

Sous la direction de Guy Pujolle

LTE et les réseaux 4G

Yannick Bouguen

Éric Hardouin

François-Xavier Wolff

Préface d'Alain Maloberti

© Groupe Eyrolles, 2012, ISBN : 978-2-212-12990-8

EYROLLES



LTE, la révolution de l'UMTS

Sommaire : *Le contexte historique – Les motivations pour l'introduction du LTE – Le processus de normalisation au sein du 3GPP – Les exigences définies par le 3GPP – Les bandes de fréquences pour le LTE – Les services – Les performances du LTE*

Ce chapitre présente, dans un premier temps, les étapes majeures du développement des réseaux mobiles, de leurs premiers pas dans les années 1970 à leurs dernières évolutions. Ces rappels permettront de mieux appréhender le contexte d'émergence du LTE (*Long Term Evolution*), qui constitue un système dit de *quatrième génération*. Puis, les motivations pour la définition d'une nouvelle génération de systèmes mobiles sont examinées. C'est ensuite le processus de normalisation du LTE au sein du 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) qui est décrit, ainsi que les objectifs ayant présidé à sa conception. Nous présentons alors les fréquences allouées au LTE, ainsi que les services envisagés grâce à cette nouvelle technologie. Les performances atteintes par le LTE sont quantifiées. Nous terminons par un aperçu des évolutions du LTE depuis sa version initiale.

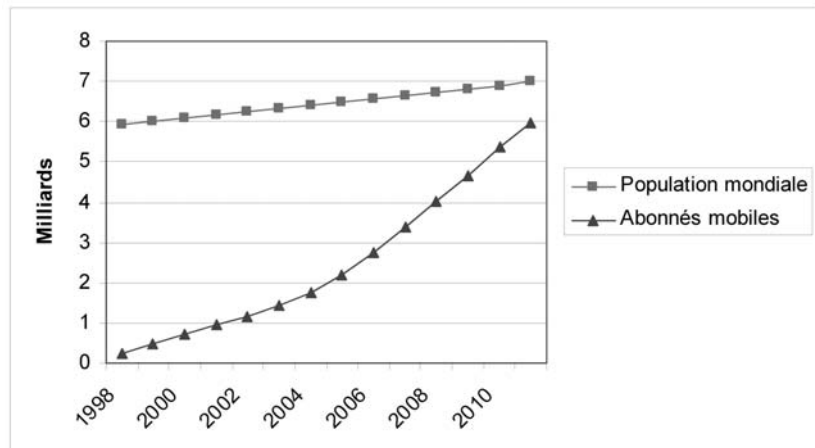
Un peu d'histoire

En l'espace d'une vingtaine d'années, l'usage des services de communications mobiles a connu un essor remarquable. La figure suivante illustre l'évolution du nombre d'abonnés mobiles au regard de la population mondiale : on compte à fin 2011 près de 6 milliards d'abonnés à travers le monde, soit 87 % de la population mondiale [UIT, 2012]. C'est véritablement un nouveau secteur de l'industrie mondiale qui s'est créé, regroupant notamment constructeurs de circuits électroniques, constructeurs de terminaux mobiles, constructeurs d'infrastructures de réseaux, développeurs d'applications et de services et opérateurs de réseaux mobiles.

Conçues à l'origine pour offrir un service de téléphonie mobile uniquement, les technologies de communications radio mobiles ont considérablement évolué et permettent désormais une

connexion haut-débit en situation de *mobilité*. Les réseaux mobiles complètent ainsi les réseaux d'accès résidentiels tels que x-DSL (*x-Digital Subscriber Line*) et FTTH (*Fiber To The Home*) pour l'accès haut-débit à Internet. Les utilisateurs de terminaux mobiles peuvent naviguer sur le Web, utiliser leurs applications et services préférés, consulter leurs courriels, télécharger des vidéos, de la musique, regarder la télévision, partager des photos, tout cela sur le même terminal et en mobilité. Ainsi, cette dernière n'est plus un frein à l'accès aux contenus numériques. Dans certains pays dépourvus de réseau fixe fiable et développé, les réseaux mobiles se substituent même aux réseaux résidentiels et sont l'unique moyen d'accéder à Internet.

Figure 1-1
Évolution du nombre d'abonnés
mobiles à travers le monde



Quelques rappels techniques

L'histoire des réseaux mobiles est relativement récente puisque l'ouverture commerciale du premier réseau mobile fut annoncée en 1979 au Japon. Jusque-là, l'état de l'art en matière d'électronique et de micro-ondes n'autorisait pas l'émission/réception radio avec un équipement portable. Les progrès majeurs réalisés dans ces domaines ont permis de réduire de manière drastique la taille des terminaux.

Le premier réseau mis en service était déjà basé sur le concept de *motif cellulaire*, concept défini au sein des *Bell Labs* au début des années 1970. Cette technique est une composante technologique clé des réseaux mobiles car elle permet de réutiliser les ressources du réseau d'accès radio sur plusieurs zones géographiques données appelées *cellule*. À une cellule est ainsi associée une ressource radio (une fréquence, un code...) qui ne pourra être réutilisée que par une cellule située suffisamment loin afin d'éviter tout conflit intercellulaire dans l'utilisation de la ressource. Conceptuellement, si une cellule permet d'écouler un certain nombre d'appels simultanés, le nombre total d'appels pouvant être supportés par le réseau peut être contrôlé en dimensionnant les cellules selon des tailles plus ou moins importantes. Ainsi, la taille d'une cellule située en zone urbaine est habituellement inférieure à celle d'une cellule située en zone rurale. Les réseaux mobiles sont tous basés sur ce concept de cellule, c'est pourquoi ils sont aussi appelés *réseaux cellulaires*.

Une cellule est contrôlée par un émetteur/récepteur appelé *station de base*, qui assure la liaison radio avec les terminaux mobiles sous sa zone de couverture. La couverture d'une station de base est limitée par plusieurs facteurs, notamment :

- la puissance d'émission du terminal mobile et de la station de base ;
- la fréquence utilisée ;
- le type d'antennes utilisé à la station de base et au terminal mobile ;
- l'environnement de propagation (urbain, rural, etc.) ;
- la technologie radio employée.

Une cellule est communément représentée sous la forme d'un hexagone ; en effet, l'hexagone est le motif géométrique le plus proche de la zone de couverture d'une cellule qui assure un maillage régulier de l'espace. Dans la réalité, il existe bien entendu des zones de recouvrement entre cellules adjacentes, qui créent de *l'interférence intercellulaire*.

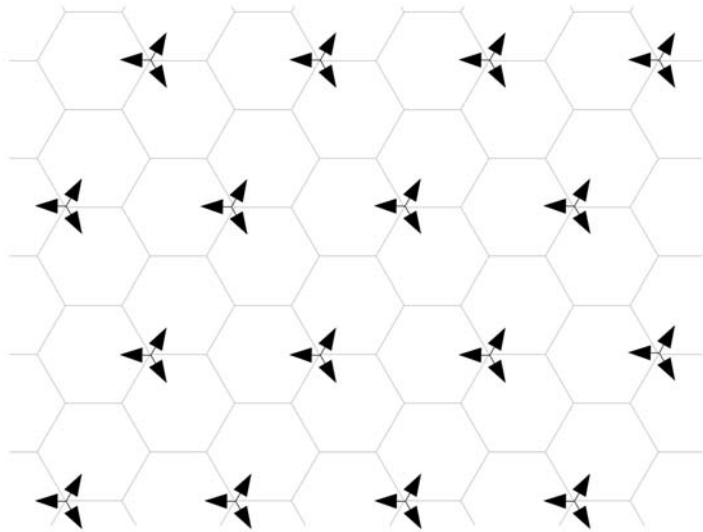
On distingue plusieurs types de cellules en fonction de leur rayon de couverture, lié à la puissance d'émission de la station de base, et de leur usage par les opérateurs.

- Les *cellules macro* sont des cellules larges, dont le rayon est compris entre quelques centaines de mètres et plusieurs kilomètres. Les cellules macro couvrent l'ensemble d'un territoire de manière régulière et forment ainsi l'ossature de la couverture d'un réseau mobile. Elles sont contrôlées par des *stations de base macro* dont la puissance est typiquement de 40 W (46 dBm) pour une largeur de bande de 10 MHz. Leurs antennes sont placées sur des points hauts, comme des toits d'immeubles ou des pylônes.
- Les *cellules micro* sont des cellules de quelques dizaines à une centaine de mètres de rayon, destinées à compléter la couverture des cellules macro dans des zones denses ou mal couvertes. Les stations de base associées sont appelées des *stations de base micro* et leur puissance est de l'ordre de 10 W (40 dBm). Leurs antennes sont typiquement placées sous le niveau des toits, généralement en façade de bâtiments.
- Les *cellules pico* poursuivent le même but que les cellules micro, mais sont associées à des puissances plus faibles, de l'ordre de 0,25 à 5 W (24 à 37 dBm). Elles peuvent notamment servir à couvrir des *hot spots*, ou de grandes zones intérieures (*indoor*), tels que des aéroports ou des centres commerciaux. Les antennes des *stations de base pico* peuvent être placées comme celles des stations de base micro, ou au plafond ou contre un mur à l'intérieur de bâtiments.
- Les *cellules femto* sont de petites cellules d'une dizaine de mètres de rayon, principalement destinées à couvrir une habitation ou un étage de bureaux. Elles sont associées à des puissances faibles, de l'ordre d'une centaine de mW (20 dBm), et sont généralement déployées à l'intérieur des bâtiments.

Chaque station de base requiert un site radio, habituellement acquis ou loué par l'opérateur de réseaux mobiles, à l'exception des stations de base femto qui peuvent être déployées par l'utilisateur. On notera que seules les cellules macro sont généralement déployées selon un motif cellulaire régulier, les autres types de cellules venant dans la plupart des cas seulement compléter localement la couverture, formant alors un réseau dit *hétérogène*.

Afin de minimiser le nombre de stations de base macro, on utilise communément la *trisection*. Ce déploiement consiste pour une station de base à mettre en œuvre un système d'émission/réception dans trois directions distinctes appelées *azimuths*. Ceci s'effectue au moyen d'antennes directionnelles, chaque antenne pointant dans une direction donnée. Le schéma suivant présente une topologie commune de réseau macrocellulaire et illustre le concept de trisection, chaque flèche représentant la direction de pointage d'une antenne et chaque hexagone représentant une cellule. Dans le cas de la trisection, une cellule est aussi appelée un *secteur*. Notons que dans la réalité, notamment en milieu urbain, les cellules ne sont pas disposées selon un motif aussi régulier et peuvent être de formes variées en fonction de la propagation locale.

Figure 1-2
Topologie d'un réseau cellulaire
trisectionné à structure hexagonale



L'*architecture* d'un réseau mobile inclut trois entités fonctionnelles :

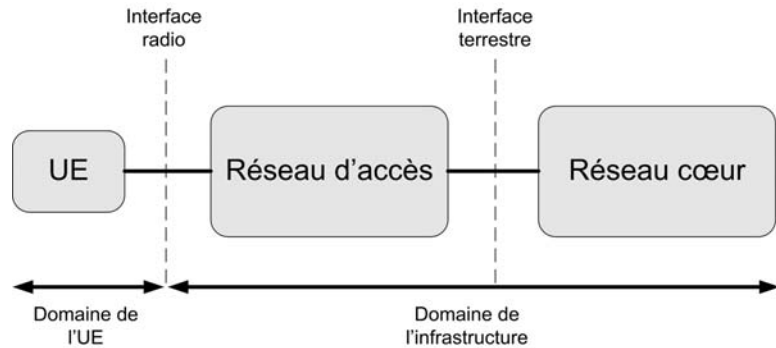
- le terminal mobile, appelé aussi équipement utilisateur (ou usager), abrégé en UE (*User Equipment*) ;
- le réseau d'accès ou RAN (*Radio Access Network*) ;
- le réseau cœur ou CN (*Core Network*).

