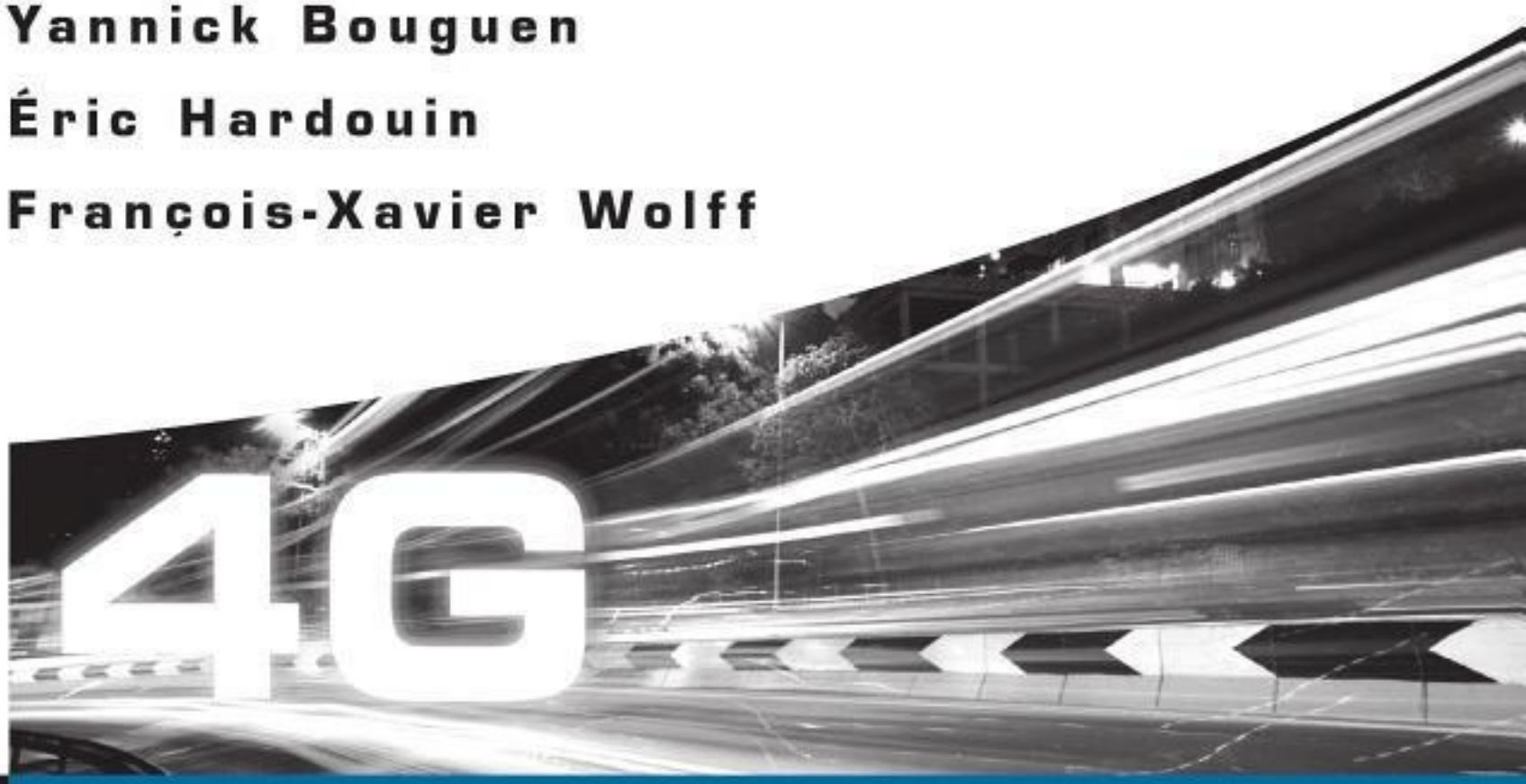
LTE et les réseaux 4G

Yannick Bouguen
Éric Hardouin
François-Xavier Wolff



EYROLLES

Éléments sous droits d'auteur

ÉDITIONS EYROLLES
61, bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

Les figures et tables suivantes sont reproduites avec la permission du 3GPP © 2009 :

- Figures 3-19, 3-20, 3-21, 3-22, 4-2, 4-3, 4-4, 5-4, 9-2, 9-7, 13-4, 19-4, 20-1, 20-4, 20-5, 20-7, 20-11
- Tables « Configurations voie montante (U)/voie descendante (D). S note la sous-trame spéciale », « Schéma de codage et rendement du code pour les canaux de transport », « Schéma de codage et rendement du code pour les informations de contrôle », « MCS utilisés pour déterminer le CQI », « Extrait de la table donnant les TBS en fonction de l'indicateur I_{TBS} et du nombre de PRB alloués », « Éléments du dictionnaire pour 2 ports d'antenne », « Modes de transmission (C-RNTI) », « Nombre et indice des symboles DMRS pour le PUCCH dans un slot », « Formats du PDCCH » « Formats de PUCCH », « Taille des RBG en fréquence en fonction de la largeur de bande du système », « Liste des espaces de recherche de PDCCH pour un UE », « Modes de retour sur le PUSCH », « Taille des sous-bandes en fonction de la bande du système pour les modes 1-2, 3-0 et 3-1 », « Nombre et taille des sous-bandes en fonction de la bande du système pour les modes 2-0 et 2-2 », « Modes de retour sur le PUCCH », « Taille des parties de bande et sous-bandes en fonction de la largeur de bande du système »

La figure suivante est reproduite avec la permission du 3GPP © 2010 :

- Figure 23-7

Les figures et table suivantes sont reproduites avec la permission du 3GPP © 2011 :

- Figures 2-6, 2-9, 2-10, 2-14, 2-19, 2-20, 2-21, 2-22, 19-3, 19-8, 21-5, 21-8, 21-9, 22-2, 22-3, 22-4, 22-5
- Table « Dictionnaire de précodage pour la voie montante, pour 2 antennes d'émission »

Les TS et TR du 3GPP™ sont les propriétés de l'ARIB, l'ATIS, le CCSA, l'ETSI, la TTA et le TTC qui en détiennent conjointement le copyright. Ils sont sujets à modifications futures et vous sont par conséquent fournis « tels quels » à des fins d'information uniquement. Tout autre usage est strictement interdit.

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris.
© Groupe Eyrolles, 2012, ISBN : 978-2-212-12990-8

Éléments sous droits d'auteur

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

Éléments sous droits d'auteur

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

Éléments sous droits d'auteur

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

Éléments sous droits d'auteur

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

Éléments sous droits d'auteur

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

Éléments sous droits d'auteur

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

1

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

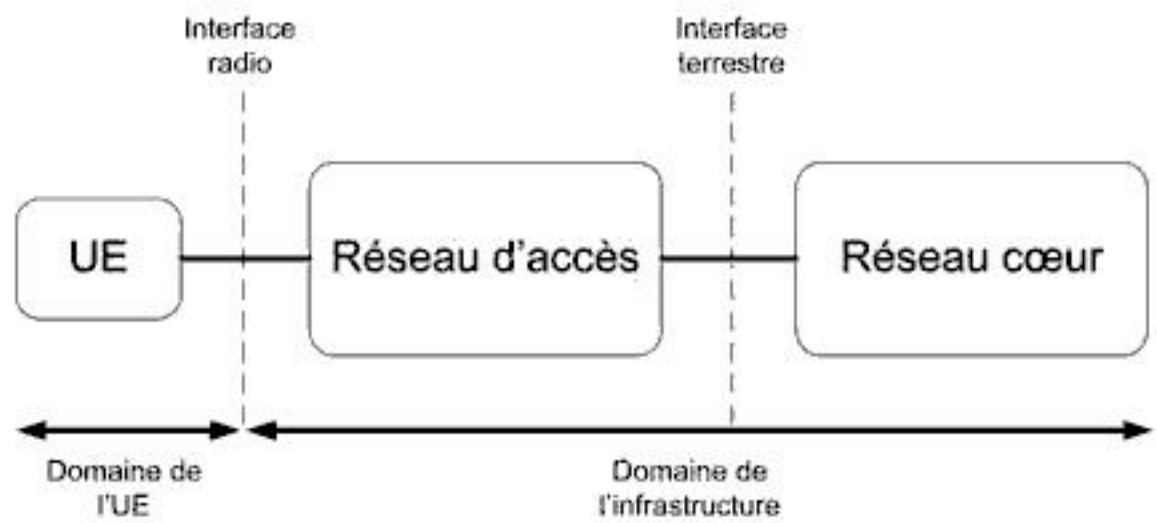
Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

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.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

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'ordonnancement 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.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

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

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

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

Éléments sous droits d'auteur

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 Comittee*) 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 ;

Éléments sous droits d'auteur

- 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 faciliteurs (*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.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

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 Bengladesh, 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.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

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

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

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	2×2	2.23	2.17	0.079	0.083
	4×2	2.53	2.52	0.100	0.096
	4×4	3.41	3.28	0.143	0.154
UL	1×2	1.33	1.24	0.047	0.045
	1×4	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.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

2

L'architecture LTE/EPC

Sommaire : *Les nœuds définis au sein de l'architecture LTE/EPC – Les fonctions des nœuds – Les interfaces définies entre les nœuds – Les différences apportées en termes d'architecture vis-à-vis des générations précédentes*

Le LTE désigne les évolutions de l'accès radio définies pour répondre aux exigences présentées au chapitre 1. Les changements requis ne se limitent toutefois pas à l'accès radio et une évolution du réseau cœur désignée par les termes SAE (*System Architecture Evolution*) ou EPC (*Evolved Packet Core*) a été nécessaire. Nous ferons référence dans cet ouvrage à l'architecture LTE/EPC. Notons que l'ensemble LTE (pour l'accès radio) et EPC (pour le réseau cœur) est aussi appelé EPS (*Evolved Packet System*). Ce chapitre a pour objectif de présenter les principes généraux de l'architecture LTE/EPC. Nous nous concentrerons sur l'analyse des fonctions du LTE et présenterons les fonctions principales des nœuds de l'EPC. Par ailleurs, les éléments d'architecture propres aux cellules femto seront présentés au chapitre 22.

Architecture des réseaux 3GPP 2G et 3G

Le 3GPP définit l'architecture générale des systèmes d'un point de vue physique et d'un point de vue fonctionnel. Au niveau physique, le concept de *domaine* a été introduit pour désigner les nœuds au sein de l'architecture et les frontières entre ces nœuds. Au niveau fonctionnel, le concept de *strate* a été défini afin d'évoquer les procédures mises en œuvre pour permettre les échanges entre les domaines. En préambule à l'analyse de l'architecture LTE/EPC et afin de mettre en lumière les innovations qui s'y rattachent, il convient de rappeler brièvement l'architecture définie pour les réseaux 2G et 3G.

D'un point de vue physique, les réseaux 3GPP 2G et 3G sont composés de trois domaines :

- l'UE ;
- le réseau d'accès ;
- le réseau cœur.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Architecture LTE/EPC

Notions de plan usager et de plan de contrôle

On distingue deux types de données pouvant transiter sur les interfaces du système LTE/EPC : les données utilisateurs, portées par le *plan usager*, et les données de signalisation, qui transitent via le *plan de contrôle*.

