheduling) par des algorithmes de programmation dans la gestion des ressources radio (RRM) sur la base des caractéristiques actuelles du canal radio signalées par l'appareil utilisateur. Les ressources minimales de programmation sont constituées de 2 blocs de ressources. Le changement de sous-porteuse ou de fréquence (frequency hopping) peut se faire sur la base des intervalles.

Les caractéristiques du LTE permettent une grande flexibilité d'adaptation à:

- divers contextes (intérieur, ville, banlieue, campagne)
- diverses conditions de mobilité (de stationnaire/nomade jusqu'à 500 km/h)
- rayon des cellules allant de la zone d'accès sans fil (dix mètres) à plusieurs dizaines de kilomètres
- largeurs de bande de 400 MHz à 4 GHz

4.3 Liaison ascendante

Pour la liaison ascendante, le procédé choisi est celui de l'accès multiple à répartition en fréquence avec une seule porteuse (SC-FDMA), qui présente l'avantage de produire des puissances dans les canaux adjacents relativement faibles, même avec un amplificateur linéaire limité. Le SC-FDMA ne pose pas d'exigences très élevées en matière de linéarité de l'amplificateur de l'appareil utilisateur et ne consomme donc pas beaucoup d'électricité. Sur les appareils utilisateurs alimentés par des accumulateurs, une grande consommation de courant constituerait un inconvénient majeur, mais facilement évitable avec le SC-FDMA. A titre d'exemple, un appareil SC-FDMA consomme trois fois moins de courant qu'un appareil OFDM présentant le même taux d'erreur sur les bits.

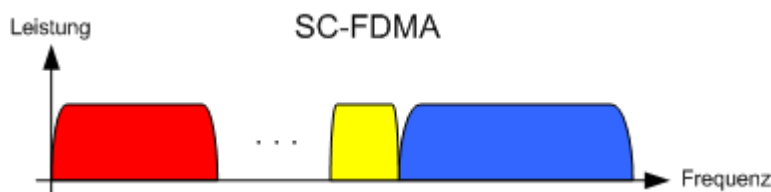


Illustration 4: Représentation schématique du spectre émetteur en liaison ascendante. Les différentes couleurs symbolisent le spectre occupé par chaque utilisateur.

Avec le SC-FDMA, le récepteur de la station de base nécessite un égaliseur (equalizer) relativement complexe. Ce procédé est bien plus résistant que l'OFDMA aux écarts des fréquences porteuses. En outre, la complexité de la liaison ascendante vers la station de base a été en grande partie placée dans la station de base, ce qui a permis de concevoir des terminaux moins chers et plus performants du point de vue énergétique. Le procédé d'accès multiple SC-FDMA en liaison ascendante constitue une nouveauté dans le monde de la radiocommunication mobile.

Chaque utilisateur reçoit de la station de base une part du canal de fréquence ascendant pour une durée déterminée. Comme en liaison descendante, l'attribution se produit dans l'intervalle de transmission (TTI) d'une milliseconde (illustration 3). L'illustration 4 donne un exemple du signal de réception de la station de base de trois utilisateurs.

Comme avec l'OFDM, les données sont réparties sur les sous-porteuses, une transformation de Fourier (FT) étant appliquée comme précorrection. C'est pourquoi, dans le cas du SC-FDMA, on parle de quasi-sous-porteuses. Les quasi-sous-porteuses employées par un utilisateur sont toujours adjacentes, de sorte qu'elles forment un seul bloc. Ainsi, chaque utilisateur est modulé sur sa propre fréquence-porteuse (justement une "porteuse unique") dans le canal ascendant. Grâce à la combinaison de plusieurs utilisateurs en liaison ascendante, on obtient un accès FDMA simple, comme le montre l'illustration 4.). La répartition des quasi-sous-porteuses entre les utilisateurs est choisie par le programmeur (voir chapitre 4.1) de sorte qu'à un moment donné, dans la même cellule, le même bloc de sous-porteuses ne peut pas être utilisé par plus d'un appareil utilisateur actif.