On distingue également deux domaines :

- le domaine de l'UE, qui inclut les équipements propres à l'utilisateur ;
- le domaine de l'infrastructure, constitué des équipements propres à l'opérateur.

La figure suivante présente la structure d'un réseau mobile. L'UE fait partie du domaine de l'équipement utilisateur et est interconnecté au réseau d'accès par l'intermédiaire de l'interface radio. L'élément d'interconnexion du réseau d'accès avec l'interface radio est la station de base. Le réseau d'accès et le réseau cœur sont rattachés au domaine de l'infrastructure et sont interconnectés par une ou plusieurs interfaces terrestres. Nous précisons au chapitre 2 la répartition fonctionnelle entre UE, réseau d'accès et réseau cœur pour le LTE.

Figure 1-3
Structure d'un réseau mobile



L'histoire des réseaux mobiles est jalonnée par trois étapes principales, auxquelles on donne couramment le nom de *génération*. On parle des première, deuxième et troisième générations de réseaux mobiles, généralement abrégées respectivement en 1G, 2G et 3G. Ces trois générations diffèrent principalement par les techniques mises en œuvre pour accéder à la ressource radio.

L'évolution de ces techniques est guidée par la volonté d'accroître la *capacité* ainsi que les *débits* offerts par le système dans une bande de fréquences restreinte. En effet, les fréquences sont des ressources très rares car convoitées par de multiples applications (télévision, radio, faisceaux hertziens, liaisons satellites, réseaux privés, communications militaires, etc.). Dans les différents pays du monde, le spectre disponible au début des années 1980 était déjà très limité. Aussi le développement des réseaux mobiles a été, et est toujours, principalement conditionné par la capacité des ingénieurs à tirer le meilleur parti des ressources spectrales disponibles. Initialement, la capacité des réseaux mobiles se traduisait par le nombre maximal de communications téléphoniques pouvant être maintenues simultanément sous couverture d'une même cellule. De nos jours, avec le développement de l'usage des services de données, la capacité d'un réseau se matérialise aussi par le nombre d'utilisateurs pouvant être connectés simultanément aux services de données, ainsi que par le débit moyen par utilisateur lors d'une session de transfert de données. Plus généralement, la capacité d'un réseau peut être représentée par le débit total maximal pouvant être écoulé par une cellule fortement chargée.

La liaison entre l'UE et la station de base est spécifique au sens de transmission entre ces deux entités. En effet, l'UE dispose typiquement d'une puissance d'émission inférieure à celle de la station de base, d'antennes moins performantes et de ressources de calcul moindres, qui limitent la complexité des traitements du signal mis en œuvre. On distingue ainsi deux voies de communication :

- la *voie montante* ou UL (*UpLink*), où l'UE transmet vers la station de base ;
- la *voie descendante* ou DL (*DownLink*), où la station de base transmet vers l'UE.

Un autre élément caractérisant un système mobile est la technique de séparation entre la voie montante et la voie descendante. Cette technique est aussi appelée le *duplexage*. Deux modes de duplexage sont possibles.

- Dans le duplexage en fréquence ou mode FDD (*Frequency Division Duplex*), les voies montante et descendante opèrent sur des fréquences différentes.

- Dans le duplexage en temps ou mode TDD (*Time Division Duplex*), les voies montante et descendante opèrent sur les mêmes fréquences mais sont séparées dans le temps. Le mode TDD requiert une synchronisation temporelle entre les stations de base, exigeance parfois complexe à garantir d'un point de vue opérationnel.

Les réseaux mobiles de première génération

La première génération de réseaux mobiles émerge au cours des années 1980 et est caractérisée par une multitude de technologies introduites en parallèle à travers le monde. On peut citer les technologies suivantes :

- AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) aux États-Unis ;
- TACS (*Total Access Communication System*) au Japon et au Royaume-Uni ;
- NMT (*Nordic Mobile Telephone*) dans les pays scandinaves ;
- Radiocom2000 en France ;
- C-NETZ en Allemagne.

Ces systèmes devaient offrir un service de téléphonie en mobilité. Ils ne parvinrent pas à réellement franchir les frontières de leurs pays d'origine et aucun système ne s'imposa en tant que véritable norme internationale. Cette hétérogénéité résultait principalement des cloisonnements nationaux en vigueur à l'époque dans le domaine des télécommunications. Elle impliquait de fait l'incompatibilité des systèmes et l'impossibilité d'itinérance internationale (aussi appelée *roaming*). Cet échec relatif fut primordial dans la reconnaissance par les différents pays de la nécessité de définir des normes de téléphonie mobile à l'échelle internationale.

D'un point de vue technique, ces systèmes étaient basés sur un codage et une modulation de type analogique. Ils utilisaient une technique d'accès multiples appelée FDMA (*Frequency Division Multiplex Access*), associant une fréquence à un utilisateur. La capacité de ces systèmes demeurait très limitée, de l'ordre de quelques appels voix simultanés par cellule. Cette contrainte de capacité, ainsi que les coûts élevés des terminaux et des tarifs de communication ont restreint l'utilisation de la 1G à un très faible nombre d'utilisateurs (60 000 utilisateurs de Radiocom2000 en 1988 en France). Par ailleurs, les dimensions importantes des terminaux limitaient significativement leur portabilité.

Les réseaux mobiles de deuxième génération

La deuxième génération de réseaux mobiles (2G) est elle aussi marquée par le nombre de systèmes ayant été définis et déployés à travers le monde. On retrouve le GSM (*Global System for Mobile communications*) en Europe, le PDC (*Personal Digital Communications*) au Japon et l'IS-95 aux États-Unis. Ces systèmes, dans leurs versions initiales, donnaient accès au service voix en mobilité, mais aussi aux messages textes courts plus connus sous le nom de SMS (*Short Message Service*). En complément, ces systèmes permettaient des transferts de données à faible débit. Les progrès technologiques réalisés dans la conception de circuits hyperfréquences et de dispositifs de traitement numérique du signal permirent une réduction drastique de la taille des terminaux, autorisant une réelle mobilité.

De ces trois systèmes, le GSM est celui qui a rencontré le plus large succès. Il fut déployé dans un grand nombre de pays, permettant l'itinérance entre ces derniers. Ce succès fut rendu possible par une démarche de normalisation mise en place au niveau européen au début des années 1990. Les pays européens avaient su en effet tirer les enseignements des écueils de la 1G en matière d'incompatibilité des systèmes. L'assurance d'une itinérance au sein des pays européens, ainsi que des coûts de production réduits via des économies d'échelle liées à la taille du marché, incitèrent d'autres pays à adopter cette technologie. Le GSM devint ainsi le premier système déployé sur quasiment l'ensemble du globe. En 2012, on compte 212 pays possédant au moins un réseau GSM. Par ailleurs, les réseaux GSM déployés à travers le monde couvrent plus de 90 % de la population mondiale [GSMA, 2012].

Les systèmes 2G ont pour principal point commun d'être basés sur des codages et des modulations de type numérique : le signal de parole est transformé en un train de bits avant modulation et transmission sur l'interface radio. L'introduction du numérique dans les technologies radio mobiles fut l'élément qui permit le net accroissement de la capacité des réseaux, grâce aux puissants traitements mathématiques du signal qu'il autorise. Par ailleurs, des techniques d'accès multiple plus élaborées que le FDMA furent employées. GSM et PDC sont par exemple basés sur une répartition en fréquences FDMA entre les cellules, combinée à une répartition en temps sur la cellule appelée TDMA (*Time Division Multiple Access*). D'autre part, les voies montante et descendante sont séparées en fréquence (mode FDD). L'IS-95 utilise une répartition par codes appelée CDMA (*Code Division Multiple Access*). Ces techniques accrurent largement l'efficacité spectrale des systèmes, c'est-à-dire le débit pouvant être écoulé par Hertz par cellule. À titre d'exemple, une cellule GSM peut supporter une cinquantaine d'appels voix simultanés et ce chiffre double quasiment si le schéma de codage de la voix est réduit au format demi-débit (*half-rate*).

Le succès des systèmes 2G fut et demeure considérable. Fin 2011, plus de deux tiers des utilisateurs de services mobiles sont connectés via un terminal 2G. Ce succès s'explique d'une part par le gain des réseaux en capacité, mais aussi par l'ouverture du marché des télécommunications mise en œuvre dans de nombreux pays au cours des années 1990. Cette nouvelle donne a introduit la concurrence au sein de marchés jusqu'alors monopolistiques, réduisant de manière significative les tarifs en vigueur. En outre, l'adoption du GSM par un grand nombre de pays a conduit à faire baisser les coûts de production des équipements, contribuant ainsi à la démocratisation de la technologie.

Les systèmes 2G présentent toutefois plusieurs limites. La plus importante est d'ordre capacitaire, impliquant des rejets d'appels aux heures les plus chargées de la journée malgré la densification des réseaux. La seconde est d'ordre fonctionnel. À ses débuts, le GSM utilisait un réseau cœur à commutation de circuit par lequel l'accès aux services de données était particulièrement lent. Afin d'accroître les débits fournis, le réseau d'accès GSM fut connecté à un réseau cœur appelé GPRS (*General Packet Radio Service*). Cette évolution améliora la prise en charge des services de données. En complément de ce développement, la technologie d'accès radio EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) rendit possible des débits de l'ordre de 240 Kbit/s par cellule grâce à l'amélioration des techniques d'accès au canal radio. Toutefois, à la fin des années 1990, les débits fournis par les réseaux 2G étaient encore trop limités pour que l'accès aux services de données soit fluide. Cette limitation fut à l'origine de la définition des technologies 3G.

Les réseaux mobiles de troisième génération

La troisième génération de réseaux mobiles (3G) regroupe deux familles de technologies ayant connu un succès commercial : l'UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), issu du GSM et largement déployé autour du globe, et le CDMA2000, issu de l'IS-95 et déployé principalement en Asie et en Amérique du Nord. Les interfaces radio de ces deux familles reposent sur des caractéristiques techniques proches, notamment un schéma d'accès multiples à répartition par les codes (CDMA). Dans ce qui suit, nous nous concentrons sur l'UMTS, car c'est cette famille de technologies qui va donner naissance au LTE.

L'UMTS

La 3G est caractérisée par la volonté des industriels de télécommunications de définir une norme au niveau mondial. Les enjeux étaient d'offrir une itinérance globale aux utilisateurs, mais également de réduire les coûts unitaires des terminaux mobiles et des équipements de réseau grâce aux économies d'échelle. Dans cette perspective, ces entreprises, en particulier celles issues du monde GSM, se sont regroupées au sein d'un consortium appelé 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), dont l'organisation est détaillée plus loin dans ce chapitre. Cette démarche aboutit à l'élaboration de la norme UMTS à la fin des années 1990. Cette première version de la norme est appelée Release 99. Les innovations associées au système UMTS ont principalement trait au réseau d'accès, celui-ci s'interfaçant avec le réseau cœur GPRS. Les objectifs de l'UMTS étaient d'accroître la capacité du système pour le service voix mais surtout d'améliorer le support des services de données.