Le plan usager (*user plane* en anglais) d'une interface correspond aux protocoles et fonctions mis en œuvre sur cette interface pour le traitement des données de l'utilisateur (en provenance ou à destination de celui-ci) transitant sur le réseau mobile, et liées au service auquel cet usager accède (appel voix, Internet, streaming vidéo, réseau privé…).

Le plan de contrôle (*control plane* en anglais) de l'interface permet, comme son nom l'indique, de contrôler le plan usager par l'établissement, la reconfiguration et la relâche de connexion, l'échange d'informations et de contextes associés à l'UE. Il permet ainsi d'établir le service et d'en assurer la continuité dans l'environnement du réseau mobile. On notera que le plan de contrôle d'une interface ne porte pas nécessairement des messages en provenance ou à destination de l'UE.

Toutes les interfaces du réseau mobile ne portent pas des données de l'un ou l'autre de ces deux plans. Par exemple, l'interface entre les équipements du réseau cœur et la base de données des abonnés (HSS ou *Home Subscriber Server*) ne porte pas de données du plan usager.

Lorsqu'ils sont mis en œuvre sur une interface, ces deux plans sont matérialisés par des piles protocolaires différentes. Celles-ci partagent en général un tronc commun et se différencient sur les couches supérieures, lorsqu'un traitement spécifique et des fonctions différentes doivent être mises en œuvre pour chacun des deux plans. Nous verrons dans la suite de ce chapitre les piles protocolaires des plans usager et de contrôle définies pour les interfaces entre l'UE et le réseau au sein du système LTE/EPC.

Exigences techniques

L'architecture LTE/EPC doit répondre à de nombreuses exigences techniques, qui ont conduit à des évolutions majeures par rapport à l'architecture définie pour les réseaux 2G et 3G. Ces exigences sont rappelées ci-dessous.

L'architecture LTE/EPC :

1. a pour objectif de supporter uniquement des services de données. Les services *circuit* migrent vers des services *paquet*. À titre d'exemple, le service voix est supporté par la VoIP (Voix sur IP) ;
2. doit fournir une connectivité IP entre l'UE et le réseau de paquets de données ou PDN (*Packet Data Network*) ;
3. doit répondre à des objectifs ambitieux de latence du plan de contrôle et du plan usager. La latence du plan de contrôle pour le passage d'un état de veille à un état actif doit être inférieure à 100 ms. La latence du plan usager doit être inférieure à 5 ms dans des conditions de faible charge ;

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

- l'authentification de l'UE ;
- la sécurité de niveau NAS ;
- la gestion des appels ;
- l'établissement des bearers.

L'architecture EPC diffère de l'architecture GPRS par les points suivants.

- Les flux des plans usager et de contrôle de l'UE traversent des nœuds logiques différents au sein de l'architecture EPC. Le MME gère les flux du plan de contrôle de l'UE tandis que la S-GW s'occupe des flux de son plan usager. Cette séparation a également été introduite au sein de l'architecture GPRS en Release 4 pour le domaine CS avec une séparation entre le plan de contrôle et le plan usager. Ce type de séparation répond à plusieurs objectifs :
  - pouvoir dimensionner séparément le plan de contrôle et le plan usager, afin de réduire les investissements capacitaires à réaliser par les opérateurs ;
  - optimiser l'implémentation matérielle des fonctions S-GW et MME ; ainsi, la S-GW peut être conçue sur la base d'une plate-forme optimisée pour le traitement de données à très haut débit, tandis que le MME peut être optimisé pour le traitement de la signalisation, et notamment la gestion simultanée d'un très grand nombre de contextes d'UE ;
  - permettre un choix différencié pour la localisation des S-GW et MME.
- L'architecture EPC n'intègre pas de domaine circuit. L'intérêt majeur de ce choix est de n'avoir à déployer et exploiter qu'un seul domaine au sein du réseau cœur. Un défi demeure néanmoins : fournir la même qualité de service voix que celle offerte par le domaine circuit des réseaux 2G et 3G.
- L'architecture EPC permet l'équilibrage de charge inter-MME. Également appelée *MME load balancing*, c'est la fonction qui permet d'équilibrer la charge des MME vis-à-vis du traitement de la signalisation au sein d'une zone de pool. Le moyen retenu pour équilibrer la charge entre les MME est de répartir les UE entrants dans la zone de pool entre les différents MME du pool. Cette fonction est permise par l'indication à tous les eNodeB de la zone de la capacité relative de chaque MME du pool, lors de la procédure d'établissement de l'interface S1. La fonction d'équilibrage de charge inter-MME intervient également lors de l'intégration ou de la suppression d'un MME au sein du pool. La charge est ainsi équilibrée automatiquement entre les nœuds. L'adaptation à l'introduction ou à la suppression d'un MME peut se faire par une procédure de mise à jour de l'interface S1 à l'initiative du MME. L'évolution de la capacité relative des MME peut alors être mise à jour.

Décrivons les nœuds logiques de l'EPC.

- S-GW : tous les paquets IP à destination d'utilisateurs sont transférés à travers la S-GW, qui sert de point d'ancrage pour les bearers de données lorsque l'UE est en mobilité entre plusieurs eNodeB. La S-GW conserve également des contextes sur les bearers de l'UE lorsqu'il est en veille. Si elle reçoit des données destinées à un UE en veille, la S-GW contacte le MME pour notifier l'UE et rétablir ainsi les bearers associés aux contextes. Par ailleurs, la S-GW gère quelques fonctions annexes au sein du réseau visité dans le contexte d'itinérance, telles que l'envoi d'informations pour la facturation (par exemple, le volume de données envoyées et reçues par l'utilisateur) et les

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

de perte de valeur pour l'opérateur Home. Par exemple, un utilisateur en itinérance peut utiliser un service TV pour lequel l'opérateur Home applique un niveau de QoS élevé. Le PLMN visité peut alors respecter ce niveau de QoS élevé en privilégiant ce trafic par rapport à son propre trafic. Cette priorisation ne pourra dans ce cas être valorisée. La contrepartie du scénario *Home routed* est la nécessité de prendre en compte le trafic des utilisateurs en itinérance dans le cadre du dimensionnement de la P-GW et du PCRF.

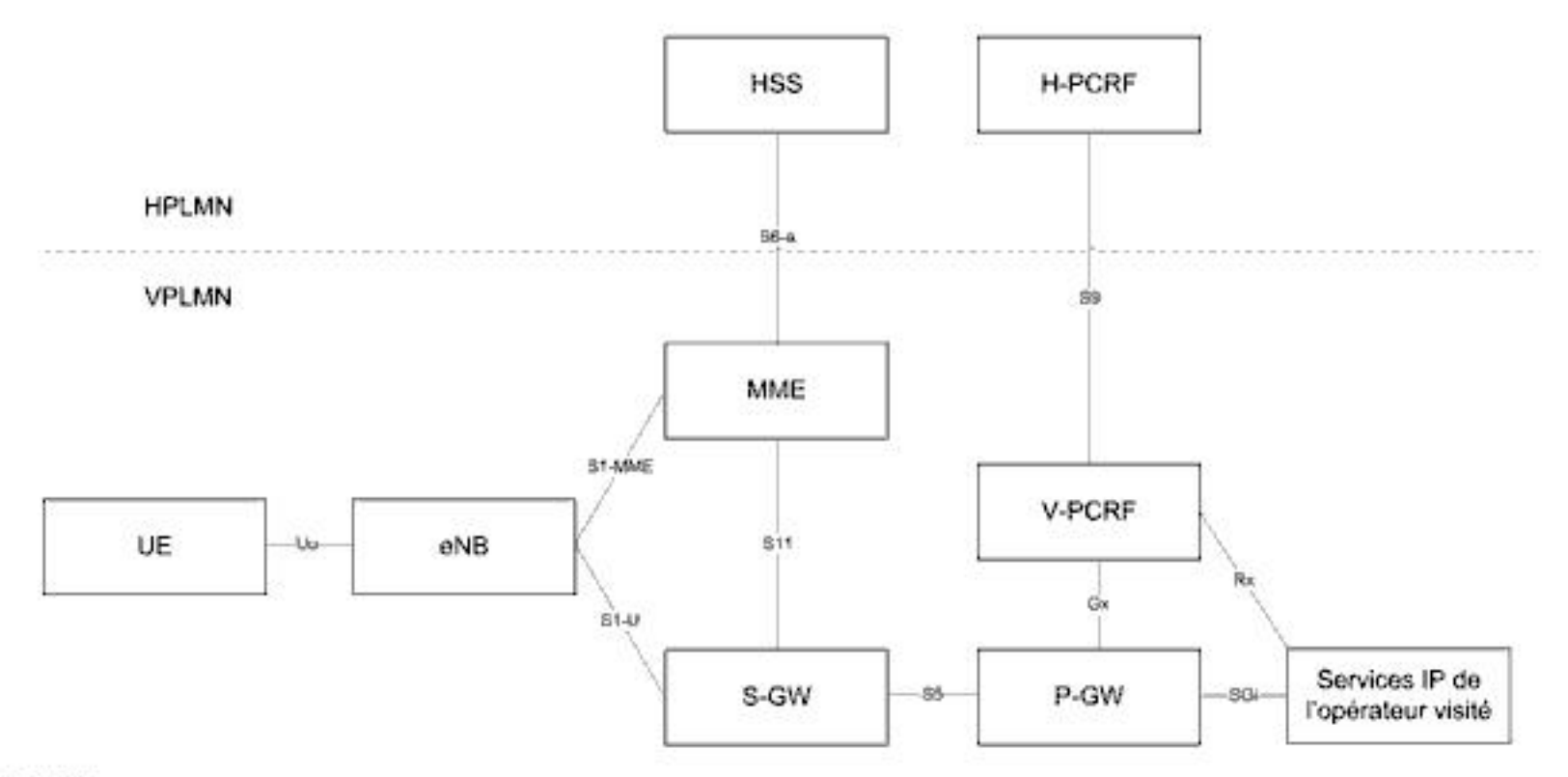


Figure 2-10
Architecture prenant en charge l'itinérance – Scénario Local breakout

Interfonctionnement avec d'autres réseaux

L'architecture LTE/EPC s'adapte également à d'autres technologies d'accès radio ou RAT (*Radio Access Technologies*) telles que le GSM, l'UMTS, le CDMA2000 et le WiMAX mobile. L'architecture permettant la mobilité vers les réseaux 3GPP 2G et 3G est présentée à la figure 2-11. La S-GW agit comme un point d'ancrage au sein de cette architecture.

Le SGSN Release 8 échange avec le MME, pour le plan de contrôle, par l'intermédiaire de l'interface S3, qui est une évolution de l'interface Gn définie entre les SGSN dans l'architecture GPRS. Le SGSN Release 8 échange par ailleurs avec la S-GW, pour le plan usager, via l'interface S4 qui est une évolution de l'interface Gn définie entre SGSN et GGSN dans l'architecture GPRS.

Toutefois, un scénario complémentaire décrit sur la figure 2-12 a été envisagé impliquant un tunnel direct entre S-GW et UTRAN, constituant l'interface S12. Cette option d'architecture améliore la latence du système pour le plan usager et réduit potentiellement la charge du SGSN.