4.4 Efficacité du spectre

L'illustration 5 montre l'évolution de l'efficacité moyenne du spectre dans une cellule radio en liaison descendante selon les différentes technologies de téléphonie mobile et les différentes versions. L'efficacité du spectre constitue une mesure pour la capacité de transmission d'une interface aérienne en bit par seconde, par largeur de bande en Hertz et par cellule (bit/s/Hz/cell), et répartie entre tous les utilisateurs dans une cellule radio.

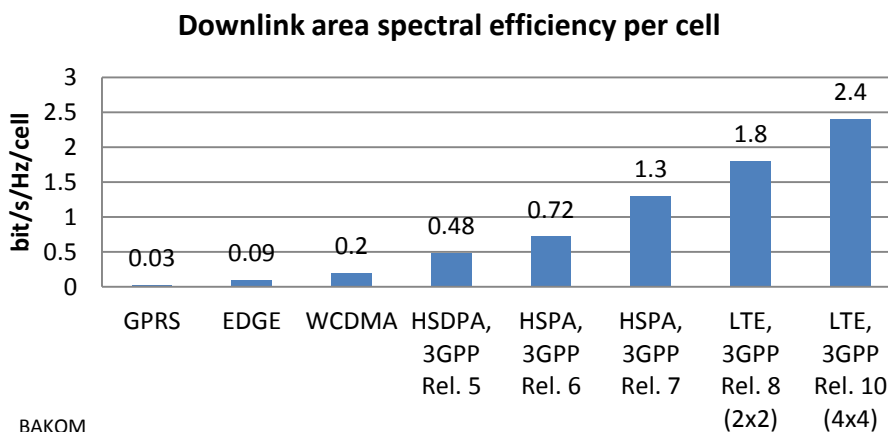


Illustration 5: Efficacité du spectre avec diverses technologies de radiocommunication mobile (3GPP)

Exemple d'efficacité du spectre: La largeur de bande d'un canal radio est de 5 MHz et l'efficacité du spectre de 1.8 bit/s/Hz/cell, avec deux antennes émettrices et deux antennes réceptrices (MIMO 2x2). La capacité de transmission *moyenne* C avec laquelle tous les utilisateurs de cette cellule radio sont

desservis au moyen du canal radio large de 5 MHz se monte donc à 9 mégabits par seconde en liaison descendante:

$$C = 5 \text{ MHz} \cdot 1.8 \frac{\text{bit}}{\text{s} \cdot \text{Hz}} = 5 \cdot 10^6 \text{ Hz} \cdot 1.8 \frac{\text{bit}}{\text{s} \cdot \text{Hz}} = 9 \cdot 10^6 \frac{\text{bit}}{\text{s}} = 9 \text{ Mbps}$$

Avec un canal radio d'une largeur de 10 MHz, toutes autres choses égales par ailleurs, la capacité *moyenne* de transmission serait doublée, pour atteindre 18 Mbps. Il convient de ne pas la confondre avec la capacité moyenne de transmission par utilisateur, qui dépend de la qualité de réception de l'utilisateur et/ou de la charge de trafic engendrée par les autres utilisateurs.

L'efficacité *maximale* du spectre ou capacité *maximale* de transmission sert surtout à des fins de marketing et de démonstration de la performance d'un système; dans la pratique, elle est moins pertinente.

4.5 Agrégation de porteuse (*Carrier Aggregation*)

A partir du LTE Version 10, jusqu'à 5 canaux adjacents ascendants et descendants peuvent être réunis dans une bande de fréquences (Intra-band contiguous – illustration 6). Le nombre de porteuses agrégées peut être différent en liaison ascendante et en liaison descendante. Logiquement, le système met les canaux réunis à disposition des couches supérieures du réseau en tant que canal unique, avec la capacité plus élevée correspondante.