L'UMTS Release 99 utilise la technologie W-CDMA (*Wideband CDMA* ou *CDMA large bande*). Cette dernière est basée sur une technique d'accès multiples CDMA et supporte les deux schémas de duplexage FDD et TDD. Le signal utile est étalé sur une largeur de bande de 3.84 MHz avant mise sur porteuse (d'où le nom de *large bande*), une porteuse occupant un canal de 5 MHz. Chaque appel est associé à un code spécifique connu de la station de base et du terminal, qui permet de le différencier des autres appels en cours sur la même porteuse. Le W-CDMA autorise la connexion simultanée à plusieurs cellules, renforçant la qualité des communications lors du changement de cellule en mobilité. La Release 99 est limitée à un débit maximal de 384 Kbits/s dans les sens montant et descendant.

Une variante de l'UMTS TDD, appelée TD-SCDMA (*Time Division Synchronous CDMA*), est également normalisée par le 3GPP. Cette technologie opère sur une largeur de bande de 1.28 MHz, et est principalement déployée en Chine.

L'UMTS connaît deux évolutions majeures que nous présentons brièvement dans les sections suivantes :

- Le HSPA (*High Speed Packet Access*) ;
- Le HSPA+ (*High Speed Packet Access+*).

Les évolutions HSPA

Rapidement, la volonté apparut d'effacer les limites de la Release 99 en matière de débits. Les évolutions HSPA, aujourd'hui connues commercialement sous le nom de 3G+, furent introduites :

- HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) pour la voie descendante ;
- HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) pour la voie montante.

Ces évolutions ont été définies par le 3GPP respectivement en Release 5 (2002) et Release 6 (2005) afin d'accroître les débits possibles et de réduire la *latence* du système. La latence désigne le temps de réponse du système à une requête de l'utilisateur, et est un facteur clé de la perception des services de données par l'utilisateur.

L'innovation principale du HSPA concerne le passage d'une commutation circuit sur l'interface radio, où des ressources radio sont réservées à chaque UE pendant la durée de l'appel, à une commutation par paquets, où la station de base décide dynamiquement du partage des ressources entre les UE actifs. L'allocation dynamique des ressources est effectuée par la fonction d'ordonnement ou *scheduling*, en fonction notamment de la qualité instantanée du canal radio de chaque UE, de ses contraintes de qualité de service, ainsi que de l'efficacité globale du système. La commutation par paquets optimise ainsi l'usage des ressources radio pour les services de données. La modulation et le codage sont rendus adaptatifs afin de s'adapter aux conditions radio de l'UE au moment où il est servi, les débits instantanés étant accrus via l'utilisation de modulations à plus grand nombre d'états qu'en Release 99. La modulation 16QAM (*16 Quadrature Amplitude Modulation*) est introduite pour la voie descendante en complément de la modulation QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) en vigueur en Release 99. De même, la modulation QPSK est introduite pour la voie montante en complément de la modulation BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) utilisée en Release 99. Enfin, un nouveau mécanisme de retransmission rapide des paquets erronés, appelé HARQ (*Hybrid Automatic Response reQuest*), est défini entre l'UE et la station de base, afin de réduire la latence du système en cas de perte de paquets. Ces évolutions offrent aux utilisateurs des débits maximaux de 14,4 Mbit/s en voie descendante et de 5,8 Mbit/s en voie montante, ainsi qu'une latence réduite.

Les évolutions HSPA+

Dans certains pays tels que le Japon et les États-Unis, la technologie UMTS et ses évolutions HSPA ont cependant commencé à montrer leurs limites en termes de capacité. La mise sur le marché de terminaux attractifs comme les smartphones et l'introduction de nouveaux services impliquant une connexion quasi-continue au réseau sont des facteurs qui ont mené à un essor brutal des usages et du trafic à écouler par les réseaux. On fait à présent référence aux utilisateurs toujours connectés ou *always-on*. Cette augmentation du trafic implique un partage des ressources entre les utilisateurs et, dans certains cas, une réduction des débits qui leur sont délivrés. Avec l'augmentation de la charge des réseaux, la qualité de service fournie aux clients se dégrade, ce qui pose un véritable problème aux opérateurs de réseaux mobiles. Deux pistes ont été suivies par le 3GPP afin de répondre à ces contraintes :

- la définition d'évolutions du HSPA, appelées HSPA+ ;
- la définition du LTE.

HSPA+ est un terme qui regroupe plusieurs évolutions techniques visant principalement à améliorer :

- les débits fournis aux utilisateurs et la capacité du système ;
- la gestion des utilisateurs *always-on*.

Le HSPA+ a été normalisé par le 3GPP au cours des Releases 7 (2007) et 8 (2008). L'amélioration des débits et de la capacité est rendue possible par l'introduction de nouvelles techniques. En voie descendante, la modulation 64QAM est désormais prise en charge, de même que la modulation 16QAM en voie montante. En complément, une cellule peut transmettre des données à un utilisateur sur deux porteuses simultanément en voie descendante, à l'aide de la fonctionnalité DC-HSDPA (*Dual Carrier – HSDPA*). Le spectre supportant la transmission n'est donc plus limité à 5 MHz mais à 10 MHz. Les débits fournis à l'utilisateur sont potentiellement doublés. De plus, la largeur de bande plus élevée permet au système une gestion plus efficace des ressources spectrales. La fonctionnalité MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) est également introduite pour améliorer les débits en voie descendante. Les utilisateurs *always-on* sont mieux pris en compte via des fonctionnalités regroupées sous le terme de CPC (*Continuous Packet Connectivity*). Le HSPA+ intègre enfin une option d'architecture qui réduit la latence du système via la suppression du contrôleur de stations de base pour les services de données. Les évolutions HSPA+ apportent ainsi des gains très significatifs en termes de débits, de capacité et de latence et renforcent la pérennité des réseaux 3G.

État des lieux de l'UMTS

Le tableau suivant dresse une comparaison non exhaustive des technologies 3GPP hors LTE jusqu'à la Release 8.

Comparaison des technologies GSM, UMTS Release 99, HSPA et HSPA+ Release 8
[UMTS forum, 2010]

	GSM/GPRS/EDGE	UMTS Release 99	HSPA	HSPA+ Release 8
Débit maximal UL	118 Kbit/s	384 Kbit/s	5,8 Mbit/s	11,5 Mbit/s
Débit maximal DL	236 Kbit/s	384 Kbit/s	14,4 Mbit/s	42 Mbit/s
Latence	300 ms	250 ms	70 ms	30 ms
Largeur de canal	200 kHz	5 MHz	5 MHz	5 MHz avec possibilité de deux canaux simultanés
Technique d'accès multiples	FDMA/TDMA	CDMA	CDMA/TDMA	CDMA/TDMA
Modulation DL Modulation UL	GMSK 8PSK	QPSK BPSK	QPSK, 16QAM BPSK, QPSK	QPSK, 16QAM, 64QAM BPSK, QPSK, 16QAM
Bandes de fréquences usuelles (MHz)	900/1800	900/2100	900/2100	900/2100

L'UMTS et son évolution HSPA sont aujourd'hui largement déployés sur tous les continents. Ils ont rencontré un succès commercial croissant en lien avec le développement de nouveaux usages (Internet mobile, TV, vidéo, applications mobiles...) mais aussi grâce à l'arrivée de nouveaux terminaux favorisant ces usages (smartphones, clés 3G+, modules intégrés aux ordinateurs portables).

Vers le LTE

Le LTE a été envisagé dès novembre 2004 comme l'évolution à long terme de l'UMTS (d'où son nom de *Long Term Evolution*), lors d'un atelier organisé par le 3GPP appelé *Future Evolution Workshop*. Cette évolution était alors destinée à maintenir la compétitivité de l'UMTS sur un horizon de dix ans et au-delà [NTT DoCoMo *et al.*, 2004]. Les travaux sur cette nouvelle norme ont débuté au 3GPP en janvier 2005 avec une étude de faisabilité, qui s'est conclue en septembre 2006 avec la définition des grands principes de la technologie LTE [3GPP 25.912, 2006]. Les travaux de spécification proprement dit se sont alors déroulés jusqu'à décembre 2008, date où la première version des spécifications a été approuvée. Le LTE est ainsi défini dans la Release 8 du 3GPP. Du fait du saut technologique qu'il représente par rapport au HSDPA, le LTE est considéré comme constituant une quatrième étape de l'évolution des réseaux d'accès mobiles, ou 4G. On peut ainsi véritablement parler d'une *révolution* de l'UMTS, plutôt que d'une évolution.

À l'instar de chaque nouvelle génération de réseau d'accès, le LTE a pour objectif de proposer une capacité accrue et fait appel à une nouvelle technique d'accès à la ressource fréquentielle. Cet ouvrage décrit la norme LTE, et explique les choix de conception effectués. En particulier, les évolutions technologiques par rapport au HSPA sont largement documentées.

Notons que le développement de la famille de systèmes CDMA2000 ne connaîtra pas d'évolution comparable au LTE. En effet, les opérateurs ayant déployé ces systèmes ont fait le choix du LTE pour la quatrième génération de réseaux mobiles, de sorte que le développement de la famille CDMA2000 est destiné à s'arrêter.

La prochaine section précise les motivations qui ont mené à la définition du LTE.

Les motivations pour l'introduction du LTE

L'émergence du LTE est liée à une conjonction de facteurs techniques et industriels qui sont décrits au sein de cette section.

La capacité

En préambule, il convient de préciser les interactions entre capacité et débit. Nous avons expliqué que la capacité d'une cellule correspond au trafic total maximal qu'elle peut écouler en situation de forte charge au cours d'une période donnée. La capacité d'une cellule est conditionnée par l'efficacité spectrale du système et la ressource spectrale disponible. Comme nous l'avons vu précédemment, les techniques employées par les évolutions HSPA impliquent un partage des ressources entre les UE connectés à une même cellule. Aussi, la présence de plusieurs UE actifs sous une même cellule se traduit-elle par une réduction du débit fourni à chacun. En particulier, le débit moyen par utilisateur en situation de forte charge peut être approché par la capacité divisée par le nombre d'UE actifs dans la cellule. La capacité d'un réseau limite donc la valeur des débits dans un scénario impliquant plusieurs UE actifs, ou le nombre d'UE pouvant être servis simultanément avec un débit donné.

L'accroissement des besoins de capacité est une constante dans l'évolution des réseaux mobiles. En effet, le progrès technologique des réseaux encourage de nouveaux types d'usages, grâce à une expérience utilisateur plus confortable et un coût pour l'abonné généralement stable ou décroissant. Ces nouveaux usages, couplés à la démocratisation de leur accès, incitent en retour à une utilisation plus intensive des réseaux. Les besoins de capacité vont donc croissant, et la technologie se doit d'évoluer constamment pour les satisfaire.

Les gains associés aux évolutions HSPA et HSPA+ ont renforcé la capacité des réseaux par rapport à la Release 99 et au GSM. Toutefois, cet accroissement est jugé trop faible à terme par les opérateurs. La mise sur le marché de terminaux tels que les smartphones ou les clés 3G+ a entraîné l'explosion des usages de services de données mobiles. L'utilisation de réseaux mobiles comme alternative aux réseaux de données résidentiels est aussi à l'origine de la très forte croissance du trafic de données mobiles. Le facteur de croissance annuelle de ce dernier au niveau mondial était supérieur à 100 % en 2011 et ce rythme devrait se maintenir dans les années suivantes. Face à cette augmentation du trafic, les opérateurs de réseaux 3G doivent activer de nouvelles porteuses s'ils souhaitent maintenir des débits satisfaisants. Cette activation est envisageable sous réserve de disponibilité des ressources fréquentielles nécessaires. Or, dans de nombreux pays, le nombre de porteuses disponibles par opérateur est trop limité pour permettre un accompagnement de la montée en charge des réseaux. Cette limitation se traduit aux heures chargées par des rejets d'appels et par une réduction des débits fournis aux abonnés.

