

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



Table des matières

Avant-propos	XIII
Remerciements	XV
CHAPITRE 1	
LTE, la révolution de l'UMTS	1
Un peu d'histoire	1
Les motivations pour l'introduction du LTE	11
Processus de normalisation du LTE	15
Allocation de spectre pour le LTE	20
Les services	24
Catégories d'UE	26
Performances du LTE	27
Au-delà de la Release 8	31
Références	32
CHAPITRE 2	
L'architecture LTE/EPC	33
Architecture des réseaux 3GPP 2G et 3G	33
Architecture LTE/EPC	37
Architecture protocolaire	48
Le bearer EPS	50
Les interfaces terrestres du LTE	52
CHAPITRE 3	
L'interface radio du LTE	59
Rappels sur le canal radio	60
Les modes de duplexage	73
L'architecture de l'interface radio	78
Les canaux	85
Structure de trame de l'interface radio	91
La dimension fréquentielle en LTE	94
Les caractéristiques clés de la couche physique	96
Introduction aux traitements d'émission et réception	96

Synthèse fonctionnelle	97
Références	98
CHAPITRE 4	
Codage, modulation et adaptation de lien	99
Codage de canal	100
Embrouillage et modulation	110
Adaptation de lien	112
Références	118
CHAPITRE 5	
Le MIMO	119
Le MIMO	119
Structure générale des traitements MIMO en LTE	132
Schémas MIMO normalisés en voie descendante	135
Schémas MIMO possibles en voie montante	142
Modes de transmission	143
Références	144
CHAPITRE 6	
Transmissions multiporteuses	147
L'OFDM	147
L'OFDMA	154
Le SC-FDMA	156
Numérologie	158
Références	160
CHAPITRE 7	
Signaux de référence	161
Signaux de référence en voie descendante	163
Signaux de référence en voie montante	167
Références	178
CHAPITRE 8	
Format des canaux physiques en voie descendante	181
Canal de données en voie descendante (PDSCH)	182
Canal de diffusion (PBCH)	183
Canal de contrôle en voie descendante (PDCCH)	184
Canal indicateur du format de contrôle (PCFICH)	188
Canal indicateur d'HARQ (PHICH)	190
Références	193

CHAPITRE 9

Format des canaux physiques en voie montante	195
Canal de données en voie montante (PUSCH).....	196
Canal de contrôle en voie montante (PUCCH)	201
Références	210

CHAPITRE 10

Allocation de ressources	211
Rôle du scheduling et principes généraux	211
Entrées du scheduler remontées par l'UE	217
Types d'allocation de ressources en temps	222
Types d'allocation de ressources en fréquence	226
Coordination d'interférence intercellulaire (ICIC).....	233
Contrôle de puissance.....	239
Références	242

CHAPITRE 11

HARQ	243
Principe de l'HARQ	244
L'HARQ en LTE.....	246
Procédure HARQ en voie descendante	252
Procédure HARQ en voie montante	255
Références	260

CHAPITRE 12

Signalisation de contrôle PHY-MAC	261
Allocation de ressources et transmission de données.....	262
Acquittements d'HARQ	268
Requête de scheduling	271
Retour d'informations sur l'état du canal	272
Retour d'informations de contrôle sur le PUSCH.....	279
Références	279

CHAPITRE 13

Aspects physiques de la recherche de cellule et de l'accès aléatoire	281
Recherche de cellule.....	282
Accès aléatoire.....	288
Références	296

CHAPITRE 14

Le protocole MAC.....	299
Rôle et fonctions du protocole MAC.....	299
Accès aléatoire.....	300

Maintien de la synchronisation en temps	308
La réception discontinue ou DRX	309
Priorisation des flux montants par l'UE	314
Références	318
CHAPITRE 15	
Les protocoles NAS	319
Les notions AS et NAS	319
Le protocole EMM	322
Le protocole ESM	325
Références	326
CHAPITRE 16	
L'accès au réseau	327
L'accès au réseau : finalité et principe	328
Le mode veille du terminal mobile	331
La sélection de réseau	332
La sélection de cellule	335
L'enregistrement au réseau	337
CHAPITRE 17	
La gestion des appels	345
Les différents types d'appels	346
Les échanges au sein du terminal mobile	346
La notion de bearer	348
Le bearer EPS	349
Bearer par défaut et bearer dédié	350
Les paramètres de QoS	355
Procédures d'appel	361
CHAPITRE 18	
La mobilité en mode veille	367
Quelques notions utiles	367
La resélection de cellule	369
Les performances de l'UE en resélection	381
La mise à jour de localisation	382
CHAPITRE 19	
La mobilité en mode connecté	393
Les différents types de handover	394
Les phases du handover	396
Le handover au sein du système LTE	399

La mobilité intersystème en appel.....	413
Références	439
CHAPITRE 20	
La sécurité	441
Quelques définitions	442
Les principaux axes de sécurité dans le système EPS	443
L'architecture de la sécurité	446
L'authentification de l'abonné dans le système EPS	449
La gestion des clés et des contextes de sécurité dans le système EPS	453
Le chiffrement et la protection de l'intégrité au sein du système EPS.....	458
La gestion de la sécurité en mobilité	465
CHAPITRE 21	
Les réseaux auto-organisés	475
Intérêt du processus d'auto-organisation.....	475
L'effet du processus d'auto-organisation au niveau de l'UE	477
La configuration des interfaces S1 et X2	477
La déclaration automatique de relations de voisinage.....	478
La déclaration automatique de PCI	487
CHAPITRE 22	
Les cellules femto	489
Intérêt des cellules femto.....	489
Architecture pour la prise en charge des HeNB	492
Accès aux HeNB	495
CHAPITRE 23	
LTE-Advanced	499
Introduction	499
Contexte réglementaire : rôle de l'IMT-Advanced	500
Cahier des charges du LTE-Advanced	501
Principales nouvelles fonctionnalités	503
Perspectives d'évolution du LTE	525
Références	530
Annexe	
Liste des sigles	531
Index	539

Avant-propos

Ce livre a pour ambition de présenter la technologie LTE normalisée par le 3GPP, de manière accessible et commentée. Les concepts et techniques qui la sous-tendent sont expliqués en des termes aussi simples que possible, de sorte que le lecteur non nécessairement familier avec les systèmes radio mobiles puisse acquérir une vue d'ensemble de leurs principes de fonctionnement. Le lecteur déjà familier avec les technologies GSM et UMTS/HSPA trouvera une description détaillée des principaux mécanismes normalisés en LTE, ainsi que les motivations des choix de conception associés. Si certaines parties sont accessibles à tous, la plupart d'entre elles présupposent que le lecteur possède une formation élémentaire en communications numériques. De même, si nous avons autant que possible limité l'usage des mathématiques, un nombre restreint de parties supposent que le lecteur ait des connaissances en algèbre linéaire et probabilités.

Il est important d'indiquer que ce livre est conçu comme un compagnon explicatif aux spécifications du LTE, mais ne prétend pas s'y substituer. En particulier, nous ne décrivons pas dans tous leurs détails l'ensemble des mécanismes normalisés, mais donnons les clés des principaux pour que le lecteur puisse déchiffrer par lui-même les spécifications. Par ailleurs, ces dernières sont par nature appelées à évoluer au cours du temps : de nouvelles fonctionnalités sont régulièrement introduites, des corrections (mineures) pouvant aussi être apportées. Le livre se concentre sur les spécifications de la première version du LTE (appelée la Release 8 du 3GPP), un chapitre étant dévolu à son évolution LTE-Advanced (définie à partir de la Release 10).

Toutes les spécifications et rapports techniques du 3GPP auxquels nous nous référons dans cet ouvrage sont disponibles en ligne à l'adresse <http://www.3gpp.org/specification-numbering>. Nous citons également souvent des documents discutés en réunion de normalisation ; ces derniers sont disponibles sur le site Internet du 3GPP, à l'adresse <http://www.3gpp.org/ftp/>.

Notons enfin que les opinions exprimées dans ce livre sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles de leur employeur.

Nous espérons que ce livre sera utile à la compréhension de cette nouvelle technologie, appelée à devenir incontournable dans le quotidien de chacun dans le futur.

Yannick Bouguen, Éric Hardouin et François-Xavier Wolff

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.

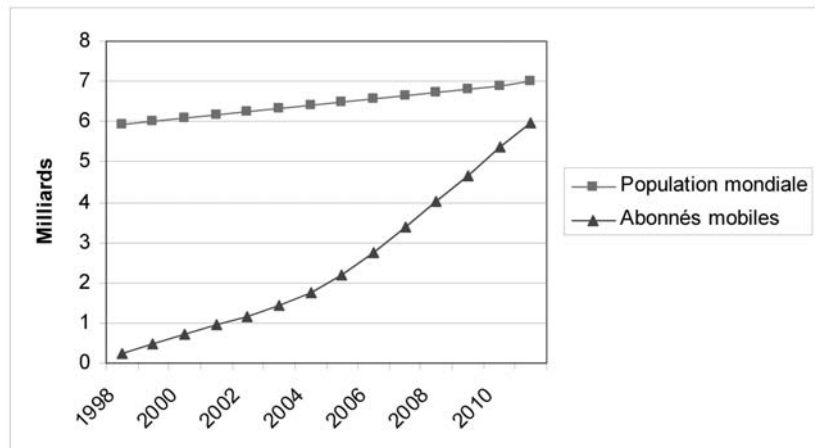
Un peu d'histoire

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*.

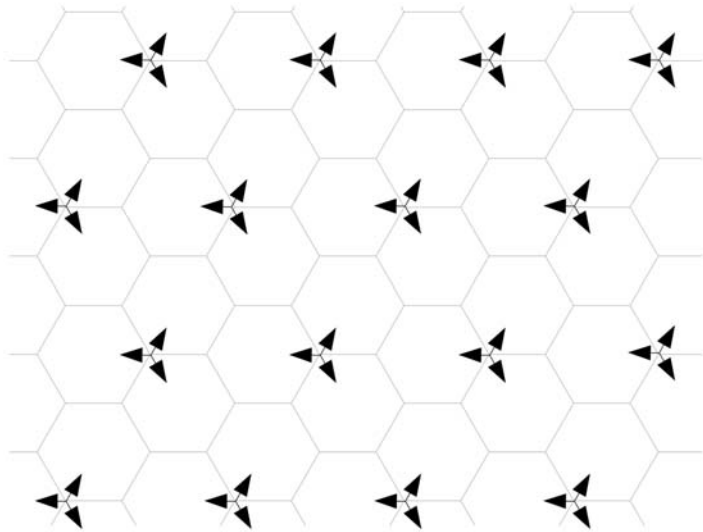
On distingue plusieurs types de cellules en fonction de leur rayon de couverture, lié à la puissance d'émission de la station de base, et de leur usage par les opérateurs.

- 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 :

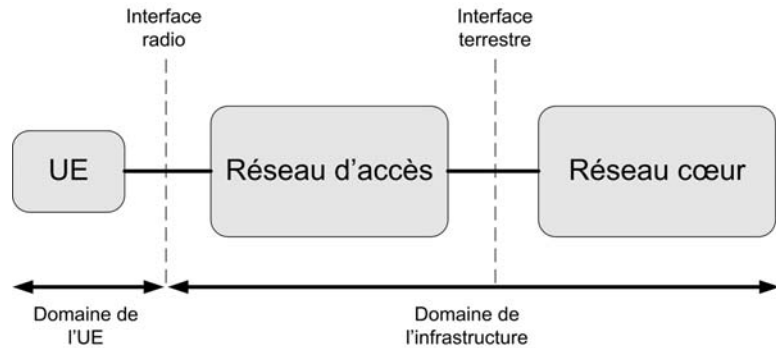
- le terminal mobile, appelé aussi équipement utilisateur (ou usager), abrégé en UE (*User Equipment*) ;
- le réseau d'accès ou RAN (*Radio Access Network*) ;
- le réseau cœur ou CN (*Core Network*).

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] :

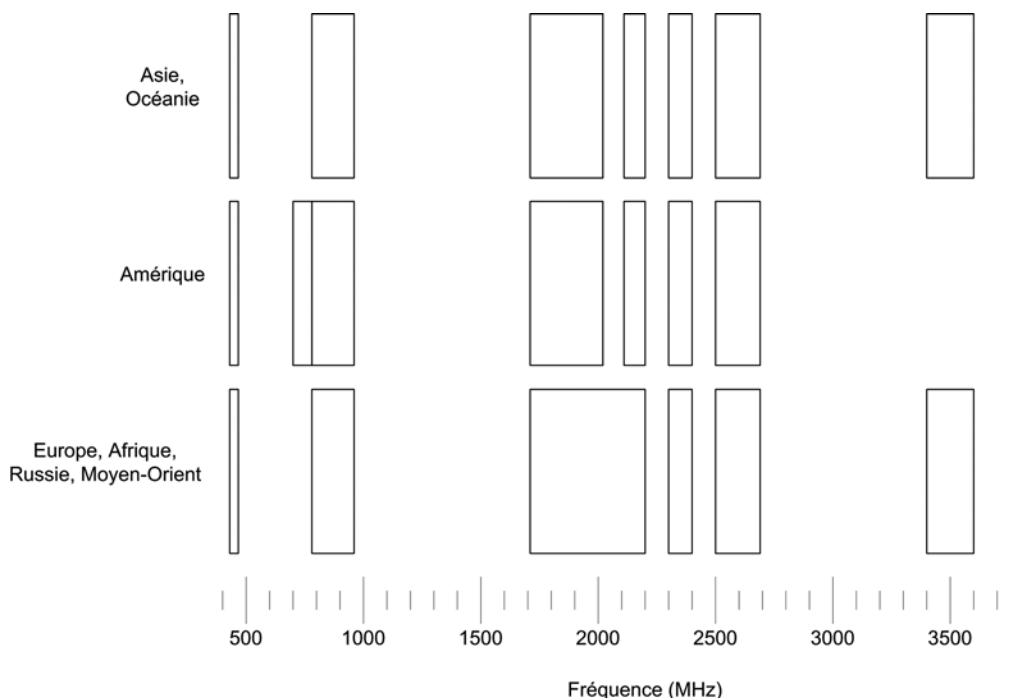
- 450 – 470 MHz ;
- 790 – 960 MHz, incluant la bande que nous appellerons plus tard la bande de fréquences 800 MHz ;
- 1 710 – 2 025 MHz ;
- 2 110 – 2 200 MHz ;
- 2 300 – 2 400 MHz ;
- 2 500 – 2 690 MHz ou bande de fréquences 2,6 GHz.

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

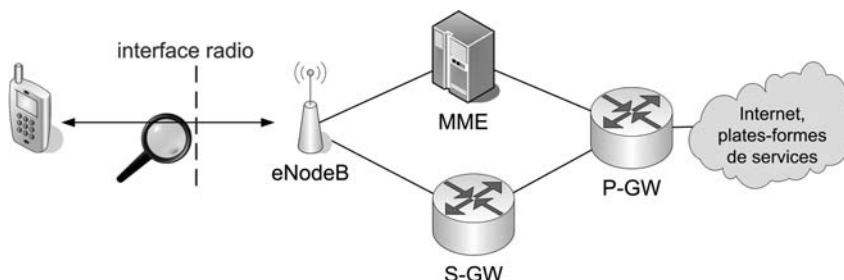
La Release 10 est principalement marquée par l'adaptation du LTE afin de garantir l'atteinte des exigences de la norme IMT-Advanced définie par l'UIT. La version du LTE définie en Release 10 est ainsi connue sous l'appellation LTE-Advanced. La description du LTE-Advanced fait l'objet du chapitre 23.

3

L'interface radio du LTE

Sommaire : *Rappels sur le canal radio – Les modes de duplexage définis pour le système LTE (FDD et TDD) – L'architecture de l'interface radio – Les canaux logiques, de transport et physiques – Structure de trame et dimension fréquentielle – Caractéristiques clés de l'interface radio – Introduction aux traitements d'émission et de réception*

Figure 3-1



Ce chapitre décrit les principes de l'interface radio du système LTE et fournit au lecteur les connaissances nécessaires à la compréhension de son fonctionnement.

L'interface radio assure le rôle clé de transférer par la voie des airs les données issues de la couche IP associées au service demandé par l'utilisateur. Ce transfert doit respecter des exigences de qualité de service (latence, débit) malgré un medium extrêmement variable, tout en optimisant l'accès à une ressource spectrale limitée. En outre, la disponibilité du spectre, variable selon les régions du globe, impose de pouvoir s'adapter à différents types de bandes disponibles.

Ce chapitre fournit une vue d'ensemble de l'interface radio du système LTE et constitue une introduction aux chapitres 4 à 19 qui décriront plus en détail les couches physique et MAC. La section « Rappels sur le canal radio » (p. 60) commence par rappeler les spécificités du canal radio. La section « Les modes de duplexage » (p. 73) présente ensuite les modes de duplexage définis pour le

système LTE. La section « L'architecture de l'interface radio » (p. 78) décrit l'architecture de l'interface radio, qui organise le transfert des données selon une structure en couches ayant chacune un rôle précis. Les couches communiquent entre elles via des canaux, dont les caractéristiques sont adaptées au type des données véhiculées et à la façon dont elles sont transportées. Les différents types de canaux sont présentés à la section « Les canaux » (p. 85). Les sections « Structure de trame de l'interface radio » (p. 91) et « La dimension fréquentielle en LTE » (p. 94) décrivent respectivement la structure de trame de l'interface radio et sa dimension fréquentielle, puis la section « Les caractéristiques clés de la couche physique » (p. 96) présente succinctement les caractéristiques clés de la couche physique. Enfin, les sections « Introduction aux traitements d'émission et de réception » (p. 96) et « Synthèse fonctionnelle » (p. 97) fournissent une vue d'ensemble respectivement des traitements mis en œuvre en émission et réception pour la transmission de données, et des fonctions assurées par les protocoles spécifiés pour l'UE.

Rappels sur le canal radio

En communications, le *canal de transmission* représente toutes les transformations subies par le signal entre l'émetteur et le récepteur, de par sa propagation dans le milieu de transmission, ainsi que dans les équipements d'émission et de réception. Le canal de transmission détermine la manière dont les données doivent être mises en forme à l'émetteur afin de se propager dans de bonnes conditions dans le milieu, ainsi que les traitements à mettre en œuvre au récepteur afin de les détecter correctement. Le canal de transmission est donc d'une importance clé, car il détermine une grande partie de la conception d'un système de communication.

Mécanismes de propagation

Dans le cas des communications radio mobiles, le signal est porté par une onde électromagnétique qui se propage dans l'air. La puissance reçue au récepteur dépend de plusieurs effets.

- Les *pertes de propagation* (*path loss*, en anglais) traduisent l'atténuation du signal en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur, et de l'environnement de propagation. Dans l'espace libre (c'est-à-dire lorsque l'onde ne rencontre aucun objet), les pertes de propagation varient comme le carré de la distance entre émetteur et récepteur. Des atténuations supplémentaires viennent s'ajouter du fait des obstacles dans le milieu, qui engendrent des réflexions, diffractions, diffusions et absorptions de l'onde. En particulier, la traversée de murs donne lieu à des pertes additionnelles dites *de pénétration*. Pour un environnement donné, les pertes de propagation ne dépendent que de la distance d entre émetteur et récepteur, typiquement selon une loi du type suivant, où A et B sont des constantes dépendant de l'environnement :

$$P(d) = A + B \cdot \log_{10}(d) \text{ (en dB) ;}$$

- L'*effet de masque* (ou *shadowing*) est une atténuation supplémentaire qui se produit lorsqu'un objet de grande taille (par exemple une tour) s'interpose entre l'émetteur et le récepteur. L'effet de masque varie donc en fonction des déplacements de l'UE, mais cette variation est lente si on la rapporte à la durée d'un intervalle de temps de transmission (qui dure une milliseconde en LTE).

- Les *évanouissements rapides* (*fast fading*) désignent des variations rapides de la puissance instantanée reçue, autour de la puissance moyenne. Ces variations proviennent du déplacement relatif de l'UE et des objets dans son environnement, comme nous le verrons plus loin. Les évanouissements profonds peuvent entraîner des pertes de puissance reçue de 35 dB en milieu urbain [Jakes, 1994]. Néanmoins, ces variations peuvent aussi augmenter la puissance reçue de quelques décibels. Pour un trajet de propagation dit distinguable (voir plus loin), deux évanouissements sont typiquement séparés d'une demi-longueur d'onde (soit 7,5 cm pour une fréquence porteuse de 2 GHz), d'où leur qualificatif de *rapides*. Ainsi, la puissance reçue peut varier de plusieurs décibels sur quelques millisecondes si la vitesse de l'UE est suffisante.

Contrairement aux évanouissements rapides, les pertes de propagation et l'effet de masque affectent la puissance moyenne du signal et sont relativement invariants sur une distance ou durée faible. La figure 3-2 résume l'effet de ces différents mécanismes sur la puissance de signal reçue. On voit que la puissance décroît régulièrement à mesure que l'UE s'éloigne de l'eNodeB, du fait des pertes de propagation (étapes 1 à 2, puis 4 à 5). La puissance chute ensuite brusquement lorsque le signal est masqué par la tour (étape 3), avant de remonter lorsque l'UE s'en dégage. Les variations de puissance instantanée dues aux évanouissements rapides sont également représentées sur un horizon bref. Elles affectent bien entendu le signal sur toute la durée du parcours de l'UE.

La figure 3-3 matérialise le chemin emprunté par le signal pour une position particulière de l'UE. Le signal est reçu via plusieurs trajets du canal, chaque trajet suivant un chemin particulier en fonction des réflexions, réfractions et diffusions sur les obstacles rencontrés par l'onde. La figure représente trois trajets principaux, dits *distinguishables* car ils peuvent être isolés les uns des autres par le récepteur. En réalité, les retards des trajets ne sont pas aussi bien marqués dans le temps, mais sont distribués autour de valeurs moyennes. Cependant, il est toujours possible de modéliser le canal comme un ensemble fini de trajets distinguables dans le domaine temporel après échantillonnage du signal [Proakis, 2000]. Chaque trajet distinguable est associé à un retard et/ou un angle d'arrivée moyen particulier, qui le différencie des autres dans le domaine temporel et/ou le domaine spatial, respectivement. En outre, chaque trajet distinguable est associé à une certaine puissance moyenne, qui dépend du chemin parcouru et des interactions que l'onde a subies avec l'environnement. À ce titre, les trajets correspondant à une vue directe entre l'émetteur et le récepteur, ou *Line of Sight* (LOS), sont reçus avec une puissance nettement supérieure à celle des trajets reçus via des réflexions, diffractions ou diffusions (dits *Non Line of Sight*, NLOS).

Chaque trajet distinguable est la somme d'un ensemble de *rayons* réfléchis, diffractés ou diffusés sur une même zone d'un obstacle donné. Notons que seuls les rayons extrêmes de chaque trajet sont représentés sur la figure 3-3. Chaque rayon possède un retard et un angle d'arrivée qui lui sont propres, proches de ceux du trajet distinguable mais avec lesquels la différence est trop faible pour pouvoir les séparer.

Les rayons sont à l'origine du phénomène d'évanouissements rapides, que nous décrivons à la section suivante, tandis que les retards différents des trajets distinguables créent les phénomènes d'*interférence entre symboles* et de *sélectivité en fréquence*, décrits à la section « Interférence entre symboles et sélectivité en fréquence » (p. 65). Enfin, la dimension angulaire des trajets fait l'objet de la section « Aspects spatiaux » (p. 66).

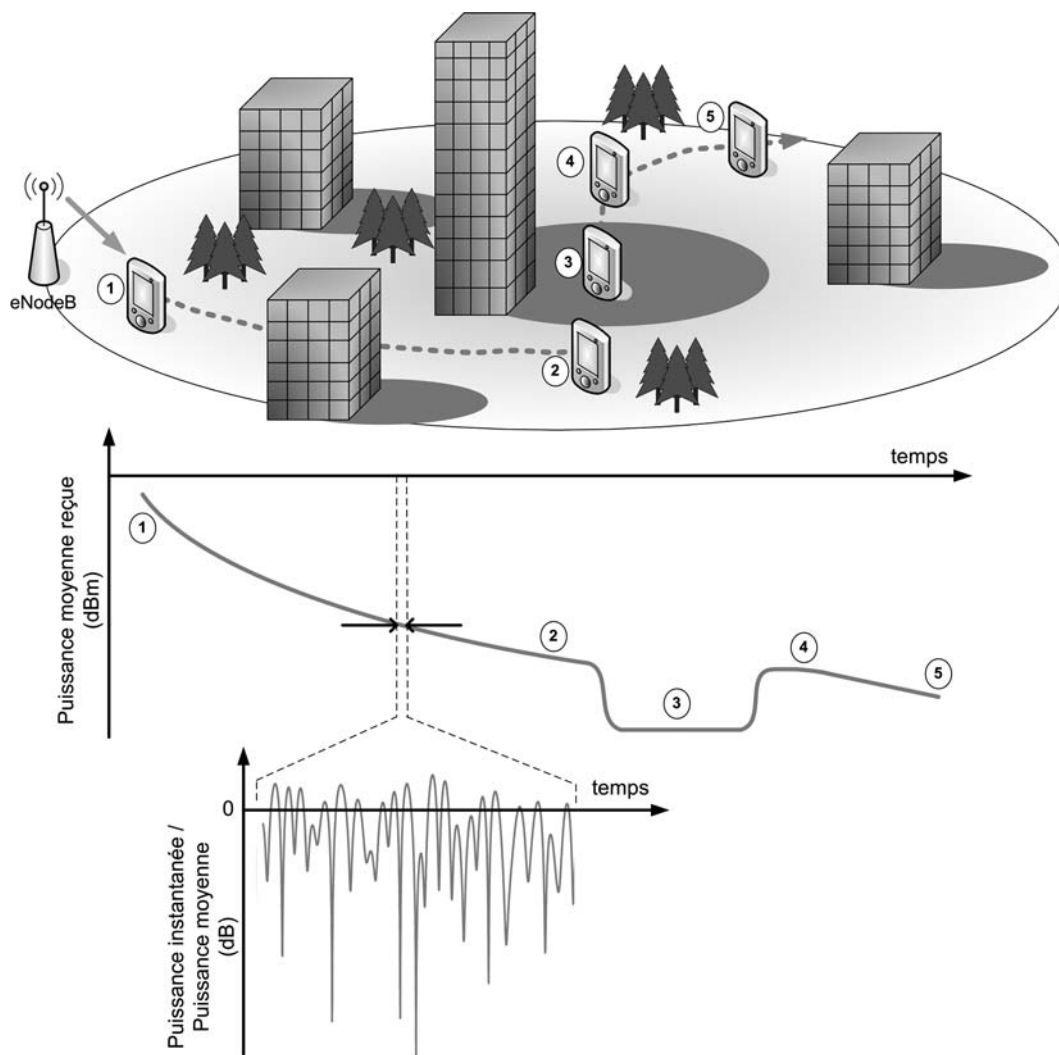


Figure 3-2
Évolution de la puissance reçue
en fonction du déplacement
dans l'environnement

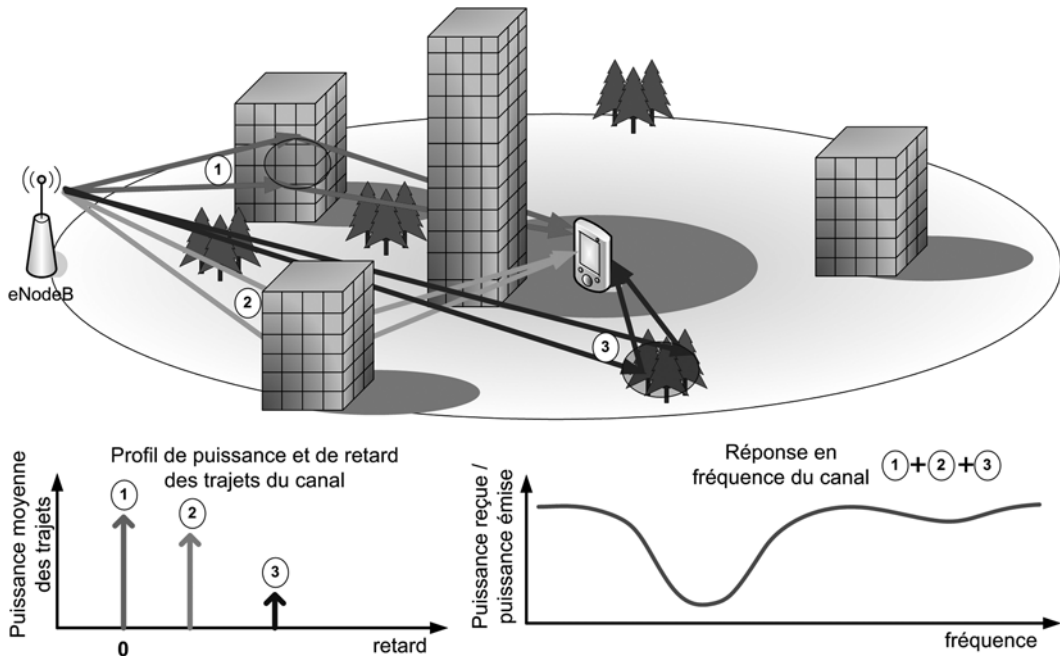


Figure 3-3
Trajets multiples et sélectivité en fréquence du canal

Évanouissements rapides et diversité

La différence de retard entre les rayons d'un trajet distinguable, aussi faible soit-elle, engendre une différence de phase entre les rayons au niveau d'une antenne de réception. À un instant donné, l'atténuation du signal sur un trajet distinguable dépend donc de la somme des phases des rayons qui le composent. Ces dernières peuvent s'additionner en phase pour donner des évanouissements constructifs, on parle alors de *combinaison cohérente*, ou en opposition de phase pour donner alors des évanouissements destructifs. La notion de combinaison cohérente est importante en communications numériques et est rappelée à la page suivante.

La phase de chaque rayon évolue à une vitesse spécifique, fonction de l'angle d'arrivée du rayon avec la direction de déplacement du récepteur suivant l'effet Doppler. Lorsque l'UE ou les objets dans son environnement se déplacent, la combinaison des phases varie rapidement pour donner le phénomène des évanouissements rapides, alternativement constructifs et destructifs. On peut ainsi voir l'UE comme se déplaçant dans un motif spatial d'évanouissements constructifs et destructifs. Puisque les phases et angles d'arrivée des rayons d'un trajet distinguable sont indépendants de celles d'un autre trajet, les évanouissements rapides affectant deux trajets distinguables sont indépendants. On définit le *temps de cohérence* du canal comme la durée pendant laquelle il reste sensiblement invariant.

Cette indépendance des trajets est exploitée pour réduire les effets négatifs des évanouissements rapides, via ce qu'on appelle la *diversité*. La diversité est un concept général en communications

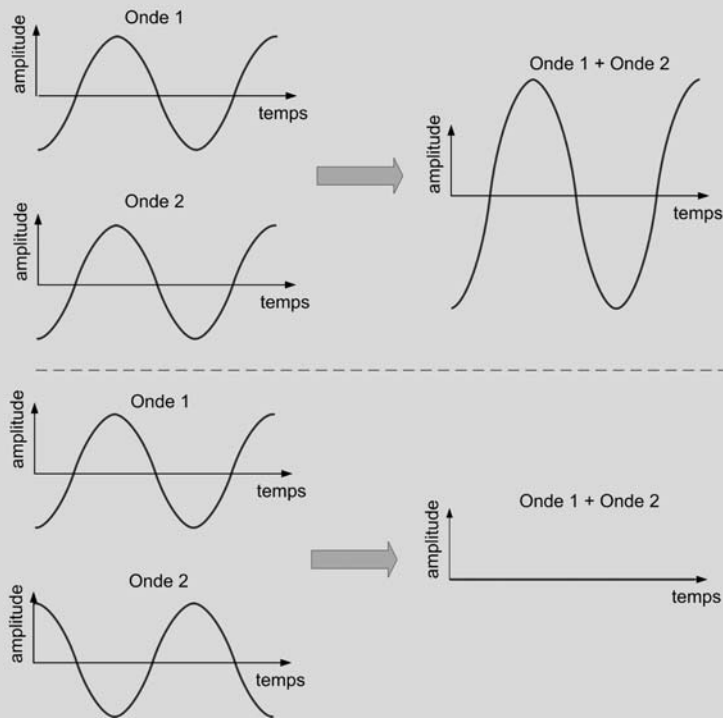
numériques, qui traduit le fait qu'un même bit d'information fait l'expérience de plusieurs réalisations indépendantes du canal au cours de sa transmission.

RAPPEL La notion de combinaison cohérente

Deux ondes de même fréquence sont combinées de manière cohérente si elles sont additionnées en phase. Prenons l'exemple de deux sinusoïdes de même amplitude comme sur la figure ci-dessous : les additionner en phase maximise la puissance du signal résultant, tandis que les additionner en opposition de phase annule le signal résultant.

Figure 3-4

Combinaison de deux sinusoïdes en phase (haut) et en opposition de phase (bas)



L'*ordre de diversité* désigne le nombre de réalisations indépendantes du canal. Plus cet ordre est élevé, plus la probabilité est faible que toutes les réalisations soient affectées par un évanouissement profond, ce qui augmente les chances d'avoir au moins une version du bit reçu qui permette de le détecter convenablement. Ainsi, l'augmentation de l'ordre de diversité améliore la robustesse de la transmission.

Dans le domaine temporel, la diversité s'obtient par la réception du signal via des trajets du canal affectés de manière indépendante par les évanouissements rapides, ou encore par des retransmissions. On distingue aussi la diversité spatiale, obtenue via plusieurs antennes (décorrélées) d'émission et/ou de réception. Enfin, la diversité en fréquence consiste à transmettre un bit d'information sur différentes parties de la bande de fréquence, par exemple via le codage de canal, afin de réduire les effets de la sélectivité en fréquence introduite à la section suivante.

Interférence entre symboles et sélectivité en fréquence

Dans le domaine temporel, les trajets distinguables sont reçus différemment atténués et retardés, ce qui crée un phénomène d'écho. Si les trajets sont de puissance similaire, et/ou s'ils sont en grand nombre, ils créent une interférence dommageable pour les performances de la transmission, appelée interférence entre symboles (IES). En effet, si des symboles de modulation sont émis sur le canal au rythme de un symbole toutes les T secondes, et si les retards des trajets sont non négligeables devant T , les symboles reçus sur un trajet seront interférés par ceux qui suivent ou qui précèdent, reçus via les autres trajets. En revanche, si la durée des symboles est grande devant le retard entre le premier trajet reçu et le dernier trajet d'énergie significative, l'IES sera quasi-inexistante. Cette différence de retards, aussi appelée *dispersion des retards* ou *delay spread*, caractérise la capacité du canal à provoquer de l'IES et donc sa difficulté pour des communications.

Le phénomène d'écho dans le domaine temporel se traduit dans le domaine fréquentiel par une *sélectivité en fréquence* : certaines fréquences du signal sont plus atténuées que d'autres, comme illustré sur la figure 3-3. La *bande de cohérence* est définie comme la largeur de bande sur laquelle la réponse en fréquence du canal peut être considérée comme constante.