Les scénarios d'architecture précédents supposent l'utilisation de SGSN compatibles avec la Release 8. Dans le cas de SGSN pré-Release 8 qui n'implémentent pas d'interface S3 ou S4, l'architecture décrite à la figure 2-13 est mise en œuvre.

Éléments sous droits d'auteur

Figure 2-11
Architecture permettant l'interfonctionnement entre LTE et UTRAN

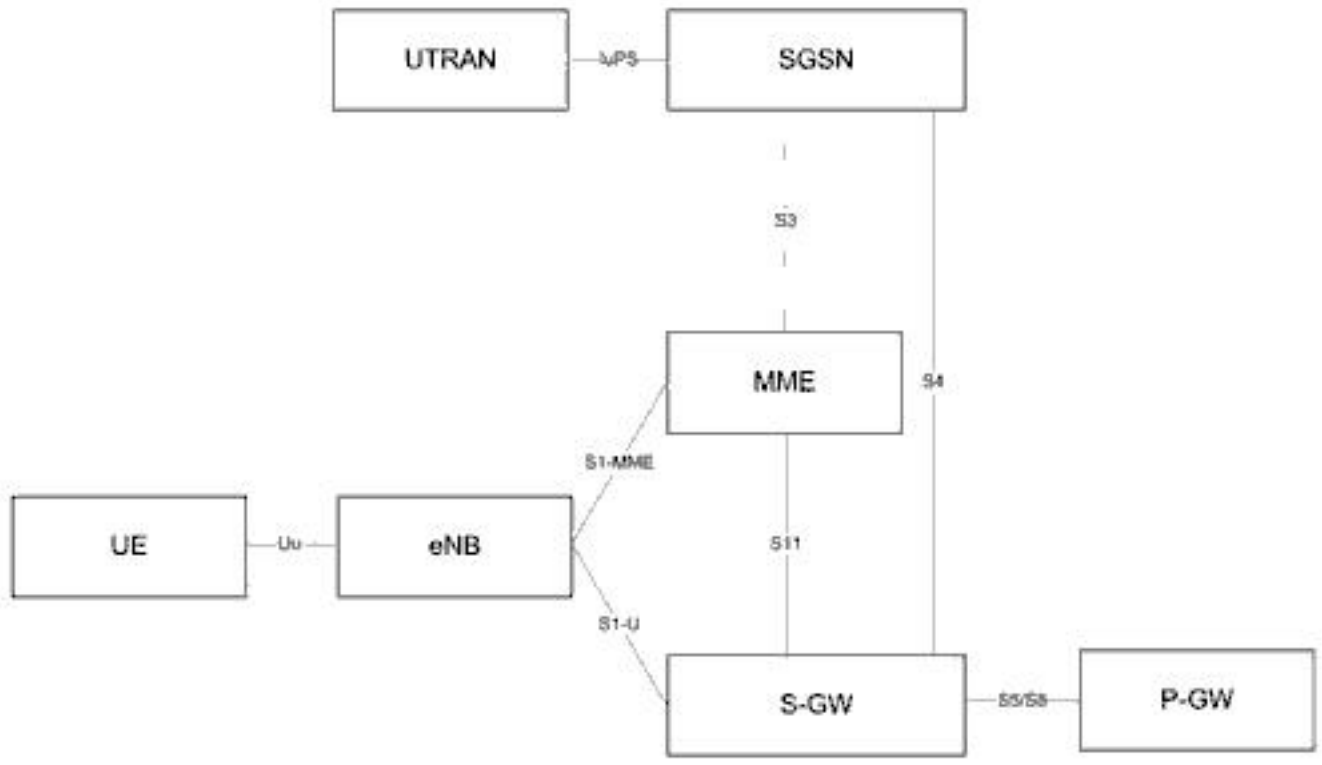
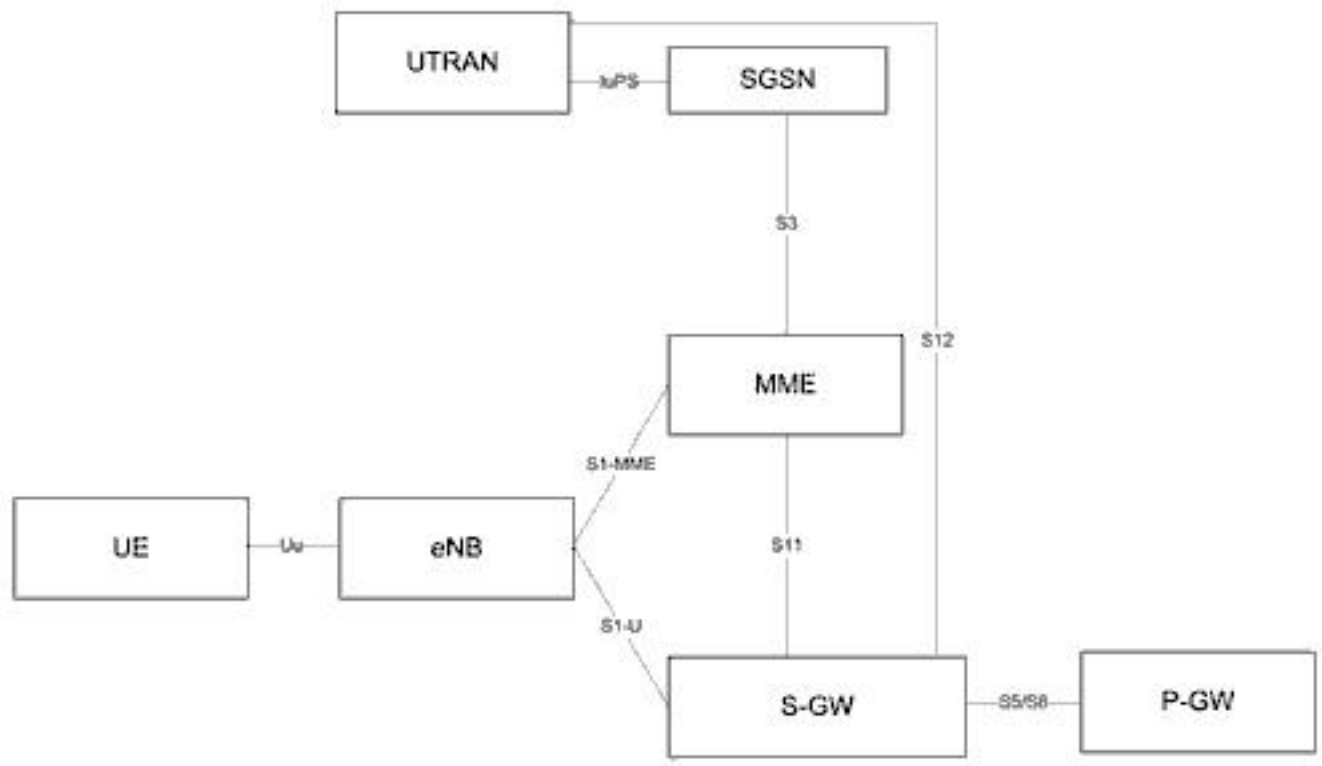


Figure 2-12
Architecture d'interfonctionnement entre LTE et UTRAN impliquant un tunnel direct



Au sein de cette architecture, le SGSN pré-Release 8 considère le MME comme un SGSN et la P-GW comme un GGSN. Par ailleurs, il n'existe plus d'interface entre le SGSN et la S-GW.

Des architectures ont également été définies pour gérer les scénarios de mobilité vers une technologie non 3GPP telle que CDMA2000 ou WiMAX mobile. Nous ne détaillerons pas ces scénarios mais le lecteur pourra se référer à la spécification 3GPP TS 23.402. Dans ces scénarios, la P-GW agit comme un point d'ancrage.

Éléments sous droits d'auteur

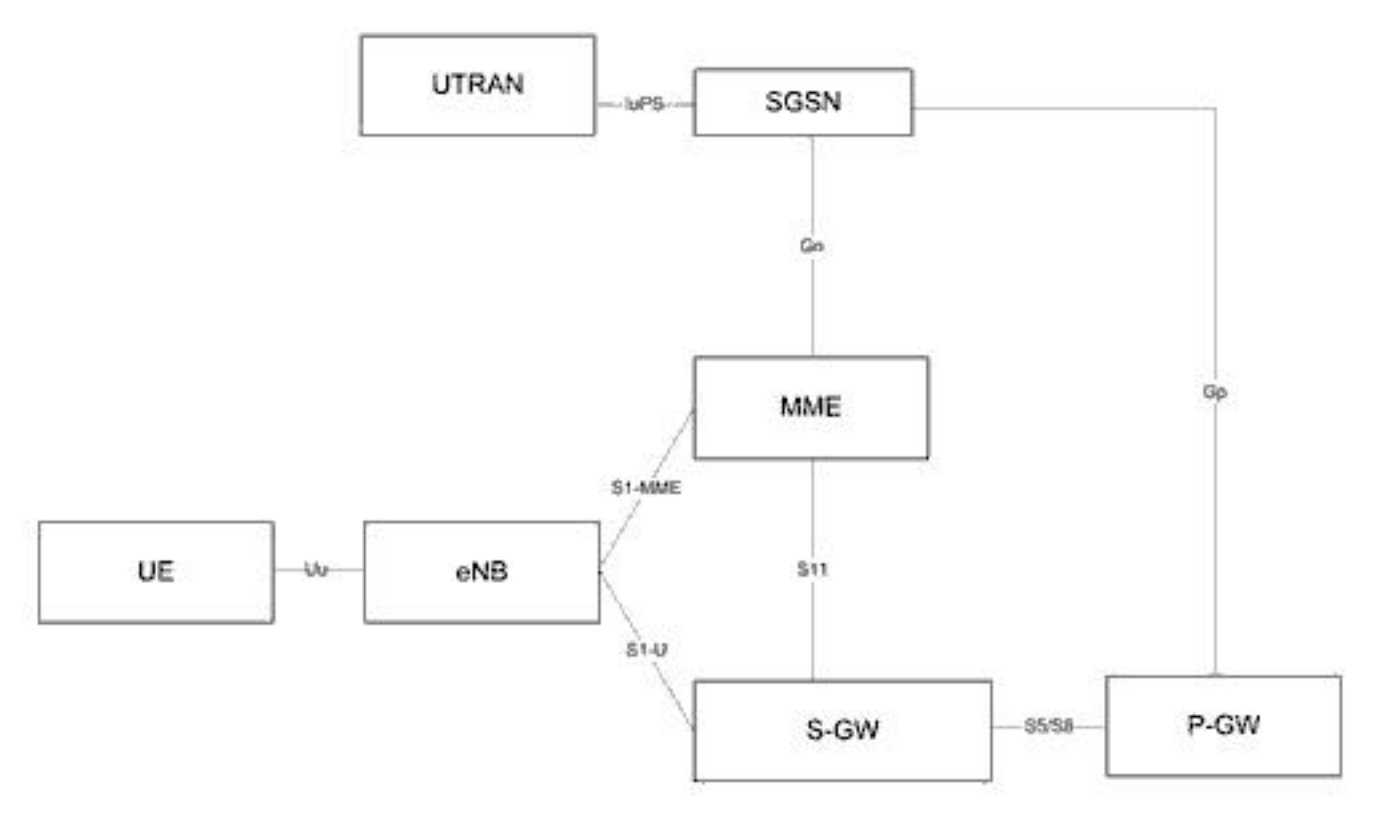


Figure 2-13
Architecture d'interfonctionnement entre LTE et UTRAN impliquant un SGSN pré-Release 8

Architecture protocolaire

L'architecture fonctionnelle LTE/EPC fait appel à différents protocoles qui sont présentés dans ce chapitre et dont certains seront détaillés plus loin dans l'ouvrage.