Fin 2004, date à laquelle le LTE a été pour la première fois discuté au 3GPP, les prévisions de trafic indiquaient déjà clairement que les besoins de capacité augmenteraient significativement. On constate a posteriori que cette anticipation s'est vérifiée. Une raison majeure ayant motivé l'introduction du LTE est par conséquent le besoin d'accroître la capacité des réseaux mobiles.

Les débits

L'évolution des débits suit une progression semblable à celle de la capacité, chaque nouvelle technologie de réseaux mobiles augmentant les débits et suscitant une attente de débits supérieurs. Il était ainsi également clair dès 2004 que le LTE devrait fournir de très hauts débits [NTT DoCoMo *et al.*, 2004]. Au-delà des limitations capacitaires, le débit fourni à un utilisateur dépend de ses conditions radio, liées en particulier à sa position dans la cellule, des techniques de transmission employées et de la ressource spectrale disponible.

Les valeurs des débits fournis aux abonnés ont nettement crû avec l'introduction des techniques HSPA et HSPA+. L'introduction de débits supérieurs à ceux fournis par les technologies HSPA est toutefois une demande forte des utilisateurs et donc des opérateurs. Cette exigence est principalement guidée par la volonté d'offrir en mobilité une expérience utilisateur comparable à celle offerte par les réseaux résidentiels. L'utilisateur peut ainsi accéder à ses services favoris chez lui ou hors de son domicile avec une fluidité homogène. En complément, le débit est jugé comme un facteur de comparaison entre opérateurs et une course aux débits est en marche dans certains pays. Enfin, des débits toujours plus élevés ouvrent la porte à l'introduction de nouveaux services, sources de revenus et/ou de différenciation pour les opérateurs.

L'attente des opérateurs de fournir des débits supérieurs à ceux offerts par les réseaux HSPA s'est donc confirmée au cours du temps, et est aujourd'hui un des motifs de déploiement du LTE.

La latence

La latence d'un système est la mesure du délai introduit par ce système. On distingue deux types de latence :

- la latence du plan de contrôle ;
- la latence du plan usager.

La latence du plan de contrôle représente le temps nécessaire pour établir une connexion et accéder au service. La latence du plan usager représente le délai de transmission d'un paquet au sein du réseau une fois la connexion établie. Les notions de plan de contrôle et plan usager seront détaillées au sein du chapitre 2.

De manière générale, la latence traduit donc la capacité du système à traiter rapidement des demandes d'utilisateurs ou de services. Une latence forte limite l'interactivité d'un système et s'avère pénalisante pour l'usage de certains services de données. L'UMTS et ses évolutions HSPA offrent une latence du plan usager supérieure à 70 ms, valeur trop importante pour offrir des services tels que les jeux vidéo en ligne. L'amélioration de la latence est un des éléments ayant concouru à la décision de définir un nouveau système.

L'adaptation au spectre disponible

La technologie UMTS contraint les opérateurs à utiliser des canaux de 5 MHz. Cette limitation est pénalisante à deux titres.

- Les allocations spectrales dont la largeur est inférieure à 5 MHz ne peuvent pas être utilisées (sauf pour le TD-SCDMA), ce qui limite le spectre disponible.
- En cas de disponibilité de plusieurs bandes spectrales de largeur de 5 MHz, un opérateur est dans l'incapacité d'allouer simultanément plusieurs porteuses à un même UE. Cette contrainte limite le débit maximal potentiel du système ainsi que la flexibilité de l'allocation des ressources spectrales aux utilisateurs. Il faut noter que cette contrainte a été partiellement levée en HSPA+ Release 8 avec la possibilité de servir un UE sur deux porteuses de 5 MHz simultanément.

Un consensus s'est ainsi imposé sur le besoin d'un système dit *agile en fréquence*, capable de s'adapter à des allocations spectrales variées. Cette agilité est un objectif de conception fort du LTE.

L'émergence de l'OFDM

Les travaux scientifiques sur la technique d'accès OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), considérée pour les systèmes de radiodiffusion dès la fin des années 1980, se sont multipliés au début des années 2000 dans l'optique d'une application aux réseaux mobiles. L'adaptation de cette technique aux terminaux mobiles pour supporter de hauts débits fut possible grâce aux progrès conjugués en traitement du signal et dans les équipements hyperfréquences. L'histoire récente des réseaux mobiles montre qu'une nouvelle génération est associée à une nouvelle méthode d'accès aux ressources radio. Or, l'OFDM offre plusieurs avantages pour des systèmes

radio mobiles. En particulier, il bénéficie d'une grande immunité contre l'interférence entre symboles créée par les réflexions du signal sur les objets de l'environnement. En outre, l'OFDM permet de gérer simplement des largeurs de bande variables et potentiellement grandes, ce qui, comme nous l'avons vu à la section précédente, était une motivation de l'introduction du LTE. Enfin, l'OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) assure un partage aisé des ressources fréquentielles entre un nombre variable d'utilisateurs bénéficiant de débits divers. Pour ces raisons, il fut décidé de baser le LTE sur l'OFDM, en rupture avec le CDMA. Les progrès scientifiques ont donc également eu leur importance dans la décision prise par le 3GPP de définir un système de nouvelle génération. L'OFDM et ses avantages seront décrits en détail au chapitre 6.

La simplicité d'exploitation du réseau

L'exploitation d'un réseau mobile est très coûteuse pour les opérateurs. Elle implique tout d'abord le déploiement de stations de base. Elle nécessite aussi une configuration initiale des paramètres des équipements installés. Ces tâches de configuration sont récurrentes et fastidieuses, et peuvent faire l'objet d'erreurs qui dégradent la qualité de service offerte aux utilisateurs. À titre d'exemple, la non-déclaration d'une relation de voisinage entre deux cellules entraîne la coupure de la communication lors du déplacement des UE entre ces cellules. Les opérateurs optimisent également les valeurs de différents paramètres afin d'optimiser la qualité de service offerte et de maximiser la capacité du système. De nombreux travaux scientifiques ont démontré la possibilité d'automatiser certaines de ces tâches, réduisant de manière significative les coûts d'exploitation des réseaux. L'intégration de fonctionnalités simplifiant l'exploitation des réseaux est par conséquent une demande forte des opérateurs que seule une nouvelle génération de systèmes pouvait satisfaire.

Le contexte industriel

Un élément clé ayant déclenché les premiers travaux du 3GPP sur la définition d'un nouveau système fut l'émergence du système WiMAX mobile (*Worldwide Interoperability for Microwave Access mobile*), normalisé par l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) et le WiMAX Forum. Le 3GPP regroupe les entreprises qui ont accompagné le développement des réseaux mobiles basés sur le GSM ces vingt dernières années. L'IEEE et le WiMAX Forum regroupent quant à eux certaines de ces entreprises dites « historiques », mais aussi des challengers qui avaient pour objectif de pénétrer le marché des télécommunications mobiles sur la base d'une rupture technologique : le WiMAX mobile, également connu sous le nom IEEE 802.16e. Les travaux de définition du WiMAX mobile commencèrent au début des années 2000 et aboutirent à une première version de spécifications en 2005. Le WiMAX mobile, basé sur une technique d'accès OFDM, offre alors une capacité supérieure à celle fournie par l'UMTS et son évolution HSDPA Release 5. Les entreprises membres du 3GPP se devaient de réagir, et c'est en 2005 que débutèrent les études sur le LTE. Certains membres du 3GPP virent là l'opportunité de reprendre des parts au sein d'un marché de la 3G dominé par un cercle restreint d'entreprises, tant au niveau des terminaux qu'au niveau des infrastructures réseau. Un dernier point majeur est celui des droits de propriété intellectuelle. L'UMTS fut développé sur la base d'une technique CDMA dont les brevets fondateurs sont détenus par un nombre très réduit de sociétés. La redistribution des droits de propriété intellectuelle associés aux produits implémentant ces

brevets est donc particulièrement inégale et affecte significativement les marges des entreprises ne disposant pas d'un portefeuille de brevets conséquent. La définition d'un nouveau système basé sur une technique bien connue du monde scientifique et industriel était donc une opportunité pour équilibrer la balance des royalties entre les différents acteurs du monde des télécoms. Au delà des aspects techniques, on constate donc que les enjeux industriels, stratégiques et financiers ont largement contribué à l'avènement du LTE.

Processus de normalisation du LTE

À l'instar de l'UMTS, le LTE a été défini par l'ensemble des entreprises partie prenante dans le marché mondial des télécommunications mobiles, regroupées au sein du 3GPP.

Présentation du 3GPP

Le 3GPP est un consortium créé en 1998 à l'initiative de l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*). Le 3GPP a pour objectif de définir des spécifications permettant l'interfonctionnement d'équipements de constructeurs différents. Contrairement à ce que son nom suggère, le champ d'activités du 3GPP ne se limite pas à la normalisation de systèmes 3G. Son rôle consiste à maintenir et développer les spécifications des systèmes :

- GSM/GPRS/EDGE ;
- UMTS (FDD et TDD) ;
- LTE, ainsi que celles du réseau cœur EPC.

Le 3GPP est composé d'un groupe de coordination appelé PCG (*Project Coordination Group*) et de différents groupes de spécifications techniques appelés TSG (*Technical Specification Groups*). On retrouve quatre TSG au sein du 3GPP :

- le CT (*Core Network and Terminals*) qui normalise les interfaces du terminal ainsi que ses capacités et est également en charge de la normalisation des réseaux cœurs des systèmes 3GPP ;
- le GERAN (*GSM/EDGE Radio Access Network*) qui développe l'accès radio GSM/EDGE et les interfaces associées permettant l'interconnexion avec les réseaux d'accès UMTS et LTE ;
- le RAN (*Radio Access Network*) qui est en charge des spécifications des réseaux d'accès UMTS et LTE ;
- le SA (*Services and System Applications*) qui définit les services ainsi que l'architecture globale des systèmes 3GPP.

Le 3GPP définit toutes les couches de chacun de ses systèmes de communication. En outre, le 3GPP normalise les méthodologies de test des équipements mettant en œuvre ses technologies. Les tests sont particulièrement importants afin de vérifier qu'un équipement est conforme aux spécifications avant sa mise sur le marché, et pour vérifier qu'il satisfait des critères de performance minimaux.

Il convient d'indiquer que le 3GPP n'est pas un organisme de normalisation en tant que tel. Il définit des spécifications techniques qui sont par la suite approuvées et publiées par des organismes

de normalisation régionaux, propres à un pays ou une région du monde. On peut citer six organismes de normalisation principaux qui travaillent à la publication de ces normes :

- ARIB (*Association of Radio Industries and Business*) et TTC (*Telecommunication Technology Committee*) pour le Japon ;
- ATIS (*Alliance for Telecommunications Industry Solutions*) pour les États-Unis ;
- CWTS (*China Wireless Telecommunication Standard Group*) pour la Chine ;
- ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) pour l'Europe ;
- TTA (*Telecommunication Technology Association*) pour la Corée du Sud.