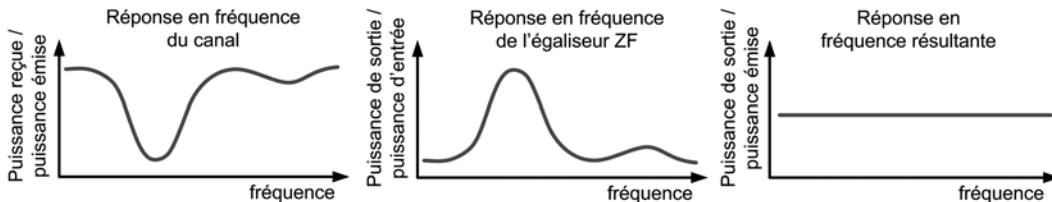


Figure 3-5
Principe de l'égaliseur ZF

L'IES et la sélectivité en fréquence introduisent ainsi une distorsion sur le signal reçu, qu'il est nécessaire de compenser afin de détecter correctement le signal émis. Cette correction est assurée par une fonction du récepteur appelée *égalisation*, car elle vise à restaurer un canal équivalent plat en fréquence, ou, de manière équivalente monotrajét dans le domaine temporel. En effet, un trajet unique ne modifie pas les propriétés spectrales du signal. Notons que l'égalisation assure également la compensation de la phase introduite par le canal lorsque l'information est portée par la phase absolue de la porteuse (on parle alors de *démodulation cohérente*). L'égalisation est typiquement mise en œuvre au moyen d'un filtre appelé *égaliseur*. Plus la dispersion des retards du canal est importante et plus le filtre devra avoir une réponse impulsionnelle longue, donc plus il sera complexe s'il est réalisé dans le domaine temporel. Dans le cas d'un canal sans bruit, l'égaliseur optimal selon le critère de la compensation de la sélectivité en fréquence inverse simplement la réponse en fréquence du canal comme illustré à la figure 3-5. On dit alors que l'égaliseur réalise un *forçage à zéro* de l'IES (*Zero Forcing*, abrégé en ZF), car dans le domaine temporel il supprime les échos du signal. En présence de bruit et/ou d'interférence, le forçage à zéro peut cependant conduire à amplifier significativement la puissance du bruit et de l'interférence, et à ainsi masquer les bénéfices de la compensation de la sélectivité en fréquence. On emploie donc généralement plutôt un critère de conception de l'égaliseur appelé la *minimisation de l'erreur quadratique moyenne* (*Minimum Mean*

Square Error, MMSE), qui réalise un compromis entre la compensation de la sélectivité en fréquence et l'augmentation de la puissance de bruit et d'interférence. Ces deux critères ZF et MMSE sont communs en communications numériques et leur cadre d'application dépasse celui de la compensation de la sélectivité en fréquence. Le lecteur pourra se reporter à [Joindot, Glavieux, 2007] pour plus de détails sur ces deux critères d'optimisation et sur l'égalisation en général.

Aspects spatiaux

Il existe un canal de transmission entre chaque antenne d'émission et chaque antenne de réception. De la même manière que deux oreilles permettent de distinguer la direction de provenance d'un son, les antennes multiples à l'émetteur et/ou au récepteur révèlent la dimension spatiale du canal.

Dans le domaine spatial, les angles de départ caractérisent la corrélation des canaux entre les antennes d'émission et une antenne de réception.

RAPPEL Notion de corrélation

La corrélation entre deux variables aléatoires traduit le degré de ressemblance moyenne entre ces variables. La corrélation entre deux canaux h_1 et h_2 s'exprime comme suit :

$$\text{Cor}(h_1, h_2) = E\{h_1 \cdot h_2^*\}$$

Où $E\{\}$ désigne l'espérance mathématique et l'exposant $*$ indique la conjugaison complexe. Si on modélise h_1 et h_2 comme des variables aléatoires de moyenne nulle et de variance unité, une corrélation unité signifie que ces deux canaux sont identiques, tandis qu'une corrélation nulle signifie qu'ils sont complètement indépendants ; entre ces deux extrêmes, deux canaux peuvent être plus ou moins corrélés. En pratique, on peut mesurer la corrélation par la moyenne temporelle du produit $h_1 \cdot h_2^*$.

De même, les angles d'arrivée caractérisent la corrélation des canaux entre une antenne d'émission et plusieurs antennes de réception. Cette corrélation entre canaux, généralement simplement appelée *corrélation entre antennes*, augmente avec l'écart entre les angles extrêmes, aussi appelé *dispersion angulaire (angle spread)*. Cela s'explique en regardant la figure 3-6 (a). Le rayon 1 arrive sur le réseau d'antennes avec un angle θ_1 faible par rapport à l'axe de symétrie du réseau, tandis que le rayon 2 arrive avec un angle θ_2 bien plus élevé. La distance δ_2 de chemin à parcourir par le rayon 2 entre les deux antennes est alors bien plus importante que pour le rayon 1, ce qui se traduit par un écart de phase entre les signaux reçus par chaque antenne également plus important pour le rayon 2. Un trajet distinguable est formé d'un ensemble de rayons. Plus la dispersion angulaire de ces rayons est importante et plus la somme de leurs phases respectives conduira à des évanouissements différents entre les antennes pour ce trajet.

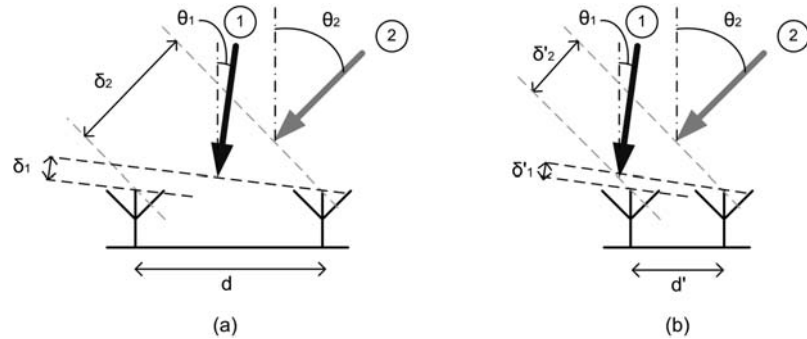
En contraste, lorsque l'UE est en vue directe de l'eNodeB, un seul trajet du canal domine largement tous les autres en termes de puissance. Ce trajet est reçu via des angles de départ et d'arrivée uniques, conduisant à des antennes fortement corrélées.

Outre l'environnement de propagation, la corrélation des antennes dépend des antennes elles-mêmes, tout d'abord via leur espacement. Reprenons la figure 3-6 et observons la différence entre

les cas (a) et (b). On voit que plus les antennes sont espacées et plus la différence de chemin des rayons entre les antennes est importante. La somme de plusieurs rayons incidents avec des angles donnés conduit ainsi à des évanouissements d'autant plus différents que les antennes sont espacées. En d'autres termes, plus des antennes sont espacées et moins elles sont corrélées.

Figure 3-6

Influence de l'angle d'arrivée et de la distance entre antennes sur la différence de chemin parcouru entre deux antennes



L'autre facteur influençant la corrélation des antennes est leur *polarisation*. La polarisation caractérise la trajectoire de l'extrémité du vecteur de champ électrique lors du déplacement de l'onde [Balanis, 2005]. Une antenne peut être conçue de façon à produire et/ou recevoir une onde selon une polarisation déterminée. On considère généralement deux grands types d'antennes pour les réseaux mobiles : les antennes de même polarisation (rectiligne), dites *copolarisées*, et les antennes de polarisations orthogonales, dites à *polarisation croisée* (*cross-polarized*). La figure suivante illustre ces deux grands types, pour 2 et 4 antennes.

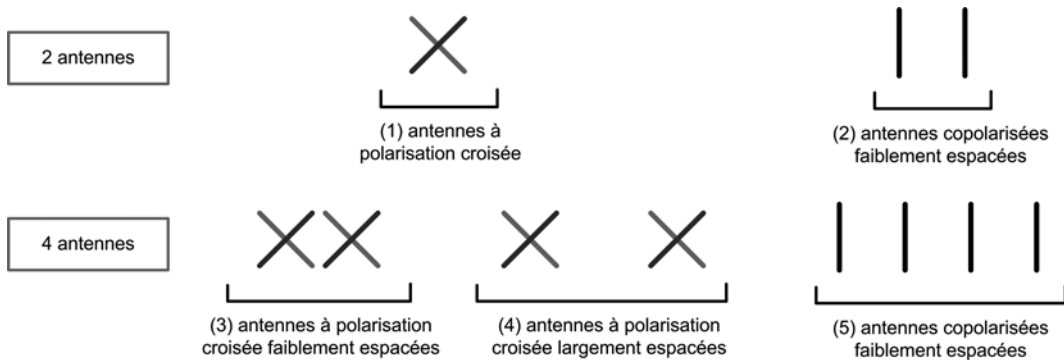


Figure 3-7

Configurations d'antennes typiques pour les réseaux mobiles, pour 2 et 4 antennes

Tout ce que nous avons dit jusqu'à présent sur le caractère spatial de la transmission s'applique à des antennes copolarisées. En effet, la polarisation ajoute une nouvelle dimension à la propagation.

Des antennes à polarisation croisée permettent en théorie d'émettre des signaux indépendants sur chaque polarisation et de les recevoir sans interférence mutuelle, à condition que le récepteur utilise également

des antennes à polarisation croisée. En réalité, les interactions avec les obstacles introduisent une dépolarisation des ondes, de sorte qu'une antenne de réception polarisée selon une direction donnée recevra une contribution du signal émis par une antenne d'émission polarisée orthogonalement [Oestges, Clerckx, 2007]. Néanmoins, les polarisations horizontale et verticale sont affectées très différemment par les obstacles rencontrés lors de leur propagation, ce qui conduit à des évanouissements très différents selon la polarisation. Les antennes à polarisation croisée sont ainsi typiquement faiblement corrélées.

Les antennes à polarisation croisée constituent une configuration de choix pour les opérateurs, car elles offrent une faible corrélation tout en autorisant des formes de radôme compactes. En effet, les antennes à polarisation croisée occupent une largeur environ deux fois moindre que des antennes copolarisées de même nombre d'éléments. Cette caractéristique est avantageuse, car des antennes plus étroites offrent moins de prise au vent et sont moins visibles dans l'environnement. Lorsque plus de deux antennes à polarisation croisée sont déployées, les paires d'éléments de même polarisation peuvent être plus ou moins espacés. Considérons, par exemple, la configuration (3) de la figure précédente : elle comporte deux paires d'éléments copolarisés, corrélés car rapprochés, ces deux paires étant décorrélées car de polarisations différentes.

La corrélation entre antennes est un paramètre important des systèmes possédant plusieurs antennes en émission et plusieurs antennes en réception, ou MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). En effet, elle conditionne la diversité spatiale pouvant être récupérée par les antennes multiples, ainsi que le nombre de flux indépendants transmissibles sur les mêmes ressources temporelles et fréquentielles. Ce dernier mécanisme est appelé le *multiplexage spatial* et nous verrons au chapitre 5 qu'il est largement exploité en LTE. Attardons-nous un peu sur les ressorts physiques de ce mécanisme. Nous venons de voir que dans le cas des antennes à polarisation croisée, deux flux indépendants seront, dans un cas idéal, transmis chacun sur une polarisation orthogonale et reçus sans interférence mutuelle. Dans le cas des antennes copolarisées, le multiplexage spatial peut se comprendre de manière intuitive d'après la figure de la section « Mécanismes de propagation » (p. 60) montrant les trajets. Plus les angles de départ et d'arrivée sont dispersés, plus les trajets distinguables du canal ont de chances de passer par des chemins différents, associés à des obstacles différents, comme c'est le cas sur la figure. Si l'émetteur et le récepteur sont capables d'orienter la transmission et la réception pour sélectionner chaque trajet individuellement, on comprend qu'il soit possible de transmettre plusieurs flux d'information indépendants sur les mêmes ressources temps-fréquence, chaque flux étant porté par un trajet. Nous aborderons le multiplexage spatial sous l'angle mathématique au chapitre 5 et montrerons que le paramètre déterminant pour sa mise en œuvre est la corrélation des antennes.

Interférence, qualité de canal et débit

Nous avons vu jusqu'ici les mécanismes de propagation affectant la puissance de signal utile reçu ainsi que son éventuelle distorsion. Au sens le plus général, le canal intègre également les perturbations externes affectant la transmission : l'interférence et le bruit thermique. Le bruit thermique est provoqué par les équipements électroniques du récepteur, tandis que l'interférence est créée par d'autres transmissions radio que celle attendue par le récepteur.

La qualité du signal reçu, aussi appelée la *qualité du canal*, est caractérisée par le *rapport signal sur interférence et bruit* (*Signal to Interference and Noise Ratio*, SINR), défini comme suit :

$$SINR = \frac{\text{Puissance du signal utile}}{\text{Puissance de l'interférence} + \text{Puissance du bruit}}$$

Dans cette équation, les différentes puissances mises en jeu sont mesurées au niveau symbole, en sortie des divers traitements de réduction d'interférence du récepteur (notamment de l'égaliseur), mais avant le décodage de canal.

Le débit pouvant être offert à un UE dépend directement de son SINR. Sous l'hypothèse d'un canal fixe et d'une interférence gaussienne, le débit maximal pouvant être atteint pour un SINR donné est donné par la formule de Shannon, où B est la largeur de bande de la transmission (en Hz) :

$$C(SINR, B) = B \cdot \log_2(1 + SINR) \quad (\text{en bit/s})$$

Ce débit maximal est appelé la *capacité du canal*. La formule précédente est relative à la transmission d'un seul bloc de données. Il existe d'autres formules plus détaillées donnant la capacité du canal pour des scénarios de transmission particuliers, notamment MIMO où plusieurs blocs de données sont transmis sur les mêmes ressources. On pourra trouver ces formules par exemple dans [Tse, Viswanath, 2005]. Dans la pratique, le débit de la transmission est adapté en réglant le type de modulation et de codage de manière à s'approcher au plus près de la capacité du canal, avec une certaine probabilité d'erreur sur le paquet transmis. La formule de Shannon, si elle reste théorique, donne néanmoins les grandes tendances de l'évolution du débit en fonction du SINR.

Il existe plusieurs types d'interférence :

- l'interférence *entre symboles*, que nous avons déjà présentée ; en LTE, cette interférence n'est présente que dans la voie montante en raison de l'utilisation de l'OFDM sur la voie descendante, comme nous le verrons par la suite ;
- l'interférence *entre couches spatiales*, créée par une transmission MIMO mono-utilisateur, ce qui consiste à transmettre plusieurs flux d'information (ou couches spatiales) indépendants vers un même UE, sur les mêmes ressources temps-fréquence ;
- l'interférence *intracellulaire*, créée par la transmission d'autres UE dans la cellule ; en LTE, la seule source d'interférence intracellulaire est la transmission MIMO multi-utilisateurs, où plusieurs UE sont servis sur les mêmes ressources temps-fréquence en étant séparés dans l'espace ;
- l'interférence *de canal adjacent*, créée par une transmission sur une fréquence adjacente à celle de la porteuse assignée à l'UE ;
- l'interférence *intercellulaire*, créée par les cellules voisines.

Les interférences liées au MIMO et l'interférence de canal adjacent seront détaillées respectivement au chapitre 5 et à la section « Le mode FDD » (p. 74) du présent chapitre. Dans ce qui suit, nous nous attardons sur l'interférence intercellulaire, car elle joue un rôle clé dans la répartition géographique du débit sur la cellule.

Dans un réseau cellulaire, la cellule dans laquelle opère un UE est environnée de cellules voisines, qui typiquement réutilisent les mêmes ressources temps-fréquence pour la communication avec les UE qu'elles servent. Ce faisant, les cellules voisines génèrent une interférence qui affecte significativement les performances de la communication. Du fait de la géométrie d'un réseau cellulaire, un

UE qui s'éloigne de son eNodeB serveur pour s'approcher de la bordure de cellule est soumis à deux mécanismes affectant sa qualité de canal.

- La puissance de signal utile reçue de l'eNodeB serveur diminue en raison des pertes de propagation.
- La puissance d'interférence intercellulaire augmente, puisque l'UE se rapproche des stations de base interférentes.

Cette observation conduit à une caractéristique fondamentale des réseaux cellulaires : à allocation de ressources égales, un UE en bordure de cellule reçoit moins de débit qu'un UE proche de l'eNodeB. Il est possible de réduire cette inégalité en allouant plus de ressources aux UE en bordure de cellule. Néanmoins, l'amélioration de l'équité entre UE s'effectue alors au détriment de la capacité de la cellule, puisque les ressources supplémentaires allouées aux UE en bordure de cellule fourniraient plus de débit si elles étaient allouées à des UE en meilleures conditions radio. L'allocation de ressources doit donc réaliser un compromis entre la capacité de la cellule et le débit des UE en bordure de cellule. En règle générale, ces derniers reçoivent ainsi moins de débit que les UE proches de l'eNodeB. On notera qu'il n'est pas nécessaire de se trouver en bordure de cellule pour expérimenter de mauvaises conditions radio, par exemple à cause de l'effet de masque ou des pertes de pénétration.

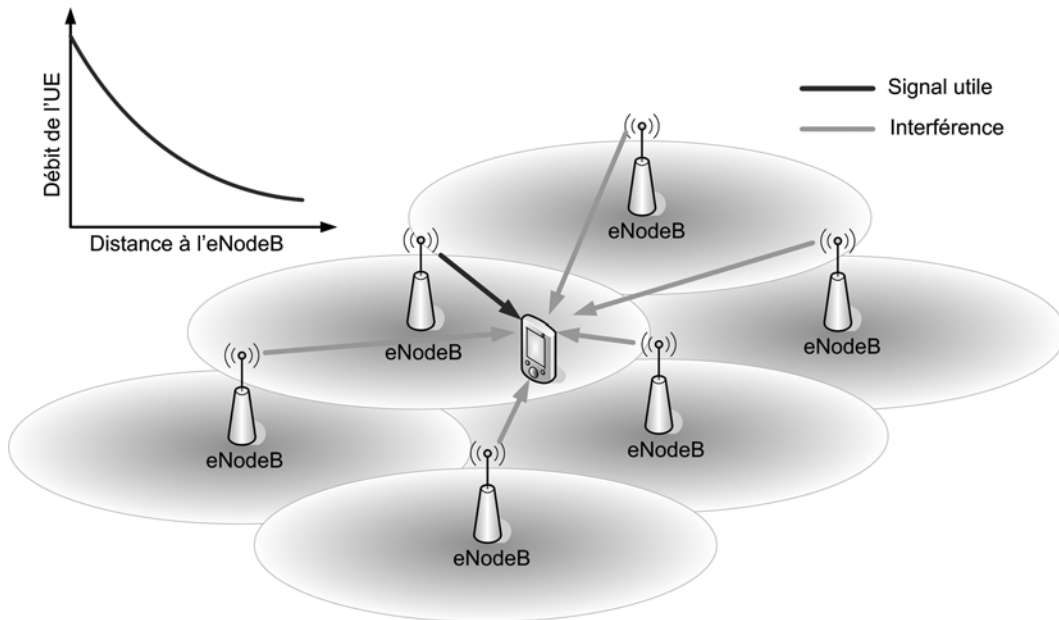


Figure 3-8

Influence de la position de l'UE dans la cellule sur son débit

Représentation mathématique du signal

On peut représenter l'effet du canal sur le signal transmis comme un filtrage par un filtre linéaire, dont les coefficients complexes capturent l'atténuation et le déphasage de chaque trajet distinguable. Ce canal, vu du récepteur en bande de base, ne se limite pas aux effets de la propagation, mais prend en compte également les effets sur le signal apportés par les différents équipements radiofréquence (filtres, etc.) des chaînes d'émission et de réception.

Pour les besoins de l'exposé, nous anticipons un peu sur le contenu du chapitre 6. Nous y verrons que la transmission en voie descendante s'effectue en LTE sur un ensemble de fréquences élémentaires orthogonales appelées *sous-porteuses*, un symbole de modulation étant transmis par sous-porteuse à un instant donné. Ce schéma de transmission est appelé OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Le signal temporel résultant de la modulation simultanée d'un bloc de symboles sur les différentes sous-porteuses du système est appelé un *symbole OFDM*. L'OFDM rend le canal plat en fréquence sur chaque sous-porteuse, de sorte qu'il est suffisant de représenter le canal entre une antenne d'émission et une antenne de réception par un seul coefficient complexe dans le domaine fréquentiel. Ce coefficient varie au cours du temps en fonction des déplacements de l'UE, mais peut être considéré comme constant sur l'intervalle de temps correspondant à la transmission d'un symbole OFDM.

Considérons un système OFDM à une antenne d'émission et une antenne de réception. Après filtrage de réception et échantillonnage, on peut exprimer un échantillon en bande de base de signal reçu sur une sous-porteuse donnée d'un symbole OFDM donné par :

$$r = \sqrt{P} h a + z$$

Dans cette expression, r est l'échantillon de signal reçu, a est le symbole de modulation émis (supposé de variance unité), P est la puissance moyenne du signal émis, z est un échantillon d'interférence et de bruit thermique, et h est le coefficient de canal, toutes ces grandeurs étant des scalaires complexes relatifs à la sous-porteuse considérée. Rappelons que h intègre non seulement les effets de la propagation, mais aussi ceux des traitements radiofréquence d'émission et de réception.

Dans le cas du MIMO, on représente les coefficients du canal sous la forme d'une matrice, dont chaque colonne porte les coefficients des canaux entre les antennes de réception et une antenne d'émission donnée. En définissant h_{nm} comme le coefficient complexe du canal entre l'antenne d'émission n et l'antenne de réception m à un instant donné, la matrice du canal pour 2 antennes d'émission et 2 antennes de réception est de la forme :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h_{12} & h_{22} \end{bmatrix}$$

Cette matrice peut encore s'écrire comme :

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \quad \mathbf{h}_2], \text{ avec } \mathbf{h}_1 = \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \end{bmatrix} \text{ et } \mathbf{h}_2 = \begin{bmatrix} h_{21} \\ h_{22} \end{bmatrix}$$

Notons $\mathbf{a} = [a_1 \ a_2]^T$ le vecteur des symboles de modulation émis sur l'antenne 1 et l'antenne 2, respectivement, où l'exposant T note l'opération de transposition. Le signal reçu sur une sous-porteuse s'écrit alors sous la forme matricielle suivante, où \mathbf{r} et \mathbf{z} sont des vecteurs complexes de dimension 2×1 , contenant respectivement les échantillons de signal reçu et d'interférence sur chaque antenne de réception, et P est la puissance émise par antenne :

$$\begin{aligned}\mathbf{r} &= \sqrt{P} \mathbf{H} \mathbf{a} + \mathbf{z} \\ &= \sqrt{P} (\mathbf{h}_1 a_1 + \mathbf{h}_2 a_2) + \mathbf{z}\end{aligned}$$

Nous verrons au chapitre 5 que le signal émis sur chaque antenne d'émission en MIMO n'est pas nécessairement un symbole de modulation, mais peut être une version précodée d'un symbole ou plusieurs (jusqu'à deux symboles pour deux antennes d'émission et deux antennes de réception, pour une transmission vers un UE donné). Le précodage est utilisé pour donner certaines propriétés spatiales au signal émis et a pour effet de transmettre chaque symbole de l'ensemble des antennes d'émission. Toutefois, il est souvent possible de se ramener à l'expression ci-dessus en définissant \mathbf{h} comme un canal équivalent, résultant de la combinaison du canal de propagation et du précodage appliqué à un symbole particulier. De même, il n'est pas obligatoire de transmettre plusieurs symboles de modulation sur les mêmes ressources temps-fréquence. Le modèle précédent s'applique toujours dans ce cas, en mettant à zéro le symbole non transmis.

Il est également utile d'introduire la notion de matrice de corrélation du signal reçu, qui est notamment utilisée pour la mise en œuvre de certains traitements de réception. La matrice de corrélation du signal reçu est définie comme suit :

$$\mathbf{R} = E \left\{ \mathbf{r} \mathbf{r}^H \right\}$$

$E \{ \}$ désigne l'espérance mathématique et l'exposant H l'opération de transposition et conjugaison complexe. Sous l'hypothèse que le canal est déterministe et que les symboles de modulation sont indépendants, on montre que la matrice \mathbf{R} s'exprime de la façon suivante, où $P^{(i)}$ et $\mathbf{H}^{(i)}$ désignent respectivement la puissance par antenne et la matrice du canal de l'interfèreurs i et σ_N^2 note la puissance du bruit thermique :

$$\begin{aligned}\mathbf{R} &= P \mathbf{H} \mathbf{H}^H + \sum_i P^{(i)} \mathbf{H}^{(i)} \mathbf{H}^{(i)H} + \sigma_N^2 \\ &= P \mathbf{h}_1 \mathbf{h}_1^H + P \mathbf{h}_2 \mathbf{h}_2^H + \sum_i P^{(i)} \mathbf{H}^{(i)} \mathbf{H}^{(i)H} + \sigma_N^2\end{aligned}$$

La matrice de corrélation du signal reçu peut en pratique s'estimer par une moyenne temporelle et/ou sur plusieurs sous-porteuses de la grandeur $\mathbf{r} \mathbf{r}^H$, à condition que le canal varie peu sur l'horizon considéré.

La voie montante du LTE utilise un schéma de transmission dérivé de l'OFDM, appelé *SC-FDMA*, où une sous-porteuse ne porte plus un symbole de modulation, mais une combinaison linéaire des symboles de modulation du bloc transmis. En redéfinissant a_k ($k = 1, 2$) comme cette combinaison linéaire, le modèle précédent reste valide pour une sous-porteuse en SC-FDMA.

L'OFDM et le SC-FDMA seront décrits en détail au chapitre 6.

Les modes de duplexage

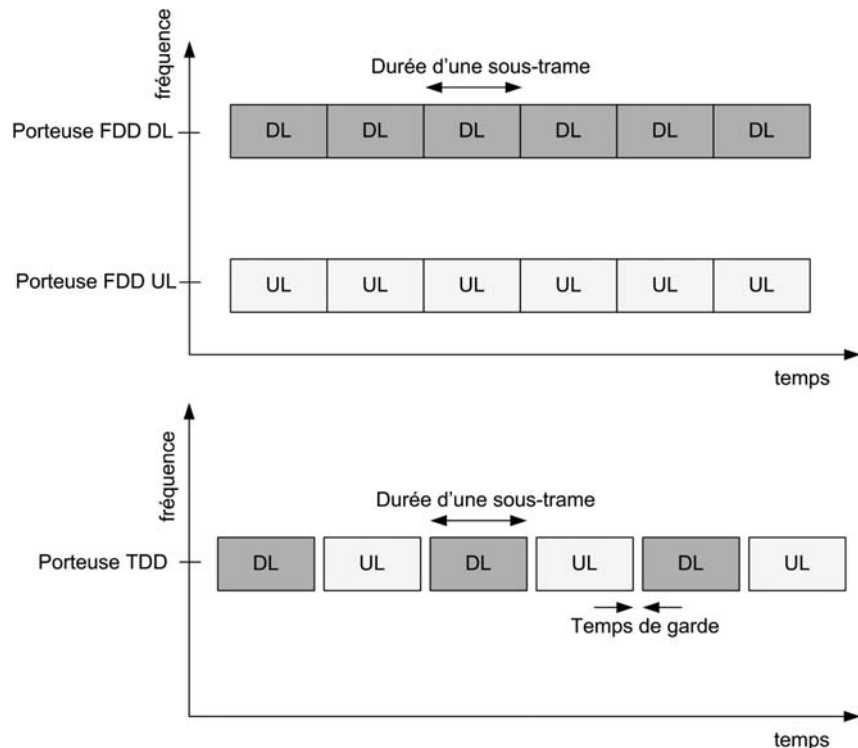
Le duplexage définit la manière dont sont séparées les transmissions sur la *voie descendante* et sur la *voie montante*. La voie descendante, aussi appelée *DownLink* (DL), correspond à la transmission de la station de base vers l'UE. La voie montante, aussi appelée *UpLink* (UL), correspond à la transmission de l'UE vers la station de base. Il existe deux principaux modes de duplexage, tous deux gérés par l'interface radio du LTE :

- le duplexage en fréquence ou *Frequency Division Duplex* (FDD) ;
- le duplexage en temps ou *Time Division Duplex* (TDD).

En mode FDD, les voies montante et descendante opèrent sur deux fréquences porteuses séparées par une bande de garde. En mode TDD, les voies montante et descendante utilisent la même fréquence porteuse, le partage s'effectuant dans le domaine temporel, comme illustré sur la figure suivante. Certains intervalles de temps de transmission sont réservés à la voie montante, tandis que les autres sont réservés à la voie descendante. Un temps de garde est nécessaire aux changements de direction de transmission, notamment pour laisser aux équipements le temps de basculer d'émission à réception. En LTE, l'intervalle de temps élémentaire pouvant être dédié à l'un des sens de transmission est appelé la *sous-trame* (voir la section « Structure de trame de l'interface radio », p. 91).

Figure 3-9

Répartition des voies montante et descendante en temps et fréquence pour les modes de duplexage TDD et FDD



Le choix du mode de duplexage dépend principalement de la disponibilité du spectre : le FDD requiert deux bandes de spectre appariées, séparées par une bande de garde de taille suffisante pour éviter les interférences. En revanche, le TDD permet de déployer un système de communication dans une bande isolée. En Europe, le FDD est le mode le plus couramment retenu pour l'UMTS, bien que des bandes TDD soient également disponibles. Ce choix est justifié par la présence des bandes appariées nécessaires, ainsi que par la facilité de mise en œuvre du FDD vis-à-vis des interférences, comme l'expliquent les deux sections suivantes. On notera cependant que le mode TDD est très utilisé par un opérateur en Chine, ce qui, en raison de la taille du marché correspondant, donne au mode TDD une importance industrielle significative. Les sections « Le mode FDD » (ci-dessous) et « Le mode TDD » (p. 75) décrivent les caractéristiques de ces modes, tandis que la section « Les modes FDD et TDD du LTE » (p. 77) présente brièvement leur mise en œuvre au sein du système LTE.

Le mode FDD

En mode FDD, les voies montante et descendante opèrent sur deux fréquences porteuses séparées. Cette séparation confère à ce mode une grande immunité vis-à-vis des interférences et simplifie ainsi le déploiement du réseau. Au contraire, nous verrons que le mode TDD requiert des précautions particulières dans ce domaine.

En contrepartie, une bande de garde est nécessaire entre les porteuses dédiées aux voies montante et descendante afin d'éviter l'interférence de canal adjacent de la bande d'émission sur la bande de réception (voir ci-après), pour laquelle la puissance des signaux reçus est généralement très faible. De plus, un duplexeur est requis au sein du terminal ainsi qu'à la station de base, afin d'isoler la partie du modem dédiée à l'émission de celle dédiée à la réception, puisque toutes deux partagent les mêmes antennes.

On notera que la bande dédiée à la voie montante est généralement la bande basse, tandis que celle dédiée à la voie descendante est généralement la bande haute. En effet, l'atténuation des ondes électromagnétiques en espace libre croît avec la fréquence. Par conséquent, un UE transmettant sur une fréquence basse requiert moins de puissance d'émission pour être reçu à la station de base avec un niveau de puissance donné qu'un UE d'un même système transmettant sur une fréquence plus haute. L'énergie étant une ressource rare pour l'UE et moins critique pour la station de base, il est logique d'allouer la fréquence basse à la voie montante et la fréquence haute à la voie descendante. Dans certains cas cependant, des contraintes de coexistence avec d'autres systèmes radio peuvent forcer la voie montante à opérer sur la bande haute et la voie descendante à opérer sur la bande basse.

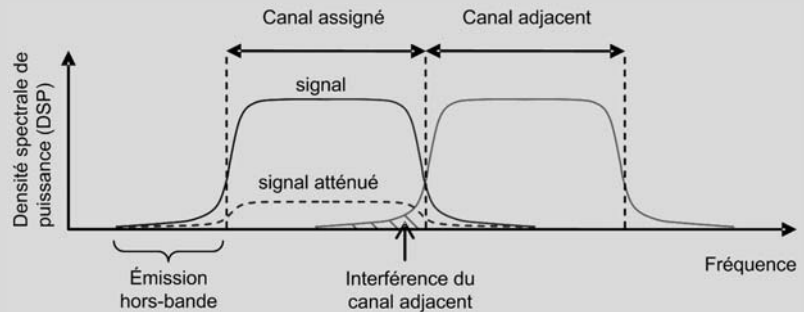
En outre, la séparation des voies montante et descendante en fréquence permet aux UE et stations de base d'émettre et de recevoir simultanément en FDD. Cette caractéristique aide à tirer le meilleur parti des mécanismes qui exploitent un échange rapide d'informations de contrôle entre émetteur et récepteur. Citons par exemple l'allocation de ressources dynamique, qui se base sur la qualité instantanée du canal mesurée par le récepteur (l'UE en voie descendante). En effet, en TDD, l'envoi d'informations dans une direction donnée ne peut s'effectuer que sur certaines sous-trames, ce qui peut augmenter leur délai de mise à disposition.

Il existe une variante du mode FDD, appelée *FDD half-duplex*. Dans ce mode, les UE ne peuvent émettre et recevoir simultanément. Une manière simple de mettre en œuvre le mode FDD half-duplex

RAPPEL L'interférence de canal adjacent

En communications radio, le signal transmis est assigné à occuper une largeur de bande donnée, appelée *canal*. Toutes les émissions hors de ce canal sont appelées émissions *hors-bande*. Ces dernières doivent être limitées car elles créent des interférences sur les canaux adjacents. Or, en pratique, il est impossible de réaliser des filtres ayant une fonction de transfert éliminant parfaitement les émissions hors-bande. Le niveau maximal des émissions hors-bande est donc fixé par les normes des systèmes de communication sans fil, en valeur relative par rapport à la puissance émise sur la bande du canal. Toutefois, si la puissance reçue sur le canal adjacent est très supérieure à celle reçue sur le canal assigné, la puissance hors-bande du canal adjacent peut affecter sévèrement la réception du signal utile. C'est ce qu'on appelle *l'interférence de canal adjacent*. Ce cas de figure est illustré à la figure suivante. Il apparaît lorsque l'émetteur sur le canal assigné est bien plus éloigné du récepteur que l'interfère sur le canal adjacent. Le signal utile est alors fortement atténué par les pertes de propagation et de même ordre de grandeur que le signal interférent.

Figure 3-10
Illustration de
l'interférence de
canal adjacent



est de diviser les UE en deux groupes, chaque groupe émettant lorsque les UE du deuxième groupe reçoivent, et inversement. Ce mode fait l'économie du duplexeur et réduit ainsi le coût des terminaux. On notera que la station de base, elle, émet et reçoit toujours simultanément, de sorte que la perte d'efficacité spectrale au niveau système est limitée. Cette perte n'est cependant pas complètement nulle, notamment en raison des restrictions imposées au scheduler pour servir un UE particulier. Le mode FDD half-duplex n'a pas été utilisé jusqu'à présent pour les systèmes radio mobiles, vraisemblablement en raison de la complexité d'implémentation à la station de base d'un scheduler adapté, et de la réduction du débit maximal qu'il entraîne pour les UE.

Le mode TDD

En mode TDD, les voies montante et descendante utilisent la même fréquence porteuse, le partage entre les deux directions s'effectuant dans le domaine temporel. Le TDD offre plusieurs avantages : tout d'abord, le partitionnement du temps en sous-trames montantes et sous-trames descendantes permet d'optimiser le système pour une éventuelle asymétrie du trafic entre les deux voies. Concrètement, le volume de trafic en voie descendante est généralement plus important qu'en voie montante. L'opérateur peut alors configurer un plus grand nombre de sous-trames descendantes que de sous-trames montantes.

Par ailleurs, l'utilisation de la même bande pour les voies montante et descendante offre l'avantage que le canal de propagation entre la station de base et l'UE est identique sur les deux voies. La station de base peut ainsi acquérir la connaissance du canal vu par l'UE sans que ce dernier ait à lui transmettre cette information. Cette propriété, appelée *réciprocité du canal*, est particulièrement utile pour mettre en œuvre des traitements de précodage à l'émission en transmission MIMO. Toutefois, cette propriété ne s'applique qu'au canal de propagation. Or, la connaissance du canal nécessaire à l'émetteur doit également prendre en compte l'effet des équipements radiofréquence (filtres, amplificateurs, câbles) et des antennes sur la phase et l'amplitude du signal. Ces équipements sont généralement sensiblement différents sur les chaînes d'émission et de réception d'un équipement donné, ce qui altère la réciprocité du canal de transmission complet. En pratique, une procédure dite de *calibration* doit donc être mise en œuvre à l'émetteur (et dans certains cas au récepteur également) afin de compenser les différences potentielles entre les chaînes d'émission et de réception [Huawei, 2009].

Enfin, l'utilisation de la même bande de fréquences permet de mutualiser une partie des composants radiofréquence entre la voie montante et la voie descendante ; de plus aucun duplexeur n'est nécessaire, ce qui conduit à des terminaux moins coûteux qu'en FDD.