Plan usager

Un paquet IP destiné à un UE est encapsulé par la P-GW et est transféré de la P-GW vers l'eNodeB au sein d'un tunnel, avant d'être transmis par l'eNodeB à l'UE. La fonction de tunnel est assurée par un protocole propre au 3GPP appelé GTP-U (*GPRS Tunneling Protocol-User plane*). Il est utilisé au sein des interfaces S1, S5 et S8. La figure suivante présente la pile protocolaire du plan usager.

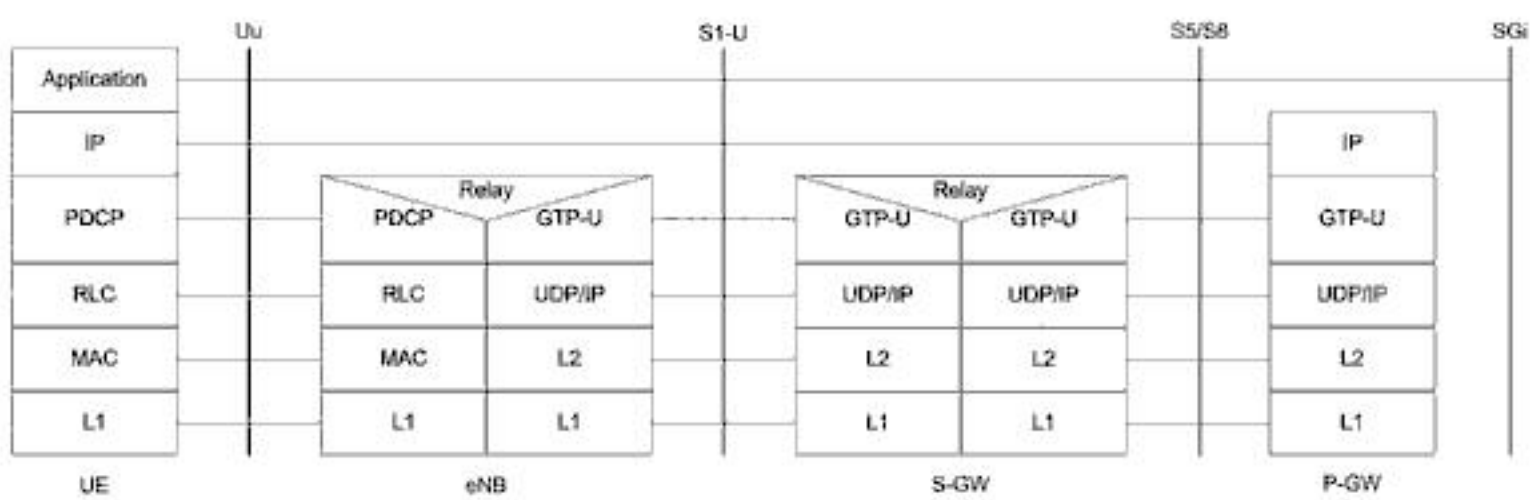


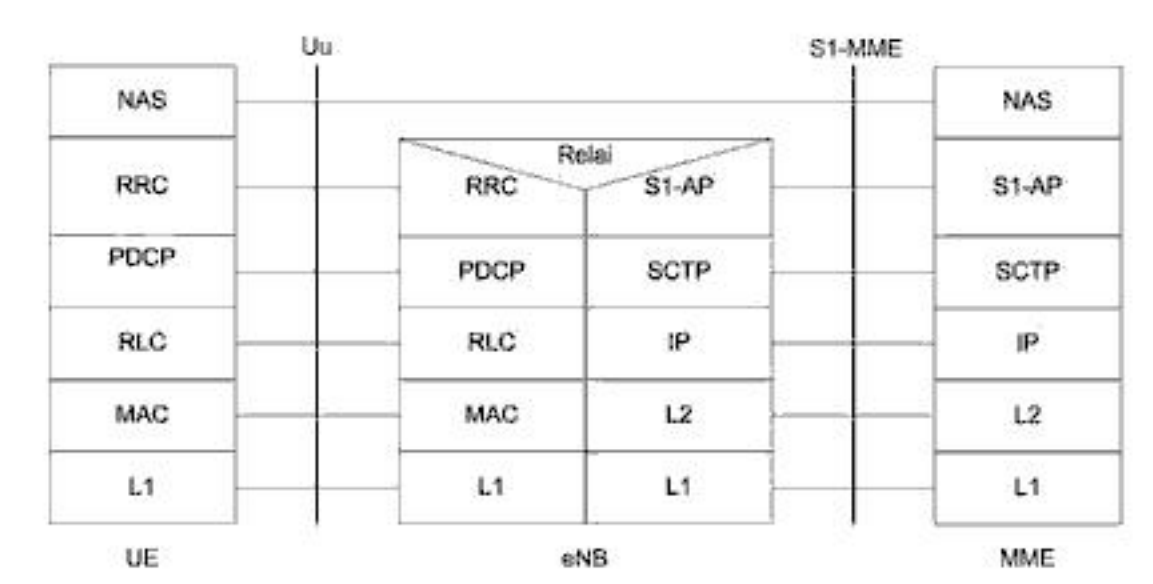
Figure 2-14
Pile protocolaire du plan usager

Éléments sous droits d'auteur

Plan de contrôle

La pile protocolaire du plan de contrôle définie entre le MME et l'UE est présentée sur la figure suivante.

Figure 2-15
Pile protocolaire du plan de contrôle



La pile protocolaire du plan de contrôle défini entre les nœuds de l'EPC est présentée sur la figure suivante.

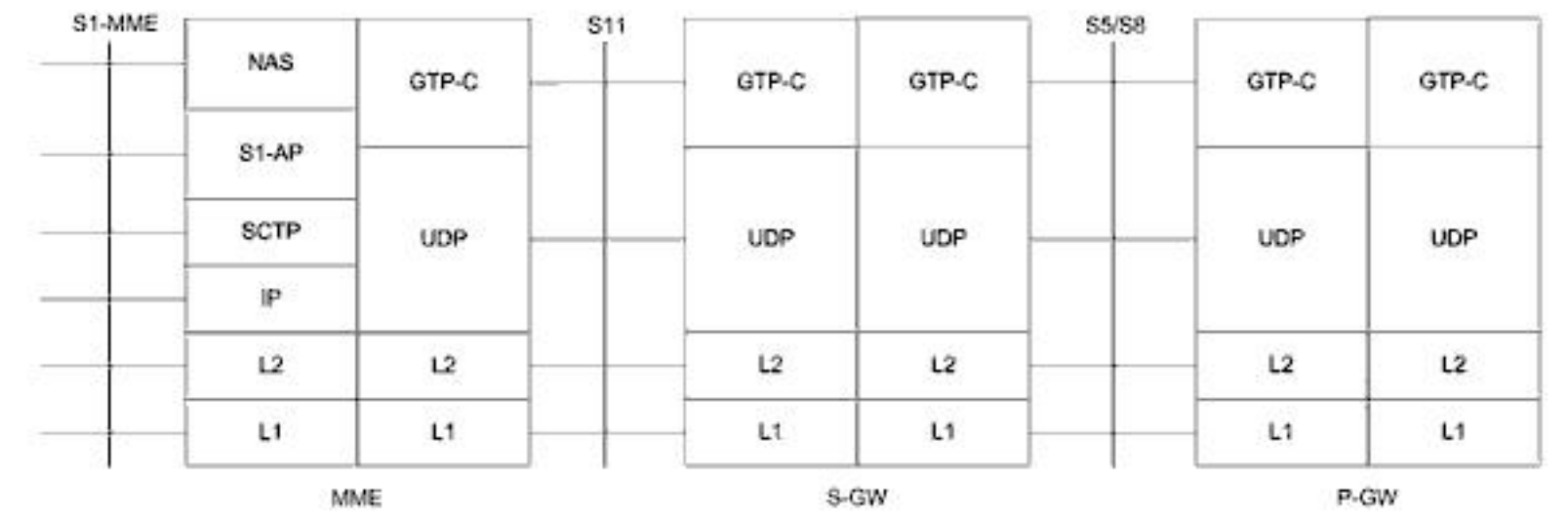


Figure 2-16
Pile protocolaire du plan de contrôle défini entre les nœuds de l'EPC

Cette pile protocolaire fait appel au protocole GTP-C (*GPRS Tunneling Protocol-Control plane*). Ce protocole est utilisé pour permettre les échanges de signalisation pendant l'établissement de bearer EPS et pour le transfert d'informations propres à chaque UE (contexte de l'UE) lors du changement de MME.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

majeur. Dans le cadre du déploiement des réseaux 2G et 3G, BTS et NodeB sont connectés au contrôleur de stations de base par trois types de solution :

- les liaisons cuivre (liaison à modulation d'impulsions codée ou liaison x-DSL) ;
- les faisceaux hertziens ;
- les liaisons optiques.

Étant données les performances requises pour le LTE, les technologies de transport envisagées à ce jour sont la fibre optique et le faisceau hertzien. On peut ainsi imaginer que les eNodeB seront connectés au réseau par l'intermédiaire de fibres optiques dans les zones urbaines et suburbaines. Les faisceaux hertziens pourraient être éventuellement utilisés dans les zones pour lesquelles le déploiement de fibres optiques s'avèrerait trop coûteux.

En revanche, le niveau 3 (couche réseau) est défini de manière précise avec l'utilisation du protocole IP, ce qui constitue une rupture avec la version originale de l'UTRAN pour laquelle le protocole ATM est utilisé. Ce choix s'explique par une bonne adaptation du protocole IP au support de services de données. Ce protocole permet notamment d'accompagner la croissance du trafic de données à des coûts raisonnables, contrairement à la technologie ATM. Les protocoles IPv6 et IPv4 peuvent tous deux être utilisés afin de donner le maximum de latitude aux opérateurs. Par exemple, un opérateur peut démarrer le déploiement de LTE en utilisant IPv4 et le faire migrer vers IPv6 par la suite.

L'interface S1

S1 est une interface logique définie entre eNodeB et EPC, obligatoire au sein de l'architecture LTE/EPC. Elle est comparable en plusieurs points à l'interface Iu-PS définie pour interconnecter l'UTRAN et le réseau cœur GPRS. L'interface S1 est présentée en détail dans les spécifications 3GPP TS 36.410, TS 36.411, TS 36.412, TS 36.413 et TS 36.414.

S1 est elle-même décomposée en deux interfaces :

- S1-U, définie entre eNodeB et S-GW, traite les flux du plan usager ;
- S1-MME, définie entre eNodeB et MME, s'occupe des flux du plan de contrôle.