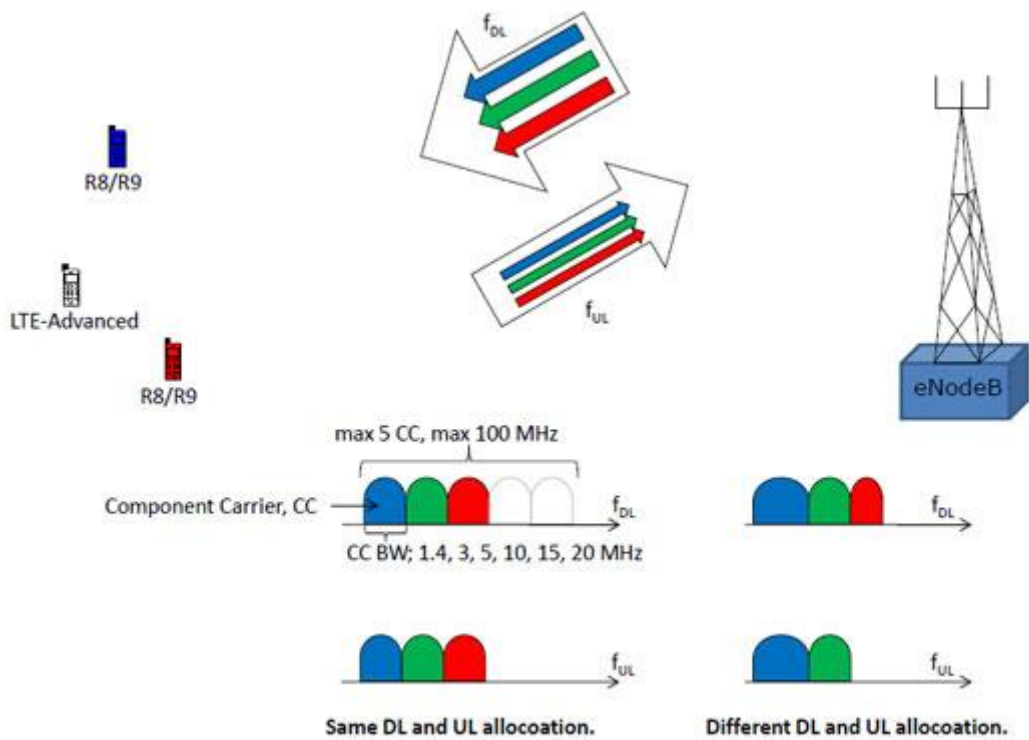


Illustration 6: Agrégation de porteuse à partir du LTE Version 10

A partir du LTE Version 11, jusqu'à cinq canaux descendants et ascendants peuvent aussi être réunis, mais dans les mêmes bandes de fréquences ou dans d'autres, voir illustration 7. [7]

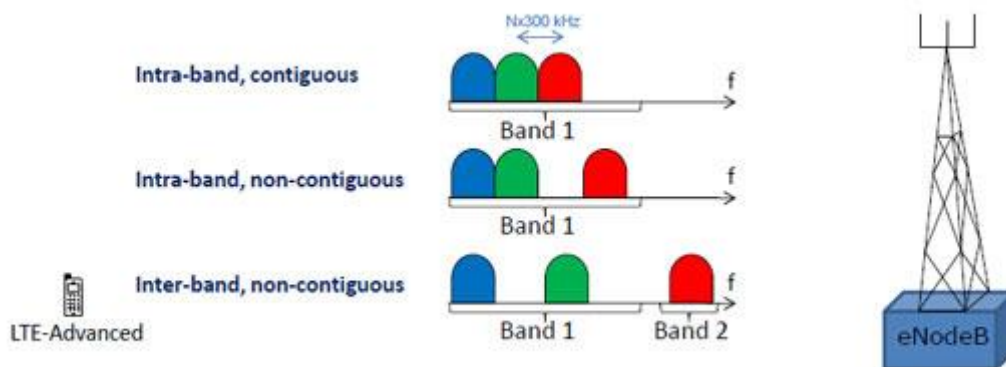


Illustration 7 Agrégation de porteuse à partir du LTE Version 11

4.6 MIMO

Les systèmes d'antennes MIMO jouent un rôle important pour le LTE. En utilisant des antennes intelligentes, il est possible d'augmenter l'efficacité du spectre. Avec le LTE, sur les stations de base et les appareils utilisateurs, les systèmes d'antennes MIMO font partie intégrante du standard. Ce n'est pas le cas avec l'UMTS.