Cependant, la dépendance temporelle du mode TDD impose des contraintes au système. Tout d'abord, toutes les stations de base d'une même zone géographique doivent être synchronisées en temps, ce qui n'est pas le cas pour le mode FDD qui requiert simplement une synchronisation en fréquence. La synchronisation en fréquence peut être fournie assez simplement par le lien de transmission qui connecte la station de base au contrôleur de stations de base (en GSM ou UMTS) ou au réseau cœur (en LTE). La synchronisation en temps est plus complexe à fournir par ce lien de transmission. Aussi, la solution la plus communément utilisée pour fournir une synchronisation en temps à une station de base est le déploiement d'un récepteur GPS connecté directement à la station de base.

Les stations de base doivent en outre mettre en œuvre la même configuration d'asymétrie entre voie montante et voie descendante, ce qui limite la flexibilité de reconfiguration de cette asymétrie. En effet, si deux équipements (station de base ou UE) proches se trouvaient dans des phases de communication différentes, l'émetteur brouillerait complètement le signal utile du récepteur. La figure suivante illustre ce cas de figure. Le récepteur de l'UE1 reçoit un signal utile émis par l'eNodeB1, affaibli en raison de leur éloignement. L'UE2 est lui aussi éloigné de sa station de base servante, l'eNodeB2, et émet donc une forte puissance pour compenser les pertes de propagation. Ce faisant, l'UE2 brouille la réception de l'UE1, puisque tous deux sont proches et communiquent simultanément sur la même fréquence porteuse.

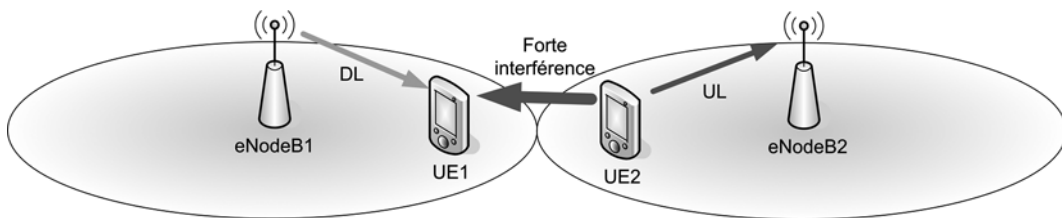


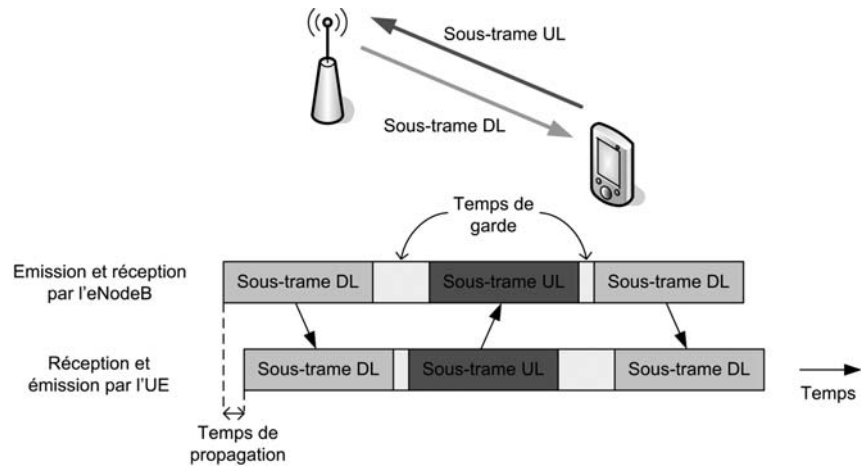
Figure 3-11

Cas d'interférence en mode TDD

En règle générale, le risque d'interférence de canal adjacent impose d'utiliser des bandes de garde entre une bande TDD et les bandes proches (TDD ou FDD) utilisées par d'autres systèmes ou appartenant à d'autres opérateurs dans la même zone géographique. Lorsque deux opérateurs TDD sont présents dans une même zone géographique sans bande de garde suffisante, il est nécessaire de synchroniser les réseaux en temps et d'aligner la configuration des sous-trames montantes et descendantes afin que les deux réseaux soient continuellement dans la même phase de communication.

Enfin, l'alternance entre voie descendante et voie montante implique d'établir un temps de garde entre une sous-trame descendante et une sous-trame montante. D'une part, les équipements ont besoin d'un certain temps afin de basculer entre émission et réception. D'autre part, le temps de propagation entre la station de base et un UE en bordure de cellule, puis entre cet UE et la station de base, rend impossible la réception par la station de base d'une sous-trame montante immédiatement après l'émission d'une sous-trame descendante. Cet effet, illustré sur la figure suivante, est d'autant plus accentué que la cellule est grande. Un temps de garde est également nécessaire à l'eNodeB pour la transition entre la réception d'une sous-trame montante et la transmission d'une sous-trame descendante, pour la bascule des équipements. Le temps de garde représente une perte d'efficacité pour le système, puisqu'aucune transmission ne peut intervenir durant cet intervalle. Afin de limiter cette perte, il est nécessaire de limiter le nombre de basculements entre voie descendante et voie montante.

Figure 3-12
Nécessité d'un temps de garde
en mode TDD



Les modes FDD et TDD du LTE

L'interface radio du LTE comprend les modes FDD et TDD, ainsi que le mode FDD half-duplex. La gestion des modes FDD et TDD a été décidée afin de garantir une interface radio universelle, déployable quelle que soit la disponibilité du spectre et permettant ainsi une itinérance (*roaming*) globale. Ces deux modes ont été développés de manière à présenter un haut degré de similitude. Ainsi, si la structure de trame diffère, la structure d'une sous trame est identique dans les deux modes, à l'exception des sous-trames spéciales employées en TDD à la transition entre voie descendante et voie

montante. De plus, les paramètres de base de la couche physique sont identiques pour les deux modes. Cette harmonisation permet de réutiliser une grande part des implémentations pour les deux modes et ainsi de réduire les coûts de développement.

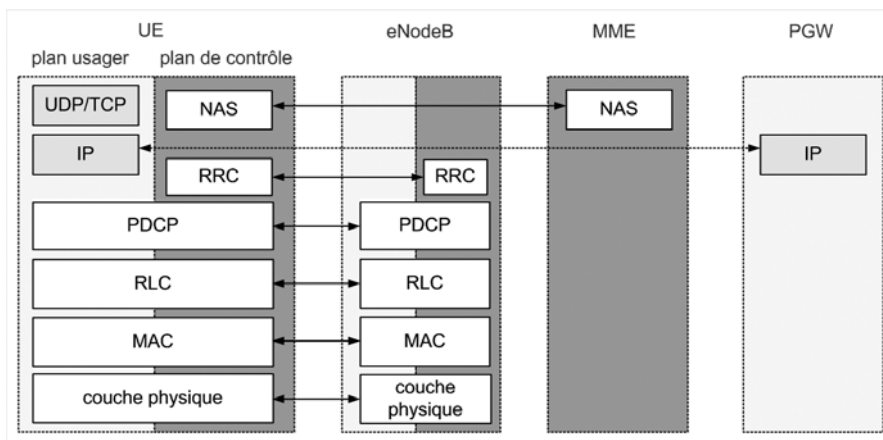
Les structures de trame pour les modes FDD et TDD du LTE ainsi que les configurations voie montante/voie descendante possibles en TDD seront données à la section « Structure de trame de l'interface radio » (p. 91). La mise en œuvre du mode FDD half-duplex sera également abordée dans cette section.

L'architecture de l'interface radio

Plan usager et plan de contrôle

Ces deux plans sont matérialisés par des piles protocolaires qui partagent un tronc commun (la partie inférieure) et qui se distinguent notamment dans les interactions avec les couches supérieures : alors que la signalisation NAS est véhiculée par le plan de contrôle de l'interface radio, son plan usager permet de transporter sur celle-ci les paquets délivrés ou à destination de la couche IP. Ces deux piles protocolaires sont représentées sur la figure suivante.

Figure 3-13
Piles protocolaires
des plans usager et
de contrôle sur
l'interface radio

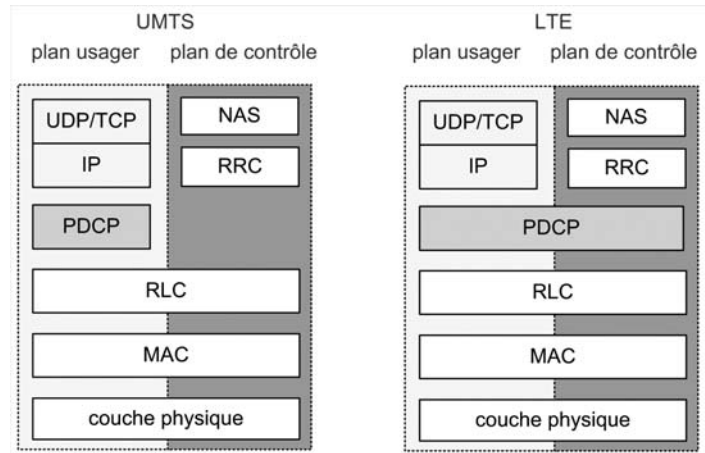


En LTE comme en GSM et UMTS, les protocoles du plan usager de l'interface radio correspondent aux deux premières couches du modèle OSI. La structure de l'interface radio du système LTE possède de nombreuses similitudes avec celle définie pour l'UMTS, comme le montre la figure 3-14.

La principale différence réside dans le rôle de la couche PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*). En UMTS, son unique rôle est de réaliser une compression d'en-tête des paquets IP. Ce protocole n'est pratiquement pas utilisé sur les réseaux UMTS actuels. En LTE en revanche, le protocole PDCP est utilisé systématiquement, car il est impliqué dans la sécurité de l'Access Stratum (chiffrement et intégrité). On notera cependant que toutes ces couches, si elles portent le même nom en UMTS et en LTE, sont néanmoins très différentes dans ces deux systèmes.

Figure 3-14

Piles protocolaires des interfaces radio en UMTS et en LTE



Les données traitées par PDCP, RLC, MAC et PHY appartiennent :

- au plan de contrôle lorsqu'il s'agit de données de signalisation communiquées par la couche RRC ;
- au plan usager lorsqu'il s'agit d'autres données (transmises par la couche IP).

Les notions de plan de contrôle et de plan usager sont transparentes aux couches RLC, MAC et PHY : celles-ci traitent les données délivrées par la couche supérieure, suivant la configuration indiquée par RRC, sans distinction a priori entre données de contrôle et données de l'utilisateur. Nous verrons plus loin que le traitement effectué par PDCP diffère en revanche suivant la nature des données reçues.

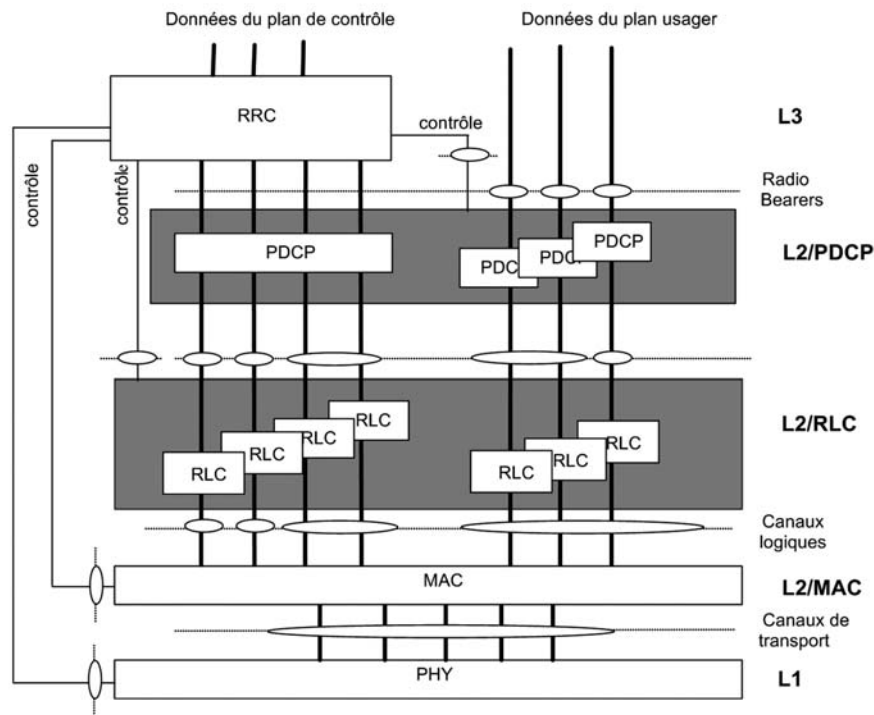
Indépendamment de ces deux plans, chaque couche utilise dans son protocole des informations de contrôle qu'elle échange avec l'entité paire distante, dans l'en-tête ajouté par la couche à l'unité de donnée. Cela permet à l'entité paire distante de traiter les données transmises de façon appropriée. Il s'agit donc d'informations de contrôle propres à la couche.

Interactions entre les couches

La figure 3-15 détaille le découpage en couches et les interactions logiques entre celles-ci pour les données du plan de contrôle et celles du plan usager. Cette architecture s'applique à l'UE et à l'eNodeB.

Deux entités paires distantes d'une couche (N) échangent entre elles des unités de données appelées *Protocol Data Unit* (PDU), formées d'un en-tête du protocole associé à cette couche N et de blocs de données. Ces blocs sont des unités de données délivrées par la couche supérieure (M), ou des segments de ces unités de données si ces dernières doivent être segmentées avant la transmission sur l'interface radio. L'unité de données de la couche M est appelée *Service Data Unit* (SDU) dans le contexte de la couche N , car elle porte des données de service que la couche N n'interprète pas. Ainsi, une PDU est-elle aussi une SDU pour la couche immédiatement inférieure, et ainsi de suite.

Figure 3-15
La modélisation
en couches
protocolaires de
l'interface radio



Par exemple, la couche PDCP de l'UE traite un paquet reçu de la couche IP et lui ajoute un en-tête, contenant notamment un numéro de séquence PDCP. Cette unité de donnée forme une nouvelle PDU PDCP, qui doit être transmise à la couche PDCP distante (celle de l'eNodeB). Pour cela, PDCP délivre la PDU à l'entité de la couche RLC associé au service. Cette entité RLC reçoit donc une nouvelle SDU RLC, qu'elle peut éventuellement segmenter ou concaténer avec d'autres SDU RLC précédemment reçues de la couche PDCP, afin de constituer une PDU RLC qui pourra être transmise sur l'interface radio sans segmentation ultérieure. À son tour, la couche RLC ajoute un en-tête à cette PDU qu'elle a formée, en-tête qui permet à l'entité distante de reconstituer la SDU RLC d'origine en rassemblant les segments reçus dans différentes PDU ou en identifiant les blocs concaténés dans cette PDU.

Ce transfert vertical de SDU entre couches du même équipement s'effectue via des points d'accès logiques entre couches, désignés par le terme générique *Service Access Points* (SAP) et représentés par des ellipses sur la figure précédente. Ils portent des noms spécifiques selon le niveau considéré : radio bearer au niveau RLC/PDCP, canal logique entre RLC et MAC, canal de transport entre MAC et PHY.

La section suivante décrit le rôle des différentes couches de l'interface radio, les canaux logiques et de transport étant présentés à la section « Les canaux » (p. 85).

Les couches de l'interface radio

La couche physique

La couche 1, appelée également *Layer 1* (L1) ou couche *PHY*, représente la couche physique. Son rôle est d'assurer la transmission des données sous une forme capable de se propager dans l'air et de résister aux différentes perturbations inhérentes au canal radio mobile. D'un point de vue fonctionnel, la couche physique offre un service de transport sur l'interface air à la couche MAC.

La couche physique réalise les fonctions suivantes pour la transmission de données :

- le *codage de canal*, qui protège les bits d'information contre les erreurs de transmission, en introduisant de la redondance dans la séquence de bits transmis ;
- la *modulation*, qui associe les bits à transmettre à des symboles de modulation capables d'imprimer une onde électromagnétique ;
- les *traitements spatiaux* (dits MIMO), qui précodent les symboles de modulation afin de les transmettre de plusieurs antennes (par exemple pour donner une direction au signal émis) ;
- la *modulation multiporteuse*, qui associe le signal à transmettre sur chaque antenne à des porteuses multiples, selon le principe de l'OFDM pour la voie descendante et du SC-FDMA en voie montante.

Les opérations inverses sont effectuées par la couche physique en réception, ainsi que des traitements de lutte contre l'interférence (par exemple l'égalisation). En outre, la couche physique assure des fonctions n'impliquant pas de transmission de données, mais nécessaires à son fonctionnement, ainsi qu'à certaines fonctions de la couche MAC :

- les *mesures radio*, pour estimer le canal de transmission, la qualité du signal de la cellule servante, ou encore les niveaux de puissance reçus d'une autre cellule, ou d'un autre système radio ;
- la *synchronisation*, afin d'acquérir et de maintenir la synchronisation en temps et fréquence avec la porteuse de l'émetteur ;
- la *détection de cellule*, afin de détecter la présence de cellules et de s'y connecter, à l'allumage de l'UE ou pour préparer un handover ;
- la *signalisation d'informations de contrôle* entre eNodeB et UE.

Le codage de canal et la modulation seront décrits au chapitre 4, le MIMO fera l'objet du chapitre 5 et les transmissions multiporteuses seront présentées au chapitre 6. Les signaux physiques sur lesquels s'effectuent les mesures radio seront détaillés au chapitre 7, les indicateurs mesurés étant introduits dans les chapitres relatifs aux fonctions qui les utilisent. La synchronisation et la détection de cellule seront traitées dans le chapitre 13. La signalisation d'informations de contrôle sera décrite au chapitre 12.

La couche 2

La couche 2 est constituée de trois sous-couches :

- PDCP (*Packet Data Compression Protocol*) ;
- RLC (*Radio Link Control*) ;
- MAC (*Medium Access Control*).

Ces sous-couches interviennent pour le transfert des données, du plan usager comme du plan de contrôle. Seule la sous-couche PDCP est conçue pour traiter différemment les données de ces deux plans. Pour RLC et MAC, c'est la configuration qui détermine les éventuelles différences de traitement à appliquer aux flux.

Sous-couche PDCP (Packet Data Compression Protocol)

PDCP assure des fonctions de sécurité et de transfert des données :

- compression d'en-tête ;
- chiffrement des données et de la signalisation RRC ;
- protection de l'intégrité de la signalisation RRC ;
- détection et suppression des doublons (unité de données PDCP reçues deux fois) ;
- remise en séquence des paquets.

La taille des en-têtes des SDU PDCP du plan usager est réduite à l'aide du mécanisme de compression RoHC (*Robust Header Compression*). Cette fonction vise à améliorer l'efficacité spectrale de services conversationnels comme la voix sur IP (VoIP), qui forme des paquets de petite taille. Plusieurs profils de compression sont cependant définis afin d'adapter son utilisation à différents usages (TCP/IP, UDP/IP, RTP/UDP/IP, ESP/IP...). On notera que cette fonctionnalité est optionnelle pour l'UE, sauf pour un UE capable de réaliser de la VoIP via l'IMS (certains profils sont alors obligatoires). L'eNodeB choisit le profil de compression selon les capacités de l'UE (profils acceptés) et le type de service utilisé. La compression d'en-tête ne peut être appliquée qu'aux SDU PDCP du plan usager.

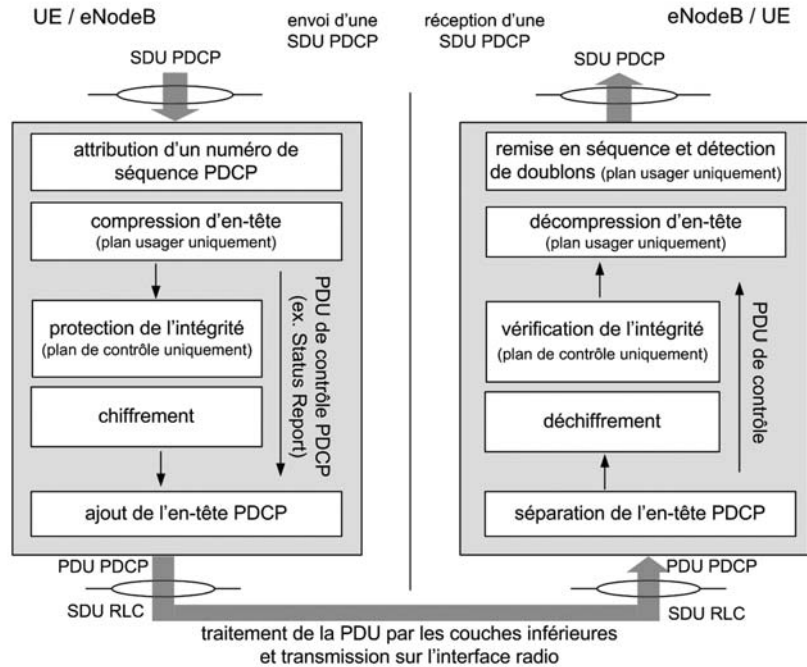
Les fonctions de chiffrement et de protection de l'intégrité seront décrites dans le chapitre 20. Elles concernent le plan de contrôle (chiffrement et intégrité) et le plan usager (chiffrement).

Enfin, les fonctions de détection des doublons et de remise en séquence sont également mises en œuvre pour le plan de contrôle et le plan usager. Elles sont particulièrement utiles lors d'un handover entre deux cellules LTE, au cours duquel des PDU PDCP peuvent être reçues deux fois (envoi sur la cellule source et la cellule cible) et/ou en désordre (PDU N reçue avant la PDU $N-1$). Ces mécanismes seront décrits dans le chapitre 19.

La sous-couche PDCP est donc sollicitée pour le transport de la signalisation et des données utilisateurs. La figure suivante illustre le traitement fonctionnel réalisé par PDCP, en émission et en réception. On notera que les PDU PDCP de contrôle, qui sont créées par la couche PDCP et non par les couches supérieures, suivent un traitement spécifique (pas de chiffrement ni de protection de l'intégrité) et ne sont pas associées à des SDU PDCP. La PDU *Status Report* en est un exemple. Son utilisation lors d'un handover sera présentée au chapitre 19.

Figure 3-16

Traitements effectués par PDCP
en émission et en réception
(vue fonctionnelle)



Sous-couche RLC (Radio Link Protocol)

La sous-couche RLC assure les fonctions de contrôle du lien de données dévolues à la couche 2 du modèle OSI (*Data Link Control*) :

- détection et retransmission des PDU manquantes (en mode acquitté) permettant la reprise sur erreur ;
- remise en séquence des PDU pour assurer l'ordonnancement des SDU à la couche supérieure (PDCP) ;
- utilisation de fenêtres d'émission et de réception pour optimiser la transmission de données.

À la différence de l'UMTS, la couche RLC en LTE n'effectue pas de contrôle de flux : l'UE et l'eNodeB doivent être capables de traiter les trames RLC tant qu'elles arrivent dans la fenêtre de réception RLC.

Sous-couche MAC (Medium Access Control)

La sous-couche MAC permet l'accès et l'adaptation au support de transmission grâce aux fonctions suivantes :

- le mécanisme d'accès aléatoire sur la voie montante ;
- la correction d'erreurs par retransmission HARQ lors de la réception d'un acquittement HARQ négatif ;

- les allocations dynamique et semi-statique de ressources radio (scheduling) ;
- le maintien de la synchronisation sur le lien montant ;
- la priorisation des flux sur le lien montant.

La fonction de scheduling s'appuie sur les mesures effectuées par la couche physique, tandis que le mécanisme HARQ est couplé avec le codage de canal. Ces fonctions sont donc étroitement liées à la couche physique et sont optimisées pour cet interfonctionnement. L'optimisation intercouches est l'une des caractéristiques clés de l'interface radio du LTE. L'HARQ et le scheduling seront décrits en détail dans les chapitres éponymes (10 et 11). L'accès aléatoire et la synchronisation en temps sont également réalisés en coordination avec la couche physique et seront décrits respectivement dans les chapitres 13 et 14. Enfin, le mécanisme de priorisation des flux sur la voie montante sera détaillé dans le chapitre 14.

La couche RRC

La couche RRC, pour *Radio Resource Control*, sert au contrôle de l'interface radio. On peut en effet constater sur le schéma modélisant la structure de l'interface radio, que la couche RRC est connectée aux quatre autres couches, via des points d'accès de contrôle : RRC est responsable de la configuration et du contrôle des couches de niveau 1 (PHY) et 2 (MAC, RLC et PDCP). C'est la spécificité de cette couche, véritable chef d'orchestre de l'interface radio.

Ce rôle est possible grâce à l'échange d'informations entre les entités RRC distantes, localisées au sein de l'UE et de l'eNodeB, suivant les procédures du protocole RRC. Les messages RRC sont traités par les couches PDCP, RLC, MAC et PHY avant d'être transmis sur l'interface radio, puis reconstitués, vérifiés et interprétés par l'entité distante RRC. La signalisation RRC demande ainsi un certain temps de traitement par l'UE et est consommatrice de ressources radio, aussi ne peut-elle pas être utilisée trop fréquemment. Pour la couche physique, on parle alors de configuration semi-statique lorsqu'elle est effectuée par RRC.

Un UE présent sur une cellule LTE est en *mode veille* (ou *RRC_IDLE*) lorsqu'il n'a pas de connexion RRC active avec l'eNodeB. Dans ce cas, il decode régulièrement les Informations Système diffusées par l'eNodeB sur la cellule, ainsi que les messages de notifications (paging). Dans cet état, l'UE contrôle de façon autonome sa mobilité. Lorsqu'il a établi une connexion RRC, il est en *mode connecté*, également appelé *RRC_CONNECTED* sur l'interface radio. RRC doit alors gérer la connexion active, la mobilité de l'UE, le transfert de la signalisation NAS, la sécurité AS (gestion des clés) ainsi que les supports radio activés pour porter les données de service et ou la signalisation (RRC et NAS).

RRC assure ainsi les fonctions suivantes :

- la diffusion et le décodage d'Informations Système de niveaux AS et NAS sur la cellule, pour tous les UE en mode veille présents sur celle-ci, donnant notamment les paramètres d'accès à la cellule, de mesure et de resélection en mode veille ;
- l'envoi et la réception de paging, pour l'établissement d'appel destiné à un UE en mode veille, pour informer les UE de la cellule que les Informations Système sont modifiées ou encore pour les alerter en cas de force majeure (par exemple, en cas de tremblement de terre ou de tsunami) ;

- la gestion de la connexion RRC (établissement, reconfiguration et relâche) ;
- le contrôle des radio bearers associés à des services ou à la signalisation ;
- le contrôle des mesures de l'UE et leur remontée à l'eNodeB en mode connecté ;
- la mobilité en mode connecté ;
- le contrôle de la mobilité en mode veille (sélection et resélection de cellule) ;
- et la transmission de la signalisation des couches supérieures NAS.

Certaines de ces fonctions seront présentées dans les chapitres qui décrivent les procédures dans lesquelles elles sont impliquées, par exemple au chapitre 18 pour la resélection de cellule et la mise à jour de localisation notamment, ou au chapitre 19 pour la gestion des radio bearers et des messages de notification.

Les Informations Système diffusées sur la cellule sont découpées en plusieurs blocs, chacun portant un type d'information défini (par exemple, informations générales sur la cellule serveuse, sur sa configuration radio, sur les cellules voisines LTE, UMTS, GSM). Ces blocs sont appelés SIB (pour *System Information Block*), chaque SIB portant un type d'information défini dans les spécifications. Le MIB (*Master Information Block*) joue un rôle particulier puisqu'il fournit aux UE les paramètres essentiels leur permettant de déterminer la structure et la périodicité des Informations Système. Il doit donc être répété fréquemment (toutes les 10 ms), pour qu'un UE arrivant sur la cellule puisse l'obtenir rapidement. Par ailleurs, sa période de mise à jour est également réduite (40 ms), pour qu'un éventuel changement dans la structure des Informations Système soit indiqué aux UE dans un délai bref.

Les canaux

Le concept de canal

Le système LTE, de manière similaire à l'UMTS, utilise le concept de *canal* afin d'identifier les types des données transportées sur l'interface radio, les caractéristiques de qualité de service associées, ainsi que les paramètres physiques liés à la transmission. Ces canaux sont des composantes de l'architecture du système et sont donc à distinguer du canal de transmission (qui capture les effets de la propagation radio) et du canal fréquentiel (ou porteuse) déjà rencontrés.

Les canaux de l'interface radio sont des points d'accès aux services proposés par une couche N : ils permettent à la couche $N+1$ de délivrer à cette couche N des données qui devront être traitées (et éventuellement marquées) selon les spécificités du canal.

On distingue trois classes de canaux, selon les couches du modèle OSI auxquelles ils sont attachés.

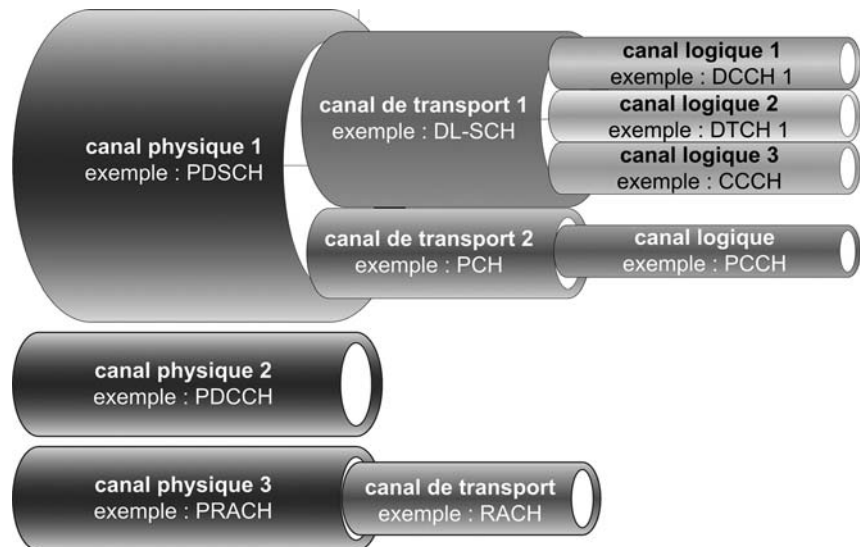
- les *canaux logiques*, qui opèrent entre les couches RLC et MAC et sont définis selon le type d'information qu'ils transportent (par exemple : signalisation du plan de contrôle ou données du plan usager) ;
- les *canaux de transport*, qui opèrent entre la couche MAC et la couche physique et sont définis par la manière et les caractéristiques selon lesquelles les données sont transportées par l'interface radio (par exemple la méthode d'accès aux ressources radio) ;

- *les canaux physiques* qui sont utilisés par la couche physique et sont définis par les caractéristiques physiques de leur transmission (par exemple leur placement dans la trame).

Dans une configuration donnée de l'interface radio (déterminée par le protocole RRC), un canal logique ne peut être porté que par un seul canal de transport, mais ce dernier peut transporter plusieurs canaux logiques. La même règle s'applique pour les canaux de transport et les canaux physiques. Enfin, certains canaux physiques ne sont associés à aucun canal de transport ni canal logique, car ils portent uniquement des informations relatives à la couche physique.

Ceci est illustré par la figure suivante, sur laquelle trois canaux physiques sont représentés (PDSCH et PDCCH pour le sens descendant, PRACH pour le sens montant).

Figure 3-17
Les canaux de l'interface radio
LTE et leurs imbrications



Nous décrivons ci-après l'ensemble des canaux utilisés par l'interface radio du LTE, pour chacune de ces trois catégories.

Les canaux logiques

Un canal logique est associé à un ou plusieurs flux de données (ou de signalisation) qui possèdent des caractéristiques communes : typologie des données transportées (plan usager ou plan de contrôle), priorité du flux, débit nominal (garanti ou non). Un canal logique est donc caractérisé par ce qu'il transporte, et non par la façon dont ces données sont véhiculées.

Les canaux logiques se séparent en canaux de contrôle et canaux de trafic. Les canaux de contrôle transportent uniquement des informations du plan de contrôle, tandis que les canaux de trafic véhiculent exclusivement les données du plan usager.

Le tableau suivant présente les différents canaux logiques définis pour l'interface radio du LTE.

Canaux logiques fournis par la couche MAC

Canal logique	Acronyme	Canal de contrôle (plan de contrôle)	Canal de trafic (plan usager)	Usage	Exemples d'information transmise
Broadcast Control Channel	BCCH	X		Pour la diffusion d'informations de contrôle sur la cellule	Identifiant de la cellule, largeur de bande DL...
Paging Control Channel	PCCH	X		Pour la notification d'appels	Identifiant de l'UE dans la zone de localisation, type d'appel
Common Control Channel	CCCH	X		Pour la transmission de la signalisation, quand elle ne peut être transmise sur un canal dédié (DCCH)	Demande d'établissement d'une connexion RRC
Dedicated Control Channel	DCCH	X		Porte la signalisation dédiée à un utilisateur (RRC et NAS)	Message commandant à l'UE de réaliser un handover
Dedicated Traffic Channel	DTCH		X	Porte les informations de trafic dédiées à un utilisateur	Données d'un flux de streaming vidéo (ex. IP/ UDP/RTSP)

Lorsque la couche RLC construit une unité de données ou *Protocol Data Unit* (PDU), elle la communique ensuite via le canal logique adéquat à la couche MAC. Cette dernière peut alors ajouter dans l'en-tête MAC l'identifiant de ce canal, si nécessaire. Après les traitements par la couche MAC, celle-ci délivre la PDU MAC à la couche physique via le canal de transport associé au canal logique. Le marquage du canal logique dans l'en-tête MAC permet à l'entité MAC distante de restituer cette information à la couche RLC, qui traite et aiguille ensuite correctement cette unité de données. Il est rendu nécessaire par le fait que, dans certains cas, plusieurs canaux logiques peuvent être multiplexés sur le même canal de transport. L'identification par l'entité paire du canal de transport n'est donc pas suffisante pour un aiguillage correct des données. La correspondance canal de transport – canal logique est configurée par la couche RRC lors de l'établissement de la connexion RRC ou de sa reconfiguration.

Les canaux de transport

Un canal de transport est caractérisé par la façon dont les données sont transportées sur les ressources physiques, notamment :

- la méthode d'accès aux ressources radio (scheduling dynamique, semi-persistant ou statique) ;
- les formats de transport autorisés, qui définissent les traitements de la couche physique à appliquer (type de codage de canal, schéma de transmission MIMO, etc.) ;
- la possibilité d'effectuer des retransmissions d'HARQ, et si oui, de quel type.

Plusieurs canaux de transport sont définis dans l'interface radio du LTE pour les sens montant et descendant, dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant.

Canaux de transport fournis par la couche physique

Canal de transport	Acronyme	Sens	Caractéristiques	Usage	Exemples d'information transmise
Broadcast Channel	BCH	DL	Ressources, périodicité et format de transport fixes et prédéfinis Doit être transmis sur toute la zone de couverture de la cellule	Pour la diffusion d'informations sur la cellule Le BCH porte exclusivement le BCCH, et en particulier le <i>Master Information Block</i> (MIB, voir remarque)	MIB (BCCH) : largeur de bande DL sur la cellule, numéro de trame système (<i>SFN, System Frame Number</i>)
Downlink Shared Channel	DL-SCH	DL	Permet l'HARQ et l'adaptation de lien, l'allocation dynamique ou semi-persistante de ressources et l'utilisation de la réception discontinue par l'UE (DRX) Peut bénéficier de beamforming, ou être transmis de manière omnidirectionnelle	Pour la transmission de données dédiées de contrôle et du plan usager Utilisé également pour transmettre les informations de cellule non portées par le BCH	Canaux DCCH, DTCH, CCCH Canal BCCH : diffusion des informations cellulaires autres que celles du MIB
Paging Channel	PCH	DL	Doit être transmis sur toute la zone de couverture de la cellule Partage les mêmes ressources physiques que le DL-SCH	Pour diffuser les informations de paging sur l'ensemble de la cellule	Canal PCCH
Random Access Channel	RACH	UL	Basé sur l'accès partagé aléatoire (« à contention ») qui implique un risque de collision entre plusieurs UE lors de la procédure d'accès au réseau	Pour l'établissement d'une connexion RRC avec la station de base, son rétablissement, lors d'un handover ou pour transmettre des données (ex. <i>Buffer Status Report</i>) ou encore sur ordre de la station de base si la synchronisation en voie montante a été perdue	Préambule choisi de façon aléatoire par l'UE dans un jeu de préambules prédéfinis
Uplink Shared Channel	UL-SCH	UL	Permet l'HARQ et l'adaptation de lien, l'allocation dynamique ou semi-persistante de ressources	Pour la transmission de données dédiées de contrôle et du plan usager	Canaux DCCH, DTCH, CCCH

REMARQUE Les SIB et les canaux de transport

Le MIB est le seul bloc d'Informations Système à être transmis sur le BCH, tandis que les autres blocs sont envoyés via le DL-SCH. Cela donne en effet une plus grande flexibilité dans l'ordonnancement des blocs (association de plusieurs blocs en un seul message, périodes de répétition et de mise à jour).