Figure 1-4

Organismes en charge
de la normalisation
des spécifications 3GPP



Les TSG sont eux-mêmes répartis en sous-groupes de travail. Ces groupes et sous-groupes sont formés de représentants des acteurs (principalement industriels) du monde des réseaux mobiles, qui se réunissent plusieurs fois par an. Ces acteurs doivent impérativement être membres de l'un des organismes de normalisation partenaires du 3GPP. On y retrouve notamment des constructeurs de circuits électroniques, des constructeurs de terminaux mobiles, des constructeurs d'infrastructures de réseau et des opérateurs de réseaux mobiles. Les spécifications sont définies sur la base de contributions proposées et présentées par les membres individuels, discutées et souvent modifiées afin d'aboutir à un consensus.

Les modifications des spécifications approuvées par les groupes de travail sont associées à une *Release*. Une Release correspond à un ensemble de nouvelles fonctionnalités introduites dans la norme par les groupes du 3GPP dans une période de temps donnée et représente un palier significatif dans l'évolution des systèmes. Le 3GPP a défini neuf Releases entre 1998 et 2011 :

- Release 97 : définition du GPRS ;
- Release 99 : introduction de l'UMTS ;
- Release 4 : ajout de fonctionnalités au sein du réseau cœur, notamment la séparation des couches média et contrôle pour le réseau cœur circuit ;
- Release 5 : introduction de l'évolution HSDPA pour le réseau d'accès UMTS ;
- Release 6 : introduction de l'évolution HSUPA pour le réseau d'accès UMTS ;
- Release 7 : introduction du HSPA+ MIMO ;
- Release 8 : introduction des évolutions HSPA+ CPC et DC-HSDPA, et première Release du réseau d'accès LTE et du réseau cœur EPC ;

- Release 9 : évolutions du DC-HSDPA, notamment en combinaison avec le MIMO, et introduction du DC-HSUPA ; seconde Release du LTE ;
- Release 10 : évolution multiporteuse du HSDPA (jusqu'à 4 porteuses, soit 20 MHz) et introduction de l'évolution du LTE appelée *LTE-Advanced*.

La Release 11 est en cours de définition au moment de l'édition de cet ouvrage et est prévue pour être finalisée en septembre 2012.

Cet ouvrage présente le système LTE/EPC : son architecture, son interface radio, les principales procédures entre l'UE et le réseau pour l'enregistrement, la gestion des appels, la mobilité et la sécurité, les fonctionnalités d'auto-optimisation et les cellules femto. En raison de la rupture du LTE avec la technologie HSPA, l'accent est mis sur les spécifications de la Release 8. Les fonctionnalités introduites dans les Releases ultérieures sont brièvement indiquées à la fin de ce chapitre. Une grande part de la Release 10 du LTE est présentée au sein du chapitre 23, où un aperçu des évolutions du LTE attendues dans les futures Releases est également esquissé.

Dans le cadre de ses travaux, le 3GPP travaille également en collaboration avec d'autres organismes de normalisation :

- OMA (*Open Mobile Alliance*), qui a pour objectif de fournir des facilitateurs (*enablers*) de services, indépendamment du réseau utilisé pour y accéder ;
- IEEE, qui définit les spécifications WiFi 802.11 et WiMAX 802.16 ;
- IETF (*Internet Engineering Task force*), qui définit les protocoles du monde d'Internet ;
- 3GPP2, qui maintient et développe les spécifications propres au CDMA2000 ;
- ETSI/TISPAN, spécialisé dans les réseaux fixes et convergents.

Le lecteur pourra se rendre à l'adresse <http://www.3gpp.org/> pour obtenir plus d'informations concernant l'organisation et les objectifs du 3GPP.

Les exigences pour le LTE

La première étape des travaux de normalisation du LTE consista à définir les exigences que ce dernier devait satisfaire. En synthèse, l'objectif majeur du LTE est d'améliorer le support des services de données via une capacité accrue, une augmentation des débits et une réduction de la latence. En complément de ces exigences de performance, le 3GPP a aussi défini des prérequis fonctionnels tels que la flexibilité spectrale et la mobilité avec les autres technologies 3GPP. Ces exigences sont définies dans le document [3GPP 25.913, 2006] et résumées dans cette section.

La capacité en nombre d'utilisateurs simultanés

Avec l'explosion des services nécessitant une connexion *always-on*, la contrainte appliquée sur la capacité en nombre d'utilisateurs simultanés devient forte. Le système doit supporter simultanément un large nombre d'utilisateurs par cellule. Il est attendu qu'au moins 200 utilisateurs simultanés par cellule soient acceptés à l'état actif pour une largeur de bande de 5 MHz, et au moins 400 utilisateurs pour des largeurs de bande supérieures. Un nombre largement supérieur d'utilisateurs devra être possible à l'état de veille.

L'efficacité spectrale cellulaire

Le système compte parmi ses objectifs l'accroissement de l'efficacité spectrale cellulaire (en bit/s/Hz/cellule) et, en corollaire, l'augmentation de la capacité du système (en termes de débit total). En sens descendant, l'efficacité spectrale doit être trois à quatre fois supérieure à celle offerte par le HSPA Release 6 au sein d'un réseau chargé, et deux à trois fois supérieure en sens montant.

Les débits

Les exigences pour la technologie LTE ont porté également sur des gains de débit en comparaison avec le HSPA. Les objectifs de débit maximal définis pour le LTE sont les suivants :

- 100 Mbit/s en voie descendante 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 pour une largeur de bande allouée de 20 MHz, soit une efficacité spectrale crête de 2,5 bit/s/Hz.

Ces chiffres supposent un UE de référence comprenant :

- deux antennes en réception ;
- une antenne en émission.

Nous verrons plus tard que ces exigences ont été largement dépassées. Une autre exigence a trait au débit moyen par utilisateur par MHz. Celui-ci doit être en voie descendante trois à quatre fois supérieur à celui disponible avec un UE UMTS Release 6 dans les conditions suivantes :

- pour l'UMTS : une antenne d'émission à la station de base avec un récepteur avancé au sein de l'UE ;
- pour le LTE : deux antennes d'émission à la station de base et deux antennes en réception au niveau de l'UE.

Par ailleurs, le débit moyen par utilisateur par MHz en voie montante doit être deux à trois fois supérieur à celui disponible avec un UE UMTS Release 6 dans les conditions suivantes :

- pour l'UMTS et le LTE : une antenne d'émission au niveau de l'UE et deux antennes de réception à la station de base.

Le débit en bordure de cellule, défini comme le débit atteignable par au moins 95 % des utilisateurs de la cellule, a aussi fait l'objet d'exigences. Il doit être deux à trois fois supérieur à celui offert par le HSPA Release 6 dans les conditions précédentes, en sens descendant comme en sens montant.

La latence

Nous avons vu que la latence du système se traduit concrètement par sa capacité à réagir rapidement à des demandes d'utilisateurs ou de services. Elle se décline en latence du plan de contrôle et latence du plan usager.

Latence du plan de contrôle

L'objectif fixé pour le LTE est d'améliorer la latence du plan de contrôle par rapport à l'UMTS, via un temps de transition inférieur à 100 ms entre un état de veille de l'UE et un état actif autorisant l'établissement du plan usager.

Latence du plan usager

La latence du plan usager est définie par le temps de transmission d'un paquet entre la couche IP de l'UE et la couche IP d'un nœud du réseau d'accès ou inversement. En d'autres termes, la latence du plan usager correspond au délai de transmission d'un paquet IP au sein du réseau d'accès. Le LTE vise une latence du plan usager inférieure à 5 ms dans des conditions de faible charge du réseau et pour des paquets IP de petite taille.

L'agilité en fréquence

Le LTE doit pouvoir opérer sur des porteuses de différentes largeurs afin de s'adapter à des allocations spectrales variées. Les largeurs de bande initialement requises ont par la suite été modifiées pour devenir les suivantes : 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz dans les sens montant et descendant. Notons que le débit crête est proportionnel à la largeur de bande. Les modes de duplexage FDD et TDD doivent être pris en charge pour toutes ces largeurs de bande.

La mobilité

La mobilité est une fonction clé pour un réseau mobile. Le LTE vise à rester fonctionnel pour des UE se déplaçant à des vitesses élevées (jusqu'à 350 km/h, et même 500 km/h en fonction de la bande de fréquences), tout en étant optimisé pour des vitesses de l'UE faibles (entre 0 et 15 km/h). Les services temps-réel comme le service voix doivent être proposés avec le même niveau de qualité qu'en UMTS Release 6. L'effet des handovers intrasystème (procédure de mobilité entre deux cellules LTE) sur la qualité vocale doit être moindre qu'en GSM, ou équivalent. Le système doit également intégrer des mécanismes optimisant les délais et la perte de paquets lors d'un handover intrasystème.

Le LTE doit aussi coexister avec les autres technologies 3GPP. Pour ce faire, les exigences suivantes ont été définies.

- L'UE qui met en œuvre les technologies GSM et UMTS en complément du LTE doit être capable d'effectuer les handovers en provenance et à destination des systèmes GSM et UMTS, ainsi que les mesures associées. Les conséquences de ces mécanismes sur la complexité de l'UE et du système doivent rester limitées.
- Le temps d'interruption de service lors d'une procédure de handover entre le système LTE et les systèmes GSM ou UMTS doit rester inférieur à 300 ms pour les services temps-réel et inférieur à 500 ms pour les autres services.

Atteinte des exigences

Une fois l'étude de faisabilité du LTE effectuée et les grands principes du système définis, le 3GPP a procédé à l'évaluation de la technologie au regard des exigences. Les résultats de cette étude

peuvent être trouvés dans le document [3GPP 25.912, 2007], qui montre que toutes les exigences ayant fondé la conception du LTE sont satisfaites. Les performances du LTE sont discutées plus loin dans ce chapitre.

Allocation de spectre pour le LTE

Contexte réglementaire

Le spectre est une ressource rare. Son organisation au niveau mondial est nécessaire à plusieurs titres. Elle garantit la compatibilité des systèmes entre pays, autorisant l'itinérance des utilisateurs à travers le monde. Elle permet aussi aux constructeurs d'équipements de réaliser des économies d'échelle substantielles, réduisant les coûts et favorisant le développement des technologies. Cette mission d'harmonisation au niveau mondial est assurée par le secteur Radiocommunications de l'UIT (*Union internationale des télécommunications*) ou UIT-R. Les WRC (*World Radiocommunication Conference*) sont des forums internationaux organisés tous les quatre ans par l'UIT-R, au cours desquels les traités internationaux gouvernant l'utilisation du spectre de fréquences radio peuvent être revus.

Au milieu des années 1980, l'UIT a démarré le travail d'évolution des réseaux mobiles de normes nationales et régionales vers une norme mondiale. Cet objectif nécessitait l'identification d'une bande de fréquences commune, mais devait également faire converger les nombreuses technologies existantes. À l'occasion de la WRC-92, une bande de fréquences de 230 MHz de largeur a été identifiée aux alentours de 2 GHz (1 885-2 025 MHz et 2 110-2 200 MHz) pour accueillir les technologies d'accès radio connues sous le nom de IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications-2000*). Ces dernières comprennent une composante terrestre, c'est-à-dire pour les réseaux mobiles, et une composante satellitaire qui n'a finalement pas été exploitée commercialement. Le rattachement à la famille IMT-2000 implique pour ces technologies l'atteinte d'exigences fortes, notamment en matière d'interopérabilité, de performances et de qualité de service. Un effort de standardisation au niveau mondial a alors été engagé pour parvenir à la définition des technologies 3G. Toutefois, le besoin de spectre supplémentaire se fit rapidement sentir pour répondre à la forte croissance du trafic mobile attendue dans les années futures. Trois nouvelles bandes de fréquences furent alors identifiées pour la composante terrestre des systèmes IMT-2000 à l'occasion de la WRC-2000 (806-960 MHz, 1 710-1 885 MHz, 2 500-2 690 MHz). Dans les années suivantes, l'accroissement du trafic mobile a mené à la capacité maximale du spectre alloué par le régulateur dans de nombreux pays. La libération de spectre supplémentaire s'est alors avérée nécessaire pour accompagner le développement des usages et l'introduction d'un nouveau système tel que le LTE. Les opérateurs et les industriels du secteur des réseaux mobiles ont par conséquent demandé à ce que l'extension du spectre alloué aux communications mobiles soit inscrite à l'ordre du jour de la WRC-07.