Le plan usager (S1-U)

L'interface S1-U traite la transmission des paquets entre l'eNodeB et la S-GW de manière non garantie. Elle peut être considérée comme une évolution du plan usager de l'interface Iu-PS. La pile protocolaire de l'interface S1-U est présentée sur la figure 2-19.

Figure 2-19
Pile protocolaire du plan usager de l'interface S1

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

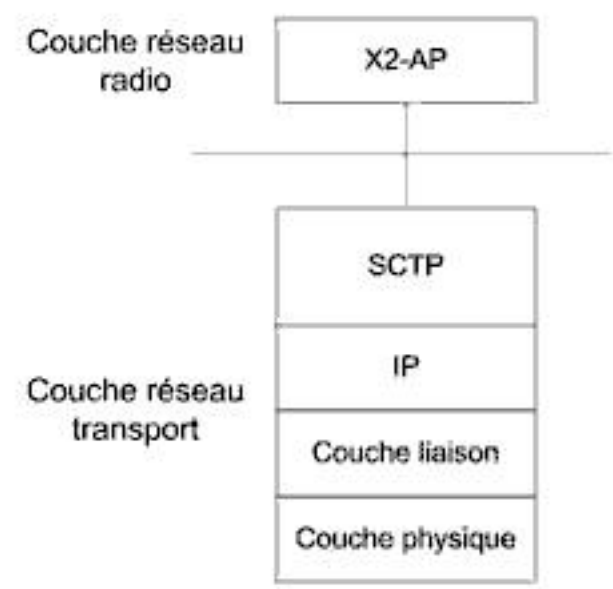
You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Le plan de contrôle (X2-C)

Le plan de contrôle de l'interface X2 est appelé X2-C et est défini entre deux eNodeB voisins. Les fonctions de l'interface X2-C sont supportées par le protocole X2-AP (*X2 Application Protocol*). La pile protocolaire du plan de contrôle de l'interface X2 est représentée sur la figure suivante.

Figure 2-22
Pile protocolaire du plan de contrôle de l'interface X2



Le plan de contrôle de l'interface X2 est contraint aux mêmes exigences que celui de l'interface S1. Les piles protocolaires des interfaces S1-MME et X2-C sont identiques, à l'exception des protocoles S1-AP et X2-AP. Le protocole SCTP est utilisé pour convoyer les messages du protocole X2-AP. Il n'existe qu'une seule association SCTP établie entre une paire eNodeB/eNodeB. L'établissement de l'association SCTP peut être démarré par n'importe quel eNodeB. Dans l'association SCTP d'une paire d'eNodeB, la gestion des identifiants est similaire à celle utilisée sur l'interface S1. Le protocole X2-AP permet de réaliser toutes les procédures de la couche réseau radio entre une paire d'eNodeB. Comme pour S1-AP, les fonctions assurées par la couche X2-AP sont divisées en deux groupes :

- les fonctions génériques, indépendantes des UE et liées aux instances de l'interface X2 dans sa globalité ;
- les fonctions associées à un UE.

Les fonctions génériques ont principalement trait à la gestion de l'interface X2 :

- établissement de l'interface X2, permettant de fournir les informations de configuration ;
- redémarrage de l'interface X2, pour garantir son initialisation rigoureuse ;
- mise à jour des informations de configuration des eNodeB ;
- indication d'erreur, pour traiter les cas pour lesquels un message d'échec n'est pas défini ;
- échange d'indicateurs relatifs à la gestion des interférences intercellulaires (voir le chapitre 10).

La principale fonction associée à un UE prise en charge par le protocole X2-AP est la gestion de la mobilité. Elle permet à l'eNodeB de transférer à l'eNodeB cible le contexte de l'UE et les données du plan usager. En cas d'absence de l'interface X2, la mobilité de l'UE est basée uniquement sur les procédures de l'interface S1.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

- 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 *distinguables* 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).

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

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.

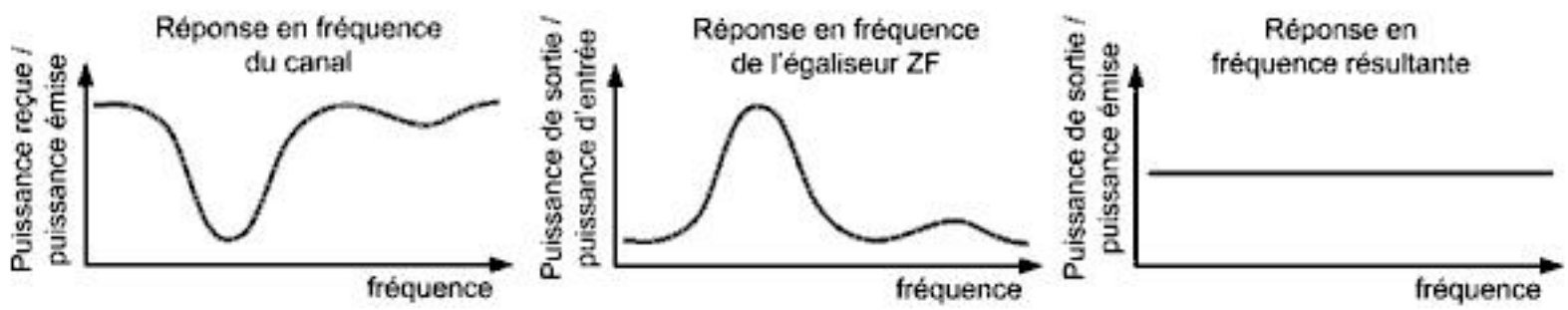


Figure 3-5
Principe de l'égaliseur ZF

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 monotrajet 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*

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

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

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) :

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

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

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

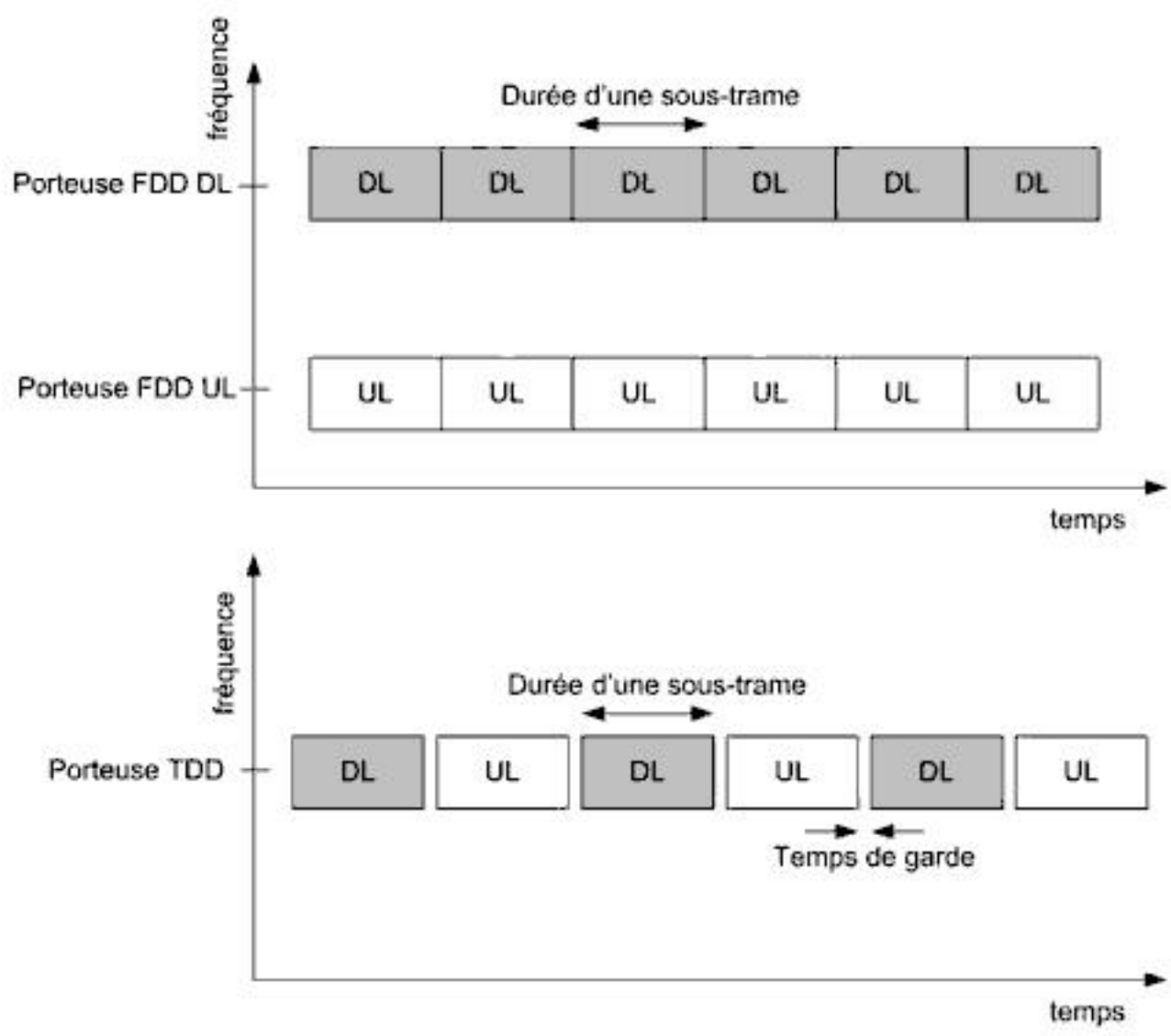
Les modes de duplexage

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



Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

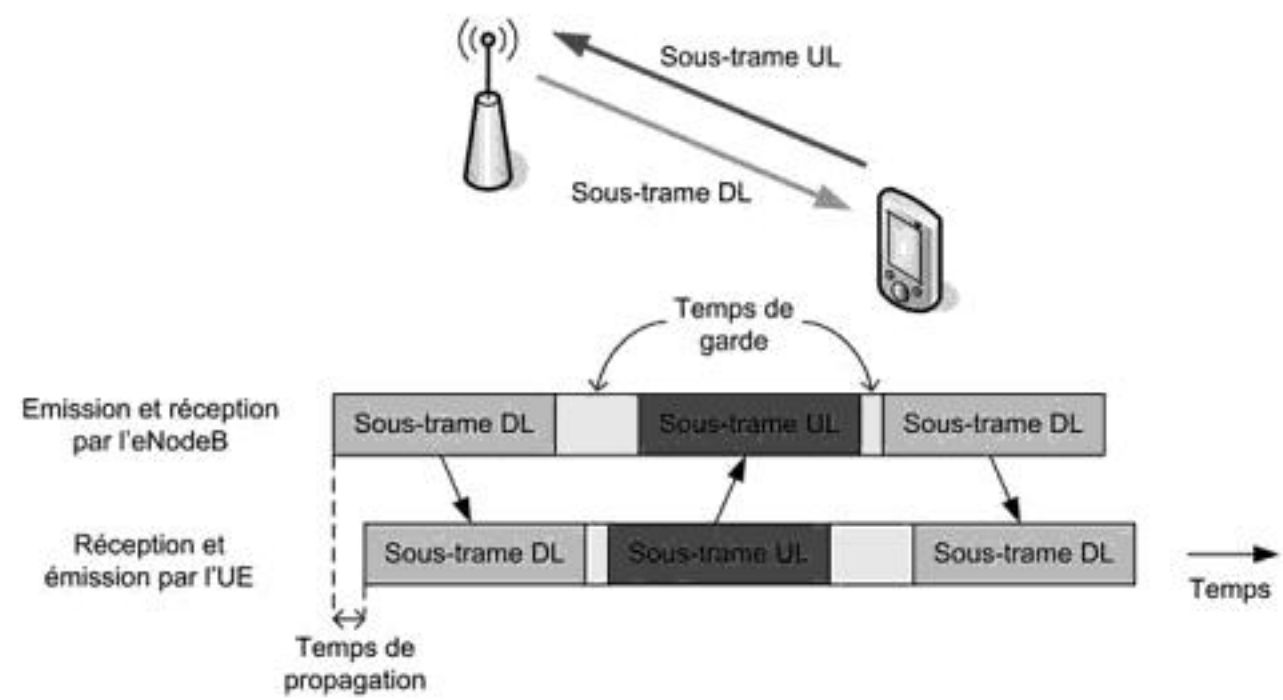
You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

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

Éléments sous droits d'auteur

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.