Les canaux physiques

Les canaux physiques fournissent le moyen de transmettre par radio les données des canaux de transport. Une SDU reçue de la couche MAC via un canal de transport donné est appelée un *bloc de transport*. Un canal physique correspond à un ensemble d'éléments de ressource temps-fréquence

(un élément de ressource est une sous-porteuse d'un symbole OFDM) dans la sous-trame. De plus, il est associé à des caractéristiques physiques particulières, comme une séquence d'embrouillage, des schémas de codage et modulation, des schémas MIMO (en voie descendante uniquement). Le format des canaux physiques sera détaillé au chapitre 8 pour la voie descendante et au chapitre 9 pour la voie montante.

Les tableaux suivants présentent de manière synthétique les différents canaux physiques, pour la voie montante et la voie descendante respectivement.

Canaux physiques pour la voie montante

Canal physique	Acronyme	Caractéristiques	Usage
Physical Uplink Shared Channel	PUSCH	Ses paramètres de transmission sont déterminés dynamiquement par l'adaptation de lien	Pour la transmission du UL-SCH ; porte également les informations de contrôle du PUCCH en cas de collision de ces deux canaux sur le même intervalle de temps
Physical Uplink Control Channel	PUCCH	N'est jamais transmis simultanément au PUSCH d'un même UE (en Release 8)	Pour la transmission d'informations de contrôle nécessaires à l'HARQ (acquitements) et à l'allocation de ressources
Physical Random Access Channel	PRACH	Est formé d'un préambule spécifique à l'UE	Porte le RACH

Canaux physiques pour la voie descendante

Canal physique	Acronyme	Caractéristiques	Usage
Physical Downlink Shared Channel	PDSCH	Ses paramètres de transmission sont déterminés dynamiquement par l'adaptation de lien.	Pour la transmission du DL-SCH et du PCH
Physical Broadcast Channel	PBCH		Pour la transmission du BCH
Physical Control Format Indicator Channel	PCFICH	Le PCFICH est placé dans le premier symbole OFDM de chaque sous-trame	Indique le nombre de symboles OFDM utilisés pour la transmission du PDCCH dans une sous-trame
Physical Downlink Control Channel	PDCCH	Le PDCCH est placé dans les premiers symboles OFDM de chaque sous-trame	Pour la transmission d'informations de contrôle : schéma de modulation et codage et allocation de ressources du DL-SCH et PCH, informations d'HARQ pour le DL-SCH Schéma de modulation et codage, allocation de ressources et informations d'HARQ pour le UL-SCH Ordre de déclenchement d'une procédure d'accès aléatoire
Physical Hybrid ARQ Indicator Channel	PHICH	Le PHICH est placé dans les premiers symboles OFDM de chaque sous-trame	Porte les acquitements d'HARQ

Association des différents canaux

Les figures suivantes décrivent l'association entre les canaux logiques, de transport et physiques, respectivement pour la voie montante et la voie descendante.

Figure 3-18

Association entre canaux logiques, de transport et physiques en voie montante

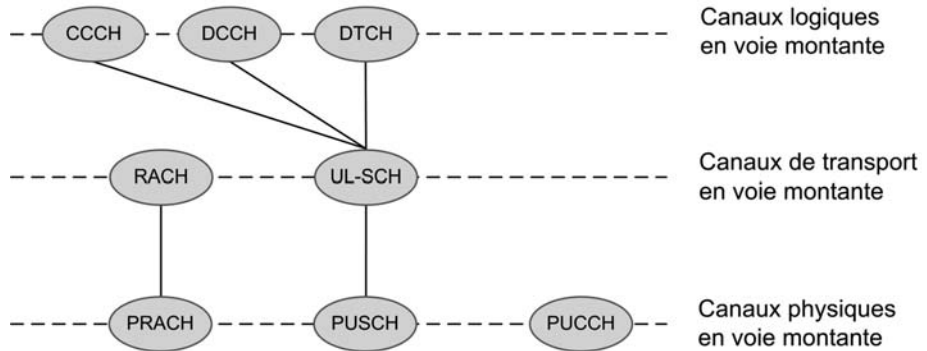
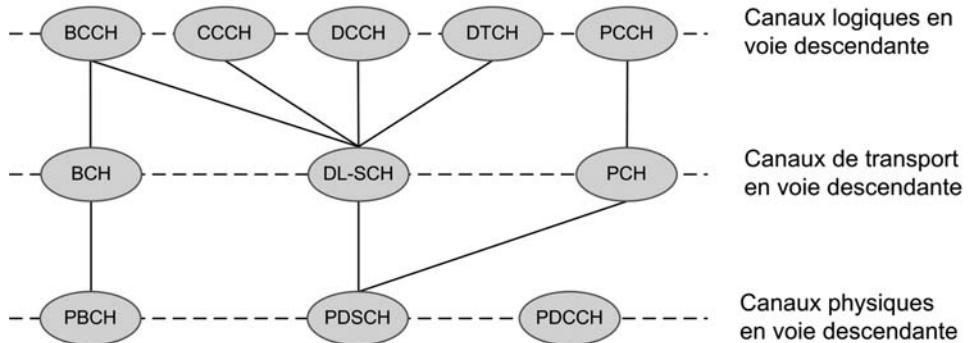


Figure 3-19

Association entre canaux logiques, de transport et physiques en voie descendante



Les signaux physiques

Outre les canaux physiques, la couche physique utilise également des *signaux physiques*, qui ne portent pas d'information issue des couches supérieures (c'est-à-dire de canaux de transport) mais sont nécessaires aux opérations de la couche physique. Les signaux physiques correspondent également à des éléments de ressource et sont associés à des paramètres de transmission physiques prédéfinis.

On distingue deux grands types de signaux physiques :

- les *signaux de référence* ou *Reference Signals* (RS) ;
- les *signaux de synchronisation*.

Les signaux de référence portent des séquences de symboles prédéfinies et connues du récepteur, qui lui permettent notamment d'estimer le canal de transmission. Cette information est cruciale

pour de nombreuses fonctions de la couche physique : l'estimation de la qualité du canal pour le scheduling, l'adaptation de lien et la détermination des paramètres MIMO, la démodulation cohérente, ainsi que les mesures nécessaires à la mobilité. Les signaux de référence seront décrits en détail au chapitre 7. Les signaux de synchronisation permettent au mobile de se synchroniser à la cellule et sont présents en voie descendante uniquement. Chaque cellule émet un signal de synchronisation qui l'identifie de manière unique dans une zone donnée. Les signaux de synchronisation seront détaillés au chapitre 13.

Les tableaux suivants récapitulent les différents signaux physiques possibles, dans la voie montante et la voie descendante respectivement.

Signaux physiques pour la voie montante

Signal physique	Acronyme	Caractéristiques	Usage
Demodulation Reference Signal	DMRS	Sont associés à la transmission du PUSCH ou du PUCCH, et spécifiques à un UE particulier	Pour estimer le canal afin de permettre une démodulation cohérente à la station de base
Sounding Reference Signal	SRS	Ne sont associés à aucun canal physique. Sont spécifiques à un UE particulier	Pour déterminer la qualité du canal (notamment sur les ressources où l'UE n'est pas servi), maintenir la synchronisation

Signaux physiques pour la voie descendante

Signal physique	Acronyme	Caractéristiques	Usage
Cell-specific Reference Signal	CRS	Sont communs à la cellule.	Pour la démodulation cohérente à l'UE, la mesure de la qualité du canal, la détermination des paramètres MIMO, le maintien de la synchronisation, les mesures de mobilité
UE-specific Reference Signals	DRS	Sont spécifiques à un UE particulier.	Pour la démodulation cohérente
Primary, Secondary Synchronization Signal	PSS, SSS	Sont communs à la cellule.	Pour la synchronisation initiale, la détection et l'identification de cellule

Structure de trame de l'interface radio

L'opération de l'interface radio dans le domaine temporel est découpée en *trames radio* consécutives de 10 ms. Une trame radio est divisée en dix *sous-trames* de 1 ms chacune, numérotées de 0 à 9. La sous-trame constitue un TTI (*Transmission Time Interval*), c'est-à-dire l'intervalle de temps de transmission élémentaire pouvant être alloué à un UE. Il existe deux types de structures de trame, illustrés sur les deux figures suivantes :

- Le type 1 est adapté au FDD et au FDD half-duplex.
- Le type 2 est adapté au TDD.

Dans la structure de trame de type 1, chaque sous-trame est divisée en deux *slots* de 0,5 ms chacun. Les slots d'une trame radio sont numérotés de 0 à 19. En FDD, dix sous-trames sont disponibles pour la voie montante et dix sous-trames sont disponibles pour la voie descendante par période de 10 ms, puisque les voies montante et descendante opèrent sur des fréquences différentes. En FDD half-duplex, un UE ne peut transmettre et recevoir simultanément, ce qui restreint le nombre de sous-trames utilisables dans chaque direction de transmission.

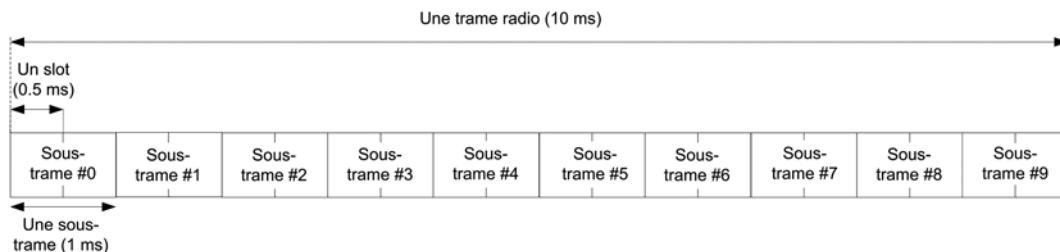


Figure 3-20

Structure de trame en FDD et FDD half-duplex

En TDD, certaines sous-trames sont réservées pour la voie montante tandis que d'autres le sont pour la voie descendante. Il existe de plus une sous-trame spéciale, qui contient notamment un temps de garde nécessaire au basculement entre la voie descendante et la voie montante. Ce temps de garde est noté GP (*Guard Period*) sur la figure suivante. Le temps de garde nécessaire au basculement de l'eNodeB entre la réception d'une sous-trame montante et l'émission d'une sous-trame descendante est créé par l'eNodeB en avançant dans le temps les sous-trames montantes par rapport aux sous-trames descendantes. L'UE est informé de ce décalage par la commande d'avance de temps décrite au chapitre 14, qui lui indique de démarrer sa transmission un peu plus tôt (ou un peu plus tard). Une avance de temps par défaut de 20 μ s est ainsi spécifiée en TDD, car cette durée est attendue comme la valeur maximale potentiellement nécessaire aux équipements pour basculer de réception à émission [3GPP RAN WG4, 2008]. Au plus, deux sous-trames spéciales sont présentes par trame, afin de limiter la perte d'efficacité du système due au temps de garde.

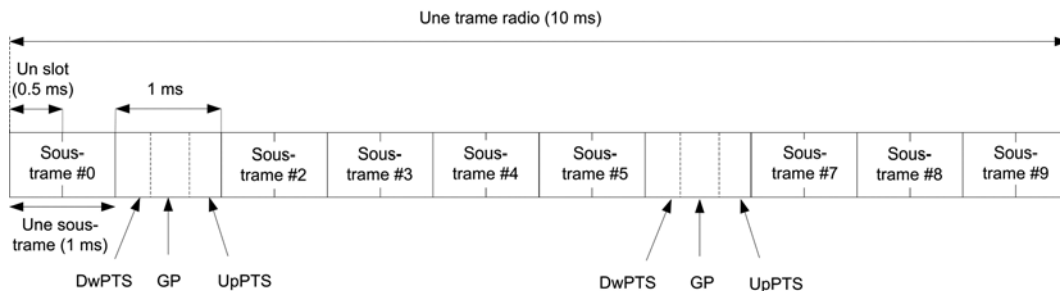


Figure 3-21

Structure de trame en TDD

Les configurations TDD voie montante/voie descendante possibles en LTE sont données dans le tableau suivant.

Configurations voie montante (U)/voie descendante (D). S note la sous-trame spéciale

Configuration voie montante/ voie descendante	Périodicité du basculement de la voie descendante vers la voie montante	Numéro de la sous-trame									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

On note que les sous-frames 0 et 5 sont toujours réservées pour une transmission en voie descendante.

Outre le temps de garde, la sous-trame spéciale porte les champs DwPTS (*Downlink Pilot Time Slot*) et UpPTS (*Uplink Pilot Time Slot*), réservés pour les transmissions respectivement en voie descendante et en voie montante. Malgré la signification de leurs acronymes, héritée de l'UMTS TDD, ces champs ne contiennent pas de signaux de référence.

- Le champ DwPTS porte de la signalisation de contrôle (PCFICH, PDCCH, PHICH) ainsi que des données (PDSCH) comme une sous-trame descendante normale, à la différence près qu'il est plus court. De plus, il porte le *Primary Synchronisation Signal* (PSS).
- Le champ UpPTS peut porter le PRACH de préambule court (dit de format 4, voir le chapitre 13) et/ou des signaux de référence de sonde (SRS), ou uniquement des SRS en fonction de la longueur du champ. Aucune donnée ni signalisation ne peut être transmise sur ce champ.

Les durées des champs DwPTS et UpPTS sont configurables et signalées par les couches supérieures. Il existe 8 configurations possibles, se différenciant par différentes longueurs de GP et deux longueurs possibles (courtes : 1 ou 2 symboles SC-FDMA) du champ UpPTS, le champ DwPTS occupant la durée de la sous-trame restante. Les différentes configurations sont données dans [3GPP 36.211, 2009, section 4.2].

Le mode FDD half-duplex requiert également un temps de garde afin que l'UE puisse basculer de l'émission à la réception, et inversement. Pour la transition voie descendante vers voie montante, ce temps de garde est créé par l'UE en ne recevant pas la fin d'une sous-trame descendante précédant immédiatement une sous-trame montante où il transmet. Cette perte doit être compensée par une adaptation de lien appropriée par l'eNodeB (voir le chapitre 4), ou par une retransmission. Pour la transition voie montante vers voie descendante, le temps de garde est assuré par l'eNodeB via la commande d'avance de temps, comme en TDD. La manière de réaliser le half-duplex n'est pas spécifiée, c'est au scheduler de l'eNodeB d'assurer qu'un UE n'est pas servi simultanément sur les voies montante et descendante.

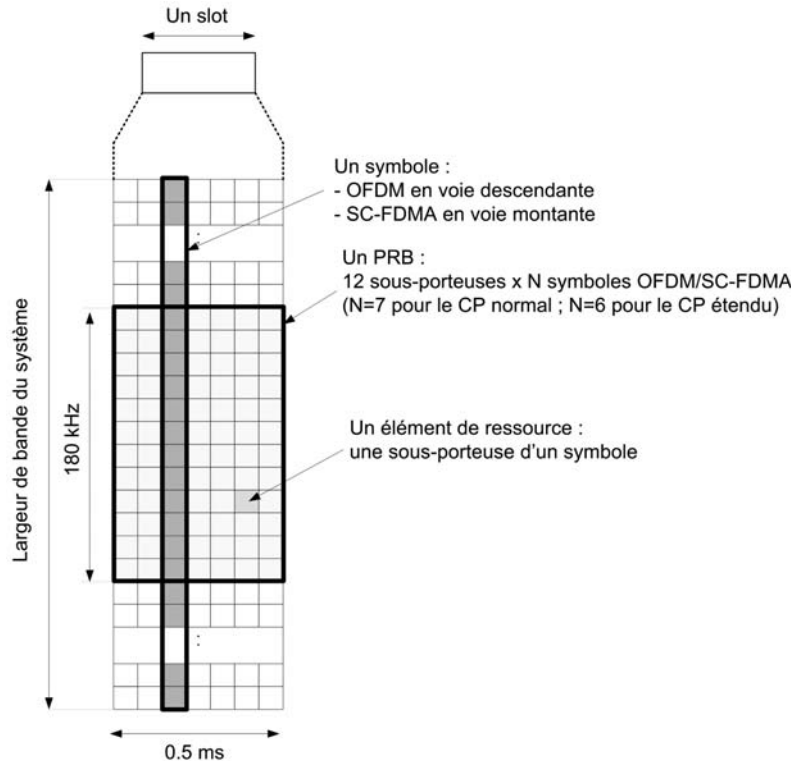
La dimension fréquentielle en LTE

Par rapport à l'UMTS, la couche physique du LTE introduit une rupture majeure : l'OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), un mode d'accès multiples basé sur l'OFDM, en remplacement de l'accès multiple à répartition par codes (CDMA).

L'OFDM a déjà été brièvement mentionné dans ce chapitre et sera décrit en détail au chapitre 6. Pour la compréhension des premiers chapitres consacrés à la couche physique, il est utile de retenir que la transmission OFDM s'effectue en parallèle sur plusieurs porteuses à bande étroite appelées sous-porteuses. Ces sous-porteuses sont orthogonales, de sorte qu'un symbole de modulation transmis sur une sous-porteuse ne subit pas d'interférence de la part des sous-porteuses adjacentes. De plus, l'OFDM est immunisé contre l'interférence entre symboles dans les domaines temporel et fréquentiel. L'OFDM est utilisé en voie descendante. Pour la voie montante, on en utilise un dérivé appelé SC-FDMA, qui permet une meilleure couverture pour les amplificateurs de puissance utilisés par les UE.

De par la dimension fréquentielle introduite par l'OFDM et le SC-FDMA, l'allocation de ressources en LTE s'effectue à la fois dans les dimensions temporelle et fréquentielle. Les ressources radio en voie descendante et voie montante se présentent ainsi sous la forme d'une grille temps-fréquence représentée à la figure suivante. La plus petite unité de ressource fréquentielle pouvant être allouée à un UE par le scheduler est le PRB (*Physical Resource Block*).

Figure 3-22
Grille de ressources temps
fréquence en voie
montante et descendante



Un PRB dure 0,5 ms, soit un slot, et est constitué de plusieurs symboles OFDM (ou SC-FDMA). Rappelons qu'un symbole OFDM représente le signal dans le domaine temporel correspondant à un bloc de symboles de modulation émis sur les différentes sous-porteuses de la bande du système. La durée d'un symbole dépend de la valeur du *préfixe cyclique* (CP, défini au chapitre 6). La largeur de bande d'un PRB est de 12 sous-porteuses, soit 180 KHz.

Une sous-porteuse d'un symbole OFDM/SC-FDMA est appelée un *élément de ressource*. Un élément de ressource porte un symbole de modulation en OFDM.

Les ressources s'allouent par *paire de PRB*, les PRB d'une paire étant alloués dans deux slots consécutifs d'une même sous-trame. Le nombre de PRB dans la dimension fréquentielle dépend de la largeur de bande du canal, comme indiqué dans le tableau suivant.

Largeur de bande du système en nombre de PRB

	Largeur de bande du canal (MHz)					
	1.4	3	5	10	15	20
Largeur de bande du système en nombre de PRB	6	15	25	50	75	100

La largeur de bande disponible pour la transmission est appelée la *largeur de bande du système*. Elle est inférieure à la largeur de bande du canal, comme décrit à la figure suivante, afin de laisser des bandes de garde de part et d'autre pour limiter l'interférence de canal adjacent.

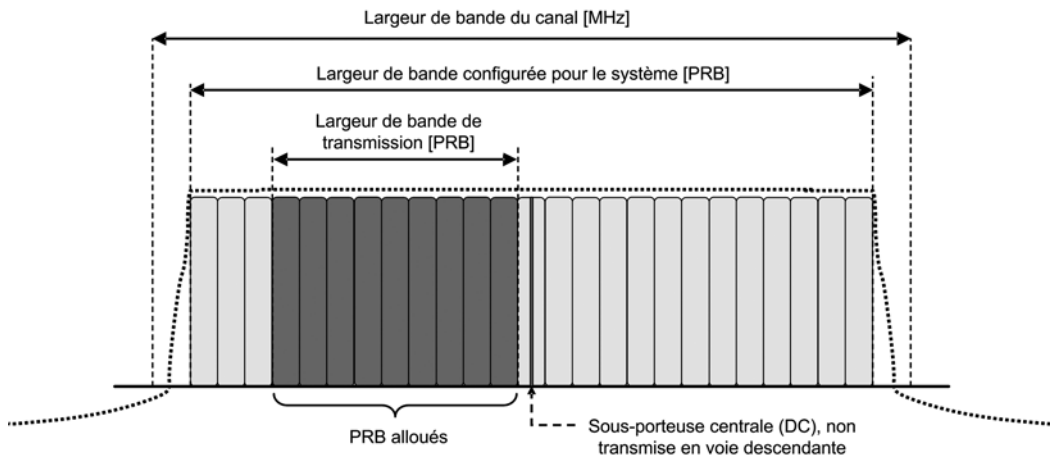


Figure 3-23

Bande du canal et bande du système

Les différents paramètres caractérisant les transmissions OFDM et SC-FDMA en LTE seront détaillés au chapitre 6.

Les caractéristiques clés de la couche physique

La manière dont sont codées les données et les techniques utilisées pour la transmission sont déterminantes pour les performances du réseau en termes de capacité et d'expérience offerte à l'utilisateur. Nous donnons dans cette section un aperçu des caractéristiques clés de la couche physique du LTE.

Outre les modulations OFDM et SC-FDMA présentées à la section précédente, la couche physique du LTE a été conçue autour de deux caractéristiques clés :

- la gestion des antennes multiples à l'émission et à la réception (le MIMO) ;
- l'optimisation conjointe des couches physique et MAC.

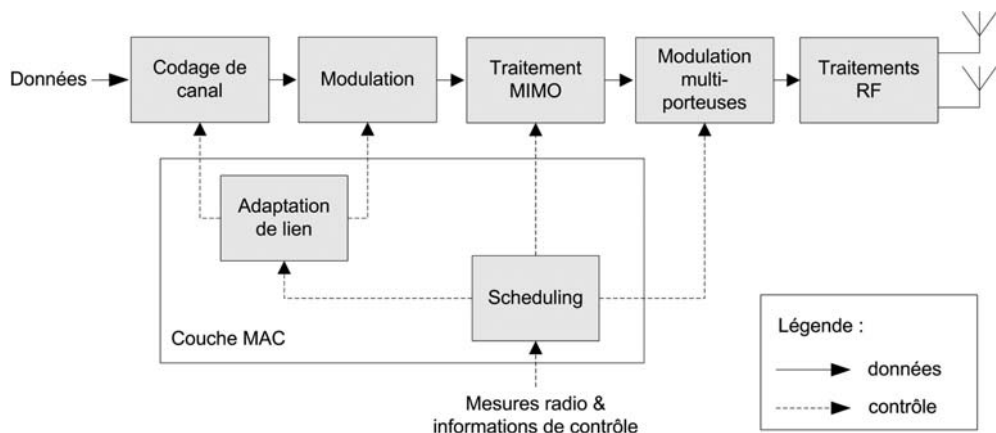
Le MIMO a été pris en compte nativement dans la conception de la couche physique, contrairement au HSDPA où il avait été ajouté au système existant. Le MIMO améliore la robustesse de la transmission et les débits, notamment grâce à la transmission de plusieurs flux indépendants d'information sur les mêmes ressources temps-fréquence. Cette intégration originelle couplée à l'absence d'interférence intracellulaire dans les systèmes OFDM conduit à une grande efficacité du MIMO dans le système LTE. Le MIMO fera l'objet du chapitre 5.

L'interaction forte entre les couches physique et MAC permet de tirer parti au maximum des évanouissements rapides du canal pour le scheduling et l'adaptation de lien, ainsi que du lien étroit entre codage de canal et mécanismes de retransmission rapide HARQ. Cette optimisation dite *inter-couches* maximise le débit offert et minimise la latence de la transmission. Elle implique des échanges d'informations de contrôle entre eNodeB et UE.

Introduction aux traitements d'émission et réception

Les figures suivantes représentent schématiquement la relation entre les grandes fonctions de la couche physique décrites à la section « La couche physique » (p. 81), ainsi que leur relation avec la couche MAC.

Figure 3-24
Principales
fonctions mises en
jeu en émission.
Les traitements
MIMO à
l'émission ne
s'appliquent qu'en
voie descendante.



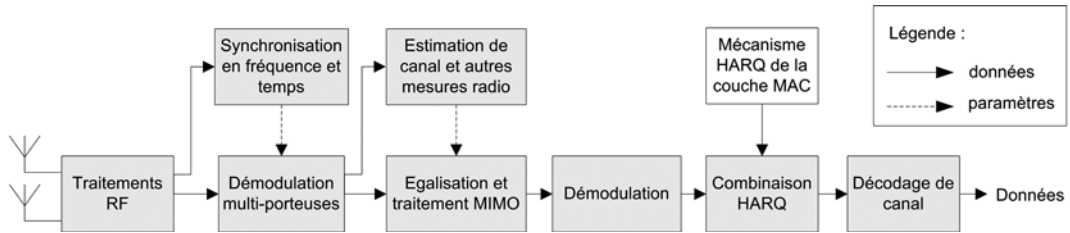


Figure 3-25

Principales fonctions mises en jeu en réception

Les fonctions de la chaîne de réception indiquées à la figure précédente ne sont pas spécifiées, bien qu'étant en grande partie déterminées par les traitements d'émission. La norme spécifie cependant les outils indispensables à leur mise en œuvre (comme les signaux physiques nécessaires à l'estimation du canal et la synchronisation). En revanche, les performances minimales de démodulation sont spécifiées, dans les documents [3GPP 36.101, 2009] et [3GPP 36.104, 2009], pour les récepteurs de l'UE et de l'eNodeB respectivement. La vérification de l'atteinte des performances requises est effectuée par des tests sur les équipements selon une méthodologie définie au 3GPP.

Synthèse fonctionnelle

La figure suivante présente une synthèse des fonctions assurées par les différents protocoles présents dans la pile protocolaire d'un UE LTE. Les protocoles EMM et ESM seront décrits en détail dans le chapitre 15 dédié aux protocoles NAS.

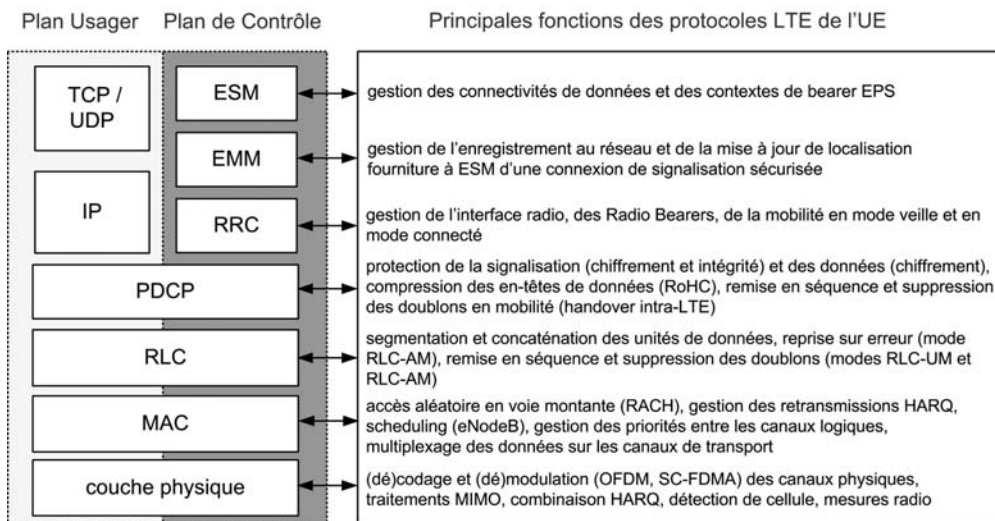


Figure 3-26

Synthèse fonctionnelle des protocoles LTE au sein de l'UE

Références

- [3GPP 36.101, 2009] Spécification technique 3GPP TS 36.101, *E-UTRA, User Equipment (UE) radio transmission and reception*, v8.8.0, décembre 2009.
- [3GPP 36.104, 2009] Spécification technique 3GPP TS 36.104, *E-UTRA, Base Station (BS) radio transmission and reception*, v8.8.0, décembre 2009.
- [3GPP 36.211, 2009] Spécification technique 3GPP TS 36.211, *E-UTRA, Physical channels and modulation*, v8.9.0, décembre 2009.
- [3GPP RAN WG4, 2008] 3GPP TSG RAN WG4, *Response to LS on switch time requirements for LTE TDD*, Liaison R1-081181, 3GPP TSG RAN WG1 #52bis, avril 2008.
- [Balanis, 2005] C. A. Balanis, *Antenna Theory*, 3ème édition, Wiley, 2005.
- [Huawei, 2009] Huawei, *Hardware calibration requirement for dual layer beamforming*, Contribution R1-091794, 3GPP TSG RAN WG1 #57, mai 2009.
- [Jakes, 1994] W. C. Jakes, Ed., *Microwave Mobile Communications*, IEEE Press, 1994.
- [Joindot, Glavieux, 2007] M. Joindot et A. Glavieux, *Introduction aux communications numériques*, Dunod, 2007.
- [Oestges, Clerckx, 2007]. C. Oestges and B. Clerckx, *MIMO Wireless Communications*, Elsevier, 2007.
- [Proakis, 2000] J. G. Proakis, *Digital Communications*, Mc Graw Hill, troisième édition, 2000.
- [Tse, Viswanath, 2005] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005.

La mobilité en mode connecté

Sommaire : *Les principaux mécanismes de mobilité en mode connecté – Le handover en LTE – La mobilité intersystème ou comment assurer la continuité de service entre des systèmes différents – Les mécanismes CS Fallback et SR-VCC*

Ce chapitre a pour objectif d'apporter au lecteur les éléments essentiels de la mobilité en mode connecté, au sein du système LTE d'une part, et entre le LTE et les autres systèmes 3GPP d'autre part.

Au cours d'un appel sur un réseau mobile, l'utilisateur peut être amené à se déplacer hors de la cellule sur laquelle l'appel a été établi. Cette mobilité ne doit pas conduire à la coupure de l'appel. Pour assurer cette continuité de service, le réseau mobile met en œuvre des mécanismes basculant l'UE vers la meilleure cellule qui peut l'accueillir. Ces mécanismes reposent généralement sur des mesures radio effectuées par l'UE sur la cellule serveuse et des cellules voisines. Le réseau choisit alors, essentiellement en fonction de ces mesures, la cellule cible et la façon de faire basculer l'UE vers cette cellule.

Trois types de mécanismes peuvent être distingués pour la mobilité en mode connecté.

- La *resélection*, qui repose sur les mêmes principes que ceux utilisés en mode veille, est employée par exemple en GPRS et en UMTS dans des états transitoires ou *dormants*. L'UE envoie ou reçoit peu de données (faible activité) et les périodes d'inactivité lui permettent alors de réaliser des mesures sur des cellules voisines. Lors d'une resélection, le réseau n'effectue aucune préparation sur la cellule cible.
- La *redirection* consiste à envoyer l'UE vers une cellule cible, sans dialogue préalable entre la station de base d'origine et celle de destination. Cette cellule cible peut se trouver sur une autre fréquence ou appartenir à un autre système. Aucune ressource radio, logique ou de transmission n'est réservée sur la cellule ou sur le système cible. Cela réduit donc la probabilité de succès de l'opération. Par ailleurs, la procédure de bascule peut être longue et conduire à des pertes de données, donc à une dégradation de la qualité de service perçue par l'utilisateur. En revanche, elle est simple pour le réseau et n'entraîne pas de charge de signalisation entre les nœuds source et cible.

- Le *handover* se distingue de la redirection par une phase de préparation de la station de base de destination et par une bascule du flux de données plus rapide et souvent plus fiable (car plus proche de l'interface radio) : il suit le principe désigné en anglais *make before break*, c'est-à-dire de préparer l'environnement radio cible avant de relâcher l'existant.

La redirection comme le handover peuvent être déclenchés à la suite de mesures sur des cellules voisines (du même système ou d'un système différent), ou de façon *aveugle*, c'est-à-dire sans aucune mesure préalable sur ces cellules candidates. On parle dans ce dernier cas de *blind handover* ou *blind redirection*. Ce mode présente l'inconvénient d'un risque plus élevé d'échec, puisqu'on ne vérifie pas que le niveau de signal reçu par l'UE sur la cellule cible est suffisant pour maintenir la connexion radio, et donc l'appel en cours.

La redirection est par exemple utilisée pour basculer un appel paquet (PS) de l'UMTS vers le GSM/GPRS et elle est alors souvent réalisée en combinaison avec des mesures sur les cellules voisines GSM/GPRS.

Le mécanisme de handover est largement utilisé sur les réseaux mobiles, en particulier au sein d'un même système, car dans ce cas le dialogue entre stations de base est simplifié. Il est par exemple mis en œuvre pour la mobilité en appel au sein des systèmes GSM et UMTS, de même qu'entre ces deux systèmes pour la continuité des appels voix.

Ce chapitre présente ainsi :

- les différents types de handover ;
- les phases du handover ;
- le handover au sein du système LTE ;
- les mécanismes de mobilité entre le LTE et les autres systèmes 3GPP ;
- les mécanismes CS Fallback et SR-VCC ;
- le rétablissement d'appel en LTE.

Les différents types de handover

On peut caractériser un handover à partir des critères suivants :

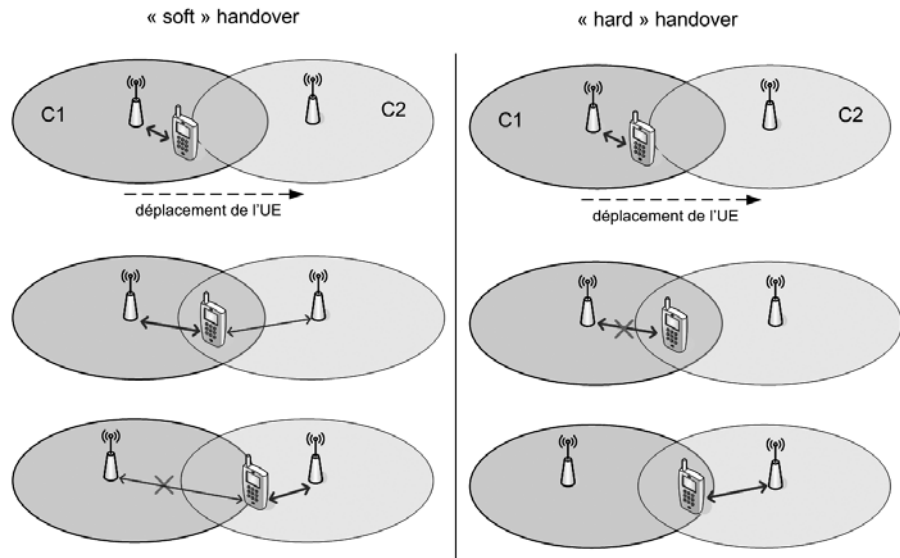
- la technologie d'accès radio (RAT) et/ou la fréquence respective des cellules source et cible ;
- l'interruption ou non du lien radio lors de la bascule.