Le LTE Release 8 est un système IMT-2000. Avec l'émergence de technologies de quatrième génération, l'UIT-R a introduit la famille IMT-Advanced (*International Mobile Telecommunications-Advanced*). Cette famille inclut des systèmes dont les capacités vont au-delà des exigences de

l'IMT-2000. L'évolution du LTE, appelée LTE-Advanced, a été définie pour répondre à ces exigences. Le LTE-Advanced sera décrit au chapitre 23. Les bandes nouvellement identifiées dans le cadre de la WRC-07 étaient initialement destinées aux systèmes IMT-Advanced. Nous allons voir cependant que le LTE Release 8 a également accès à ces nouvelles bandes.

D'un point de vue fréquentiel, le déploiement du LTE peut ainsi se concevoir de deux manières :

- déploiement sur une bande de fréquences déjà allouée à un système 2G ou 3G ;
- déploiement sur de nouvelles bandes de fréquences.

L'allocation spectrale au niveau mondial

Un des thèmes principaux discutés lors de la WRC-07 concerna l'allocation de spectre additionnel pour les services mobiles. La première décision prise fut de s'accorder sur le terme générique IMT (*International Mobile Telecommunications*). Ce terme regroupe désormais les familles IMT-2000 et IMT-Advanced et donc les technologies 3G et 4G. Cette décision fut guidée par la volonté des régulateurs de rendre l'allocation de spectre plus neutre d'un point de vue technologique. Les fréquences inférieures à 1 GHz sont optimales pour répondre au besoin de couverture étendue en comparaison avec les fréquences supérieures à 2 GHz. Toutefois, il est très difficile d'identifier de larges bandes de fréquences en dessous de 1 GHz. Les besoins de très haut débit sont par conséquent satisfaits par des bandes de fréquences supérieures à 2 GHz. La WRC-07 a permis d'identifier du spectre additionnel inférieur à 1 GHz et supérieur à 2 GHz.

Suite à la WRC-07, les bandes de fréquences suivantes sont identifiées pour les technologies IMT au niveau mondial [UIT] :

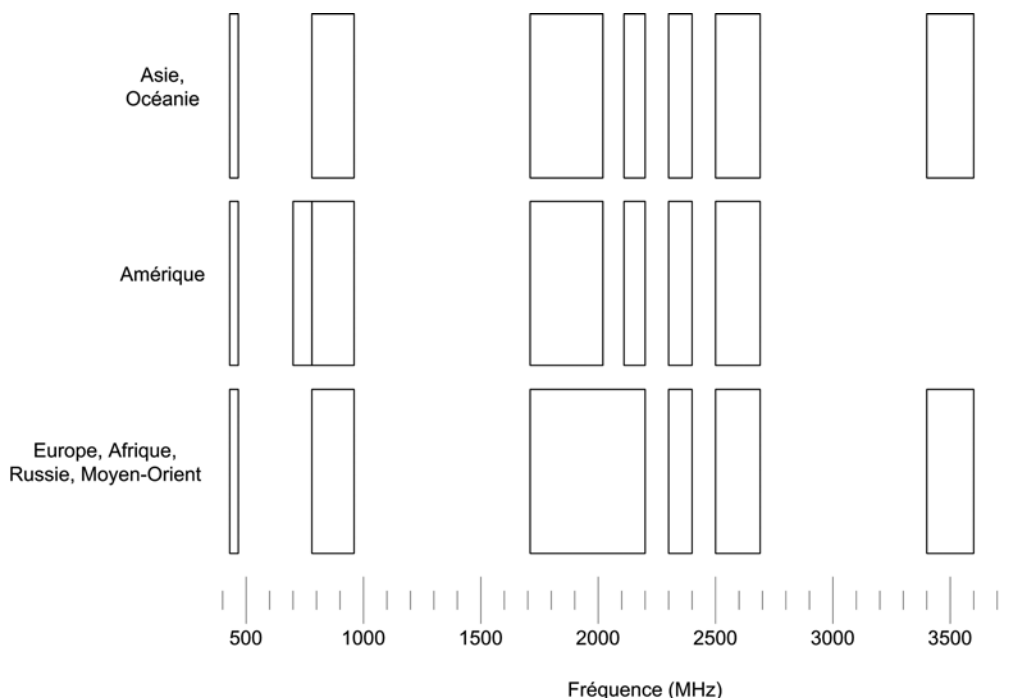
- 450 – 470 MHz ;
- 790 – 960 MHz, incluant la bande que nous appellerons plus tard la bande de fréquences 800 MHz ;
- 1 710 – 2 025 MHz ;
- 2 110 – 2 200 MHz ;
- 2 300 – 2 400 MHz ;
- 2 500 – 2 690 MHz ou bande de fréquences 2,6 GHz.

Les bandes de fréquences suivantes ont également été identifiées au niveau régional :

- 610 – 790 MHz pour le Bangladesh, la Chine, la Corée du Sud, l'Inde, le Japon, la Nouvelle-Zélande, la Papouasie-Nouvelle-Guinée, les Philippines et Singapour ;
- 698 – 790 MHz pour le continent américain ;
- 3 400 – 3 600 MHz sans allocation globale mais acceptée par un grand nombre de pays d'Asie, d'Océanie, d'Europe, d'Afrique, du Moyen-Orient et la Russie.

La figure suivante fait la synthèse des bandes de fréquences allouées aux technologies IMT suite à la WRC-07 pour différentes régions du monde.

Figure 1-5
Bandes
de fréquences
allouées aux
technologies
IMT suite à
la WRC-07



La bande de fréquences 2,6 GHz est de largeur spectrale relativement importante, offrant la possibilité d'utiliser des canaux fréquentiels contigus de 10, 15 ou 20 MHz. Notons que cette bande avait été identifiée lors de la WRC-2000, mais n'était pas utilisée jusqu'alors car elle n'était pas libérée dans de nombreux pays.

L'allocation spectrale au niveau européen

Pour permettre le déploiement du très haut débit mobile de manière satisfaisante, l'Europe a choisi d'harmoniser les bandes attribuées au LTE entre les différents pays de l'Union. Ce sont les bandes 800 MHz et 2,6 GHz qui ont été identifiées au niveau européen. La bande 2,6 GHz a été harmonisée au cours de l'année 2008, tandis que la bande 800 MHz l'a été au cours de l'année 2010. Les pays européens sont ainsi tenus de mettre à disposition ces bandes de fréquences pour permettre d'y introduire le LTE. Cette approche harmonisée au niveau européen a pour objectif la création d'un marché européen pour les équipements de réseau et les terminaux. En effet, un marché d'une telle échelle encourage des développements technologiques plus efficaces et des équipements à des prix plus compétitifs. En outre, il garantit l'interopérabilité entre équipements et ainsi une itinérance sans couture pour les utilisateurs voyageant au sein de l'Union Européenne. L'harmonisation des bandes de fréquences permet également, d'un point de vue technique, une meilleure coordination aux frontières pour les opérateurs européens.

Pour le mode de duplexage FDD, on fait référence à la notion de duplex pour évoquer les bandes de fréquences distinctes qui supportent la voie montante et la voie descendante. Par exemple, un duplex de 70 MHz correspond à une bande de fréquences de 70 MHz pour la voie descendante en complément d'une bande de fréquences de largeur identique pour la voie montante. La bande 2,6 GHz a ainsi été organisée en deux parties :

- un duplex de 70 MHz de spectre FDD ;
- 50 MHz de spectre TDD.

La bande 800 MHz étant plus étroite, il a été retenu de définir un duplex de 30 MHz de spectre pour le mode FDD, sans réservation pour le mode TDD. Les directives européennes instituent par ailleurs un cadre de neutralité technologique pour l'utilisation des fréquences, en lien avec la démarche engagée par l'UIT. Historiquement, les bandes de fréquences étaient affectées à des technologies spécifiques. Les bandes 900 et 1 800 MHz ont été dédiées à la technologie GSM. Le lancement de l'UMTS a été permis par l'attribution de la bande 2,1 GHz. Le principe de neutralité technologique guide l'attribution des bandes de fréquences 800 MHz et 2,6 GHz en Europe, les licences n'imposant pas l'utilisation d'une technologie spécifique. Il est en revanche habituel que le régulateur requière des niveaux de performances minimaux lors des procédures d'attribution de fréquences, conditionnant fortement la technologie à déployer par les opérateurs.

L'allocation spectrale en France

La bande 800 MHz

La bande 800 MHz est particulièrement prisée par les opérateurs de réseaux mobiles car elle revêt de très bonnes propriétés de propagation. Les ondes radio se propagent plus loin avec des fréquences basses et pénètrent mieux les bâtiments et la végétation qu'avec des fréquences hautes. À même nombre de stations de base déployées, la bande 800 MHz permet aux opérateurs d'offrir une meilleure couverture (notamment à l'intérieur des bâtiments) que la bande 2,6 GHz. Le prix consenti par les opérateurs français pour acquérir du spectre dans la bande de fréquences 800 MHz a donc été supérieur à celui investi pour la bande 2,6 GHz. La bande 800 MHz présente toutefois quelques inconvénients. Tout d'abord, la bande disponible est assez étroite (duplex de 30 MHz), à répartir entre les opérateurs présents sur le marché. Cette restriction a pour effet de limiter les débits et la capacité des réseaux 4G qui seront déployés par les opérateurs dans cette bande. Par ailleurs, la bande 800 MHz est appelée dividende numérique car elle regroupe les fréquences libérées suite à l'extinction de la TV analogique au profit de la TNT (Télévision Numérique Terrestre), plus efficace d'un point de vue spectral. Des précautions doivent ainsi être prises par les opérateurs déployant des stations de base LTE dans la bande 800 MHz afin d'éviter de brouiller les signaux de la TNT, qui utilisent une bande proche.

L'ARCEP (Autorité de régulation des communications électroniques et des postes) a publié en décembre 2011 les résultats de la procédure d'attribution des bandes de fréquences en France dans la bande 800 MHz [ARCEP, 2011], illustrés sur la figure suivante.

Figure 1-6

Bandes de fréquences allouées
par opérateur en France
dans la bande 800 MHz
[ARCEP, 2011]

791 MHz 832 MHz	801 MHz 842 MHz	811 MHz 852 MHz	821 MHz 862 MHz
Bouygues Telecom	SFR	Orange France	
Bloc A	Blocs B+C	Bloc D	

Le dividende numérique a été valorisé à 2 639 087 005 euros. Les trois opérateurs retenus bénéficient chacun d'un duplex de 10 MHz. Cette autorisation est assortie d'obligations spécifiques en matière de couverture du territoire. Les opérateurs devront couvrir à terme 99,6 % de la population. Cette obligation est en outre assortie d'un objectif complémentaire de couverture de 95 % de la population de chaque département. Enfin, les trois opérateurs devront se conformer à un calendrier de déploiement accéléré pour les zones les moins denses du territoire. Ces obligations ont pour objectif de contribuer à l'aménagement numérique du territoire français.