La technologie MIMO permet la transmission parallèle et simultanée de données sur la même fréquence avec plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur grâce à l'utilisation de plusieurs antennes en émission et en réception. Plusieurs formes d'applications de MIMO sont prévues pour le LTE; elles peuvent être cataloguées comme multiplexage spatial (Space Multiplex), diversité spatiale (Space Diversity), formation de faisceaux (Beamforming - BF), ou dans une combinaison adéquate de ces dernières. Les exigences relatives à la qualité de service (QoS - chapitre 6), le débit de données, l'état du canal de téléphonie mobile et les possibilités de l'appareil utilisateur ou du type d'appareil déterminent où et quand une forme de MIMO est utilisée. Le principe est représenté schématiquement par l'illustration 8.

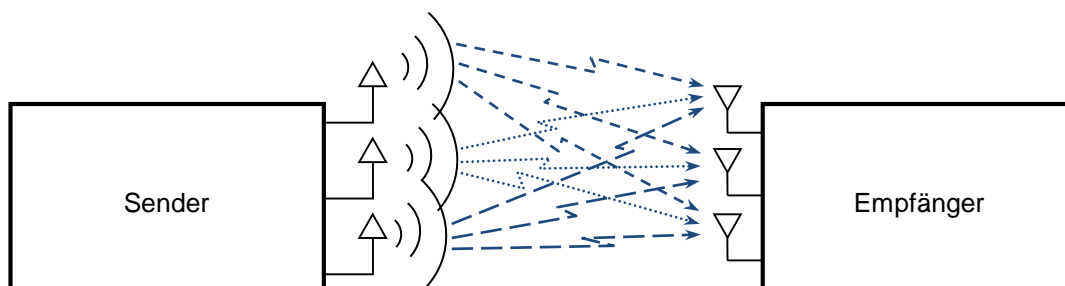


Illustration 8: Principe de la transmission multi-antennes avec MIMO (3x3)

La *diversité spatiale* permet d'améliorer sensiblement la qualité des canaux de radiocommunication en cas d'évanouissement marqué et rapide du signal. L'information rétroactive (feedback) de l'appareil utilisateur à la station de base permet une attribution optimale des ressources temporelles et en fréquences (PRB) à une liaison déterminée. Les ressources du canal (PRB) peuvent, selon un algorithme de programmation, être attribuées aux utilisateurs qui disposent des meilleures conditions momentanées du canal de transmission (Multi User Space Diversity). Ce procédé permet de maximiser aussi le débit de données moyen par utilisateur en perdant moins de temps à transmettre des données sur des canaux passagèrement mauvais. Quelques millisecondes plus tard, il est fort probable que la liaison soit meilleure. La méthode tire donc le meilleur profit de la qualité de transmission souvent fluctuante, sans que l'utilisateur final ne s'aperçoive de quoi que ce soit.

Le *multiplexage spatial* permet un très haut débit, à condition que le canal radio soit de bonne qualité (puissance de réception moyenne élevée, rapport signal-interférence (SIR) élevé et faible corrélation

entre les antennes. Le multiplexage peut être mono-utilisateur ou multi-utilisateurs. Dans les deux cas, le débit du système est le même. Avec le multiplexage spatial *mono-utilisateur*, les flux de données parallèles des différentes antennes émettrices de la station de base sont transmis à un seul utilisateur. Le nombre des flux dépend de la configuration des antennes MIMO. Un MIMO 4x4 (4 antennes en réception/émission) permet théoriquement, par exemple, un débit quatre fois plus élevé qu'un système d'antenne conventionnel (1x1). Avec le multiplexage spatial *multi-utilisateurs*, les flux de données partent de la station de base vers plusieurs utilisateurs (SDMA). Un MIMO 4x4 permet, en liaison descendante, de desservir quatre utilisateurs avec les mêmes ressources (PRB). Le débit de données par utilisateur correspond alors à un quart de celui du multiplexage spatial *mono-utilisateur*, mais le débit du système reste identique puisque 4 utilisateurs utilisent les ressources.