Ainsi, un handover entre deux cellules du même système sera dit *intrafréquence* si les cellules sont portées par la même fréquence radio et *interfréquence* dans le cas contraire. On parle de handover *inter-RAT* ou *intersystème* lorsque les deux cellules appartiennent à deux systèmes différents. Les fréquences sont alors nécessairement différentes.

Le second critère est moins évident. Si le lien radio sur la cellule source est relâché avant l'établissement du lien radio sur la cellule cible, la bascule est réalisée avec une interruption de la transmission sur l'interface radio entre l'UE et le réseau. C'est le type de handover utilisé en GSM, ou en

UMTS pour les handover interféquences. Pour rappel, en GSM un handover est nécessairement interférence puisque les cellules voisines sont portées sur des fréquences différentes. Au contraire, si le second lien radio est établi entre la cellule cible et l'UE alors que le lien sur la cellule source est toujours actif, la transmission radio ne sera pas interrompue. L'UE a alors deux liens radio actifs, qui portent les mêmes données depuis et vers l'UE, et qui lui offrent un gain de diversité : les deux liens empruntent des chemins radio différents et ne sont donc pas soumis aux mêmes perturbations. La station de base peut alors réduire sa puissance d'émission vers l'UE, ou la maintenir pour améliorer la réception de l'UE. Le lien initial peut donc être conservé au-delà de cet ajout et être supprimé par exemple lorsque sa qualité deviendra trop faible pour apporter une information utile à l'UE (voir la figure suivante). Le terme *soft handover* a été choisi pour désigner cette bascule opérée sans interruption du lien radio entre l'UE et le réseau. Par opposition, on a alors consacré la dénomination *hard handover* au type de handover précédent, illustré sur la partie droite de la figure suivante : le lien radio sur la cellule C1 est relâché avant l'établissement du lien sur la cellule C2.

Figure 19-1
Principes du soft
handover et du hard
handover



Le principe du soft handover a été en premier lieu utilisé dans les systèmes CDMA de seconde génération. Il a été repris dans le système UMTS (qui repose également sur un accès à répartition par les codes, ou CDMA) comme principal mécanisme de mobilité intrafréquence. Le soft handover n'a en revanche pas été défini dans la première version (Release 8 3GPP) du système LTE.

Le tableau suivant présente les mécanismes de mobilité couramment utilisés en mode connecté, sur les systèmes GSM, GPRS/EDGE et UMTS, pour les différents types de mobilité (intrafréquence, interférence et inter-RAT).

Mécanismes de mobilité en mode connecté couramment utilisés

Système considéré	Type de mobilité		
	Intrafréquence	Interfréquence	Inter-RAT
GSM (voix)	non applicable	hard handover	hard handover
GPRS/EDGE (données)	non applicable	resélection et/ou hard handover *	resélection et/ou hard handover *
UMTS (voix et données)	soft handover et/ou hard handover *	hard handover	voix : hard handover données : resélection (et/ou hard handover *)

* suivant la configuration du réseau et les choix de l'opérateur

Les phases du handover

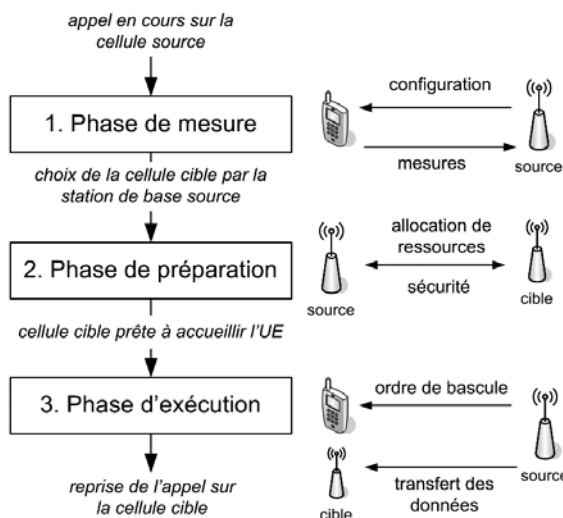
Cette section présente les étapes de la réalisation d'un handover de façon générale, c'est-à-dire sans aborder les spécificités propres au système LTE. Celles-ci seront décrites à la section « Le handover au sein du système LTE », p. 399.

On peut distinguer trois phases dans la réalisation d'un handover :

1. la phase de *mesure* sur la cellule serveuse et sur les cellules voisines ;
2. la phase de *préparation* de la cellule cible, qui met en jeu des échanges entre les contrôleurs de stations de base source et destination, ainsi qu'entre ces contrôleurs et le réseau cœur ;
3. la phase d'*exécution*, c'est-à-dire la bascule de l'UE et des flux de données, puis la relâche des ressources dans la cellule d'origine.

Le schéma suivant montre le séquençement de ces phases, les nœuds impliqués et les principales actions réalisées.

Figure 19-2
Les trois phases du
handover



La phase de mesure est toujours optionnelle. Dans le cas de la redirection, la phase de préparation n'existe pas. Dans la suite, les explications données décrivent la procédure de handover, sauf indication explicite.

La phase de mesure

Cette phase précède la décision de handover prise par le contrôleur de station de base source et donc le déclenchement effectif de ce handover. Les critères de décision sont essentiellement basés sur la qualité et/ou le niveau de signal des cellules voisines, mesurés par l'UE. La station de base informe au préalable l'UE des éléments suivants, dans un message de configuration :

- les mesures attendues : par exemple le niveau ou la qualité de signal, la puissance reçue ;
- l'objet à mesurer : cellule, fréquence porteuse ;
- le mode de remontée : périodique ou sur événement.

La réalisation des mesures par l'UE peut en outre nécessiter des aménagements dans la trame radio, en particulier des périodes dédiées à la mesure d'une autre fréquence ou d'un autre système, grâce auxquels l'UE ne manque pas les données transmises sur la cellule serveuse alors qu'il effectue ces mesures.

De façon générale, le temps que prend l'UE pour mesurer les cellules voisines et l'exactitude de ces mesures sont des points cruciaux pour le succès du handover et la continuité de l'appel. Ils dépendent notamment des performances radio intrinsèques de l'UE, de ses algorithmes de moyennage et de la configuration judicieuse des mesures par l'opérateur. Les exigences de performance de l'UE pour le handover seront abordées à la section du même nom, p. 428.

En UMTS par exemple, l'UE effectue ses mesures sur les cellules intrafréquences sans modification de la trame radio sur la cellule serveuse : il est capable de maintenir sa connexion radio avec cette cellule et de réaliser de façon simultanée des mesures sur les cellules intrafréquences.

Pour les cellules UMTS portées par une autre fréquence ou un autre système (donc nécessairement sur une fréquence porteuse différente), il peut être nécessaire de ménager des intervalles de temps vides sur la trame en émission et réception. Ces intervalles, appelés *trous*, ou *gaps* en anglais, permettent à l'UE d'ajuster son récepteur sur la fréquence à mesurer pendant une durée déterminée. À la fin de cette période, l'UE bascule à nouveau sur la fréquence d'origine et la cellule source. Ce mécanisme, appelé *mode compressé* (ou *Compressed Mode*) impose d'une part des coupures très courtes pour éviter la désynchronisation entre l'UE et la station de base, et engendre d'autre part des interférences supplémentaires liées au fait que la même quantité de données doit être transmise sur la trame radio, mais dans un délai réduit par les trous. Son utilisation est souvent nécessaire pour que l'UE effectue des mesures sur des fréquences différentes (en particulier lorsque l'UE n'a qu'une seule chaîne de réception radio UMTS/GSM). En effet, en UMTS l'UE a un lien radio dédié avec le NodeB et reçoit de celui-ci une trame continue, notamment pour le maintien d'un contrôle de puissance précis.

Le contrôleur de station de base intègre les mesures remontées par l'UE dans son algorithme de décision. Si les critères de déclenchement sont vérifiés, elle entame la phase de préparation décrite ci-après. La décision repose par exemple sur les critères suivants :

- Le niveau de signal d'une cellule voisine mesurée par l'UE est supérieur à un seuil prédéfini et la qualité de la cellule serveuse est inférieure à un autre seuil (pour un handover intersystème par exemple).

- Le niveau ou la qualité du signal d'une cellule voisine est meilleur(e) que celui/celle de la cellule serveuse (pour un handover intra ou interférence par exemple).

On comprend que, pour que cette phase de mesure soit possible, l'opérateur doit paramétrer les cellules intra et intersystèmes voisines de la cellule serveuse, et ce pour toutes les cellules du réseau, ce qui représente un effort conséquent. Il doit également définir les seuils d'activation des mesures et de déclenchement du handover. Par exemple en UMTS, le mode compressé et les mesures intersystèmes peuvent n'être activés que lorsque le signal de la cellule serveuse est dégradé, afin de limiter la consommation du terminal et les interférences engendrées sur la cellule serveuse. Les seuils mis en jeu peuvent varier suivant la topologie du réseau. Un travail d'optimisation est donc souvent nécessaire.

La phase de préparation

L'objectif premier de cette phase est de maximiser les chances de succès de la procédure de handover, par l'échange d'informations entre les contrôleurs de stations de base source et cible, en préalable à la réalisation de la bascule proprement dite. La préparation commence dès lors que le contrôleur source a pris la décision de réaliser un handover de l'UE, sur la base des mesures remontées par celui-ci et de ses critères de déclenchement.

Elle consiste en un simple échange de messages visant à :

- interroger le contrôleur de la station de base gérant la cellule cible sur la possibilité de réaliser ce handover ;
- obtenir de sa part les informations et paramètres grâce auxquels l'UE accèdera rapidement et de façon fiable aux ressources de la cellule, par exemple la configuration des canaux logiques et de transport.

Cet échange peut avoir lieu directement entre deux contrôleurs du même système, s'il existe une interface entre ces nœuds, ou par l'intermédiaire d'un ou plusieurs nœud(s) du réseau cœur. En effet, dans le cas d'un handover intersystème, chaque contrôleur de station de base communique avec le nœud de son réseau cœur (SGSN ou MSC en GSM/GPRS et UMTS, MME en LTE), nœuds qui relaient ensuite les informations entre système source et système cible. On notera cependant que le MME et le SGSN peuvent être physiquement intégrés dans un même équipement.

La phase de préparation doit être exécutée rapidement, puisqu'il s'agit de la période pendant laquelle les conditions radio se dégradent pour l'UE sur la cellule source. Cependant, cet échange est généralement bref, dans la mesure où il s'effectue sur les interfaces *terrestres* du réseau, sur lesquelles la latence et le taux d'erreur sont souvent très faibles.

À l'issue de cet échange, le contrôleur source peut commencer le transfert des données reçues du réseau cœur vers le contrôleur cible. On parle de *data forwarding*. Ces données sont stockées en mémoire par le contrôleur cible, avant l'arrivée de l'UE. Ce transfert de données doit veiller à maintenir le séquençement des paquets tel que reçu du réseau cœur.

La phase d'exécution

Pour l'exécution du handover, le contrôleur source envoie un ordre de bascule à l'UE. Cette commande est typiquement un message RRC, indiquant à l'UE la cellule cible (fréquence, identi-

fiant...) et des informations sur sa configuration, afin de permettre un accès rapide et fiable de l'UE aux ressources qui lui sont réservées ou qui sont partagées au sein de la cellule entre les UE.

Dès la réception de cette commande, l'UE procède à la recherche de la cellule cible, s'il ne reçoit pas déjà son signal de façon simultanée à celui de la cellule source. Si la cellule cible est portée par une fréquence différente, l'UE ajuste par exemple la fréquence de son récepteur pour démoduler le signal sur cette nouvelle fréquence.

Une fois la cellule cible détectée, l'UE doit accéder aux ressources radio de la voie montante afin de transmettre au contrôleur de la station de base cible un message signalant sa présence et le succès de la bascule radio. Ce message déclenche l'envoi par ce contrôleur d'une notification au réseau cœur lui indiquant que le chemin de données peut être basculé. À l'issue de cette bascule du flux de données, celles-ci ne transitent alors plus par le contrôleur source, mais sont acheminées directement du réseau cœur au contrôleur cible.

Dans le cas d'un handover inter-RAT, la bascule radio est gouvernée par une temporisation déclenchée par l'UE à la réception de la commande de handover : si cette temporisation s'écoule avant que l'UE n'ait pu accéder à la nouvelle cellule, la procédure échoue et l'UE retourne sur la cellule d'origine.

Rôle de l'UE

Le rôle de l'UE dans la procédure de handover est crucial à deux égards :

- pour réaliser des mesures fiables sur son environnement et les remonter au contrôleur de la station de base ;
- pour la bascule proprement dite sur la cellule cible.

La performance radio de l'UE (justesse et délai des mesures, délai pour basculer sur la cellule cible) est donc un élément clé du succès de cette procédure. Pour l'opérateur, il est primordial de s'assurer que les UE utilisés sur son réseau sont capables de réaliser cette procédure radio dans un délai minimal, afin de limiter le temps d'interruption du service. Cet aspect de performance sera traité à la section « Les performances de l'UE en handover », p. 428.

Le handover au sein du système LTE

Cette section décrit la procédure de handover au sein du LTE (handover intra-LTE). Il s'agit de la seule procédure définie pour la mobilité en mode connecté au sein du système LTE. Le handover intra-LTE est de type hard handover.

Les aspects suivants sont décrits dans cette section :

- les mesures ;
- la préparation du handover ;
- l'exécution du handover ;
- la procédure en cas d'échec ;
- et enfin, le délai du handover<XREF>.

La phase de mesures

Nous avons expliqué dans le chapitre 18 que l'UE est capable, en mode veille, de détecter les cellules voisines intra et interféquences sur la seule indication de leur fréquence porteuse, évitant ainsi la nécessité d'indiquer sur la cellule serveuse une liste complète de cellules voisines LTE.

En mode connecté, il faut considérer deux contraintes.

- Les informations dont l'UE a besoin pour détecter une cellule voisine. Ici, les capacités de l'UE sont identiques au mode veille : l'indication de la fréquence porteuse lui suffit pour détecter les cellules présentes sur cette fréquence dans le voisinage de la cellule serveuse.
- Le besoin ou non d'intervalles de mesures aménagés spécifiquement par l'eNodeB pour l'UE dans la trame radio (trous). Cette question ne se pose pas en mode veille puisque l'UE ne reçoit pas de données en continu de l'eNodeB.

La détection des cellules voisines LTE

L'UE n'a pas besoin de recevoir une liste de cellules voisines LTE pour les détecter. Cette détection met en jeu les signaux de synchronisation émis par chaque cellule et décrits au chapitre 7. Par ailleurs, l'eNodeB peut signaler une *liste noire* (ou *blacklist*) de cellules que l'UE ne doit pas mesurer. Signaler cette liste à l'UE pour les mesures limite sa consommation. En effet, même si, in fine, l'eNodeB décide de ne pas réaliser le handover vers une cellule cible faisant partie de la liste noire, l'UE détectera et mesurera inutilement ces cellules si elles ne lui sont pas interdites.

Par ailleurs, pour la mesure proprement dite, l'UE n'a pas besoin d'intervalles de mesure (*gaps*) pour les cellules intrafréquences : il est capable de mesurer ces cellules tout en continuant de recevoir des données sur la cellule serveuse, de façon simultanée.

Pour les cellules interféquences en revanche, ces intervalles de mesure peuvent être nécessaires à l'UE, suivant ses capacités : seul un UE pourvu de deux chaînes de réception radio LTE peut simultanément réaliser des mesures interféquences et poursuivre la réception de données sur la cellule serveuse. Une telle configuration matérielle implique un coût accru du terminal.

Mesures intrafréquences et interféquences

En LTE, une cellule se caractérise dans le domaine fréquentiel par sa fréquence centrale f_c et sa largeur de bande. Deux cellules voisines peuvent donc avoir la même fréquence centrale mais une largeur de bande différente, ou une fréquence centrale différente avec la même largeur de bande. Le terme intrafréquence est réservé au cas de cellules partageant la même fréquence centrale, quelle que soit leur largeur de bande respective (scénarios 1, 2 et 3 sur la figure 19-3). Au contraire, si cette fréquence est différente, on parlera de cellules *interfréquences* (scénarios 4, 5 et 6).

L'UE effectue les mesures des cellules voisines sur une bande de fréquence dont la largeur est indiquée par la cellule serveuse dans ses Informations Système.

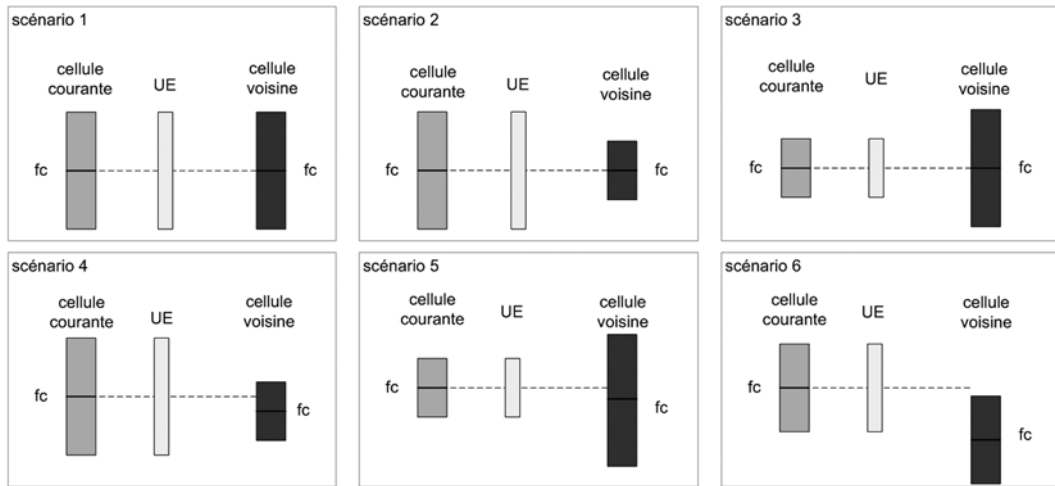


Figure 19-3

Deux cellules intrafréquences ont la même fréquence centrale

Configuration et remontée des mesures

Lors de la configuration d'une mesure, l'eNodeB associe un objet, c'est-à-dire l'élément sur lequel porte la mesure, à une configuration de remontée, c'est-à-dire la façon dont la mesure doit être remontée à l'eNodeB. L'objet de mesure peut être la fréquence LTE courante ou une autre fréquence LTE. L'UE mesure pour chaque cellule détectée le niveau de signal qu'il reçoit de la cellule. Cette mesure s'effectue à l'aide des signaux de référence communs à la cellule (CRS, voir le chapitre 7) et est appelée RSRP (*Reference Signal Received Power*).

L'UE réalise un filtrage sur les mesures de RSRP fournies par la couche physique et remonte cette valeur filtrée à l'eNodeB ou la compare au seuil configuré pour l'événement.

Ensuite, la remontée des mesures suit un des schémas suivants.

- Sur événement (dit *event-triggered* en anglais) : dans ce cas, l'UE informe l'eNodeB lorsque l'événement survient. Ce dernier est au préalable configuré par l'eNodeB au moyen du protocole RRC, qui indique notamment le ou les seuil(s) radio associé(s) au critère de déclenchement et la durée T pendant laquelle ce critère doit être vérifié (appelée *time-to-trigger*). L'événement suivant peut par exemple être utilisé pour déclencher un handover intrafréquence : « une cellule voisine mesurée devient meilleure de 6 dB que la cellule courante et le reste pendant T secondes ».
- De façon périodique : l'UE envoie régulièrement à l'eNodeB des rapports de mesures, conformément au format et à la fréquence définis par l'eNodeB lors de la configuration des mesures.
- De façon périodique après un événement : il s'agit d'une combinaison des deux modes précédents. Une fois que le critère associé à l'événement configuré est atteint, l'UE envoie des rapports de mesures de façon périodique, dans la limite d'un nombre prédéterminé de rapports.

La remontée périodique permet à l'eNodeB de suivre l'évolution de l'UE vis-à-vis de l'objet mesuré et, par exemple, de déclencher un handover lorsque la mesure remontée se dégrade de façon continue. En revanche, elle implique plus de signalisation qu'une remontée sur événement et peut donc induire une charge radio plus importante sur la voie montante. Il faut bien noter cependant que la périodicité avec laquelle l'UE réalise les mesures ne dépend pas de ce mode de remontée.

En général, les mesures intrafréquences LTE sont configurées dès l'établissement de la connexion RRC, puisqu'elles sont indispensables au réseau pour assurer la mobilité sur une plaque de cellules LTE. Les mesures interféquences peuvent être configurées également à ce moment ; cependant, si le terminal ne dispose pas de deux récepteurs radio LTE, elles ne pourront être réalisées sans intervalles de mesure aménagés à cet effet dans la trame. Cette configuration d'intervalles est typiquement réalisée par l'eNodeB lorsque l'UE remonte un événement comme « la cellule serveuse est inférieure au seuil absolu X » et que la cellule serveuse se trouve dans une zone avec plusieurs fréquences LTE.

On notera également qu'en LTE, et cela constitue une différence importante avec l'UMTS, l'eNodeB peut configurer en mode connecté un seuil de niveau de signal radio au-dessus duquel l'UE n'est pas obligé de réaliser des mesures sur les fréquences LTE voisines ou sur les autres systèmes, et cela même si les intervalles permettant ces mesures sont activés. Ce seuil est appelé *s-Measure*, comme pour le mode veille. L'intérêt de ce seuil pour l'opérateur est de limiter la consommation des UE tout en simplifiant la configuration des mesures : celles-ci peuvent être configurées dès l'établissement de la connexion RRC, mais activées par l'UE uniquement lorsqu'il mesure sur la cellule serveuse un RSRP inférieur au seuil *s-Measure*. La valeur de *s-Measure* peut aussi être adaptée à l'activité de l'UE. Un UE actif aura besoin de bonnes conditions radio pour une qualité de service satisfaisante et une bonne continuité de service ; on pourra donc positionner *s-Measure* prudemment pour cet UE. En revanche, une valeur plus faible pourra être utilisée pour un UE peu ou pas actif pour lequel la consommation de batterie doit être minimisée (UE en mode DRX par exemple).

Il est important d'avoir à l'esprit que ce seuil ne s'applique qu'aux mesures effectuées par l'UE sur les cellules voisines, et non sur la cellule serveuse, que l'UE évalue de façon continue.

Ce séquençement configuration - remontée de mesures est illustré à la figure de la section « La phase de préparation », p. 403.

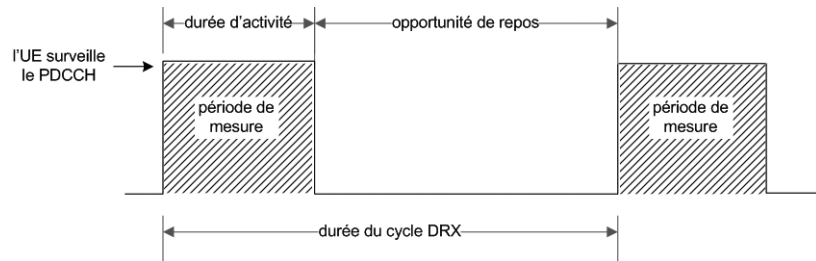
Mesures en mode DRX

Lorsque le DRX est utilisé en mode connecté, la période de mesure est limitée à la durée d'activité, comme illustré à la figure suivante. De ce fait, les exigences sur la précision des mesures et la rapidité de détection de nouvelles cellules voisines sont relâchées et elles dépendent de la durée du cycle DRX. Maintenir les mêmes exigences de performances avec et sans DRX impliquerait une activité de mesure et de remontée identique et réduirait donc notablement le gain apporté par ce mécanisme.

Le mode DRX a été présenté en détail dans le chapitre 14.

Figure 19-4

Les mesures en mode DRX ne peuvent être réalisées que pendant les périodes d'éveil



La phase de préparation

La préparation peut être réalisée entre les deux eNodeB via l'interface X2 si elle existe, ou, à défaut, par l'intermédiaire du MME via l'interface S1. Dans les deux cas cependant, la procédure sur l'interface radio est identique. L'utilisation de l'interface S1 pour le handover est nécessaire lorsque l'opérateur ne peut mettre en œuvre d'interface X2 entre certains eNodeB. Cependant, les délais de préparation et de transfert des données peuvent être plus longs puisque les messages transitent par le MME et traversent ainsi deux interfaces S1 (entre eNodeB source et MME, puis entre MME et eNodeB cible). Si la cellule cible appartient au même eNodeB, celui-ci n'engage aucune procédure de préparation.

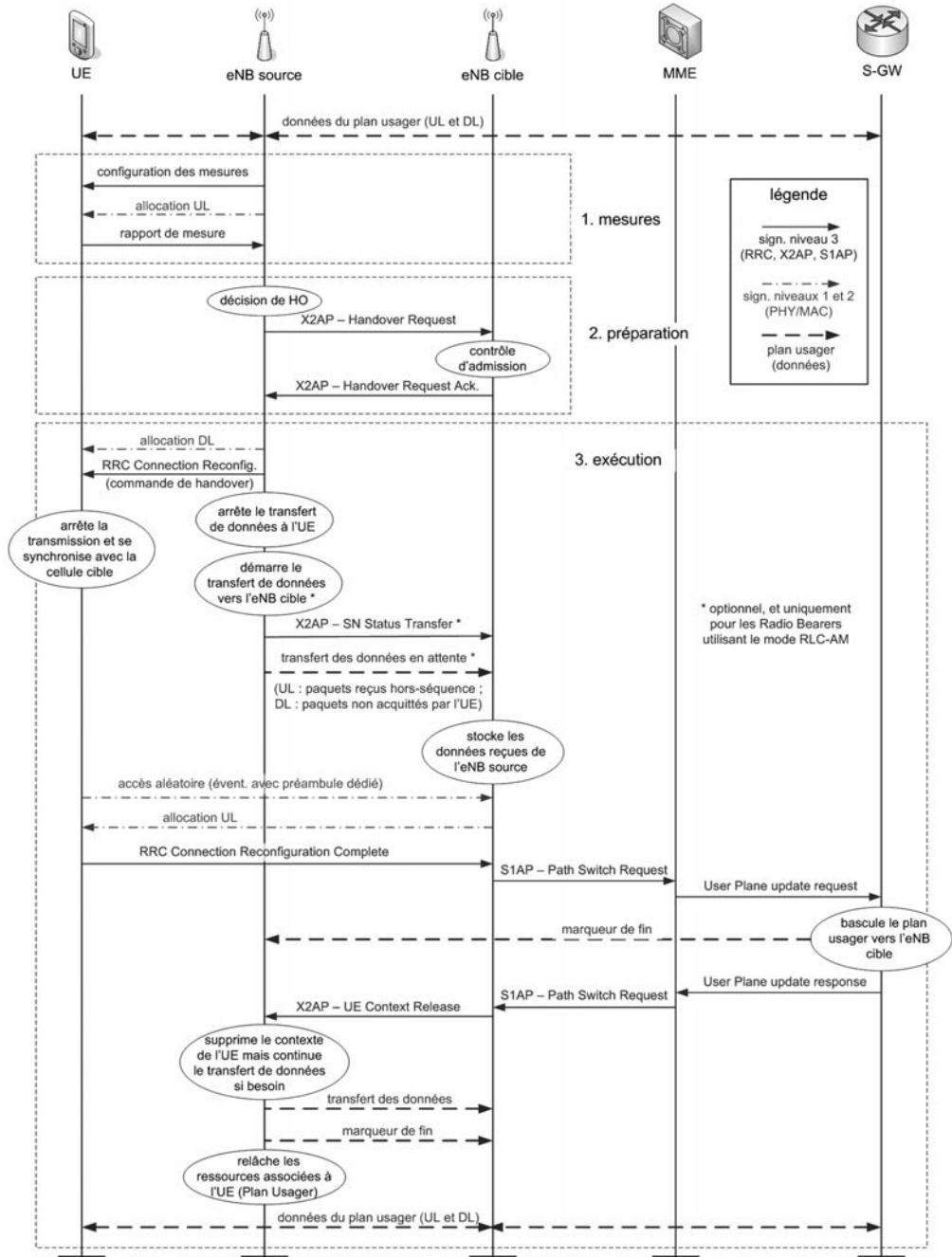
La figure suivante représente la cinématique des flux de signalisation dans le cas d'une procédure de handover via l'interface X2.

Lors de la préparation, l'eNodeB source fournit, entre autres, les informations suivantes à l'eNodeB cible :

- l'identifiant global de la cellule cible EGCI, permettant d'identifier la cellule cible sans ambiguïté ;
- la cause du handover (par exemple les conditions radio, la réduction de la charge, l'optimisation des ressources) ;
- des paramètres de sécurité, comme les algorithmes implémentés, la clé K_{eNB*} , l'identifiant short MAC-I (voir le chapitre sur la sécurité) ;
- la liste et la description des E-RAB à configurer ;
- le contexte RRC de l'UE, qui décrit notamment la configuration radio de la connexion RRC sur la cellule source, les paramètres du cycle DRX si utilisé ;
- des informations sur l'historique de mobilité de l'UE, informant l'eNodeB cible de la liste des 16 dernières cellules visitées par l'UE, et, par exemple, de déplacements récurrents entre des cellules (« ping-pong »).

L'eNodeB cible, à la réception du message X2AP *Handover Request*, effectue le contrôle d'admission : il vérifie qu'il dispose des ressources radio et système pour accueillir l'UE et, en particulier, des E-RAB actifs sur la cellule source. S'il est capable d'établir au moins l'un de ces E-RAB, l'eNodeB doit répondre positivement à l'eNodeB source en lui indiquant le ou les E-RAB qui peuvent être maintenu(s). Il inclut dans sa réponse le message RRC destiné à l'UE et qui sera envoyé par l'eNodeB source lors de la commande du handover. Ce message contient la configuration que

Figure 19-5
Diagramme
de flux
du handover
LTE via
l'interface X2



L'UE devra appliquer lors de son accès à la cellule cible, notamment les radio bearers associés aux E-RAB qui sont maintenus. L'eNodeB cible retourne également à l'eNodeB source, pour chaque E-RAB, le point de terminaison du tunnel GTP entre les deux eNodeB, si un transfert de l'eNodeB source à l'eNodeB cible des données descendantes (reçues par l'eNodeB source de la S-GW) a été demandé par l'eNodeB source dans le message *Handover Request*.

La phase d'exécution

Après la réception du message de réponse au *Handover Request*, l'eNodeB source déclenche le handover par l'envoi à l'UE du message *RRC Connection Reconfiguration*, qui lui indique notamment :

- la cellule cible (sa fréquence, si différente, et son PCI) ;
- son identifiant C-RNTI dans cette cellule ;
- des paramètres de sécurité (par exemple l'algorithme, s'il doit changer) lui permettant de dériver les nouvelles clés de chiffrement et d'intégrité RRC.

Lorsqu'il reçoit ce message, l'UE doit immédiatement tenter de basculer sur la cellule cible, même s'il n'a pu acquitter la réception du message RRC (acquittements HARQ ou ARQ/RLC). Il réinitialise sa couche MAC et procède au rétablissement de ses couches RLC et PDCP. La couche RRC configure alors les couches PHY, MAC, RLC et PDCP suivant les paramètres fournis par l'eNodeB cible et transmis par l'eNodeB source dans le message *RRC Connection Reconfiguration*.

L'UE dérive ensuite la nouvelle clé K_{eNB*} , soit à partir de la clé K_{ASME} actuelle (c'est-à-dire celle utilisée pour le calcul de la clé K_{eNodeB} courante), soit à partir de la nouvelle clé K_{ASME} si une procédure NAS de sécurité a été réalisée. L'eNodeB indique à l'UE lequel des deux mécanismes utiliser pour cette dérivation.

L'UE procède alors à l'accès aléatoire sur le canal RACH de la cellule cible et, en cas de succès, transmet à l'eNodeB le message *RRC Connection Reconfiguration Complete*, qui termine la procédure de signalisation. L'accès au canal RACH peut être réalisé avec un préambule dédié, si la cellule cible l'a fourni à la cellule source lors de la phase de préparation. Ce mode présente l'avantage d'écarter un risque de collision avec des préambules d'autres UE, ce qui augmente donc les chances de succès de la procédure et tend à réduire son délai global (voir le chapitre 14 pour la description de la procédure d'accès aléatoire).

Enfin, l'UE arrête les remontées périodiques de mesures activées sur la cellule source et supprime la configuration des intervalles de mesures utilisés pour les mesures interférences ou intersystèmes. Cependant, dans le cas d'un handover interférence, l'UE conserve les événements préalablement configurés sur la cellule source, en intervertissant simplement les fréquences source et cible dans la configuration de mesure.

La gestion du plan usager

Lors d'un handover, la bascule de l'UE de la cellule source vers la cellule cible s'accompagne d'une interruption de la connexion radio et, par conséquent, le transfert des données dans les sens montant et descendant est temporairement suspendu.

Le transfert de données descendantes vers l'eNodeB cible

Sans mécanisme de transfert des données entre eNodeB, les unités de données reçues de la S-GW par l'eNodeB source après le déclenchement de la bascule de l'UE sont perdues. La réémission de ces données échoit alors aux couches supérieures, si celles-ci mettent en œuvre une transmission fiable à l'aide de mécanismes de retransmission (par exemple lorsque le protocole TCP est utilisé). Cependant, ces retransmissions sont de fait plus lentes, puisque réalisées entre entités distantes (par exemple de type client/serveur), et peuvent induire une diminution du débit par les couches supérieures (mécanisme *TCP slow start* par exemple). L'expérience de l'utilisateur est alors dégradée. Pour éviter ces pertes, un transfert des unités de données PDCP (SDU PDCP) est possible de l'eNodeB source vers l'eNodeB cible.

La couche PDCP est utilisée, car la numérotation des SDU PDCP est maintenue entre les deux eNodeB pour les radio bearers utilisant le mode RLC acquitté (RLC-AM), alors que la couche RLC est toujours réinitialisée lors du handover (le numéro de séquence RLC est donc remis à zéro). Cette continuité dans la numérotation PDCP permet ainsi, pour ce type de radio bearer, de délivrer en séquence les unités de données à la couche supérieure (paquets IP typiquement) et d'éviter de renvoyer sur la cellule cible une unité de donnée déjà reçue par l'UE sur la cellule source.

Pour les radio bearers utilisant le mode RLC transparent (RLC-TM) ou non acquitté (RLC-UM), le transfert des données à l'eNodeB cible réduit l'interruption du service mais ne peut garantir l'absence de perte de paquets ni la remise en séquence à la couche supérieure, la numérotation des SDU PDCP n'étant pas maintenue.

Pendant la bascule radio effectuée par l'UE et décrite précédemment, l'eNodeB source peut commencer à transférer des données du plan usager à l'eNodeB cible, si un tel transfert doit être appliqué pour l'un des radio bearers basculés sur la cellule cible.