La bande 2,6 GHz

La bande 2,6 GHz a été moins prisée par les opérateurs car elle possède de moins bonnes propriétés de propagation. Toutefois, la largeur de bande disponible à 2,6 GHz est bien plus importante qu'à 800 MHz avec un duplex de 70 MHz à répartir entre les opérateurs. Elle autorise potentiellement des débits et une capacité élevés pour les réseaux l'utilisant. La bande 2,6 GHz est donc appropriée pour le déploiement de réseaux en zones denses.

Les résultats de la procédure d'attribution des bandes de fréquences dans la bande 2,6 GHz ont été communiqués en octobre 2011 comme décrits sur la figure suivante [ARCEP, 2011-2].

Figure 1-7

Bandes de fréquences allouées
par opérateur en France dans
la bande 2,6 GHz [ARCEP,
2011-2]

2500 MHz 2620 MHz	2515 MHz 2635 MHz	2535 MHz 2655 MHz	2550 MHz 2670 MHz	2570 MHz 2690 MHz
SFR	Orange France	Bouygues Telecom	Free Mobile	

La bande de fréquences 2,6 GHz a ainsi été valorisée à 936 129 513 euros. Orange France et Free Mobile bénéficient d'un duplex de 20 MHz tandis que SFR et Bouygues Télécom en ont un de 15 MHz.

Les services

Introduction

La définition d'une nouvelle génération de systèmes mobiles permet habituellement :

- l'introduction de nouveaux services ;
- l'amélioration de certains services vis-à-vis des systèmes de génération précédente.

Les systèmes 1G ont proposé le service voix pour un nombre limité d'utilisateurs. Les systèmes 2G ont autorisé le développement du service voix avec une capacité nettement accrue. Ils ont également introduit le SMS, service devenu très populaire dans le monde entier avec plusieurs milliards de messages envoyés chaque année dans le monde. Les systèmes 2G ont enfin autorisé des services de données à faible débit (inférieur à 300 Kbit/s). Les systèmes 3G ont accru la capacité des réseaux pour le service voix et ont développé les services de données grâce à des débits nettement supérieurs à ceux fournis par les systèmes 2G, le HSPA permettant réellement l'avènement du haut débit mobile.

Services associés au LTE

Il est encore tôt pour identifier avec certitude de nouveaux services associés au LTE. Néanmoins, les caractéristiques techniques de ce dernier permettent de dégager quelques pistes. Le LTE se distingue des technologies précédentes par :

- une grande capacité cellulaire, qui peut se décliner en un grand nombre d'UE utilisant simultanément des services de débit moyen ou faible, ou peu d'UE utilisant simultanément des services à très haut débit ;
- une faible latence.

Le premier changement apporté par le LTE en termes d'expérience utilisateur est donc un confort accru d'utilisation des services en ligne : les pages web et les courriers électroniques se chargent rapidement grâce au très haut débit, tandis que la latence réduite garantit une réponse quasi-instantanée aux requêtes, par exemple pour lancer le chargement d'une page web ou d'une vidéo. Le très haut débit permet également l'introduction de nouveaux services mobiles tels que la vidéo haute définition en 3D, sur des écrans larges de type tablettes.

De plus, la faible latence ouvre la porte à de nouveaux services mobiles difficiles à mettre en œuvre jusque-là. On peut notamment citer les jeux vidéo en réseau, qui devraient ainsi se développer sur terminal mobile. La faible latence permet aussi d'accompagner sur les réseaux mobiles des évolutions de l'Internet fixe, comme le développement des services de type *cloud computing* ou *SaaS (Software as a Service)*, où l'utilisateur fait appel à des capacités de calcul et un logiciel mis en œuvre sur un serveur distant, les ressources de calcul du terminal ne servant qu'à l'accès au réseau et à assurer l'interface utilisateur. La faible latence est essentielle pour ces services afin d'assurer à l'abonné une perception du service similaire à celle qu'il aurait avec un logiciel installé directement sur le terminal.

La capacité accrue permet de développer des services qui jusque-là auraient pu être à l'origine d'une saturation du réseau dans le cas d'un usage simultané par un grand nombre d'abonnés : on peut citer, par exemple, l'accès continu à des contenus en ligne, comme des web radio, ou des vidéothèques ou discothèques numériques, les terminaux recevant le média en temps réel au lieu de le lire sur leur mémoire locale.

Enfin, les débits confortables combinés à une meilleure capacité permettent l'introduction de modules LTE dans des équipements jusque-là non connectés au réseau. On peut par exemple citer des appareils photo ou des caméras vidéo qui enverraient leurs images ou vidéos directement sur un blog en ligne, ou des lecteurs multimédias téléchargeant des vidéos et de la musique. Les communications de machine à machine, communément appelées M2M (*Machine-to-Machine*) ou MTC

(*Machine-Type Communications*), sont également appelées à se développer grâce au LTE. Ces dernières recouvrent une large gamme de services, allant, par exemple, de caméras de vidéosurveillance transmettant continuellement vers un serveur avec un débit de l'ordre de quelques centaines de Kbit/s, à des capteurs renseignant à distance l'état de compteurs de consommation électrique, qui transmettent typiquement avec un débit très faible une fois par mois. Ces derniers, toutefois, ne nécessitent pas les hautes performances du LTE, et ne se développeront vraisemblablement que lorsque le coût des terminaux LTE sera suffisamment faible.

Le contrôle de la qualité de service

Le contrôle de la qualité de service est essentiel pour l'opérateur afin de garantir une expérience satisfaisante à l'utilisateur. La technologie LTE offre des mécanismes dits de *qualité de service différenciée* afin de faciliter la prise en compte des contraintes de services différents. Les services mobiles peuvent être distingués selon deux critères principaux, souvent intimement liés.

- Le service est-il temps-réel ou non temps-réel ?
- Le service tolère-t-il des erreurs de transmission ?

Ces caractéristiques de service impliquent une prise en charge différenciée de la part du réseau. On comprend aisément que le traitement d'un appel voix n'imposera pas les mêmes contraintes que le téléchargement d'un fichier. D'une manière générale, les services temps-réel (par exemple, un appel voix ou un appel de streaming vidéo) requièrent des délais de transmission courts mais peuvent tolérer des erreurs de transmission. En revanche, les services non temps-réel (par exemple, un téléchargement de courrier électronique ou de fichier) revêtent des contraintes de délais relâchées mais ne tolèrent pas d'erreurs de transmission. Le LTE a ainsi été conçu pour distinguer les services nécessitant un débit garanti ou GBR (*Guaranteed Bit Rate*), des services ne requérant pas de débit garanti (non-GBR). Nous présenterons en détail au chapitre 17 les mécanismes définis par le 3GPP pour différencier la qualité de service.

Catégories d'UE

La mise en œuvre du LTE nécessite de nouveaux équipements de réseaux, comme de nouveaux terminaux compatibles avec cette nouvelle technologie.

À l'image de ce qui est défini en 3G, le débit maximal auquel peut prétendre un utilisateur LTE est dépendant de la *catégorie* de l'UE qu'il utilise, laquelle détermine sa complexité et donc son coût. Différentes catégories d'UE ont ainsi été définies ; plus précisément, elles se différencient par :

- les modulations supportées en voie descendante et en voie montante ;
- le nombre de flux indépendants, appelés couches spatiales, pouvant être reçus en voie descendante lorsque le multiplexage spatial ou SU-MIMO (*Single User-MIMO*) est employé (voir le chapitre 5) ; la mise en œuvre du SU-MIMO requiert que l'UE et le réseau disposent d'un nombre d'antennes au moins égal au nombre de couches spatiales transmises ;

- la capacité de traitement au niveau de l'UE pour mettre en œuvre les traitements nécessaires à la démodulation et au décodage du signal reçu, dont la complexité est conditionnée par le débit maximal supporté ;
- les quantités de mémoire nécessaires à la mise en œuvre de la combinaison HARQ et de l'opération de la couche RLC (*Radio Link Control*).

En comparaison avec l'UMTS, le nombre de catégories d'UE LTE a été réduit au minimum afin de limiter la segmentation du marché et favoriser ainsi les économies d'échelle. Il existe cinq catégories d'UE en Release 8, dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant.

Caractéristiques des catégories d'UE LTE

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

L'UE signale sa catégorie au réseau lors de sa connexion initiale. Outre les catégories, un ensemble de *capacités (capabilities)* sont signalées par l'UE afin d'indiquer s'il supporte des fonctionnalités optionnelles dans les spécifications. Ces capacités sont définies dans [3GPP 36.306, 2012].

Notons de plus que les UE LTE sont contraints à une puissance d'émission maximale de 23 dBm. La largeur de canal devant être gérée par les UE est définie par bande de fréquences : elle est de 20 MHz pour les bandes 800 MHz et 2,6 GHz.

Performances du LTE

Le 3GPP a mené une étude de vérification des performances complètes du LTE à l'issue de son étude de faisabilité [3GPP 25.912, 2007]. Cette évaluation a notamment comparé les performances du LTE à celles du HSPA Release 6, conformément aux exigences définies pour la conception du LTE. Le HSPA ayant évolué depuis, cette comparaison n'est plus aussi pertinente aujourd'hui, aussi nous nous limitons dans cette section aux performances absolues du LTE.

Le 3GPP a plus récemment effectué de nouvelles évaluations des performances du LTE Release 8, dans le cadre de la soumission du LTE-Advanced à l'UIT-R comme interface candidate au processus IMT-Advanced (voir le chapitre 23). Les résultats obtenus s'appuient sur les fonctionnalités effectivement normalisées en Release 8 et sont donc plus proches de la réalité que ceux de [3GPP 25.912, 2007]. Par conséquent, nous présentons ces derniers résultats dans cette section. Notons bien qu'il s'agit des résultats du LTE Release 8 et non du LTE-Advanced. Les résultats complets de cette campagne d'évaluation sont publiés dans le document [3GPP 36.912, 2010].

Efficacité spectrale crête

L'efficacité spectrale crête (en bit/s/Hz) caractérise le débit maximal théorique offert par la technologie. Elle est déterminée par le schéma de modulation et codage d'efficacité spectrale la plus élevée possible, ainsi que par le nombre de couches spatiales pouvant être multiplexées sur les mêmes ressources en SU-MIMO. Cette efficacité spectrale est peu représentative des performances réelles du système, car pour l'atteindre, les UE se doivent d'être très proches de l'eNodeB ; en revanche, elle est aisée à calculer.

L'efficacité spectrale crête du LTE est résumée dans le tableau suivant pour différentes configurations d'antennes, où une configuration d'antennes $N \times M$ correspond à N antennes à l'émetteur et M antennes au récepteur. Ces chiffres sont obtenus d'après les performances maximales du système pour un UE seul dans la cellule, pour les catégories d'UE 4 et 5. Rappelons qu'il suffit de multiplier les chiffres d'efficacité spectrale par 10 pour obtenir le débit correspondant en Mbit/s sur un canal de 10 MHz.

Efficacité spectrale crête d'un UE LTE

Voie	Configuration d'antennes (modulation)	Efficacité spectrale crête (bit/s/Hz)
DL	2x2 (64QAM)	7.5
	4x4 (64QAM)	15.0
UL	1x2 (16QAM)	2.5
	1x2 (64QAM)	3.75

Efficacité spectrale cellulaire et en bordure de cellule

L'efficacité spectrale cellulaire (en bit/s/Hz) caractérise la capacité réelle de la cellule. Elle est évaluée par simulation informatique d'un réseau dans des scénarios bien définis.