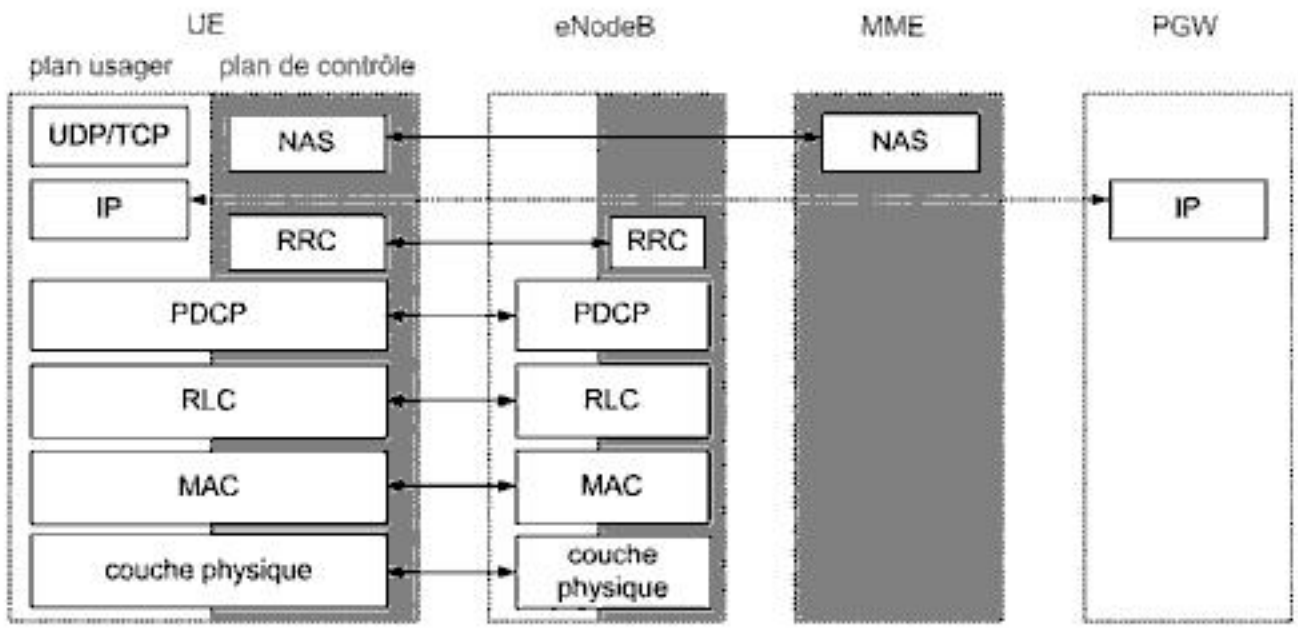
Les structures de trame pour les modes FDD et TDD du LTE ainsi que les configurations voie montante/voie descendante possibles en TDD seront données à la section « Structure de trame de l'interface radio » (p. 91). La mise en œuvre du mode FDD half-duplex sera également abordée dans cette section.

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

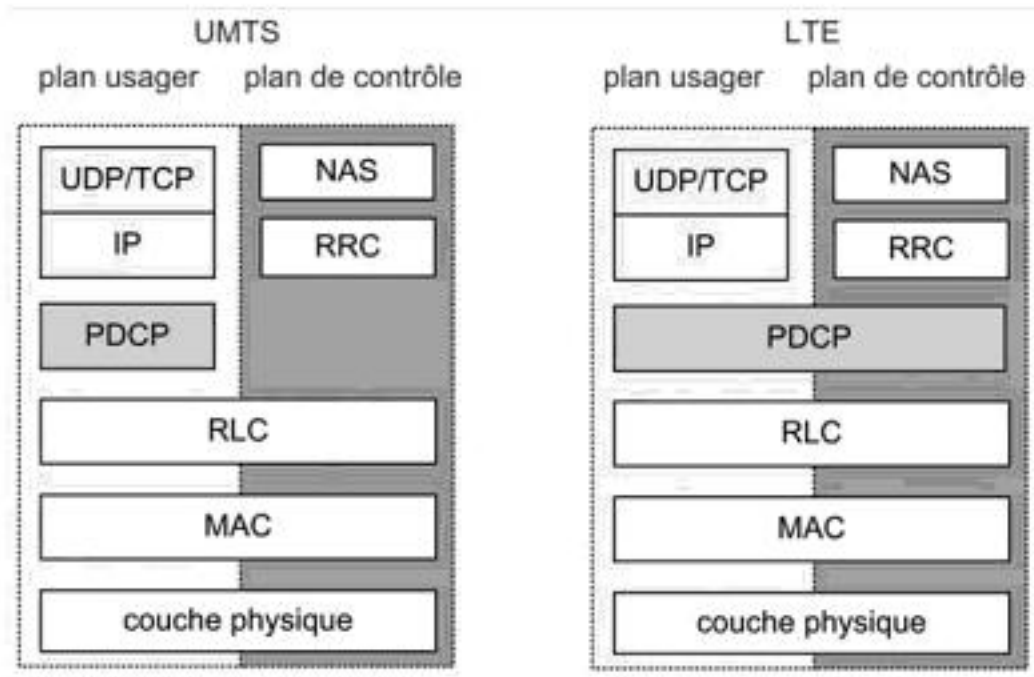


En LTE comme en GSM et UMTS, les protocoles du plan usager de l'interface radio correspondent aux deux premières couches du modèle OSI. La structure de l'interface radio du système LTE possède de nombreuses similitudes avec celle définie pour l'UMTS, comme le montre la figure 3-14.

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.

Éléments sous droits d'auteur

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'usager. 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.

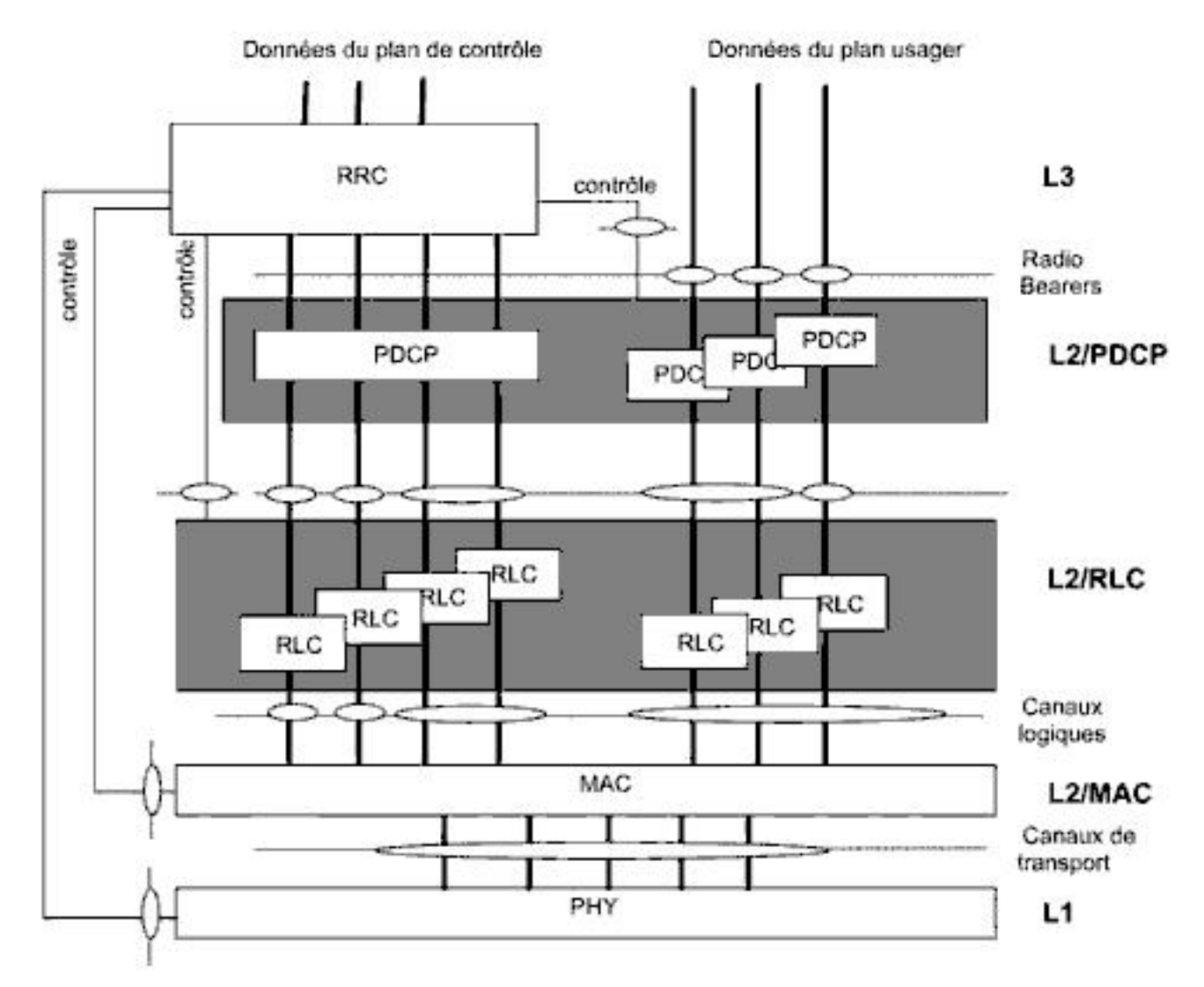
Interactions entre les couches

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.

Éléments sous droits d'auteur

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).