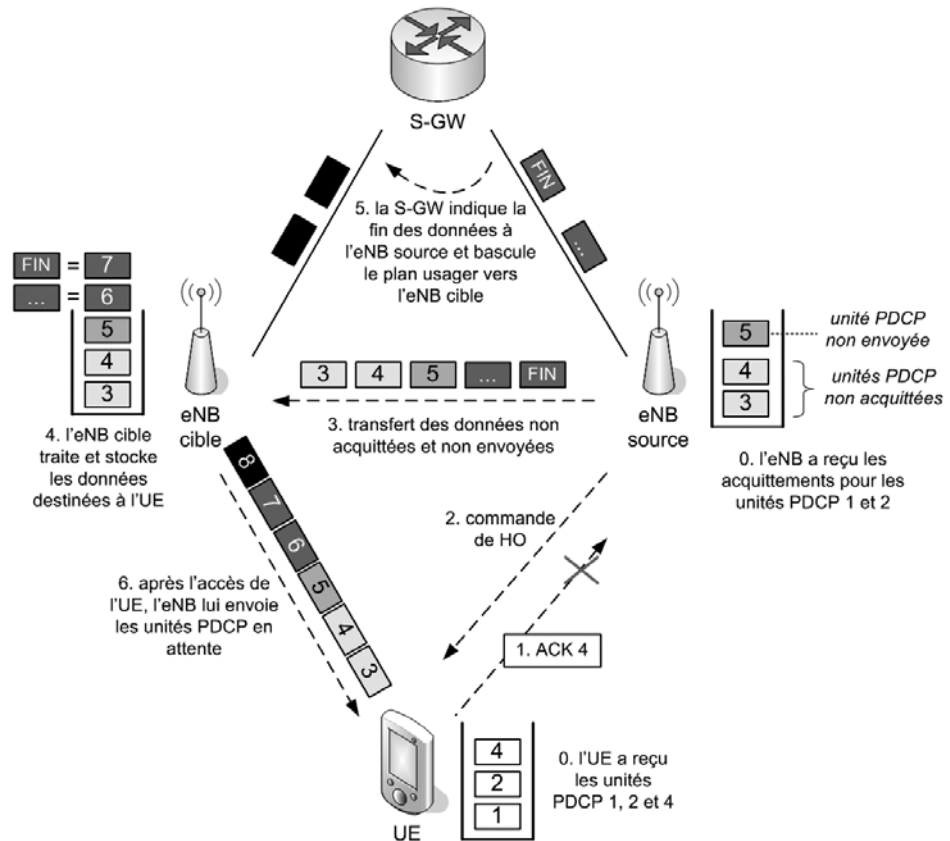
Pour un radio bearer utilisant le mode RLC-AM, l'eNodeB source indique à l'eNodeB cible le prochain numéro de séquence à attribuer dans le sens descendant à un paquet de données n'ayant pas encore de numéro de séquence PDCP. L'eNodeB source transmet également les unités de données suivantes :

- les SDU PDCP qui n'ont pas été intégralement transmises à l'UE ;
- les SDU PDCP dont les unités RLC n'ont pas toutes été acquittées par l'UE ;
- les nouvelles unités de données reçues de la S-GW, qui n'ont pas été traitées par la couche PDCP.

Les SDU PDCP complètes reçues de l'UE sont quant à elles transférées par l'eNodeB source à la S-GW. Deux tunnels différents sont utilisés entre l'eNodeB source et l'eNodeB cible pour transférer les données du sens montant et celles du sens descendant.

Le transfert des SDU PDCP permet de réaliser un handover sans perte de données. Il doit être conjugué à l'utilisation des rapports de réception décrits à la section suivante, pour réaliser un handover sans doublon.

Figure 19-6
Gestion du plan
usager lors du
handover en
LTE



La figure illustre par un exemple la gestion du plan usager lors d'un handover avec transfert des données PDCP de l'eNodeB source à l'eNodeB cible :

0. Lors de l'appel en cours sur la cellule source, l'eNodeB a pu envoyer à l'UE les SDU PDCP 1 à 4. Cependant, l'eNodeB source n'a pas reçu d'ackuitement pour les SDU 3 et 4. Il les conserve donc dans son buffer de transmission, de même que la SDU 5 qui n'a pas été transmise à l'UE. Ce dernier a correctement reçu les SDU 1, 2 et 4, et les a acquittées. En revanche, il n'a pas reçu la SDU 3 ; il a donc besoin de sa retransmission par l'eNodeB.
1. L'ackuitement de la SDU 4 n'arrive pas à l'eNodeB source, le lien radio entre l'UE et l'eNodeB source étant déjà dégradé.
2. L'eNodeB source envoie à l'UE l'ordre de bascule.
3. L'eNodeB source commence alors le transfert des SDU PDCP vers l'eNodeB cible, en indiquant leur numéro de séquence. Simultanément, il continue de recevoir de la S-GW des unités de données à destination de l'UE, qu'il transférera également à l'eNodeB cible après le transfert de toutes les SDU PDCP en attente. L'eNodeB cible leur attribuera alors des numéros de séquence PDCP.

4. L'eNodeB cible stocke les SDU reçues, jusqu'à l'arrivée de l'UE sur la cellule. Il attribue un numéro de séquence à chaque unité de données reçue de l'eNodeB source sans numéro de séquence (SDU 6 par exemple, transmise dès réception de la S-GW par l'eNodeB source).
5. Lors de l'accès de l'UE, l'eNodeB cible informe la S-GW, qui bascule alors le plan de données vers l'eNodeB cible. Celle-ci envoie à l'eNodeB source un indicateur de fin de trafic.
6. L'eNodeB cible transmet à l'UE les données PDCP en attente, ainsi que de nouvelles unités de données reçues de la S-GW (SDU 7 et 8). On voit que l'UE va recevoir une seconde fois la SDU 4, ce qui constitue donc un doublon et une utilisation non optimale de l'interface radio.

Les rapports de réception

Un mécanisme de rapport de réception évite en LTE la transmission sur la cellule cible de SDU PDCP déjà reçues par l'UE ou par l'eNodeB (*doublons*). Ce mécanisme ne peut être utilisé que pour les radio bearers utilisant le mode RLC-AM, pour lesquels la numérotation des SDU PDCP est continue entre la cellule source et la cellule cible, comme nous l'avons expliqué précédemment.

Si l'eNodeB source choisit d'utiliser ce mécanisme pour un ou plusieurs E-RAB actif(s) de l'UE, il indique à l'UE dans le message de commande du handover les E-RAB pour lesquels l'UE devra envoyer un rapport de réception PDCP à l'eNodeB cible une fois la bascule effectuée. L'UE doit alors transmettre sur la cellule cible une unité de contrôle PDCP, appelée *PDCP Status Report*, donnant l'état des réceptions des SDU PDCP pour ces radio bearers. Ce rapport n'est donc pas systématique pour un radio bearer RLC-AM. Cependant, s'il est demandé, l'UE doit l'envoyer avant toute transmission de données sur la cellule cible. Il sert à l'eNodeB cible pour déterminer quelles SDU PDCP doivent être renvoyées à l'UE.

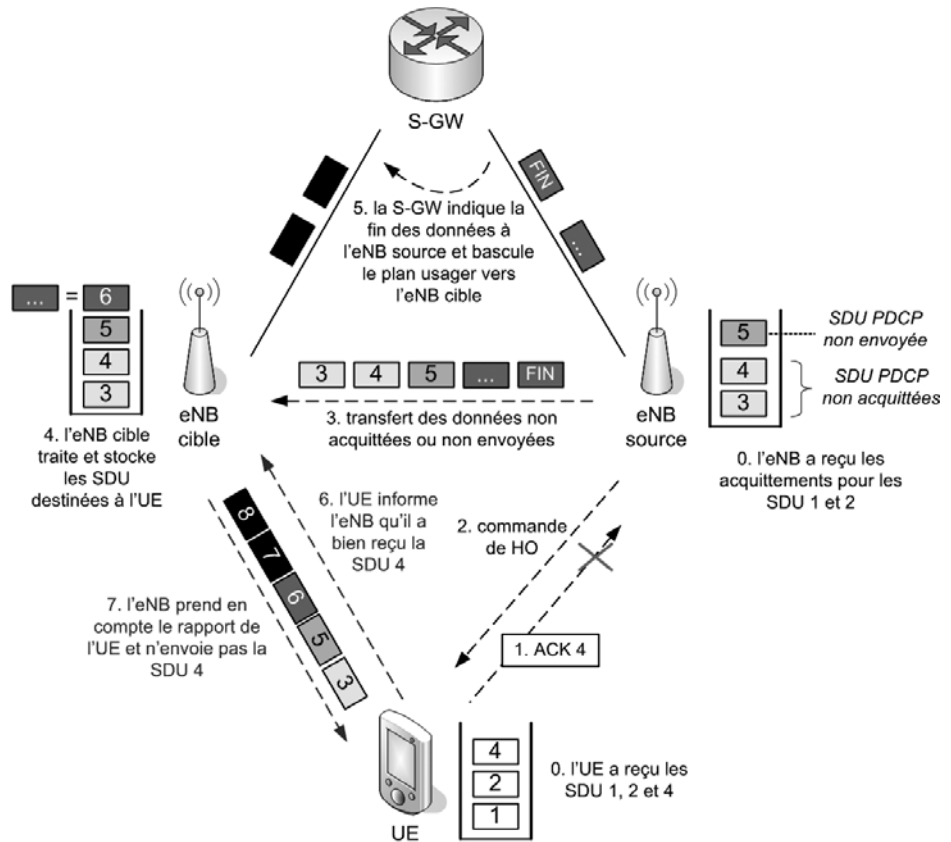
Lors du transfert des données à l'eNodeB cible, l'eNodeB source envoie également un état d'envoi/réception indiquant, pour chacun de ces E-RAB :

- pour le sens descendant : le dernier numéro de séquence PDCP alloué, indiquant à l'eNodeB cible quel numéro attribuer à la première SDU PDCP qui n'en a pas encore ;
- pour le sens montant : le numéro de séquence SN1 de la dernière SDU PDCP reçue en séquence, informant l'eNodeB cible qu'il ne doit pas transmettre à la S-GW de SDU PDCP reçue de l'UE avec un numéro de séquence inférieur ou égal. La SDU SN2 est donc la première SDU non reçue par l'eNodeB source ;
- pour le sens montant : les numéros de séquence des autres SDU PDCP reçues de l'UE après cette SDU SN1, qui n'ont donc pas besoin d'être renvoyées par l'UE sur la cellule cible.

Les deux dernières informations servent à l'eNodeB cible pour préparer un PDCP Status Report à destination de l'UE, pour qu'il ne renvoie que les SDU manquantes. L'eNodeB source peut envoyer cet état d'envoi/réception à l'eNodeB cible directement via l'interface X2 (dans le cas d'un handover via X2), ou par l'intermédiaire du MME (handover via S1).

Avec ces deux rapports PDCP fournis par l'eNodeB source et par l'UE lors de son accès, l'eNodeB cible sait donc quelles SDU PDCP renvoyer et lesquelles attendre de l'UE.

Figure 19-7
Rapport de
réception par l'UE
pour éviter les
doublons PDCP



Cette figure reprend l'exemple précédent, mais ici l'UE envoie un rapport de réception lors de son accès à la cellule cible. Cela informe l'eNodeB qu'il a reçu la SDU 4 et donc qu'il doit la supprimer du buffer d'envoi. On évite ainsi un doublon sur l'interface radio.

En synthèse :

- Un handover peut être réalisé sans perte de données sur un radio bearer si, d'une part, un transfert de données est opéré par l'eNodeB source pour ce radio bearer et, d'autre part, le radio bearer utilise le mode RLC-AM.
- Le mécanisme de rapport de réception limite le renvoi sur l'interface radio de données déjà transmises (évite les doublons) et améliore ainsi l'efficacité radio du handover.

En cas d'échec : la procédure de rétablissement

Lors de la réception du message *RRC Connection Reconfiguration* commandant le handover, l'UE démarre la temporisation du handover. Celle-ci est arrêtée par l'UE lorsque la procédure d'accès aléa-

toire sur le canal RACH de la cellule cible aboutit. Si cette temporisation expire avant la fin de cette procédure, l'UE considère que le handover a échoué et lance alors une procédure de rétablissement de connexion RRC. L'UE reprend alors la configuration RRC et PDCP utilisée dans la cellule source et supprime les configurations des couches physique et MAC établies pour la cellule cible.

La perte du lien radio et le rétablissement de connexion en LTE

Lors de l'appel, la position de l'UE au sein de la cellule peut évoluer et conduire à une dégradation du lien radio avec l'eNodeB. L'objectif de l'opérateur est d'éviter que cette dégradation ne conduise à la perte de la connexion RRC et d'assurer une continuité de l'appel à l'aide des procédures de mobilité. Toutefois, différents facteurs, comme la charge du réseau, un déplacement rapide et soudain de l'UE ou des perturbations liées à l'environnement (interférences, obstacle mobile...) peuvent provoquer une dégradation brutale des conditions et une rupture du lien radio avant que l'eNodeB ait pu déclencher un handover. Enfin, le paramétrage du réseau (seuils de handover notamment) est une opération délicate qui peut nécessiter sur certains sites une période d'observation et d'optimisation après le déploiement, période pendant laquelle l'UE peut être exposé à des pertes de couverture en fonction de son déplacement.

Il est donc primordial de pouvoir rétablir une connexion RRC si celle-ci est provisoirement rompue du fait d'une dégradation sévère du lien radio. Une procédure a donc été définie, comme dans les systèmes GSM et UMTS, pour que l'UE recouvre cette connexion avec une cellule.

Nous décrivons dans cette section les différentes étapes de ce mécanisme, à savoir :

1. la détection d'un problème sur le lien radio ;
2. la procédure de rétablissement elle-même.

Dans la suite, nous supposons que l'UE a établi un bearer EPS avec le réseau. Une connexion RRC est donc établie et la procédure de sécurité a été effectuée.

La détection de la perte de lien radio

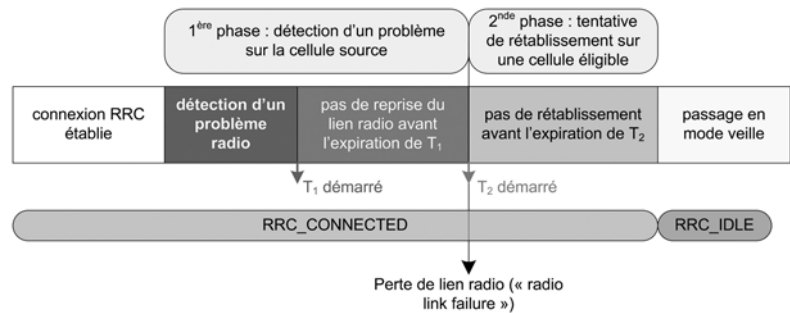
Lorsqu'une connexion radio est établie avec l'eNodeB, l'UE en surveille la qualité à l'aide de mesures effectuées par la couche physique et remontées à la couche RRC après application d'un filtre.

La couche RRC de l'UE détecte un problème sur la couche physique lorsqu'elle reçoit de celle-ci N indications successives de perte de synchronisation. Une temporisation RRC (que nous appellerons ici T_1) est alors démarrée et n'est arrêtée que si la couche physique remonte M indications consécutives de synchronisation avant que cette temporisation expire. Dans ce cas de figure, la couche RRC considère que la synchronisation est rétablie et ne lance aucune procédure particulière. En revanche, si la temporisation expire, ou si le nombre maximal de retransmissions RLC a été atteint, la couche RRC de l'UE considère que le lien radio est défaillant et démarre alors la procédure de rétablissement de connexion RRC. Elle lance alors la temporisation T_2 . Si le rétablissement aboutit avant l'expiration de T_2 , cette temporisation est arrêtée. Sinon, l'UE passe en mode veille et le rétablissement de la session est alors du ressort des couches supérieures, voire de l'utilisateur.

Les valeurs N , M , T_1 et T_2 sont configurées par l'opérateur et diffusées sur les Informations Système de chaque cellule.

Figure 19-8

Les étapes dans la perte du lien radio



Le rétablissement de la connexion RRC

L'objet de cette procédure est de rétablir la connexion RRC. Ceci implique d'abord la reprise du radio bearer de signalisation SRB1, portant les messages RRC avant la procédure de sécurité RRC et, ensuite, la réactivation de la sécurité RRC. On notera que cette procédure est prévue pour permettre un rétablissement de la connexion radio sur la cellule source ou la cellule cible du handover, après un échec lors de l'accès initial de l'UE à la cellule cible. Cette procédure ne peut en effet aboutir que lorsque la cellule sélectionnée par l'UE a été préalablement *préparée* par l'eNodeB d'origine, c'est-à-dire qu'elle a reçu de celui-ci un ensemble d'informations sur l'UE en préparation à un handover.

Cette procédure est décrite dans la suite de cette section et illustrée par la figure 19-9. Ici, une interface X2 existe entre les deux eNodeB et le handover est donc préparé via cette interface.

Nous supposons que la temporisation T₁ a expiré (perte du lien radio) et que l'UE n'a pas reçu la commande de handover. L'UE déclenche la temporisation de rétablissement T₂ et procède à la sélection de cellule. Lorsqu'une cellule E-UTRAN éligible est sélectionnée, l'UE arrête T₂ et prépare le message *RRC Connection Reestablishment Request*. Si en revanche aucune cellule éligible E-UTRAN n'est trouvée, ou si l'UE sélectionne une cellule d'une autre technologie d'accès (GSM ou UMTS), il passe alors en mode veille et relâche tous les radio bearers établis en LTE.

Dans le message *RRC Connection Reestablishment Request*, l'UE indique notamment :

- son identifiant C-RNTI utilisé dans la cellule d'origine ;
- l'identifiant physique de la cellule d'origine (PCI) ;
- un code d'identification appelé *Short MAC-I*.

Les deux premiers paramètres permettent à l'eNodeB contrôlant la cellule accédée de retrouver le contexte de l'UE. Le cas échéant, l'eNodeB vérifie que le code d'identification Short MAC-I fourni par l'UE correspond à celui reçu de l'eNodeB d'origine avec le contexte de l'UE, lors de la préparation du handover.

En effet, lors de cette préparation, l'eNodeB d'origine ne fournit pas les clés RRC de l'UE utilisées pour la protection de l'intégrité et le chiffrement des messages RRC, mais uniquement le paramètre Short MAC-I qu'il a calculé à l'aide de ces clés (voir le chapitre 20). L'UE procède au même calcul

au moment d'accéder à la cellule. Le message *RRC Connection Reestablishment Request* n'est donc pas protégé en intégrité, ni même chiffré, et l'identification fiable n'est rendue possible que par la vérification de ce code. Sans cette identification sécurisée, un UE malveillant pourrait mettre fin à l'appel de l'UE auquel le CRNTI est attribué, en initiant une procédure de rétablissement sur une cellule voisine.

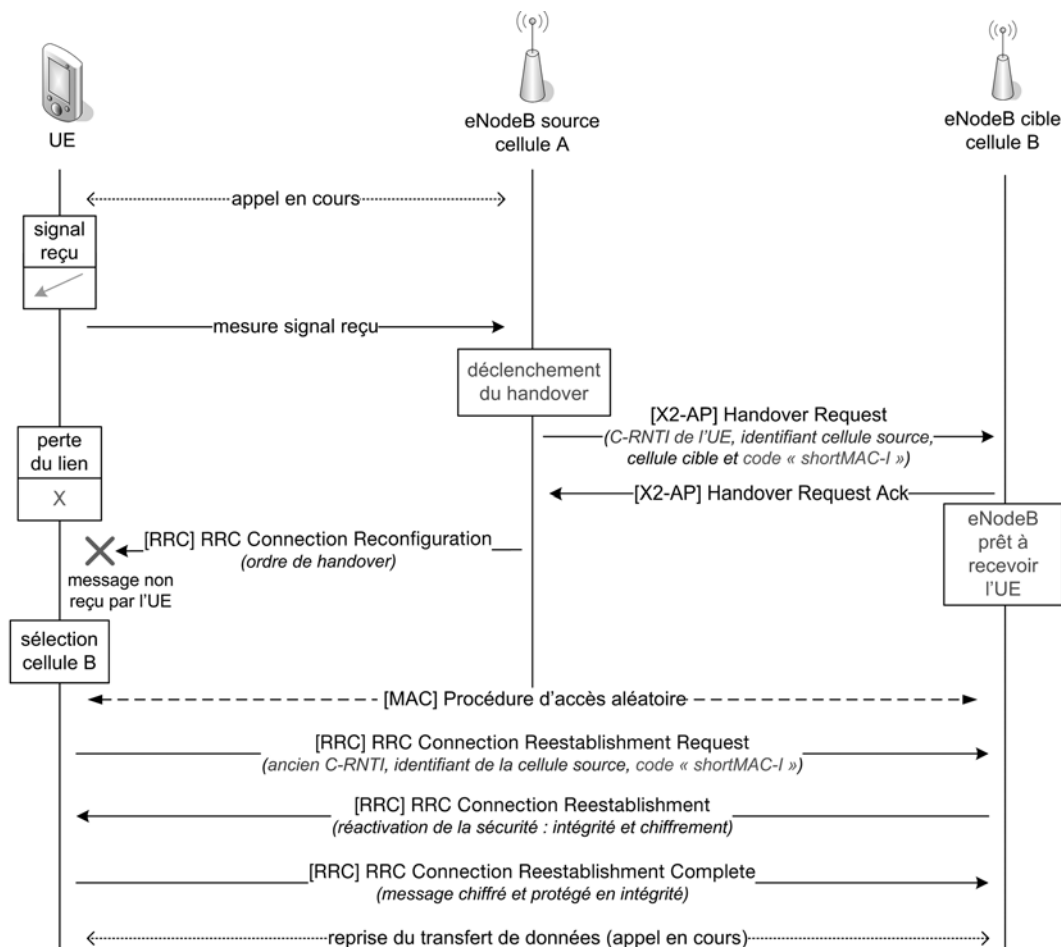


Figure 19-9

Cinématique pour le rétablissement de la connexion RRC

Ce message est alors transmis à la couche MAC de l'UE, qui démarre une procédure d'accès aléatoire pour l'envoyer à l'eNodeB, comme dans le cas d'une procédure d'établissement de connexion RRC.

Lors de cette procédure d'accès aléatoire, un nouveau C-RNTI est alloué à l'UE par la cellule d'arrivée. L'UE reçoit en retour le message *RRC Connection Reestablishment*, à l'aide duquel il dérive les nouvelles clés de chiffrement et d'intégrité RRC. Tous les messages suivants sont alors protégés en intégrité et chiffrés à l'aide de ces clés, avec les algorithmes de chiffrement et d'intégrité utilisés dans la cellule d'origine. La clé de chiffrement du plan usager est également calculée par l'UE à la réception de ce message. À partir de ce moment, la sécurité entre l'UE et l'eNodeB est donc rétablie. Ce dernier peut maintenant procéder au rétablissement des radio bearers de données, via la procédure de reconfiguration de la connexion RRC. Le basculement du plan usager vers l'eNodeB cible est alors demandé par l'eNodeB source au MME et suit le même mécanisme que pour un handover.

Vitesse de déplacement et mobilité

En mode connecté, un ajustement peut être effectué en fonction de la vitesse de l'UE sur la rapidité de détection d'un événement particulier. Dans ce cas, l'UE modifie la durée de validation du critère associé à l'événement, appelée *time-to-trigger*, selon sa vitesse de déplacement.

Il évalue sa vitesse en comptant le nombre de handovers réalisés dans un intervalle de temps donné et, selon le résultat et la configuration indiquée par l'eNodeB, il considère qu'il évolue à une vitesse faible, moyenne ou élevée. Il ajuste alors le paramètre *time-to-trigger* d'un coefficient associé à cette vitesse et fourni par l'eNodeB. Le mécanisme est donc identique à celui utilisé en mode veille (voir le chapitre 18), la seule différence portant sur le paramètre affecté, *time-to-trigger* étant l'équivalent en mode connecté de $T_{\text{reselection}}$. Les paramètres nécessaires à la détection de la vitesse de déplacement (durée d'évaluation, nombre de handovers pour chaque niveau de vitesse) et à l'adaptation du *time-to-trigger* (coefficient pour chaque niveau de vitesse) sont indiqués par l'eNodeB dans le message *RRC Connection Reconfiguration*, typiquement lors de la configuration des événements de mesure. Cependant, ce mécanisme est optionnel pour l'eNodeB et l'opérateur peut faire le choix de ne pas l'utiliser.

La mobilité intersystème en appel

Principes généraux

De façon générale, la mobilité intersystème peut suivre les mêmes schémas que la mobilité intra-système, c'est-à-dire handover (avec ou sans mesures), redirection et resélection. Cependant, en cas de handover, ce dernier sera toujours effectué avec une rupture du lien radio. En effet, le mécanisme de soft handover n'est défini qu'en UMTS et est possible uniquement entre stations de base de la même technologie radio. Par ailleurs, un principe général adopté par le 3GPP pour la définition des procédures de handover en appel est que le système source s'adapte au système cible : cela signifie par exemple que, lors d'un handover LTE vers UMTS, les messages échangés entre les nœuds des deux systèmes suivent la syntaxe et le protocole du système UMTS.

Ce principe est essentiel dans la perspective du déploiement d'une nouvelle technologie de réseau mobile. En effet, le déploiement d'un tel réseau se faisant progressivement, les zones couvertes par

ce nouveau système sont habituellement limitées aux grands centres urbains dans un premier temps et à des surfaces géographiques limitées de façon générale. Cela implique, pour une technologie dite mobile, de mettre en place dès le début des mécanismes de continuité de service depuis le nouveau réseau vers le réseau existant, a minima pour les services interactifs ou conversationnels (appels voix et vidéo, streaming par exemple). Les opérateurs cherchent alors à éviter des modifications sur la technologie de réseau existante pour limiter les investissements sur une technologie non pérenne. Ainsi, il est primordial que la continuité de service vers le réseau existant soit assurée sans faire évoluer ce dernier de façon significative. C'est une condition déterminante pour l'acceptation de la nouvelle technologie.

De façon similaire, l'intérêt des opérateurs est que la mobilité vers le nouveau système, qui suit aussi le principe énoncé ci-dessus, soit conçue de façon à ce que les changements sur le système existant, inévitables, soient limités et simples. Par exemple, les modifications sur la partie UMTS de l'UE pour permettre le handover vers le LTE doivent être minimales.

Un autre point important dans le handover intersystème est que le système source transmet les capacités de l'UE au système cible. Elles sont en effet utilisées par ce dernier pour préparer une configuration adaptée à ces capacités (configuration radio, de sécurité, de mesure...) avant l'arrivée de l'UE sur la cellule.

Mécanismes utilisés en LTE

Rappelons que le système LTE/EPC a été conçu pour utiliser l'architecture de service IMS, entièrement basée sur le protocole IP : cela signifie que tous les services, y compris ceux de type conversationnel (voix, visiophonie), sont destinés à être portés de bout-en-bout par ce protocole (VoIP pour la voix). Le handover en mode paquet est donc la procédure adéquate pour basculer un appel VoIP entre les systèmes LTE et UMTS tout en le maintenant sur l'IMS pour la signalisation.

Cependant, lors de la définition des systèmes LTE/EPC, certains opérateurs ont souhaité permettre une mobilité vers le mode circuit de l'UMTS, afin de ne pas avoir à déployer une infrastructure IMS dès le déploiement de leur réseau LTE/EPC. Cela a conduit à la définition de la procédure CS Fallback, qui transfère un appel VoIP en LTE vers la technologie la plus utilisée en UMTS ou en GSM/GPRS pour la voix : le mode circuit (CS).

Plusieurs mécanismes de mobilité en mode connecté ont été définis pour couvrir différents cas d'usages (voix, données) et de déploiement.

- Handover en mode paquet (*PS handover*, pour *Packet-Switched handover*), similaire au mécanisme existant entre 3G et 2G pour la continuité des sessions de données, qui peut être utilisé pour la mobilité entre le LTE et le domaine PS des technologies 3G et 2G.
- Handover de type paquet vers circuit (SR-VCC pour *Single Radio Voice Call Continuity*), transférant un appel VoIP en LTE vers le domaine CS de la 3G ou de la 2G.
- Resélection commandée par la station de base (*Cell Change Order*). Elle peut être utilisée dans certaines configurations, entre LTE et GPRS notamment, lors de sessions de données, à la place du PS handover, dont la mise en œuvre est plus complexe (voir la section « Cell Change Order et redirection », p. 427). Comme le handover, elle peut être précédée de mesures sur la RAT cible.

- Redirection lors de l'établissement ou de la relâche de la connexion RRC, similaire à la redirection existant en UMTS. Ce mécanisme peut être utilisé en LTE par exemple lors d'une procédure de CS Fallback (voir la section « Le mécanisme CS Fallback », p. 432) pour renvoyer l'UE en 3G ou en 2G afin qu'il puisse y établir un appel voix sur le domaine CS.

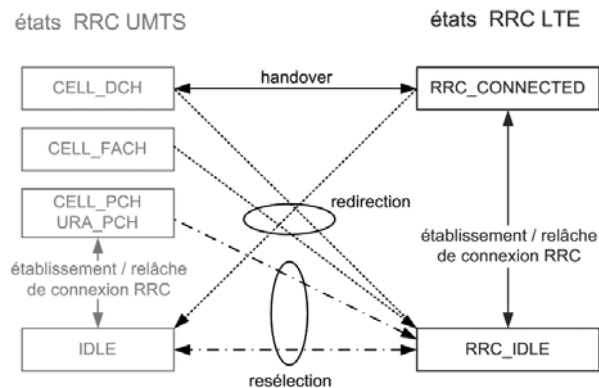
L'intérêt et la mise en œuvre effective de tel ou tel mécanisme dépend de la configuration du réseau existant de l'opérateur (par exemple en fonction de l'existence et la couverture du réseau UMTS et/ou des services proposés sur le réseau GSM/GPRS) et de sa stratégie (selon son choix ou non d'investir dans le réseau GSM/GPRS, la nature des premiers terminaux LTE etc.).

Mobilité entre les systèmes LTE et UMTS

Les mécanismes de mobilité existant entre l'UMTS et le LTE sont résumés par le schéma suivant. On voit que seul le handover permet de rester dans l'état connecté sur le système cible, tandis que la redirection est possible, dans un sens comme dans l'autre. Ces mécanismes sont décrits dans la suite de ce chapitre, tandis que la resélection a été décrite dans le chapitre 18.

Figure 19-10

États RRC et mobilité entre les systèmes UMTS et LTE



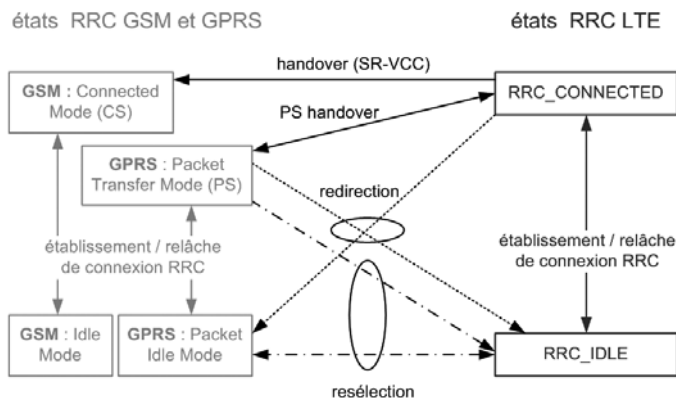
Mobilité entre les systèmes LTE et GSM/GPRS

Les mécanismes de mobilité en mode connecté définis en Release 8 entre les systèmes LTE et GSM/GPRS sont :

- pour la mobilité du LTE vers le GSM/GPRS :
 - PS Handover ;
 - SR-VCC (appel voix) ;
 - redirection de type *Cell Change Order*.
- pour la mobilité du GPRS vers le LTE :
 - PS Handover ;
 - resélection autonome en mode connecté GPRS (*Packet Transfer Mode*) ;
 - redirection de type *Cell Changer Order*.

La figure suivante représente les mécanismes et les transitions d'états associées entre LTE et GSM/GPRS.

Figure 19-11
États RRC et mobilité
entre les systèmes GSM/GPRS
et LTE



Handover LTE vers UMTS

Cette section décrit la procédure de handover en mode paquet depuis le système LTE vers le système UMTS. En particulier, les étapes suivantes sont présentées :

- les mesures ;
- la préparation <XREF> du handover ;
- l'exécution du handover ;
- l'échec du handover : sur quel critère et quel comportement de l'UE.

Comme nous l'avons évoqué plus haut, ce handover en mode paquet est essentiel pour assurer une véritable continuité de service lors du déploiement d'un réseau LTE, puisqu'il s'agit du seul mécanisme de mobilité comprenant une phase de préparation.

La prise en charge de cette procédure par l'UE est optionnelle et est indiquée dans les capacités que l'UE communique au réseau lors de son attachement (voir le chapitre 16).

Au cours de cette procédure, le plan usager bascule de la configuration 1 à la configuration 2 ci-après, définies en termes d'équipements mis en jeu :

1. en LTE : P-GW – S-GW – eNodeB – UE ;
2. en UMTS : P-GW – S-GW – SGSN (si le *Direct Tunnel* n'est pas utilisé, voir la section « Mécanismes de Direct Forwarding et de Direct Tunnel », p. 421) – RNC – UE.

De même, le plan de contrôle entre l'UE et le réseau évolue :

1. en LTE : MME – eNodeB – UE ;
2. en UMTS : SGSN – RNC – UE.

L'eNodeB n'est pas mentionné dans les chaînes UMTS, car son rôle est identique vis-à-vis des plan de contrôle et plan usager UE – réseau.

Mesures

Une liste des cellules voisines UMTS et GSM

Si l'UE n'a pas besoin de recevoir de liste de cellules pour réaliser des mesures sur les cellules voisines LTE, il n'en est pas de même pour les mesures intersystèmes. En effet, la norme 3GPP prévoit que l'UE reçoit de l'eNodeB une liste complète de cellules voisines UMTS et/ou GSM et qu'il peut effectuer des mesures uniquement sur ces cellules. La principale raison de cette différence entre les cas intra et intersystèmes est que la détection autonome de cellule, prévue dans les spécifications UMTS, n'a pas ou très peu été utilisée en UMTS et par conséquent n'a été que peu testée voire peu mise en œuvre au sein des terminaux. Constructeurs et opérateurs étant soucieux de réutiliser au maximum l'implémentation UMTS existante pour la partie UMTS des terminaux LTE, afin d'accélérer l'arrivée de ces terminaux et de limiter leur coût, il a été décidé de conserver le mode de mesure existant, basée sur une liste de cellules voisines fournie par le réseau.

Activation et remontée des mesures

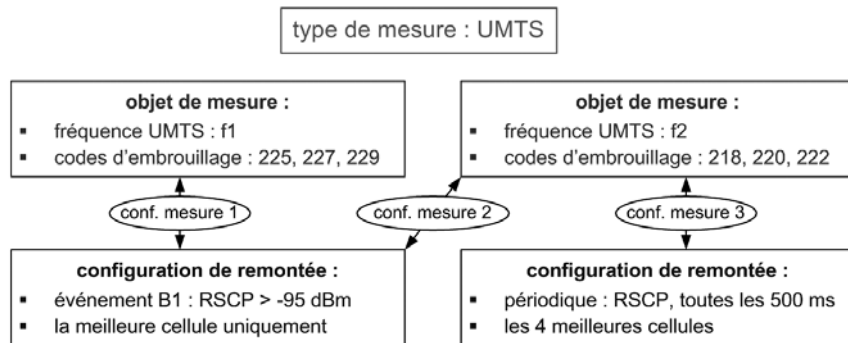
La configuration des mesures intersystèmes et des intervalles de mesure éventuels est décidée par l'eNodeB, le plus souvent sur un critère de niveau de signal (RSRP) remonté par l'UE. En effet, lorsque l'UE n'a plus dans son voisinage de cellule LTE suffisamment bonne pour y basculer, le niveau du signal radio reçu par l'UE sur la cellule serveuse peut continuer à se dégrader sans que l'eNodeB puisse déclencher de handover intra-LTE, jusqu'à la rupture du lien. Un seuil absolu de ce niveau RSRP est de ce fait associé à un événement déclenchant la configuration de mesures intersystèmes. Si l'UE remonte des mesures périodiques, ce seuil est configuré au sein de l'eNodeB. On notera que si l'UE a besoin d'intervalles de mesure pour réaliser des mesures inter-RAT, il n'effectuera pas ces mesures tant que ces intervalles ne seront pas configurés par l'eNodeB, même si les mesures sont configurées et si le RSRP est inférieur au seuil *s-Measure*. Ce mécanisme est similaire à celui décrit à la section « Configuration et remontée des mesures » (p. 401) pour le déclenchement des mesures interférences. L'événement de type « le RSRP de la cellule serveuse est inférieur à un seuil » (appelé événement A2 dans [3GPP TS 36.331]) peut par exemple être utilisé.

La configuration des mesures et des intervalles peut être réalisée dans la même procédure, par l'envoi du message *RRC Connection Reconfiguration*, qui indique notamment à l'UE l'objet de la mesure inter-RAT (c'est-à-dire la liste des cellules UMTS dans le cas présent), le mode de remontée (sur événement, périodique) et enfin la quantité mesurée sur ces cellules UMTS (soit le RSCP, équivalent du RSRP, soit le rapport signal sur bruit E_c/N_0 du canal pilote).