Le rapport entre le *multiplexage spatial* et la *diversité spatiale* a été analysé en fonction du débit du système (débit de données total dans la cellule) et du débit des utilisateurs. Avec le multiplexage spatial mono-utilisateur, il est possible d'obtenir des débits élevés pour un seul utilisateur, si le rapport signal-interférence (SIR) est élevé. Toutefois, des simulations ont montré que dans un système limité par des interférences, les zones présentant un SIR élevé sont relativement restreintes, et que le gain en termes de rendement du système avec le multiplexage spatial est relativement faible. Le multiplexage spatial mono-utilisateur peut cependant être utilisé pour des cellules isolées ou pour des utilisateurs se trouvant à proximité de la station de base, pour la transmission avec de très hauts débits. Pour les systèmes de radiocommunication mobile, en général limités par les interférences et présentant des SIR peu élevés, la *diversité spatiale* présente plus d'avantages que le *multiplexage spatial* et permet dans l'ensemble d'obtenir un débit du système plus élevé.

Avec la formation de faisceaux (beam forming), plusieurs utilisateurs peuvent être desservis simultanément avec les mêmes ressources (SDMA). Par ailleurs, de forts signaux d'interférence peuvent être supprimés.

Dans la pratique, des formes mixtes combinant les différentes applications MIMO deviendront importantes pour le LTE. Par exemple, la formation de faisceaux permet de créer des secteurs et d'y utiliser le multiplexage spatial ou la diversité spatiale, selon la qualité du canal radio et la distance entre l'utilisateur et la station de base.

5 Réseaux de téléphonie mobile

Dans un premier temps, le LTE a été utilisé pour traiter le trafic de données, en forte augmentation. Désormais, l'introduction du service vocal (VoIP) est imminente; elle a déjà eu lieu dans certains réseaux de téléphonie mobile (voir chapitre 6).

En Suisse, comme dans d'autres pays, la pénétration sur le marché d'appareils supportant le LTE et la couverture du réseau sont déjà bien avancées grâce à l'utilisation des smartphones, qui atteint environ 80%. Le trafic se déplace ainsi de plus en plus des réseaux 2G et 3G aux réseaux LTE.

Le GSM (2G) notamment gagne en importance, ce qui permet d'utiliser le spectre avec des technologies plus efficaces (bits par seconde et largeur de bande en hertz) (voir illustration 9 et chapitre 4.1).

Mobile subscriptions by technology (billion)

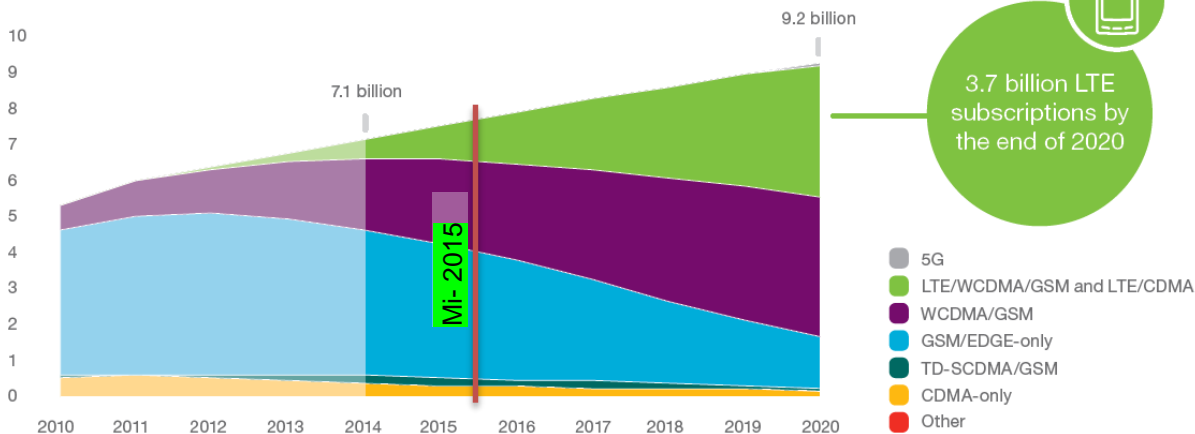


Illustration 9: Evolution des raccordements d'abonnés selon la technologie (1 billion = 1 milliard, Source: Ericsson Mobility Report, juin 2015)