De même, l'efficacité spectrale en bordure de cellule (en bit/s/Hz) caractérise le débit pouvant être offert à un UE en mauvaises conditions radio, ce qui est le cas typiquement en bordure de cellule. Elle est définie comme la valeur d'efficacité spectrale telle que 95% des UE du système bénéficient d'une efficacité spectrale supérieure ou égale. Elle doit être évaluée au cours des mêmes simulations que l'efficacité spectrale moyenne.

Les résultats de performance suivants correspondent à un scénario représentant un déploiement dense urbain de cellules macro, dans la bande 2 GHz. Les sites sont trisectorisés et espacés de 500 m. Le nombre d'UE est fixé à 10 par cellule, et tous se déplacent à l'intérieur de bâtiments avec une vitesse de 3 km/h. Ce scénario est appelé *3GPP case 1*, et ses spécifications détaillées peuvent être trouvées dans [3GPP 36.814, 2010]. Le modèle de trafic employé est dit *full buffer*, car il correspond à des UE ayant toujours des données à transmettre en voie montante ou à recevoir en voie descendante ; on peut également voir les UE selon ce modèle comme téléchargeant un fichier de taille infinie. Bien qu'extrême, ce modèle est communément utilisé pour évaluer la performance d'un réseau à forte charge.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus pour différentes configurations d'antennes, en voie montante et en voie descendante, pour les modes FDD et TDD. Notons que les chiffres d'efficacité spectrale du mode TDD supposent une transmission continue dans la direction de transmission considérée.

Efficacité spectrale cellulaire et en bordure de cellule

Voie	Configuration d'antennes	Efficacité spectrale cellulaire (bit/s/Hz/cellule)		Efficacité spectrale en bordure de cellule (bit/s/Hz/UE)	
		FDD	TDD	FDD	TDD
DL	2x2	2.23	2.17	0.079	0.083
	4x2	2.53	2.52	0.100	0.096
	4x4	3.41	3.28	0.143	0.154
UL	1x2	1.33	1.24	0.047	0.045
	1x4	2.00	1.83	0.075	0.064

Bien entendu, les chiffres donnés dans le tableau précédent dépendent du scénario considéré et doivent donc être considérés comme des ordres de grandeur des performances atteignables dans la réalité. En particulier, nous verrons au chapitre 5 que la performance des traitements MIMO dépend du type d'antennes utilisé. Les antennes simulées ici sont des antennes de même polarisation séparées d'une demi-longueur d'onde, qui favorisent le *beamforming* (et donc la performance en bordure de cellule), mais sont moins favorables au SU-MIMO que des antennes à polarisation croisée. Les résultats pour ces dernières pourront ainsi être sensiblement différents.

Capacité d'appels voix

La capacité d'appels voix caractérise le nombre maximal d'utilisateurs pouvant passer des appels voix simultanément sur une cellule. Cette capacité en LTE est souvent appelée capacité voix sur IP (VoIP), car le service voix en LTE n'est supporté que par la VoIP. Elle est évaluée par simulation informatique du réseau dans des scénarios bien définis.

Les chiffres présentés dans le tableau suivant correspondent au scénario UIT « macrocellulaire urbain ». Ce dernier représente un scénario de déploiement dense urbain selon les mêmes caractéristiques que celles exposées à la section précédente, à la différence que les UE se déplacent dans des véhicules à une vitesse de 30 km/h. De plus, les paramètres détaillés de ce scénario, en particulier les modèles de propagation, diffèrent de ceux du 3GPP case 1. Les résultats selon ces deux scénarios ne peuvent donc être comparés. Les spécifications détaillées du scénario UIT macrocellulaire urbain peuvent être consultées dans [UIT-R, 2009].

Capacité VoIP

Capacité VoIP (nombre d'UE/cellule/MHz)	
FDD	TDD
69	67

Sur une bande de 10 MHz, une cellule LTE correspondant au scénario indiqué pourra donc écouler 690 appels voix simultanés en FDD et 670 en TDD. Ces chiffres supposent bien sûr qu'aucun autre trafic n'est présent sur la cellule. Dans le cas contraire, ce nombre sera inférieur puisque les ressources radio du système devront être partagées entre les différents utilisateurs et services.

Latence

La latence a été définie plus tôt à la page 19.

La latence du plan usager s'évalue par la durée des procédures liées à l'émission et la réception d'un paquet sur l'interface radio. On montre dans [3GPP 25.912, 2007] que la latence du plan usager est inférieure à 5 ms en FDD, sous des hypothèses réalistes. En TDD, la latence du plan usager dépend de la configuration voie montante/voie descendante (voir le chapitre 3). Si pour certaines configurations la latence est effectivement inférieure à 6 ms en voie montante et en voie descendante pour des hypothèses réalistes, d'autres configurations peuvent conduire à une latence légèrement supérieure mais toujours inférieure ou égale à 6,2 ms en voie descendante et inférieure ou égale à 9,5 ms en voie montante.

De même, la latence du plan de contrôle est évaluée en calculant le temps nécessaire aux procédures d'activation de la connexion. Celles-ci dépendent en particulier des temps de traitement par les différents nœuds de l'architecture mis en jeu, ainsi que du temps de transport sur les interfaces réseau associées (voir le chapitre 2 pour une description de ces nœuds et interfaces, et le chapitre 17 pour une description des procédures). On montre que la latence du plan de contrôle pour la transition entre l'état de veille et l'état actif est de 80 ms en FDD et de 85 ms en TDD.

Le tableau ci-dessous résume les valeurs de latence des plans usager et de contrôle, en FDD et TDD.

Latence du plan usager et du plan de contrôle sous des hypothèses réalistes

Latence du plan usager (ms)		Latence du plan de contrôle pour la transition de l'état de veille à actif (ms)	
FDD	TDD	FDD	TDD
< 5	≤ 6.2 en DL ≤ 9.5 en UL	80	85

Performance du handover

La performance du handover est mesurée par le temps d'interruption du plan usager lors d'un changement de cellule, ou, en d'autres termes, le temps d'interruption de la communication que peut subir un utilisateur. Ce temps est calculé analytiquement en fonction du délai des procédures de synchronisation et d'accès aléatoire sur la nouvelle cellule, décrites aux chapitres 13 et 14. Les temps d'interruption pour les modes FDD et TDD sont donnés dans le tableau suivant.

Performance du handover

Temps d'interruption du plan usager lors d'un handover (ms)	
FDD	TDD
10.5	12.5

Ces temps d'interruption correspondent aux durées les plus courtes possibles, lorsque la procédure d'accès aléatoire est réalisée avec succès. En TDD, le temps d'interruption dépend de la configuration

voie montante/voie descendante ; celui donné dans le tableau correspond à la configuration 1, qui permet l'interruption la plus courte.

On constate que ces temps d'interruption sont très courts et ne peuvent être décelés par l'utilisateur. Notons que ces temps d'interruption sont valables pour une cellule de destination située sur la même fréquence que la cellule source ou sur une fréquence différente, que cette dernière soit sur la même bande de fréquences ou sur une autre bande.

Au-delà de la Release 8

Cet ouvrage présente en détail le contenu de la Release 8 du LTE, dont le contenu a été finalisé en décembre 2008. Depuis, la norme LTE a évolué à travers de nouvelles Releases (Release 9, Release 10). Cette section fournit une brève synthèse de leur contenu.

La Release 9

La Release 9 a essentiellement consisté à compléter les fonctionnalités de base introduites en Release 8, et qui seront détaillées dans les chapitres suivants. En outre, elle a permis l'intégration d'un certain nombre de corrections de la Release 8, profitant de l'expérience acquise par les constructeurs dans le cadre des premières implémentations matérielles.

Les évolutions principales ont été définies dans les domaines suivants :

- extension des techniques de transmission multi-antennes pour le TDD afin de permettre la transmission simultanée de deux blocs de données pour 8 antennes d'émission (*beamforming double-couches*) ;
- définition de protocoles de localisation, notamment motivés par la législation des États-Unis qui impose de localiser les appels d'urgence ;
- définition d'une architecture et de protocoles autorisant des services de diffusion et d'envois multiples, aussi appelés MBMS (*Multimedia Broadcast Multicast Service*). Ces services permettent d'optimiser l'efficacité spectrale lors de la transmission d'un contenu commun à un groupe d'utilisateurs, comme de la télévision ;
- définition de nouvelles fonctionnalités d'*auto-optimisation* ;
- approfondissement des spécifications techniques des HeNB (*Home eNodeB*) notamment dans les domaines de la mobilité, de la sécurité et de l'architecture.

La Release 10

La Release 10 est principalement marquée par l'adaptation du LTE afin de garantir l'atteinte des exigences de la norme IMT-Advanced définie par l'UIT. La version du LTE définie en Release 10 est ainsi connue sous l'appellation LTE-Advanced. La description du LTE-Advanced fait l'objet du chapitre 23.

En complément des évolutions propres au LTE-Advanced, des développements ont été effectués en Release 10 pour :

- améliorer la mobilité entre cellules femto ;
- permettre d'utiliser les mesures des UE afin d'évaluer automatiquement la qualité du réseau, et déterminer ainsi le besoin éventuel d'optimisation ou de résolution de problèmes, en réduisant le besoin de tests manuels par les opérateurs ;
- améliorer la prise en charge des communications de machine à machine, en introduisant des mécanismes destinés à protéger le réseau de surcharges éventuelles dans le cas où un très grand nombre de machines chercheraient à accéder au réseau simultanément.

Références

- [3GPP 25.912, 2006] Rapport technique 3GPP TR 25.912, *Feasibility study for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)*, v7.1.0, octobre 2006.
- [3GPP 25.912, 2007] Rapport technique 3GPP TR 25.912, *Feasibility study for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)*, v7.2.0, août 2007.
- [3GPP 25.913, 2006] Rapport technique 3GPP TR 25.913, *Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)*, v7.3.0, mars 2006.
- [3GPP 36.306, 2012] Spécification technique 3GPP TS 36.306, *E-UTRA, User Equipment (UE) radio access capabilities*, v.10.5.0, mars 2012.
- [3GPP 36.814, 2010] Rapport technique 3GPP TR 36.814, *E-UTRA, Further advancements for E-UTRA physical layer aspects*, v9.0.0, mars 2010.
- [3GPP 36.912, 2010] Rapport technique 3GPP TR 36.912, *Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced)*, v9.3.0, juin 2010.
- [ARCEP, 2011] ARCEP, *Résultats de la procédure d'attribution des licences mobiles 4G dans la bande 800 MHz*, décembre 2011.
- [ARCEP, 2011-2] ARCEP, *Résultats de la procédure d'attribution des licences mobiles 4G dans la bande 800 MHz*, octobre 2011.
- [GSMA, 2012] GSMA, <http://www.gsma.com/gsm/>, avril 2012.
- [NTT DoCoMo et al., 2004] NTT DoCoMo et al., *Proposed Study Item on Evolved UTRA and UTRAN*, description d'étude RP-040461, 3GPP TSG-RAN #26, décembre 2004.
- [UIT] UIT, *Spectrum for IMT*.
<http://www.itu.int/ITU-D/tech/MobileCommunications/Spectrum-IMT.pdf>
- [UIT, 2012] UIT Télécommunications, *Global mobile-cellular subscriptions, total and per 100 inhabitants, 2001-2011*, février 2012.
- [UIT-R, 2009] Rapport UIT-R M.2135-1, *Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced*, décembre 2009.
- [UMTS forum, 2010] UMTS forum, *Recognising the promise of mobile broadband*, juillet 2010.