Un exemple de configuration est donné sur la figure suivante. Deux fréquences porteuses UMTS sont indiquées comme objet de mesure, portant chacune trois cellules identifiées par leur *code d'embrouillage* (*Scrambling Code* en anglais). Par ailleurs, deux configurations de remontée sont fournies à l'UE (périodique et sur événement). Dans le message RRC de configuration, l'eNodeB indique à l'UE trois configurations de mesures, correspondant chacune à un couple {objet de mesure, configuration de remontée}. On voit que pour la fréquence porteuse UMTS f_2 , deux configurations de mesures existent : l'une avec une configuration de remontée sur événement, l'autre avec une remontée périodique.

Figure 19-12

Exemple de configuration
de mesures sur la RAT
UMTS en LTE



On notera cependant que l'eNodeB peut utiliser plusieurs critères pour décider du déclenchement du handover, l'algorithme de décision étant du ressort de l'implémentation de la partie RRM (voir le chapitre 2). Il n'est en effet pas défini dans les spécifications 3GPP, qui fournissent des outils associés aux interfaces normalisées (comme les éléments ci-dessus) et il constitue un élément clé de différenciation pour les constructeurs.

Intervalles de mesure et capacités de l'UE

Le mode compressé mis en œuvre en UMTS n'est pas nécessaire en LTE, puisque les UE sont multiplexés par l'eNodeB dans le domaine temporel (et fréquentiel) : l'eNodeB peut donc s'arranger pour ne pas envoyer de données pendant des intervalles de temps que l'UE utilise pour réaliser les mesures attendues sur les cellules voisines UMTS. La réalisation des mesures intersystèmes implique donc, pour l'UE ne disposant pas de deux chaînes complètes de réception, une interaction avec les opérations de scheduling (voir le chapitre 10). L'eNodeB doit donc aménager des intervalles de temps suffisants pour que l'UE puisse mesurer les cellules indiquées en respectant les exigences de performance définies par le 3GPP, mais pas trop longs pour limiter l'effet sur l'expérience de l'utilisateur (débit utile et latence notamment).

Un avantage notable de ces intervalles de mesure par rapport au mode compressé de l'UMTS est qu'ils n'engendrent pas directement d'interférences sur la cellule, dans les sens montant et descendant.

L'UE indique dans ses capacités radio (*UE radio access capabilities*) s'il a besoin d'intervalles pour mesurer des cellules UMTS, pour chaque combinaison de bande LTE et UMTS. Par exemple, si l'UE gère les bandes I (2,1 GHz) et VIII (900 MHz) en UMTS, ainsi que les bandes VII (2,6 GHz) et XX (800 MHz) en LTE, il devra ainsi préciser dans ses *UE radio access capabilities* s'il a besoin d'intervalles aménagés pour mesurer :

- des cellules UMTS sur la bande I, alors qu'il est en LTE sur la bande VII ;
- des cellules UMTS sur la bande VIII, alors qu'il est en LTE sur la bande VII ;
- des cellules UMTS sur la bande I, alors qu'il est en LTE sur la bande XX ;
- des cellules UMTS sur la bande VIII, alors qu'il est en LTE sur la bande XX.

Ce besoin d'intervalles est intimement lié à l'implémentation de la chaîne de réception radio de l'UE et en particulier aux duplexeurs utilisés pour séparer en réception les signaux des différentes bandes de fréquences.

Préparation du handover

Cette section décrit en détail la phase de préparation du handover, sur décision de l'eNodeB lorsque les critères de déclenchement sont vérifiés. Dans la plupart des cas, ce handover est démarré suite à la réception d'un événement spécifique (voir la section précédente) et/ou de mesures remontées par l'UE. Cependant, d'autres facteurs peuvent déclencher un tel mécanisme, par exemple un état de congestion sur la cellule LTE serveuse et ses voisines immédiates.

Cette phase de préparation implique l'UE, l'eNodeB, le RNC cible et le cœur de réseau LTE et UMTS, à la fois pour la gestion du plan de contrôle (signalisation) et pour celle du plan usager (données). À l'issue de cette phase, le RNC et le SGSN sont informés de l'arrivée de l'UE et préparés à le recevoir.

Les étapes de cette phase sont décrites ci-après, les numéros correspondant à ceux indiqués sur la figure suivante.

1. En premier lieu, l'eNodeB décide de déclencher un handover vers une cellule UMTS. Un plan usager existe dans les sens montant et descendant pour le transfert de données, qui implique l'existence des éléments suivants : radio bearer(s) entre l'UE et l'eNodeB, tunnels GTP entre l'eNodeB, la S-GW et la P-GW.
2. L'eNodeB envoie le message *S1-AP Handover Required* au MME pour qu'il demande des ressources au RNC cible, au SGSN et à la S-GW cible, si celle-ci change.

Ce message indique notamment :

- le type de handover, "LTE-to-UTRAN" ici, permettant au MME de savoir quel protocole suivre pour la formation du message suivant (vers le SGSN dans le cas présent) ;
- la cause de cette procédure, qui indiquera « Handover desirable for radio reasons » dans le cas d'un handover déclenché par les conditions radio ;
- l'identifiant *Target ID* de la cible, qui contient l'identifiant du RNC, de la zone de localisation (LAI) et de la zone de routage (RAI), et que le MME transmettra ensuite au SGSN ;
- l'indication si un chemin est disponible pour effectuer du *Direct Forwarding* (voir la section « Mécanismes de Direct Forwarding et de Direct Tunnel », p. 421) vers le RNC ;
- le bloc transparent *Source to Target RNC Transparent Container*. Ce bloc suit le protocole UMTS RANAP (entre RNC et réseau cœur) et est formaté comme s'il s'agissait d'un handover entre deux RNC, l'eNodeB jouant ainsi le rôle du RNC source, conformément au principe énoncé plus haut « la source s'adapte à la cible ». En outre, il est *transparent* pour le réseau cœur, c'est-à-dire qu'il n'est pas interprété par le MME ou le SGSN, mais est inséré par ces nœuds dans les messages ultérieurs pour être transmis tel quel au RNC cible. Il fournit notamment l'identifiant de la cellule cible et un conteneur RRC, destiné à la couche RRC du RNC et qui contient les capacités radio de l'UE pour les deux systèmes (UMTS et LTE). Les capacités LTE sont utiles dans la perspective d'un handover ultérieur vers le LTE ; elles seront alors fournies à l'eNodeB par le RNC de façon similaire.

Les éléments de sécurité (clés et algorithmes) seront fournis au RNC par le SGSN, après dérivation des clés UMTS CK et IK par le MME (voir les étapes 3 et 4).

3. Le MME associe à chaque contexte de bearer EPS un contexte PDP (équivalent en UMTS) ainsi que des paramètres de QoS : les paramètres de QoS EPC sont traduits en paramètres de QoS UMTS selon la correspondance définie par [3GPP TS 23.401]. Le MME envoie alors un message *Forward Relocation Request* au SGSN, contenant notamment l'IMSI de l'abonné, le ou les contexte(s) PDP, l'identifiant *Target ID* fourni par l'eNodeB, le bloc *Source RNC to Target RNC Transparent Container*, les clés CK/IK et ses propres coordonnées (adresse et point de terminaison) pour l'échange de signalisation avec le SGSN. Le MME peut déterminer le SGSN cible à partir de la zone de routage du domaine paquet (RA) incluse dans le paramètre *Target ID*. Le MME informe également le SGSN dans ce message si le *Direct Forwarding* est utilisé pour le transfert de données. On notera que, si l'UE a un bearer dédié actif, celui-ci sera décliné en UMTS sous la forme d'un contexte PDP secondaire (*Secondary PDP Context*), équivalent du contexte EPS dédié défini en LTE. Le maintien de ce bearer dédié lors d'une mobilité vers l'UMTS implique donc la prise en charge de la fonctionnalité *Secondary PDP Context* par le réseau UMTS et par l'UE.

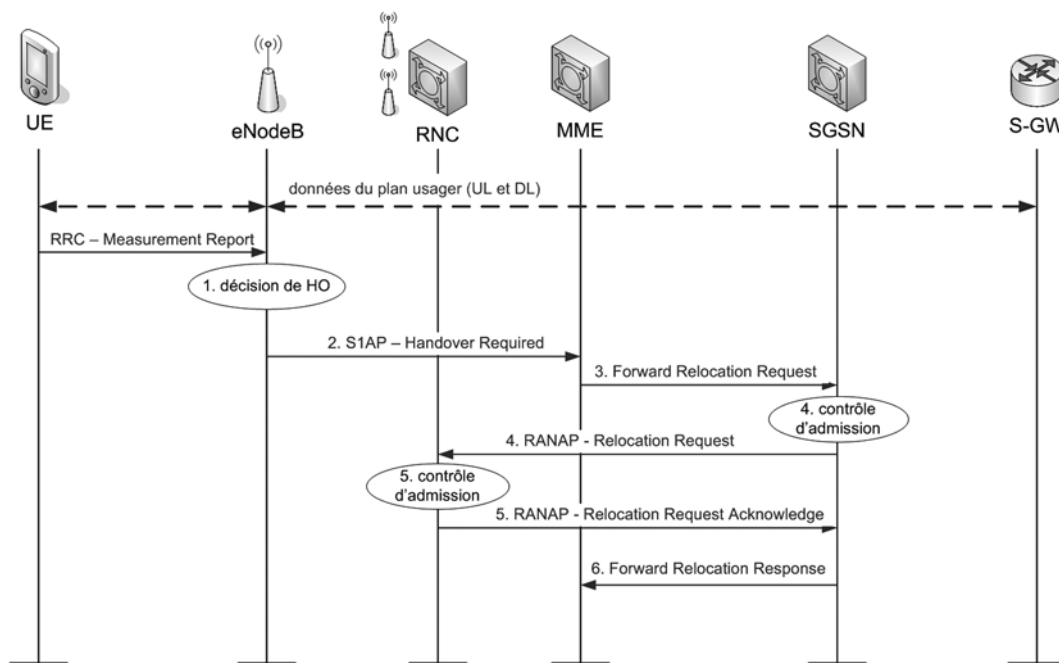


Figure 19-13

Cinématique pour la phase de préparation du handover LTE vers UMTS (pas de changement de S-GW)

4. Le SGSN détermine si une S-GW différente doit être utilisée (par exemple en cas de changement de PLMN). Nous supposons ici que la même S-GW est utilisée. On notera que même si

la S-GW change, elle reste le point d'ancrage du plan usager pour l'UE. Le SGSN vérifie qu'il peut accueillir le ou les RAB demandé(s) (contrôle d'admission). Le cas échéant, il demande à son tour au RNC cible d'établir les ressources pour les *Radio Acces Bearers* correspondant aux contextes PDP qui doivent être maintenus en UMTS, par l'envoi du message *RANAP Relocation Request*. Ce dernier contient notamment les données de sécurité, les paramètres du ou des RAB (un RAB par contexte PDP), le bloc *Source RNC to Target RNC Transparent Container* et l'identifiant de l'abonné (IMSI). On notera que le SGSN peut réduire la QoS associée à un RAB par rapport à celle indiquée par le MME, en fonction de ses capacités propres et de sa charge. L'envoi des clés de sécurité UMTS au RNC par le SGSN évite d'effectuer une authentification UMTS AKA à l'arrivée de l'UE sur la cellule UMTS et donc accélère la reprise du transfert de données.

5. Le RNC alloue les ressources logiques, radio et réseau pour les RAB et radio bearers qu'il peut établir, à l'issue du contrôle d'admission. Il retourne alors au SGSN dans le message *RANAP Relocation Request Acknowledge* la liste de ces RAB qui peuvent être maintenus. En outre, il insère dans ce message le bloc *Target RNC to Source RNC Transparent Container*, destiné à l'eNodeB (qui opère comme le RNC source ici) et qui n'est ensuite modifié ni par le SGSN ni par le MME. Ce bloc contient en fait le message *RRC Handover to UTRAN Command*, destiné à l'UE, qui précise l'algorithme de chiffrement UMTS choisi, la configuration de la connexion RRC et les paramètres des radio bearers établis par le RNC, dont l'UE a besoin lors de son accès à la cellule UMTS. À partir de ce moment, le RNC doit être prêt à recevoir des paquets de données à destination de l'UE.
6. Le SGSN traite ce message du RNC et transmet au MME le message *Forward Relocation Response*, qui contient le bloc transparent fourni par le RNC. Si le mode *Direct Forwarding* n'est pas utilisé, le SGSN indique également dans ce message les coordonnées du tunnel GTP avec la S-GW (adresse IP et point de terminaison GTP) : si le mode *Direct Tunnel* est employé, ces coordonnées correspondent à une terminaison de tunnel sur le RNC, sinon, sur le SGSN.

Nous supposons que le mécanisme *Direct Forwarding* est utilisé pour le transfert des données entre l'eNodeB et le RNC. Si ce n'est pas le cas, le MME indique à la S-GW, sur réception de la réponse du SGSN, les coordonnées communiquées par ce dernier pour le tunnel GTP et les identifiants des bearers EPS concernés afin de permettre à la S-GW de transférer les données au SGSN.

Mécanismes de Direct Forwarding et de Direct Tunnel

Deux mécanismes complémentaires peuvent être utilisés pour accélérer l'envoi des données du plan usager au RNC :

- l'un pour le transfert des données déjà reçues, de l'eNodeB vers le RNC lors du handover uniquement (*Direct Forwarding*) ;
- le second, plus général, pour la transmission directe des données depuis le SGSN ou la S-GW au RNC (*Direct Tunnel*), dès qu'un service implique un transfert de données vers l'UE.

Ces mécanismes sont illustrés par la figure suivante.

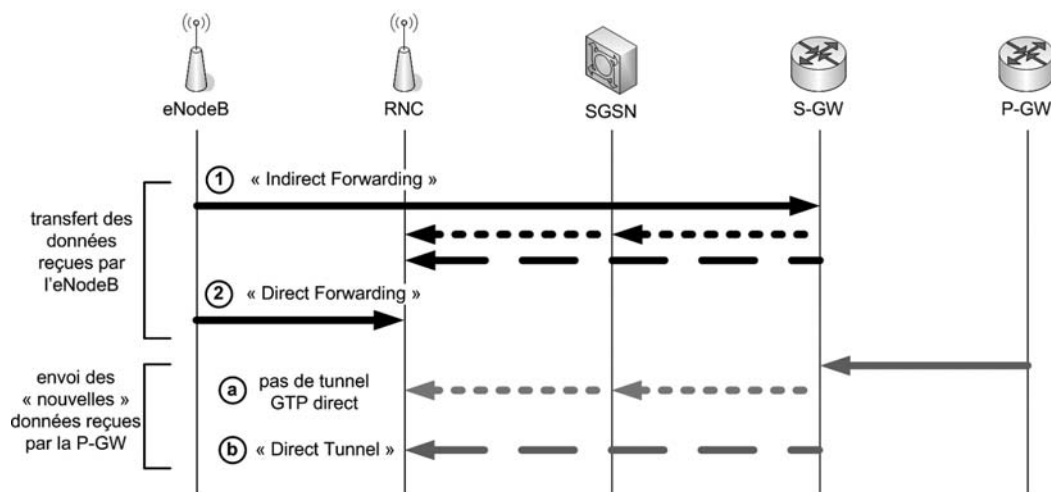


Figure 19-14

Mécanismes *Direct Forwarding* et *Direct Tunnel*

Le mécanisme *Direct Forwarding* désigne ainsi le transfert de données du plan usager pendant le handover, directement de l'eNodeB vers le RNC cible, sans transiter par la ou les S-GW. Dans le cas contraire (*Indirect Forwarding*), ces données sont d'abord envoyées par l'eNodeB à la S-GW. Ensuite, cette dernière transmet les données soit au SGSN, qui les envoie lui-même au RNC, soit directement au RNC si le mécanisme *Direct Tunnel* est utilisé, via un tunnel GTP entre la S-GW et le RNC. Ce mécanisme peut déjà être mis en œuvre en UMTS, entre le GGSN et le RNC, afin de réduire la latence des données et de diminuer la charge du SGSN. Ce tunnel, s'il est utilisé, est maintenu pour la suite de l'appel et jusqu'à sa relâche.

En LTE, la séparation des plans de données et de contrôle dans le réseau cœur implique que les données sont toujours transmises par la S-GW à l'eNodeB et inversement, sans jamais transiter par le MME.

On voit sur la figure que le tunnel (direct ou indirect) sert toujours à délivrer au RNC les données issues de la P-GW, mais qu'il peut être utilisé également pour transmettre les données envoyées par l'eNodeB à la S-GW dans le cas d'un mode *Indirect Forwarding* (flèche noire en pointillés longs).

Exécution du handover

À ce moment de la procédure, l'eNodeB continue de recevoir des unités de données sur le plan usager, de la part de la S-GW (sens descendant) et de la part de l'UE (sens montant). Le transfert de données vers le RNC n'a pas commencé et l'eNodeB n'a pas encore commandé à l'UE de basculer sur la cellule cible : il attend pour cela la réponse du RNC cible, qui est transmise par le MME. Celle-ci indiquera à l'eNodeB si le handover est possible et déclenchera l'envoi par l'eNodeB à l'UE de la commande de bascule. Dès qu'il aura donné cet ordre à l'UE, l'eNodeB pourra démarrer le transfert vers le RNC des données reçues de la S-GW et non transmises à l'UE, suivant le schéma

de transfert permis par le réseau. Les données de l'UE reçues par l'eNodeB seront quant à elles toujours transmises à la S-GW.

L'accès de l'UE à la cellule cible déclenchera d'abord le basculement effectif du plan de données sur le réseau UMTS (la S-GW envoie alors les données au SGSN, ou directement au RNC), ainsi que la relâche des ressources et de la session dans le réseau LTE (eNodeB, MME, S-GW). Le handover s'achève lorsque l'eNodeB a transféré toutes les données qu'il a en mémoire.

Dans cette phase d'exécution, l'étape la plus critique est la bascule radio de l'UE, du fait du risque d'échec et de l'effet de sa durée sur la qualité de l'expérience utilisateur. D'une part, il est possible que l'UE ne reçoive pas le message de commande, du fait d'une dégradation (ou d'une rupture) du lien radio sur la cellule LTE. Si le lien continue de se dégrader, l'appel en cours est interrompu. D'autre part, la réception par l'UE de la cellule UMTS a pu elle aussi évoluer, rendant plus difficile l'accès de l'UE aux ressources de la cellule. Ces deux phénomènes peuvent simplement être provoqués par le déplacement de l'utilisateur (par exemple le passage d'un angle de rue), ou par l'évolution de son environnement (cas d'obstacles mobiles). Par ailleurs, le service en cours est interrompu pendant une durée au moins égale à celle de cette bascule, d'où l'importance de sa durée. Selon le service utilisé, l'effet sur l'expérience de l'utilisateur sera plus ou moins important : il peut être imperceptible entre deux messages de *chat* par exemple. Le transfert des données de l'eNodeB au RNC pendant cette période vise à réduire l'interruption du service, en permettant au RNC d'envoyer des données à l'UE dès son accès sur la cellule UMTS.

Les différentes étapes de la phase d'exécution du handover sont décrites plus en détail, les numéros des étapes correspondant à ceux indiqués sur la figure 19-15.

1. Le MME envoie à l'eNodeB le message *S1-AP Handover Command*, qui contient essentiellement le message RRC envoyé par le RNC (*Handover to UTRAN*, voir la phase de préparation).
2. Sur réception de ce message, l'eNodeB envoie à l'UE le message RRC *Mobility from E-UTRAN Command*, dans lequel il insère le message RRC du RNC et indique à l'UE la cellule UMTS cible. L'eNodeB peut dès lors démarrer le transfert des données au RNC. Nous supposons ici que le *Direct Forwarding* est utilisé.

On notera que, à la différence du handover intra-LTE, la couche PDCP est ici réinitialisée et, par conséquent, les numéros de séquence éventuellement attribués par l'eNodeB aux unités de données PDCP ne sont pas conservés. Ceci implique que le RNC et l'UE ne peuvent envoyer l'un à l'autre de rapport de réception PDCP. En outre, la couche PDCP délivre à la couche supérieure, dès la commande de bascule, les SDU PDCP reçues sur la cellule LTE, même si la remise en séquence ne peut être assurée (SDU intermédiaire non reçue).

Pour le sens descendant, l'eNodeB peut transmettre au RNC les SDU PDCP qu'il n'a pas encore envoyées à l'UE, ou que ce dernier n'a pas acquittées (pour le mode RLC-AM uniquement), afin de limiter les pertes de données lors du handover. Ainsi, ces unités de données seront retransmises à l'UE par le RNC. Du fait de l'absence de rapport de réception PDCP, il est possible en mode RLC-AM que l'UE reçoive et délivre deux fois le même paquet à la couche IP (une fois sur la cellule LTE et une autre fois sur la cellule UMTS). On peut donc avoir des doublons dans le sens descendant, mais les pertes de données peuvent être évitées grâce au transfert des données de l'eNodeB au RNC.

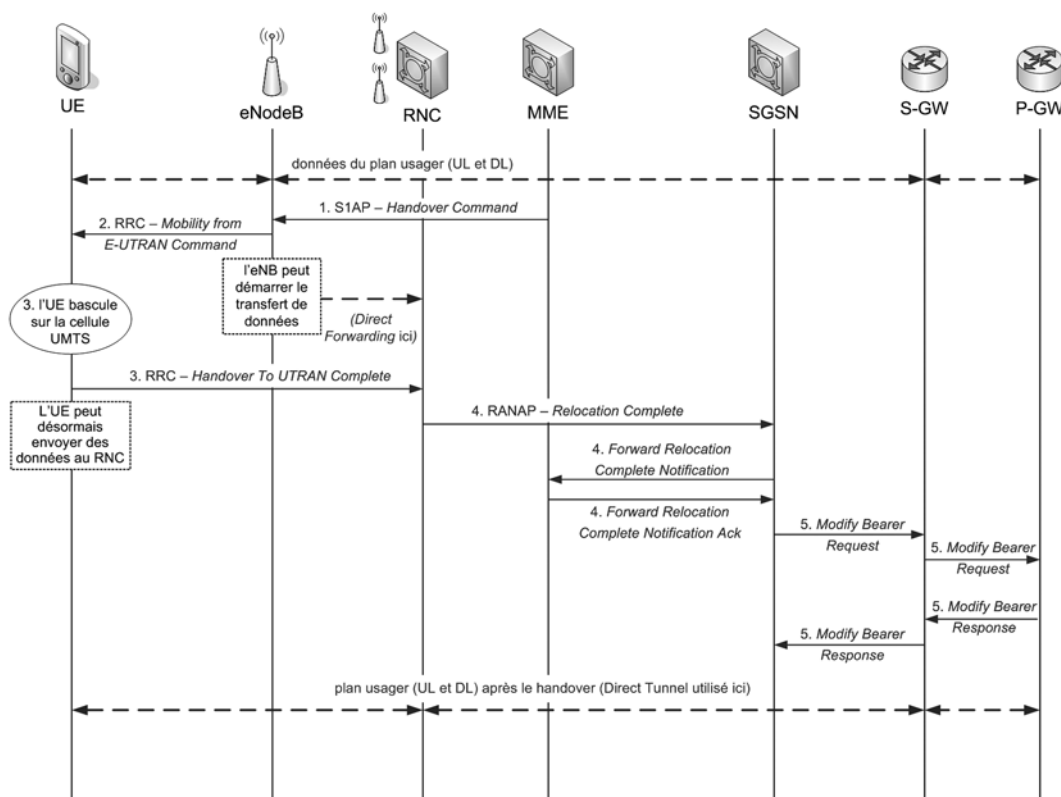


Figure 19-15

Cinématique de la phase d'exécution du handover LTE vers UMTS (pas de changement de S-GW)

Pour le sens montant, l'UE considère les unités de données PDCP déjà transmises comme reçues par l'eNodeB. Cela constitue donc une différence avec le comportement de l'eNodeB, qui peut transférer au RNC les données non acquittées. De ce fait, des pertes de données peuvent survenir dans le sens montant. Il sera du ressort des couches supérieures de les corriger si besoin. En revanche, ce comportement évite des doublons dans le sens montant.

Ainsi, des doublons et des pertes de paquets peuvent avoir lieu lors du handover LTE vers UMTS, alors qu'ils sont évités lors d'un handover intra-LTE.

3. L'UE suspend le transfert de données sur la cellule LTE et bascule sur la cellule indiquée, sans acquitter la réception des unités RLC à l'eNodeB. L'UE recherche la cellule UMTS, récupère les Informations Système diffusées par la cellule et nécessaires à son accès, puis transmet au RNC le message RRC *Handover To UTRAN Complete* sur les ressources de la cellule qui lui ont été allouées. Ce message signale au RNC que l'UE a réussi à accéder à ces ressources et que le plan usager dans le réseau peut être à son tour basculé vers la cellule UMTS, afin de délivrer à l'UE les nouvelles données reçues par la S-GW. Le RNC peut alors commencer à envoyer des données à l'UE, même si le transfert des données par l'eNodeB n'est pas terminé.

De même, l'UE peut à son tour transmettre des données sur le ou les radio bearer(s) établi(s), en commençant par le premier paquet IP qui n'a pas encore été transmis.

4. Le RNC informe alors le SGSN de l'arrivée de l'UE par le message *RANAP Relocation Complete*. À partir de ce moment, le SGSN doit accepter les données envoyées par le RNC pour cet UE (sens montant) et les transmettre immédiatement à la S-GW. Le SGSN informe le MME du succès de la procédure, ce qui conduira à la relâche des ressources associées à l'UE dans le MME et l'eNodeB.
5. Le SGSN contacte ensuite la S-GW pour lui demander de basculer le flux de données : celles-ci ne doivent plus être envoyées à l'eNodeB mais au RNC si le mécanisme *Direct Tunnel* est utilisé, au SGSN sinon. Dans le cas d'un tunnel direct, le SGSN indique l'adresse IP et le point de terminaison sur le RNC pour chaque bearer maintenu. Sur réception de ce message, la S-GW met à jour sa table de routage et oriente les données destinées à l'UE vers le RNC. La S-GW peut informer la P-GW du changement de RAT, en envoyant le message *Modify Bearer Request*.

Après l'étape 5, le plan usager est basculé et implique l'UE, l'UTRAN, la S-GW, la P-GW et éventuellement le SGSN si un tunnel direct n'est pas employé.

Échec du handover

Si l'UE ne parvient pas à établir la connexion RRC sur la cellule UMTS, il doit revenir sur la cellule LTE et appliquer la configuration utilisée avant l'ordre de handover, à l'exception de la configuration des couches PHY et MAC, et entamer une procédure de rétablissement RRC (voir la section « Les performances de l'UE en handover », p. 428).

Cependant, le handover LTE vers UMTS n'est pas gouverné par une temporisation, à la différence du handover intra-LTE : l'UE ne démarre aucune temporisation à la réception de la commande de handover par l'eNodeB. Par conséquent, le délai d'accès à la cellule UMTS que s'autorise l'UE peut varier d'une implémentation à l'autre. Lorsque l'eNodeB détecte le retour de l'UE, il annule la procédure de handover en cours dans le réseau par l'envoi au MME du message *S1-AP Handover Cancel*.

Handover du LTE vers le GSM/GPRS

Cette section présente le mécanisme de handover PS du système LTE vers le système GSM/GPRS, qui vise à assurer une continuité de service de données entre les deux systèmes, par exemple lorsque l'utilisateur quitte la zone de couverture LTE et que l'opérateur ne détient pas de réseau UMTS.

Si l'opérateur détient un réseau GSM/GPRS et UMTS, il peut choisir de privilégier le handover vers l'UMTS afin de maintenir un débit et une expérience meilleurs pour l'utilisateur, mais aussi pour conserver un appel voix en VoIP si son réseau UMTS en est capable et éviter ainsi une procédure de transfert vers le domaine circuit (SR-VCC, voir la section « Le transfert d'appel VoIP vers le domaine CS : SR-VCC », p. 435). Dans ce cas, et si la couverture UMTS est satisfaisante, le handover vers le système GSM/GPRS peut n'être que très rarement utilisé. L'opérateur fait parfois le choix de ne pas l'activer, ce qui limite les mesures intersystèmes en LTE à des cellules UMTS uniquement. Il est cependant possible que l'opérateur ne dispose pas d'un réseau UMTS dans la zone où évolue l'utilisateur et ait alors besoin d'utiliser ce handover localement.

Ce handover est très semblable dans son déroulement et les messages échangés à celui du LTE vers l'UMTS. Les principales différences avec celui-ci sont :

- les cellules voisines GSM sont désignées par leur fréquence porteuse uniquement ;
- l'utilisation de conteneurs transparents échangés entre stations de base, qui suivent le formalisme GSM (« la source s'adapte à la cible ») ;
- la gestion des données du plan usager ;
- le mode d'accès de l'UE à la cellule cible, qui suit la norme du système GSM/GPRS.

Mesures

Pour évaluer une cellule GSM, l'UE mesure le niveau de signal reçu sur la fréquence porteuse GSM signalée par l'eNodeB (une porteuse par cellule). Cette grandeur, appelée RSSI pour *Received Signal Strength Indication*, indique la puissance mesurée par le récepteur radio du terminal sur l'ensemble de cette fréquence GSM. Il faut rappeler que la planification cellulaire en GSM repose sur des fréquences distinctes entre cellules voisines : une cellule GSM utilise une fréquence porteuse qui ne peut être utilisée par ses voisines immédiates. Ainsi, cette mesure de RSSI sur une fréquence porteuse est bien la mesure d'une cellule, à un endroit donné du réseau GSM.

Signalisation réseau et conteneurs

La phase de préparation suit les mêmes étapes que pour le handover du LTE vers l'UMTS. Les principales différences résident dans le fait que l'eNodeB et le MME doivent utiliser le formalisme du GSM/GPRS. En particulier, le conteneur fourni par l'eNodeB au BSS est codé suivant le format utilisé entre deux BSS pour un handover GSM. De même, le message RRC envoyé par le BSS à l'eNodeB et à destination de l'UE est un message GSM, inséré dans la commande de handover et interprété par la couche RRC GSM de l'UE avant l'accès à la cellule cible.

Ce message contient également des informations NAS insérées à la volée par le SGSN lorsqu'il reçoit la réponse du BSS dans la phase de préparation et qui indiquent notamment l'algorithme de chiffrement choisi. En effet, en GPRS le chiffrement est réalisé par la couche LLC entre l'UE et le SGSN, et non entre l'UE et la station de base, comme c'est le cas en UMTS et en LTE.

Gestion du plan usager

À la différence du RNC en UMTS, le BSS n'utilise pas le protocole GTP pour le transfert des données du plan usager avec le SGSN. De ce fait, la notion de tunnel direct entre GGSN (ou P-GW en LTE/EPC) et BSS n'existe pas : ces données transitent nécessairement par le SGSN. Il en est donc de même pour le transfert des données de l'eNodeB vers le BSS : en cas de transfert direct côté LTE (*Direct Forwarding*), les données transitent quand même par le SGSN avant d'atteindre le BSS ; pour le transfert indirect, elles passent en outre par la S-GW.

Accès au réseau GSM/GPRS

L'accès de l'UE à la cellule GSM/GPRS est suivi immédiatement d'un échange de messages de la couche LLC entre l'UE et le SGSN, notamment pour l'activation du chiffrement et la négociation

des paramètres de la liaison LLC (*Logical Link Control*, niveau 2). Comme en UMTS, cet échange peut être suivi d'une procédure de mise à jour de localisation (*Routing Area Update*) entre l'UE et le SGSN, après laquelle l'échange de données peut reprendre.

Cell Change Order et redirection

L'eNodeB envoie parfois l'UE vers une cellule GSM/GPRS à l'aide d'un mécanisme appelé *Cell Change Order*. Ce mécanisme s'apparente à une redirection, à la différence que l'UE reste en mode connecté lors de la bascule. L'UE accède alors à la cellule GSM/GPRS comme lors d'une resélection. Cette bascule est déclenchée par l'envoi d'un message *Mobility from E-UTRAN Command* de l'eNodeB à l'UE, qui indique le mécanisme *Cell Change Order*, ainsi que la fréquence et l'identifiant physique de la cellule GSM. Pour accélérer l'accès de l'UE à la cellule GSM, l'eNodeB peut fournir une partie des Informations Système de cette cellule, ce qui évite à l'UE d'avoir à les décoder avant d'engager la connexion RRC avec le BSS. Il s'agit de la principale différence avec la redirection par relâche de la connexion RRC, présentée ci-après.

Le principe de la redirection est en effet très voisin du *Cell Change Order*. L'eNodeB relâche ici la connexion RRC avec l'UE en lui indiquant la cellule GSM ou UMTS cible. L'UE passe alors en mode veille et effectue une sélection initiale de la cellule cible GSM ou UMTS. Ce mécanisme est typiquement utilisé pour la procédure de CS Fallback (voir la section « Le mécanisme CS Fallback », p. 432). La redirection peut ainsi être déclenchée vers une cellule GSM ou une cellule UMTS, tandis que le *Cell Change Order* n'est possible que vers une cellule GSM.

La figure suivante illustre les étapes de ces deux mécanismes.

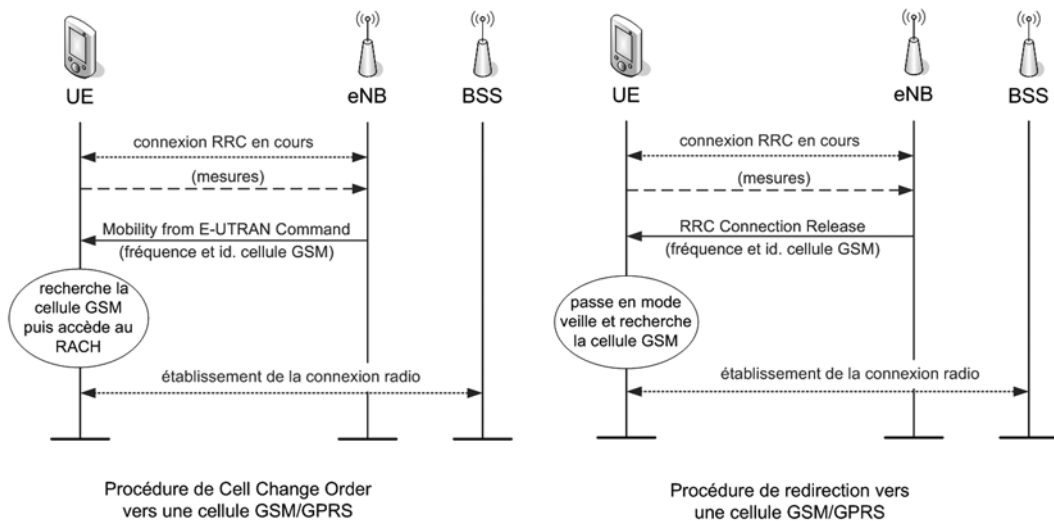


Figure 19-16

Mécanismes de *Cell Change Order* et de redirection vers une cellule GSM/GPRS

Les performances de l'UE en handover

Cette section est dédiée aux performances de l'UE pour le handover. Les performances de l'UE pour la resélection ont été abordées dans le chapitre 18.

Comme nous l'avons vu, la procédure de handover est contrôlée par le réseau et l'algorithme de décision réside dans l'eNodeB. On peut donc s'attendre à ce que la différence de comportement et les écarts de performance entre des UE de constructeurs différents soient nettement moins marqués que pour la resélection. L'UE réalise toujours des mesures, et donc leur justesse reste un point important, mais ces mesures sont éventuellement moyennées et corrigées par l'eNodeB dans son traitement. En revanche, le délai effectif de bascule radio est un point crucial, surtout dans un environnement radio perturbé, et dépend entièrement de l'UE pour une configuration donnée du réseau.