Le passage du GSM/EDGE, avec une efficacité spectrale moyenne de 0.09 bit/s/Hz/cell (voir illustration 5) au HSPA Version 7, avec 1.3 bit/s/Hz/cell, ou au LTE Version 8, avec 1.8 bit/s/Hz/cell, multiplie la capacité moyenne par 10, respectivement 20, en utilisant la même largeur de bande. La plupart du temps, le GSM/EDGE est remplacé dans la bande des 900 MHz par l'UMTS/HSPA+ et, dans la bande des 1800 MHz, par le LTE et le LTE-A.

Le rôle des différentes couches (à savoir différents rayons de cellules) appliquées dans les réseaux de téléphonie mobile est affiné par le LTE. Après les macro-cellules, dont le rayon atteint parfois 10 kilomètres dans les zones rurales, et vu les volumes croissants de trafic, les petites cellules de couverture du réseau (les microcellules et les pico-cellules) gagnent en importance. Dans les zones urbaines et suburbaines, selon la densité du trafic des communications mobiles, le rayon de la cellule est parfois bien inférieur à 2 kilomètres.

Les pico-cellules ont une portée similaire à celle des téléphones sans fil (DECT), à savoir environ 60 mètres dans les bâtiments et 250 mètres à l'extérieur. Les microcellules, les pico-cellules et les femto-cellules ont pour but premier de décharger les couches de macro-cellules. La réception et l'acheminement rapide du trafic mobile par le DSL, par les réseaux coaxiaux et optiques (FTTx) et par les faisceaux hertziens dans le réseau central déchargent le réseau de macro-cellules en cas de fort trafic.

Une partie importante du volume total échangé sur les réseaux mobiles circule à l'intérieur des bâtiments (p. ex. à la maison, au bureau), c'est-à-dire à proximité immédiate des raccordements au réseau fixe. Les installations prévues pour l'intérieur et la desserte dans les tunnels, les magasins et les parkings sont déjà très répandues, mais ne supportent pas encore les grandes cellules LTE. Le changement de paradigme n'est qu'une question de temps: La desserte indoor-out (de l'intérieur vers l'extérieur) doit s'appuyer sur ces femtocellules et le trafic de téléphonie mobile – notamment les énormes volumes de données attendus – doit être amené le plus près possible de la source dans le réseau central ou le réseau fixe. La desserte d'utilisateurs à proximité de bâtiments n'est pas prioritaire. La stratégie appliquée jusqu'ici pour la desserte outdoor-in, à savoir que la desserte à l'intérieur des bâtiments est assurée par une station de base située à l'extérieur, doit être complétée. Le but visé est de desservir les utilisateurs à l'extérieur au moyen de cellules à l'extérieur et les utilisateurs à l'intérieur par des petites cellules à l'intérieur. C'est ce que l'on appelle un réseau hétérogène. [11]

Dans les réseaux comprenant un grand nombre de stations de base, comme c'est le cas dans les réseaux hétérogènes, la signalisation représente un défi majeur. La norme LTE contient donc déjà des modifications qui concernent en particulier la signalisation.

La norme LTE contient des fonctions relatives à l'auto-organisation du réseau (Self Organising Network – SON) et à l'évitement des interférences par la gestion des ressources radio (Radio Resource Management – RRM) et la coordination des interférences intercellulaires (Inter-Cell Interference Coordination – ICIC). Ces fonctions réduisent les interférences entre les cellules et simplifient la planification du réseau, ce qui permet de continuer à augmenter le débit tout en diminuant les coûts. [10]

6 Services

La liste des services est courte, car ceux-ci sont tous fournis au moyen du protocole internet (IP). Le réseau de raccordement (LTE) et le réseau central (EPC, EPS, SAE) ne fonctionnent plus par commutation de circuit; les services vocaux proposés par les opérateurs de réseau sont fournis au moyen du "Managed VoIP"⁹, comme le VoLTE.