Éléments sous droits d'auteur

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.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

- 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) ;

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

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 *Master Information Block* (*MIB*, voir remarque)	MIB (BCCH) : largeur de bande DL sur la cellule, numéro de trame système (*SFN, System Frame Number)*
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 cellules 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. *Buffer Status Report*) 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

Éléments sous droits d'auteur

(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 (acquittements) 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 acquittements d'HARQ

Éléments sous droits d'auteur

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

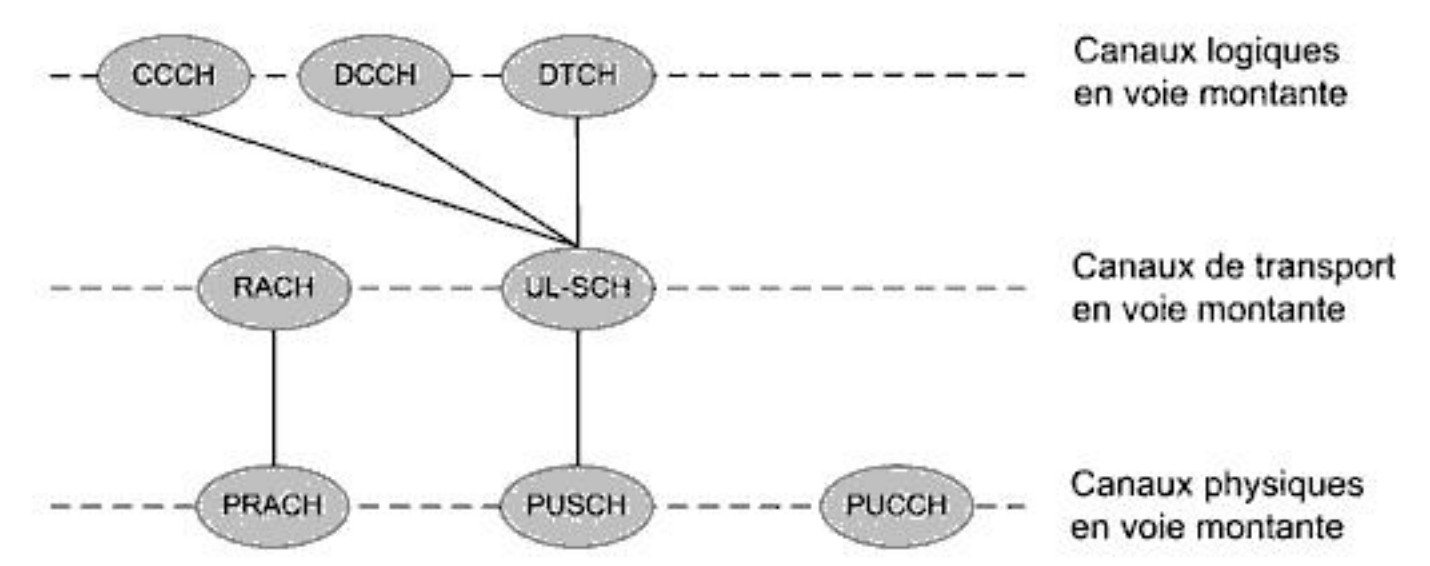
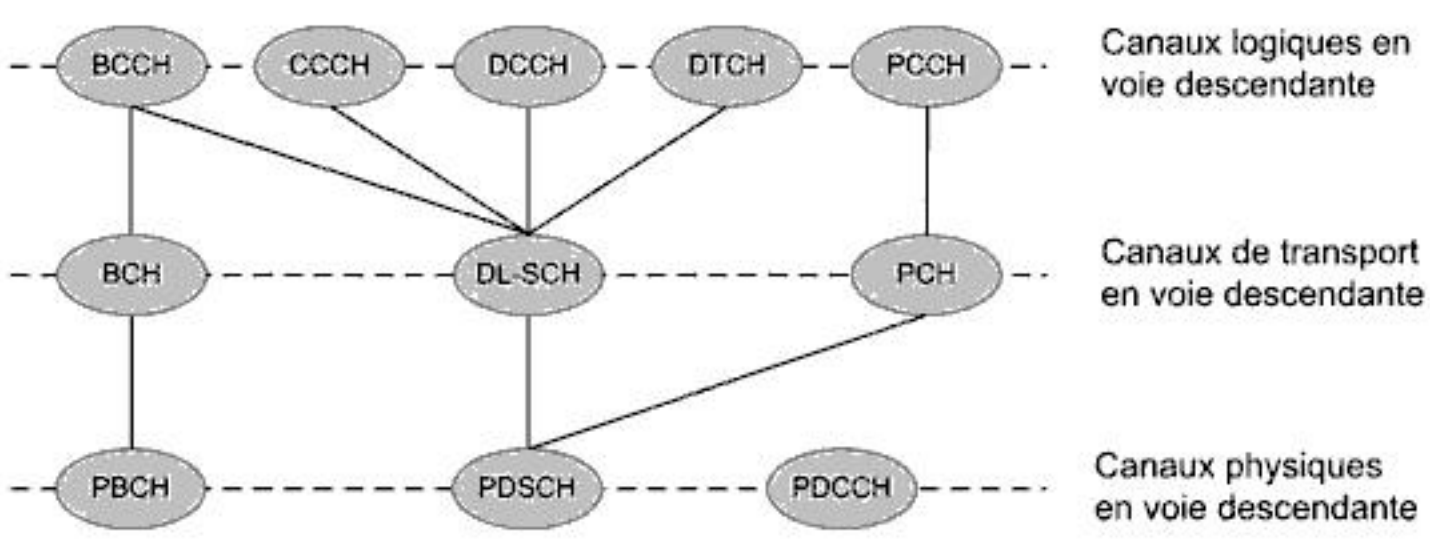


Figure 3-19
Association entre canaux logiques, de transport et physiques en voie descendante



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

Éléments sous droits d'auteur

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.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

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-trames 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 que des 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.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

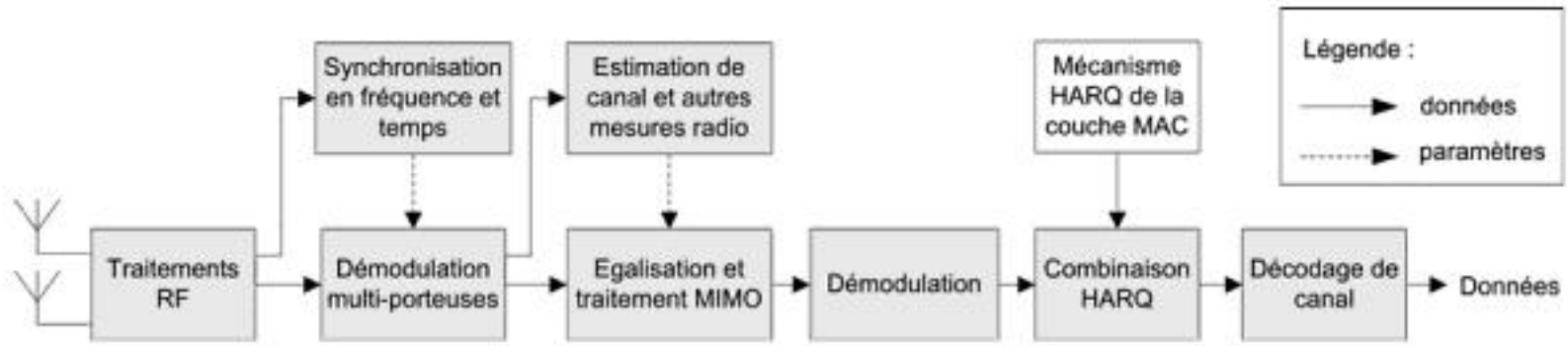


Figure 3-25
Principales fonctions mises en jeu en réception

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.

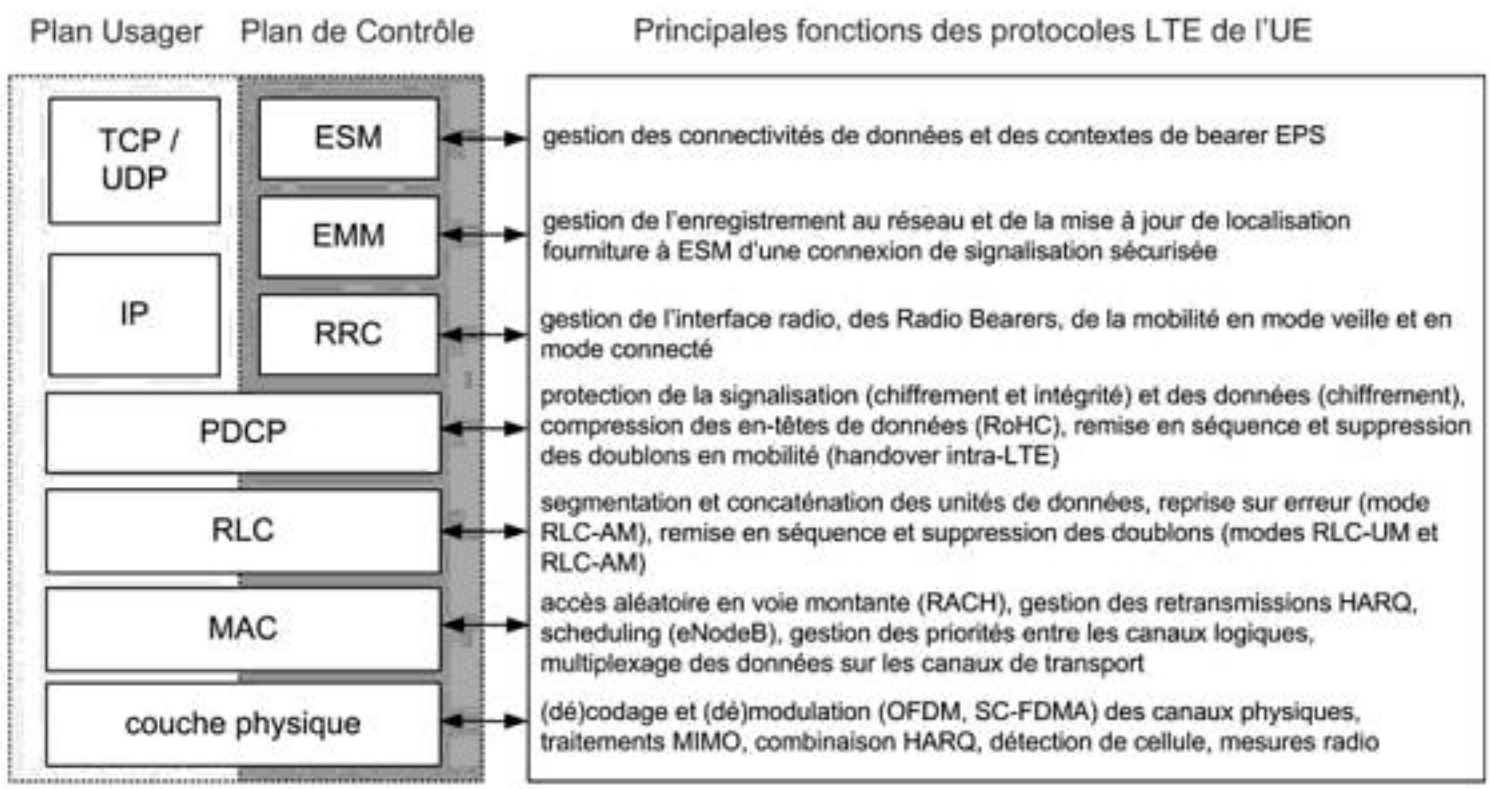


Figure 3-26
Synthèse fonctionnelle des protocoles LTE au sein de l'UE

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

L'un des rôles du codage de canal est de détecter la présence d'erreurs dans un bloc de données reçues. Cette fonctionnalité est cruciale dans les communications de données, où une erreur sur un bit d'information peut avoir des conséquences désastreuses, par exemple lorsqu'il code le montant de transactions financières ou des données médicales. On utilise typiquement pour cette opération des codes dits *de contrôle par redondance cyclique*, généralement abrégés en CRC (*Cyclic Redundancy Check*).