Pour le handover intra-LTE, les exigences de performance sur le délai de bascule varient entre 20 et 130 ms, suivant le fait que l'UE connaît ou non la cellule cible. Par exemple, si l'UE a mesuré la cellule cible avant de recevoir l'ordre de bascule, l'exigence de délai sera de l'ordre de 20 à 50 ms. En revanche, pour un handover en aveugle (*blind handover*), l'exigence est relâchée à plus de 100 ms car l'UE doit rechercher cette cellule avant d'y accéder.

Pour le handover intersystème, les exigences sur le délai de bascule dépendent beaucoup de la configuration de la cellule cible. Par exemple, pour le handover vers l'UMTS ce délai maximal varie de 90 à plus de 500 ms et cette plage est liée à la périodicité des canaux logiques configurés pour l'UE. Ce délai est minimisé lorsque tous ces canaux logiques (données et signalisation) sont portés par le HSPA. Ainsi, pour une mobilité de type SR-VCC, on comprend qu'il sera préférable d'utiliser sur la cellule cible les canaux de transport HSPA aux canaux DCH de la Release 99, afin de réduire ce délai de bascule (via l'utilisation de la fonction *CS over HSPA*, voir [CS over HSPA]).

La performance globale de l'UE pour réaliser les handovers est cependant issue d'un compromis entre le coût final du produit, qui dépend notamment de la chaîne de réception radio, et son autonomie : un algorithme plus complexe demande plus d'opérations élémentaires, des mesures plus nombreuses impliquent que la chaîne de réception sera plus souvent allumée.

La mobilité vers le système LTE

Les mécanismes de mobilité de l'UMTS vers le LTE

Le handover UMTS vers LTE

Le handover UMTS vers LTE peut être réalisé pour les appels sur le domaine PS de l'UMTS, pour que l'utilisateur bénéficie d'un débit supérieur et d'une latence réduite en LTE. Les appels voix établis sur le domaine circuit (CS) ne peuvent être basculés sur le système LTE, d'abord parce qu'il n'existe pas de tel domaine en LTE/EPC et ensuite parce que la procédure de transfert d'appel CS vers VoIP n'est pas définie en Release 8.

Cela étant, si le réseau LTE/EPC ne permet pas de réaliser des appels VoIP, par choix de l'opérateur cette fois (pas d'infrastructure IMS déployée par exemple), les appels VoIP établis en UMTS ne devront pas non plus être envoyés sur le système LTE. On comprend qu'il est important que le

système UMTS sache s'il peut basculer ou non un RAB vers le système LTE. C'est le rôle de l'indicateur *E-UTRAN Service Handover*, grâce auquel le réseau cœur indique au RNC que le RAB ne doit pas être basculé. Ce paramètre est par exemple signalé lors de l'établissement d'un RAB CS pour un appel voix, que l'opérateur souhaite maintenir en UMTS.

Le handover peut être utilisé lorsque l'UE est dans l'état *Cell_DCH* (un des états RRC du mode connecté en UMTS). Dans les états *Cell_PCH* et *URA_PCH*, l'UE utilise la resélection de cellule, comme en mode veille. Dans l'état *Cell_FACH*, l'UTRAN doit faire passer l'UE à l'état *Cell_DCH* avant d'effectuer le handover. Ces états UMTS sont définis dans [3GPP TS 25.331].

Mesures LTE et mode compressé

Comme pour les mesures en mode veille, les cellules voisines LTE ne sont pas indiquées individuellement à l'UE lorsque le RNC lui demande de remonter des mesures de cellules LTE. Seule la fréquence est fournie à l'UE, qui se débrouille ensuite pour détecter les cellules présentes sur cette fréquence dans l'environnement de la cellule UMTS. Ce fonctionnement est donc identique au cas des mesures effectuées en LTE sur des cellules voisines LTE.

Les UE LTE auront probablement besoin du mode compressé pour effectuer des mesures sur des cellules LTE alors qu'ils sont connectés à l'UMTS. Cette adaptation de la trame radio est déjà utilisée aujourd'hui par la grande majorité des UE UMTS pour réaliser les mesures GSM ou UMTS interférences en appel. Il s'agit donc surtout pour le RNC de s'assurer que la durée et la fréquence des intervalles sont suffisantes à l'UE pour détecter des cellules LTE et les mesurer.

On peut s'attendre à ce que ces mesures LTE soient demandées à l'UE dès qu'il a une connexion RRC active sur une cellule UMTS en zone de couverture LTE. Le RNC peut en effet prendre comme critères pour faire cette demande la déclaration comme voisines d'une ou plusieurs fréquences LTE d'une part, et une priorité supérieure associée à la RAT LTE d'autre part. Ainsi, l'UTRAN peut activer ces mesures dès l'établissement de la connexion RRC ou d'un radio bearer de données, afin de basculer l'UE sur la RAT LTE dès que le signal radio d'une cellule est suffisant.

Préparation

Pour la préparation du handover, le RNC contacte le SGSN en lui indiquant l'identifiant de l'eNodeB cible, ce qui lui permet de relayer la demande de handover au MME gérant cet eNodeB. Pour rappel, le MME et le SGSN peuvent être un seul et même nœud physique. Ce message du RNC contient notamment un conteneur destiné à l'eNodeB cible (*Source eNodeB to Target eNodeB Transparent Container*). Comme les autres conteneurs, il est transmis de façon transparente par les équipements du réseau cœur (SGSN et MME ici) et indique en particulier à l'eNodeB la cellule cible ainsi que les capacités radio de l'UE pour le LTE. Celles-ci servent par exemple à l'eNodeB pour adapter la configuration des mesures ou le scheduling des envois de données.

Le MME sollicite ensuite l'eNodeB cible, qui retourne alors un message S1AP incluant le conteneur *Target eNodeB to Source eNodeB Transparent Container*, lequel contient en fait le message RRC destiné à l'UE pour la bascule vers la cellule cible. Ce message lui indique la configuration radio à appliquer lors de son accès à la cellule LTE, ainsi que les paramètres de sécurité LTE nécessaires pour la dérivation des nouvelles clés.

Le RNC, recevant ce message RRC dans la réponse du SGSN, ne l'interprète pas ; il n'en est d'ailleurs pas capable a priori, s'agissant du protocole RRC LTE. Il l'intègre à la commande de bascule qu'il envoie à l'UE (message RRC *Handover From UTRAN Command*).

Plan usager

Le RNC est autorisé à démarrer le transfert à l'eNodeB des données reçues du SGSN dès qu'il a envoyé l'ordre de bascule à l'UE. Comme pour le sens LTE vers UMTS, les données peuvent être transférées directement de la station de base source (RNC) à l'eNodeB cible sans transiter par le SGSN et la Serving-GW, à l'aide du mécanisme *Direct Forwarding*. En cas de transfert indirect, les données transitent nécessairement par la S-GW et éventuellement par le SGSN, si le mécanisme *Direct Tunnel* n'est pas non plus utilisé. Comme nous l'avons évoqué plus haut, il est possible que des RAB actifs de l'UE ne puissent pas être basculés en LTE. Si l'UE a un appel voix CS et une session de données en cours, le handover ne pourra être déclenché, l'appel voix CS ne pouvant être basculé en LTE. Le RNC indique à l'UE dans la commande de handover le ou les RAB maintenu(s). L'UE doit alors désactiver localement les autres RAB. Le MME peut également refuser un ou plusieurs RAB, en cas de congestion par exemple sur l'eNodeB ou sur le réseau cœur.

Échec du handover

Si l'UE ne parvient pas à accéder aux ressources de la cellule LTE, il doit revenir à la cellule UMTS et à la configuration précédemment utilisée, puis envoyer un message RRC au RNC afin de l'informer de cet échec. On précisera cependant que la norme n'indique pas de critère temporel et l'UE ne déclenche pas de temporisation à la réception de l'ordre de bascule. Le délai au bout duquel l'UE revient sur la cellule UMTS est lié en fait au mécanisme d'accès aléatoire du LTE, l'UE effectuant plusieurs tentatives sur la cellule LTE (voir le chapitre 14).

La redirection UMTS vers LTE

En UMTS, la redirection vers le système LTE peut se faire de deux façons différentes :

- lors de l'établissement de la connexion RRC, le RNC rejetant la demande de l'UE et lui indiquant la cellule LTE à resélectionner ;
- à la relâche de la connexion RRC, par exemple à la fin d'un appel ou lorsque l'UE est inactif.

Tout comme le handover, la redirection est toujours décidée par le RNC et l'ordre est signalé explicitement dans un message RRC.

Dans le premier mode, le RNC prend sa décision sur la base de la cause de connexion indiquée par l'UE dans le message *RRC Connection Request* et du paramétrage de l'opérateur. Il peut par exemple rediriger vers le LTE les demandes de connexion pour des sessions de données et maintenir en UMTS les appels voix si le réseau LTE de l'opérateur ne permet pas de passer ce type d'appels. C'est le cas par exemple si l'opérateur n'a pas déployé de solution VoIP en LTE et souhaite donc que les terminaux de type smartphones, dont la voix demeure un usage majeur, établissent leurs appels voix en UMTS plutôt qu'en LTE. Il attribuera alors typiquement à l'UMTS une priorité de resélection supérieure à celle du LTE. Cependant, il devra envoyer en LTE les appels de données, qui peuvent bénéficier du débit élevé et de la latence réduite de ce système. Ce

mécanisme de redirection peut alors être utilisé et fait l'économie d'un handover de l'UMTS vers le LTE une fois la session de données établie.

Pour cette redirection, le RNC indique à l'UE dans le message de rejet (*RRC Connection Reject*) la ou les cellules LTE qu'il peut resélectionner ainsi qu'une durée pendant laquelle l'UE ne devra pas resélectionner de cellule UMTS. Cette durée d'inhibition vise à éviter un phénomène de ping-pong entre les couches LTE et UMTS, en particulier si la couche UMTS a une priorité de resélection supérieure à celle de la fréquence LTE utilisée. Le RNC peut également fournir à l'UE une liste de cellules interdites pour chaque fréquence LTE indiquée.

Dans le second mode de redirection, le RNC indique à l'UE une ou plusieurs cellules LTE cible(s) lors de la relâche de la connexion RRC. Cette redirection peut être utilisée dans le scénario évoqué précédemment : pour les UE centrés sur un usage de type modem, l'opérateur aura plutôt intérêt à les faire rester sur des cellules LTE pour qu'ils bénéficient d'un accès immédiat aux débits élevés offerts par le LTE. Si ces terminaux sont également capables de passer des appels voix de façon accessoire, le mécanisme CS Fallback pourra être utilisé.

Ces deux redirections ne doivent être déclenchées par le RNC que si la cellule UMTS est sous couverture de cellules LTE, ce que le RNC détermine grâce à des mesures remontées par l'UE avant la relâche (dans le second mode), ou par la configuration de l'opérateur (si des cellules LTE sont déclarées comme voisines de la cellule UMTS).

La mobilité entrante GSM/GPRS vers LTE

Le handover GSM/GPRS vers LTE

Lorsque l'UE a une session de données en cours, le BSS peut effectuer un handover vers le LTE, s'il supporte la procédure de *PS handover*. Comme pour l'UMTS, ce handover est précédé ou non de mesures préalables de l'UE sur des cellules LTE. Ces dernières doivent alors être indiquées explicitement à l'UE lors de la configuration des mesures LTE. La préparation du handover suit le même principe que pour le handover de l'UMTS vers le LTE. Par ailleurs, comme pour le handover LTE vers GPRS, les données du plan usager transitent par le SGSN et la S-GW avant d'arriver à l'eNodeB gérant la cellule cible. L'UE bascule sur la cellule cible LTE lorsqu'il reçoit le message de l'eNodeB *RRC Connection Reconfiguration*, inclus par le BSS dans l'ordre de handover (message *PS Handover Command*).

La redirection GSM/GPRS vers LTE

La redirection GPRS vers LTE est utilisée typiquement lorsque le handover n'est pas implémenté dans le réseau, ou que l'UE ne le permet pas. Elle est éventuellement précédée de mesures sur des cellules LTE et est déclenchée par le BSS. Celui-ci envoie pour cela le message *Packet Cell Change Order* indiquant la cellule cible LTE et éventuellement des priorités de resélection dédiées pour l'UE (voir le chapitre 18).

Cette redirection de type *Cell Change Order* s'effectue en *Packet Transfer Mode*, c'est-à-dire lorsque l'UE a une session de données en cours. Elle peut être utilisée dans le but de transférer tout appel de données vers le LTE, dès lors que l'UE est sous la couverture d'une cellule LTE.

La resélection GPRS vers LTE en mode connecté

En GPRS, l'UE peut effectuer des résélections de façon autonome en mode connecté (*Packet Transfer Mode*), les mesures étant réalisées dans les intervalles de temps où il n'est pas servi par le scheduler.

Cette resélection en mode connecté peut être faite vers une cellule GPRS, UMTS ou LTE suivant les mesures de l'UE et le paramétrage indiqué par le BSS (cellules voisines, seuils et offsets). Les priorités de resélection, si elles sont diffusées sur la cellule, sont appliquées par l'UE comme pour la resélection en mode veille (*Packet Idle Mode*).

Le mécanisme CS Fallback

Origine et principe

Le système LTE/EPC est entièrement basé sur la commutation de paquets et ne comporte pas de domaine à commutation de circuits, contrairement au GSM/GPRS et à l'UMTS. Il a en outre vocation à être associé à l'architecture de services IMS, définie par le 3GPP, pour l'accès aux services multimédias. En effet, l'IMS propose une architecture fonctionnelle de services élémentaires (présence, carnet d'adresses, appel voix/vidéo, échange de données client-à-client...), qui peuvent ensuite être utilisés et mutualisés par différents services multimédias évolués. Cependant, lors de l'élaboration de la Release 8 3GPP, plusieurs opérateurs souhaitaient pouvoir fournir un service voix via les terminaux mobiles LTE dès l'ouverture de leur réseau LTE, sans avoir à déployer dans le même temps une architecture IMS, complexe et coûteuse.

Pour cette raison, un mécanisme a été défini pour basculer l'UE, dès qu'un appel voix est lancé, vers une technologie d'accès traitant la voix en commutation de circuits (appelée aussi *voix CS* par opposition à la VoIP). Ce mécanisme, appelé CS Fallback, permet de renvoyer un appel voix lancé par l'UE ou à destination de celui-ci vers le domaine CS du GSM ou de l'UMTS.

Procédure : appel voix CS entrant en LTE

La figure 19-17 illustre la procédure CS Fallback dans le cas d'un appel voix entrant. Les numéros indiqués renvoient aux étapes décrites dans la suite de cette section.

1. Dans le cas d'un appel entrant, le MME reçoit du MSC un message de notification d'appel CS pour l'UE.
2. Le MME transmet alors un message de paging à tous les eNodeB inclus dans la zone de localisation de l'UE (Tracking Area, ou liste de TA).
3. Chaque eNodeB envoie un paging sur les canaux radio communs des cellules associées à la zone de localisation de l'UE. L'eNodeB indique dans chaque paging le S-TMSI de l'UE pour qu'il sache que le message lui est destiné. Ce message indique également que la notification provient du domaine CS, ce qui permet à l'UE de déduire qu'il s'agit d'une procédure CS Fallback.
4. Sur réception de cette notification, l'UE établit une connexion RRC et contacte le MME avec le message EMM *Extended Service Request*, dédié au CS Fallback et encapsulé successivement dans la signalisation RRC puis dans un message S1-AP.

5. Le MME demande alors à l'eNodeB de faire basculer l'UE, en lui indiquant qu'il s'agit d'un CS Fallback dans le message *S1AP UE Context Setup*. De façon simultanée, le MME envoie le message *Service Request* au MSC, via l'interface SGs définie pour le CS Fallback.
6. L'eNodeB peut alors rediriger l'UE vers la cellule cible prédéfinie, sans préparation préalable. Cette redirection s'effectue soit via une procédure de type *Cell Change Order*, soit via la relâche de la connexion RRC. Dans les deux cas de figure, l'eNodeB peut éventuellement demander à l'UE d'effectuer des mesures sur une ou plusieurs cellule(s) de la technologie cible avant de lui envoyer la commande de bascule. Cette phase, si elle augmente les chances de succès de la procédure, conduit néanmoins à un délai plus long avant l'établissement effectif de l'appel voix.
7. L'UE tente alors d'accéder à la cellule cible et procède comme pour l'établissement d'un appel voix CS sur le système GSM ou UMTS, après avoir réalisé une mise à jour de localisation si la zone de localisation CS (*Location Area*) ou PS (*Routing Area*) a changé.

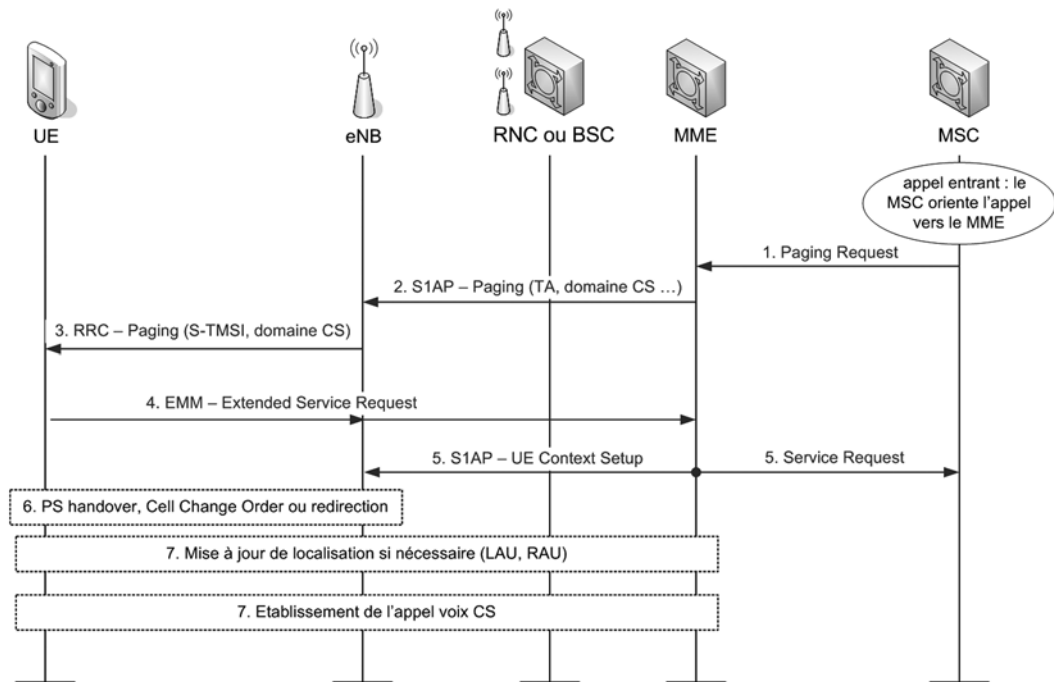


Figure 19-17

Procédure de CS Fallback déclenchée par un appel voix entrant en LTE

Dans le cas d'un appel voix lancé par l'UE, les étapes 1 à 3 n'ont pas lieu et l'envoi du message *Extended Service Request* est déclenché par l'action de l'utilisateur et non par la réception du message de paging. Le reste de la procédure est identique.

On notera également que l'appel entrant ou sortant peut survenir n'importe quand, y compris lorsque l'UE a une connexion active avec le réseau LTE et échange des données avec celui-ci

(service en cours). Dans ce cas, l'opérateur a plusieurs possibilités en fonction des capacités de son réseau et de sa stratégie :

- réaliser un handover PS vers une cellule GSM ou UMTS pour maintenir le ou les service(s) en cours, si le réseau, l'UE et la cellule cible le permettent ;
- réaliser une redirection vers une cellule GSM, ce qui a pour effet de suspendre la session de données en cours jusqu'à l'accès de l'UE à la cellule GSM si l'UE et le système GSM/GPRS implémentent le *Dual Transfer Mode* (qui permet d'établir un appel voix et une session de données simultanément), jusqu'à la fin de l'appel voix sinon ;
- réaliser une redirection vers une cellule UMTS. La session de données en cours sera suspendue jusqu'à l'accès de l'UE à la cellule, la combinaison d'appels CS et PS simultanés étant prise en charge nativement en UMTS.

Conséquences sur l'UE et le MME

Le préalable à cette procédure est que l'UE s'attache au domaine circuit en même temps qu'il s'enregistre à l'EPS. Sans cela, le MSC recevant la notification d'appel ou le SMS à destination de l'UE ne saura router le message vers le bon MME. On parle alors d'enregistrement combiné EPS/CS. La réalisation de cette procédure nécessite donc la prise en charge de fonctions spécifiques, principalement sur l'UE, le MME et le MSC. En particulier, le MME et le MSC doivent tous deux mettre en œuvre une nouvelle interface (SGs), semblable à l'interface Gs définie entre SGSN et MSC, pour l'enregistrement combiné, l'envoi de la notification d'appel, le transfert du message EMM et l'envoi ou la réception de SMS. Le MME doit par ailleurs indiquer à l'eNodeB la nécessité de basculer l'UE. L'UE doit quant à lui être capable de réaliser un enregistrement combiné, d'implémenter les procédures CS Fallback pour les appels voix entrants et sortants, et la fonctionnalité ISR (voir le chapitre 18). L'eNodeB doit pour sa part être capable de déclencher la procédure RRC adéquate lorsqu'il reçoit l'indication « CS Fallback » du MME lors de l'établissement ou de la modification du contexte de l'UE.

Lorsque l'UE réalise un enregistrement combiné EPS/CS, le réseau LTE/EPC en déduit qu'il implémente les mécanismes de CS Fallback. L'UE n'a donc pas à signaler une information de type « CS Fallback implémenté ».

Autres services

Si le CS Fallback a été défini en premier lieu pour établir des appels voix CS lorsque que l'UE a sélectionné une cellule LTE, son périmètre est plus étendu et recouvre d'autres services initialement portés en GSM et UMTS sur le domaine CS (par exemple services de localisation et services supplémentaires, voir [3GPP TS 23.272]). Cependant, tous ne donnent pas lieu à une bascule vers le GSM ou l'UMTS. Ainsi, l'UE peut envoyer et recevoir des SMS insérés dans la signalisation NAS sans utiliser l'IMS, mais sans être non plus envoyé sur une cellule GSM ou UMTS. On réutilise donc ici simplement le mode classique de transmission des SMS, employé dans tous les réseaux GSM et UMTS.

On notera que ce mécanisme CS Fallback, s'il est utilisé, doit aussi permettre de basculer dans le domaine CS des appels d'urgence déclenchés sur le réseau LTE. L'UE en informe le MME dans le

message EMM *Extended Service Request* en indiquant *appel d'urgence* comme service demandé. Le MME transmet à son tour l'information à l'eNodeB dans le message S1-AP *Initial UE Context Setup Request*. L'eNodeB peut, comme pour la bascule d'un appel normal, demander à l'UE de faire des mesures préalables, ou bien déclencher la bascule dès la réception du message S1-AP vers une cellule prédéfinie.

Le transfert d'appel VoIP vers le domaine CS : SR-VCC

Principe

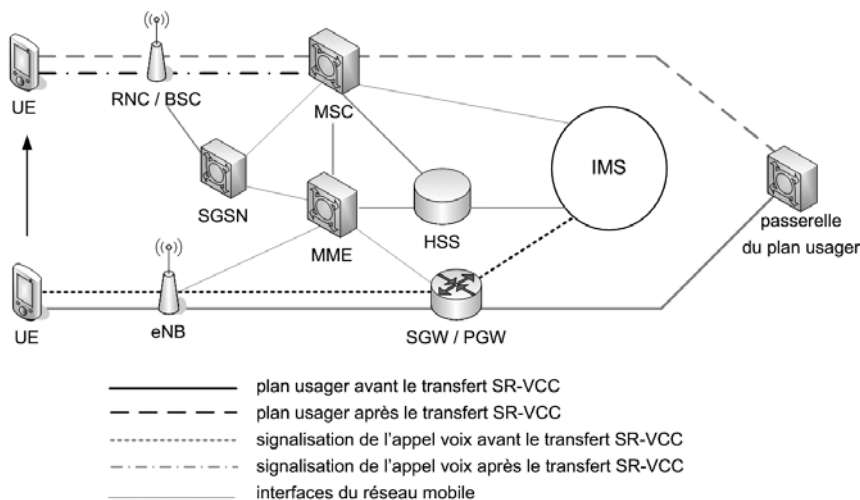
Comme nous l'avons évoqué dans la section précédente, le système LTE/EPC a été bâti sur le mode de transfert de données par paquets et n'intègre pas de commutation de circuits, à la différence du GSM/GPRS et de l'UMTS. Ainsi, un appel voix porté par ce système utilise nécessairement la voix sur IP (VoIP), typiquement à l'aide d'une infrastructure IMS pour l'établissement et le contrôle des appels. Les réseaux GSM/GPRS et UMTS peuvent également être interconnectés à une infrastructure IMS et permettre des appels VoIP, si les équipements du réseau et les terminaux mettent en œuvre des fonctionnalités spécifiques, définies dans les évolutions 3GPP de ces deux systèmes. Cependant, presque tous les réseaux GSM/GPRS et UMTS actuels utilisent principalement, voire exclusivement, la voix à commutation de circuits.

Cet état de fait a conduit à envisager un mécanisme garantissant une continuité de service d'un appel VoIP vers un appel voix CS, lorsque l'utilisateur sort de la zone de couverture du réseau LTE. Ce mécanisme ne peut se limiter à un simple handover intersystème puisque la gestion entière de l'appel est différente entre ces deux modes : outre le fait que l'appel VoIP est porté par le domaine paquet, il implique aussi l'utilisation d'une signalisation (SIP, pour *Session Initiation Protocol*, entre l'UE et l'IMS), de protocoles de données (par exemple UDP/RTP) et de codecs différents. Ainsi, la bascule vers un mode de voix circuit doit réaliser le transfert complet du chemin de données de l'UE au point de sortie du réseau, et pas uniquement entre l'UE et le réseau d'accès. La signalisation d'appel est également modifiée, passant de SIP au protocole NAS *Call Control* (voir le chapitre 15). Le principe de cette bascule est illustré à la figure 19-18 : on peut voir que la signalisation de l'appel comme le plan usager sont modifiés par le transfert SR-VCC. On peut remarquer que la signalisation de l'appel VoIP en LTE transite par la S-GW et non par le MME : cette signalisation SIP se termine dans l'IMS, elle est portée par un bearer EPS et n'utilise pas les protocoles NAS du LTE entre l'UE et le MME.

La procédure définie par le 3GPP pour ce transfert est nommée *Single Radio Voice Call Continuity*, abrégée en SR-VCC. Les termes *Single Radio* ont été ajoutés pour préciser que l'UE ne peut recevoir simultanément des messages ou des données sur deux systèmes d'accès radio différents (LTE et UMTS par exemple). En effet, les premières procédures VCC ont été définies pour permettre la bascule d'un appel VoIP sur un accès WiFi vers le domaine circuit du réseau mobile (GSM ou UMTS). Cette mobilité est alors basée sur la capacité de l'UE à émettre et recevoir simultanément sur ces deux accès radio qui ne sont pas coordonnés et qui ne sont pas capables d'échanger de la signalisation ni des données. Dans le cas du SR-VCC, l'UE échange des données et de la signalisation avec un seul réseau d'accès à un instant donné et le réseau se charge du transfert des informations nécessaires au système cible (contexte de l'UE, paramètres de l'appel etc.).

Figure 19-18

Transfert du plan usager
et de la signalisation
d'appel lors d'un transfert
SR-VCC



Procédure de transfert d'appel voix LTE-IMS vers le domaine CS

En Release 8, seule la procédure de transfert du LTE (ou du HSPA) vers le domaine CS de l'UMTS ou du GSM/GPRS est définie. C'est la plus importante pour la continuité de service puisqu'elle permet de maintenir l'appel voix au-delà de la couverture VoIP.

Elle est illustrée par la figure 19-19 et décrite dans la suite de cette section.

L'UE remonte une mesure sur une cellule voisine UMTS ou GSM, qui déclenche la décision de handover par l'eNodeB. L'eNodeB demande alors au MME d'effectuer le handover des bearers EPS de l'UE (via le message S1-AP *Handover Required*). Le MME détermine qu'au moins un des bearers EPS est un bearer de voix, par exemple à l'aide du QCI (typiquement égal à 1 dans ce cas). Il le traite alors séparément des autres bearers EPS actifs pour cet UE. Pour le bearer voix, il contacte le MSC Serveur afin d'effectuer le transfert de l'appel voix vers le domaine CS. Pour les autres bearers, il déclenche une préparation de handover dans le domaine PS (voir les sections précédentes). Le message envoyé au MSC Serveur par le MME indique notamment le MSISDN de l'abonné (numéro de téléphone), son IMSI, la cellule GSM cible ou l'identifiant du RNC pour un transfert vers l'UMTS, un conteneur transparent destiné au BSS ou au RNC et le contexte NAS de l'UE qui inclut entre autres la ou les clé(s) de sécurité (par exemple CK et IK pour un transfert vers l'UMTS).

Le MSC Serveur déclenche alors un handover inter-MSC vers le MSC cible, déterminé à partir de la zone de localisation LA de la cellule cible. Une fois ce handover vers le BSS ou RNC cible effectué, le MSC Serveur contacte l'IMS pour demander le transfert de l'appel (message SIP *INVITE* avec le MSISDN de l'abonné).

Enfin, le MME informe l'eNodeB qu'il est autorisé à poursuivre le handover. Ce dernier peut alors déclencher la bascule vers la cellule cible ou attendre la réponse du SGSN pour le handover des autres bearers, s'il ne l'a pas encore reçue.

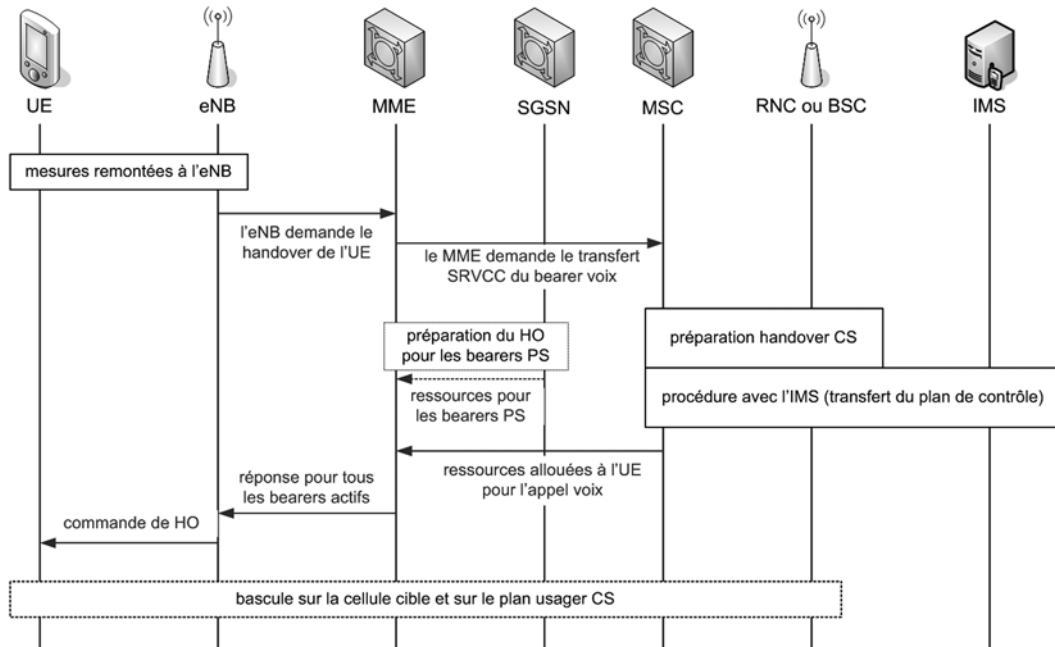


Figure 19-19

Principales phases de la procédure de transfert SR-VCC

Lors de son accès à la cellule cible, l'UE dispose d'un contexte NAS (MM, CC) identique à celui qu'il aurait eu s'il avait établi son appel voix dans le domaine CS.

Conséquences sur les équipements

La procédure SR-VCC requiert des fonctionnalités spécifiques de la part des différents équipements impliqués.

Le MME doit être capable de :

- réaliser la séparation du bearer voix et des autres bearers ;
- déclencher la procédure de SR-VCC et éventuellement celle de PS handover si d'autres bearers sont actifs ;
- coordonner ces deux procédures lorsqu'elles sont toutes deux effectuées.

Le MSC Serveur doit quant à lui :

- demander le transfert de session auprès de l'IMS ;
- coordonner ce transfert et la procédure de handover dans le domaine circuit.

Enfin, l'UE doit être capable de réaliser cette procédure, et en particulier la bascule d'un mode utilisant la signalisation SIP et un codec VoIP vers le mode circuit (signalisation NAS Call Control et codecs AMR).

Il n'existe pas dans la norme LTE/EPC de champ permettant à l'UE d'indiquer explicitement qu'il est capable de SR-VCC. Cependant, il doit nécessairement proposer au moins une des deux technologies d'accès GSM/GPRS et/ou UMTS pour réaliser la procédure de SR-VCC. Ainsi, le réseau considère que l'UE est capable de SR-VCC dès lors qu'il a établi un appel VoIP via l'IMS et qu'il indique la prise en charge du GSM/GPRS et/ou de l'UMTS.

Synthèse

Le tableau suivant présente une synthèse des mécanismes de mobilité qui sont utilisés à l'établissement ou en cours d'appel, au sein d'un même système ou entre deux technologies d'accès différentes.

À l'exception du soft handover de l'UMTS, tous les autres handovers indiqués dans ce tableau sont du type hard handover et conduisent donc à une rupture du lien radio lors de la bascule. Le sigle PS HO désigne un handover sur le domaine PS, impliquant un ou plusieurs réseau(x) d'accès et un ou plusieurs réseau(x) cœur, tandis que CS HO désigne un handover sur le domaine CS du réseau cœur. Ainsi, même si les procédures sont différentes, les PS HO utilisés par exemple pour les cas LTE vers UMTS et UMTS vers GPRS suivent les mêmes principes (voir les sections précédentes de ce chapitre).

Principaux mécanismes de mobilité intra et intersystème en appel ou à l'établissement d'appel

Type de service	de \ vers	LTE	UMTS	GSM/GPRS/EDGE
Voix	LTE	LTE HO	PS HO (VoIP?VoIP) SR-VCC (VoIP?CS) redirection CS Fallback	SR-VCC (VoIP?CS) PS HO (VoIP?VoIP) redirection CS Fallback
	UMTS	PS HO (VoIP?VoIP)	soft HO (intrafréq.) hard HO (intra/interfréq.)	CS HO
	GSM	PS HO (VoIP?VoIP)	CS HO	GSM HO
Données	LTE	LTE HO	PS HO redirection	PS HO redirection Cell Change Order
	UMTS	PS HO redirection	soft HO (intrafréq.) hard HO (intra/interfréq.)	PS HO Cell Change Order
	GPRS/EDGE	PS HO redirection resélection	PS HO redirection resélection	GPRS HO resélection

Nous avons indiqué en italique les mécanismes dont l'utilisation avec un réseau LTE nous semble peu probable et ceux, pour les technologies UMTS et GSM/GPRS, qui sont peu utilisés dans les réseaux existants. Il s'agit des mécanismes de PS HO entre le LTE et le GSM d'une part, et entre l'UMTS et le GSM d'autre part.

Références

- [3GPP TS 36.331] Spécification technique 3GPP TS 36.331, *E-UTRA, Radio Resource Control (RRC), Protocol specification*, v8.16.0, décembre 2011.
- [3GPP TS 23.401] Spécification technique 3GPP TS 23.401, *General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for E-UTRAN access*, v8.16.0, mars 2012.
- [CS over HSPA] *Circuit-Switched Voice Services over HSPA*, Qualcomm Incorporated, 2009.
- [3GPP TS 25.331] Spécification technique 3GPP TS 25.331, *UTRA, Radio Resource Control (RRC), Protocol specification*, v8.18.0, mars 2012.
- [3GPP TS 23.272] Spécification technique 3GPP TS 23.272, *Circuit Switched (CS) fallback in Evolved Packet System (EPS), Stage 2*, v8.11.0, octobre 2010.

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.