Il n'existe pas encore de service de communication vocale dans la norme 3GPP LTE. C'est pourquoi les fournisseurs d'équipements réseau proposent différentes solutions propriétaires.

Une solution de plus en plus répandue est la norme industrielle "Voice over LTE" (VoLTE), conçue par la GSM Association (GSMA). Cette association d'exploitants de réseaux mobiles et de fournisseurs d'équipements réseau normalise les services vocaux et les SMS en se basant sur l'IP Multimedia System (IMS). L'IMS constitue le "Service Cloud" de l'exploitant. Pour sa part, le Service Cloud est une composante de l'architecture des services (SAE). [8]

En Suisse, le VoLTE a été utilisé par un exploitant pour la première fois mi-2015. En mai 2015, les modèles haut-de-gamme de smartphones supportaient le VoLTE.

Le système 3GPP distingue les classes de trafic standardisées (traffic class) et la qualité des services (QoS). Ces deux éléments sont caractérisés notamment par:

- le temps de latence (delay)
- le taux d'erreurs sur les bits/paquets (BER/PER)
- la priorité
- le débit de données minimum garanti (GBR)
- l'ordre de l'acheminement de paquets

Par exemple, les paquets de données d'un service VoIP requièrent avant tout un court temps de latence lors de la transmission et un débit minimum pour garantir la qualité du service vocal; le taux d'erreur sur les paquets n'est pas très important, alors qu'il l'est pour le téléchargement de fichiers. Le tableau 2 montre, pour plusieurs applications, des exemples d'exigences concernant les attributs de QoS. [9]

Application	Priorité	Temps de latence maximum	Taux d'erreurs sur les paquets (PER)	Débit de données minimal garanti (GBR)
VoIP	2	100 ms	0.1 %	Oui, p. ex. 172 kbps
Navigation sur l'internet	8	300 ms	0.0001 %	Non

Tableau 2: Exemples d'attributs QoS pour différents services

⁹ VoIP signifie que l'exploitant assure la qualité vocale par des mesures adéquates.

7 Références

- [1] 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network; *User Equipment (UE) radio transmission and reception*. 3GPP TS 36.104 Releases 8, 9 ,10, 11, 12
- [2] 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network; *Base Station (BS) radio transmission and reception*. 3GPP TS 36.104 Releases 8, 9 ,10, 11, 12
- [3] Seidel E. (2008): *3GPP Long Term Evolution, LTE The Future UMTS Standard*. CEI-Europe
- [4] Seisa S. / Toufik I. / Baker M. (2009): *LTE, The UMTS Long Term Evolution*. Wiley
- [5] Holma H. / Toskala A. (2011): *LTE for UMTS, Evolution to LTE-Advanced*. Wiley
- [6] Holma H. / Toskala A. (2012): *LTE-Advanced, Solution for IMT-Advanced*. Wiley
- [7] Wannstrom J. (2013): *Carrier Aggregation explained*. 3GPP
<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained>
- [8] GSM Association (2013): *IR.92 - IMS Profile for Voice and SMS Version 7.0*. GSMA
<http://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/2013/04/IR.92-v7.0.pdf>
- [9] 3GPP Technical Specification Group Services and System Aspects; *Quality of Service (QoS) concept and architecture*. 3GPP TS 23.107
- [10] Volker P. / Seidel E. (2011): *Inter-Cell Interference Coordination for LTE-A*. Nomor Research GmbH
<http://www.nomor.de/uploads/1d/19/1d196a493af5511cc92466089924cc5c/2011-09-WhitePaper-LTE-A-HetNet-ICIC.pdf>
- [11] Qualcomm (2015): *The 1000x data challenge*. <https://www.qualcomm.com/invention/1000x>
- [12]