L'autre rôle du codage de canal est de corriger les erreurs. Pour cela, on fait appel à d'autres types de codes, appelés codes correcteurs d'erreurs ou codes FEC (*Forward Error Correcting Codes*), qui introduisent dans le signal émis une redondance qui peut être exploitée au récepteur, par l'opération de décodage, afin de reconstruire des données corrompues. Les codes correcteurs d'erreurs permettent notamment d'opérer dans des environnements fortement bruités ou affectés par l'interférence et ont été de ce fait une composante clé des communications radio mobiles depuis l'émergence du système GSM/GPRS.

Vue d'ensemble du codage de canal en LTE

Le codage de canal en LTE comporte les fonctions décrites à la figure suivante, mises en œuvre à l'émetteur de l'UE et de l'eNodeB.

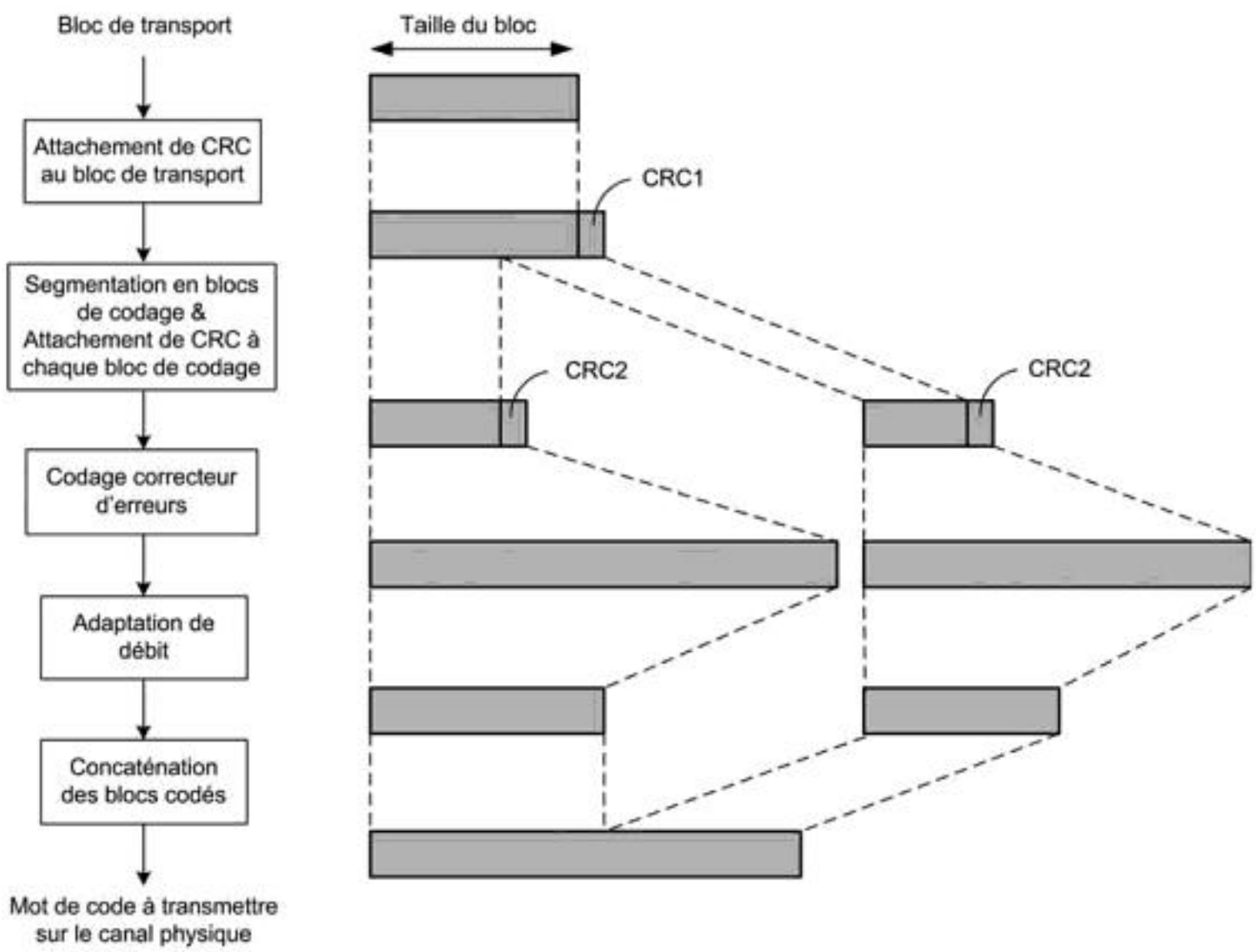


Figure 4-2
Opérations effectuées pour un bloc de transport en voie montante ou descendante (à gauche) et illustration de l'évolution de la taille des blocs de bits mis en jeu (à droite)

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

séquences binaires ne sont pas possibles en sortie du codeur, et qu'à chaque séquence valide de bits codés ne correspond qu'une succession unique de transitions entre états. Ces contraintes sont à rapprocher des contraintes introduites par le langage évoquées plus haut, qui elles aussi en interdisant certains enchaînements de syllabes ou de mots, permettent le décodage d'un message reçu en environnement bruité.

Les codes convolutifs se décodent ainsi typiquement au moyen d'un diagramme appelé *treillis*, qui représente l'évolution des états du codeur en fonction des bits d'entrée. Connaissant au moins l'état initial du codeur, les transitions autorisées et les bits codés produits par le codeur pour chacune d'entre elles, l'observation des bits codés reçus de manière bruitée permet de décider d'un *chemin* dans le treillis associé aux transitions les plus probables, et donc à la séquence la plus probable de bits d'entrée. L'efficacité du décodage peut encore être améliorée lorsque l'état final du codeur est également connu, qui est atteint lorsque le dernier bit du bloc de codage pénètre dans le registre. Une technique pour assurer cette connaissance consiste à initialiser le registre à décalage avec les L-1 derniers bits du bloc d'entrée, de sorte que les états initial et final du registre soient identiques. Cette technique, appelée *tail biting*, offre notamment une protection plus uniforme des bits d'information. Plus d'information sur le décodage des codes convolutifs peut être trouvée dans l'ouvrage [Berrou, 2007].

La structure du code convolutif normalisé pour le système LTE est décrite à la figure suivante. Ce code est de longueur de contrainte 7 (64 états) et possède 3 sorties, conduisant à un rendement 1/3. Le registre à décalage est initialisé avec les 6 derniers bits du bloc d'entrée suivant la technique du tail biting.

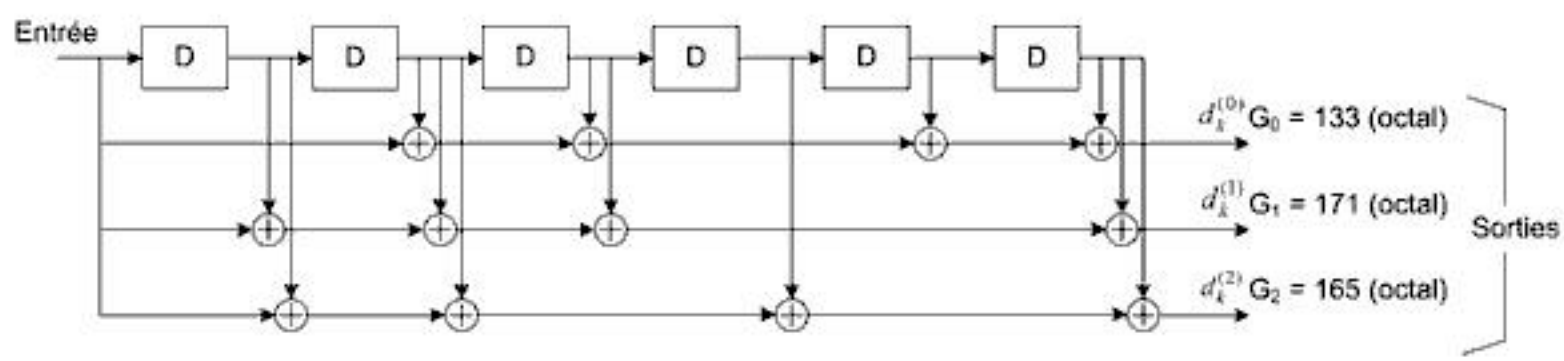


Figure 4-3
Structure du codeur convolutif

Turbo-code

Le turbo-code et le procédé de décodage associé, dit *turbo-décodage*, sont considérés comme une des ruptures technologiques des années 1990 dans le domaine des communications numériques, au même titre que le MIMO. Le turbo-code a depuis été mis en œuvre dans une grande variété d'applications de communications, notamment dans l'UMTS.

Le turbo-codeur met en jeu deux codeurs constituants élémentaires et un *entrelaceur interne*. Ce dernier a pour fonction d'assurer que chaque codeur traite des séquences de bits ordonnés différemment, en mélangeant les bits du bloc d'entrée avant traitement par le deuxième codeur. Cette caractéristique est un

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

L'entrelacement en LTE s'effectue par sous-bloc, où un sous-bloc désigne l'ensemble des bits issus d'une même sortie du codeur, selon les étapes suivantes.

1. Les bits d'entrée de l'entrelaceur sont rangés dans une matrice remplie ligne par ligne.
2. Les colonnes (au nombre de 32) de la matrice sont permutées.
3. La matrice permutée est lue colonne par colonne pour donner un sous-bloc de bits codés entrelacés.

Collection des bits et poinçonnage/répétition

L'adaptation de débit s'effectue par bloc codé, soit en répétant tout ou partie des bits codés pour obtenir des rendements effectifs inférieurs à 1/3, soit en ne transmettant qu'une partie des bits codés pour obtenir des rendements effectifs supérieurs. Les bits codés non transmis sont dits *poinçonnés*.

Les bits codés entrelacés des 3 sous-blocs sont rangés dans un registre comme illustré à la figure suivante pour le cas du turbo-code. Puis ce registre est lu de manière *circulaire* pour délivrer les bits de sortie, ce qui signifie qu'une fois atteinte la fin du registre, la lecture reprend à son début.

Le point de départ de la lecture dans le registre est variable pour les besoins des retransmissions HARQ. Nous verrons en effet au chapitre 11 qu'il est avantageux lors des retransmissions de transmettre des bits de parité ne faisant pas partie de la transmission initiale. Plusieurs points de départ de lecture dans le registre sont ainsi prédéfinis (matérialisés sur la figure par les points notés « RV »), chacun d'entre eux marquant le début d'une *version de redondance*, c'est-à-dire d'une certaine version codée des bits d'information. La version de redondance à utiliser pour une transmission est signalée à l'UE par l'eNodeB, ou déterminée par l'UE selon une procédure normalisée.

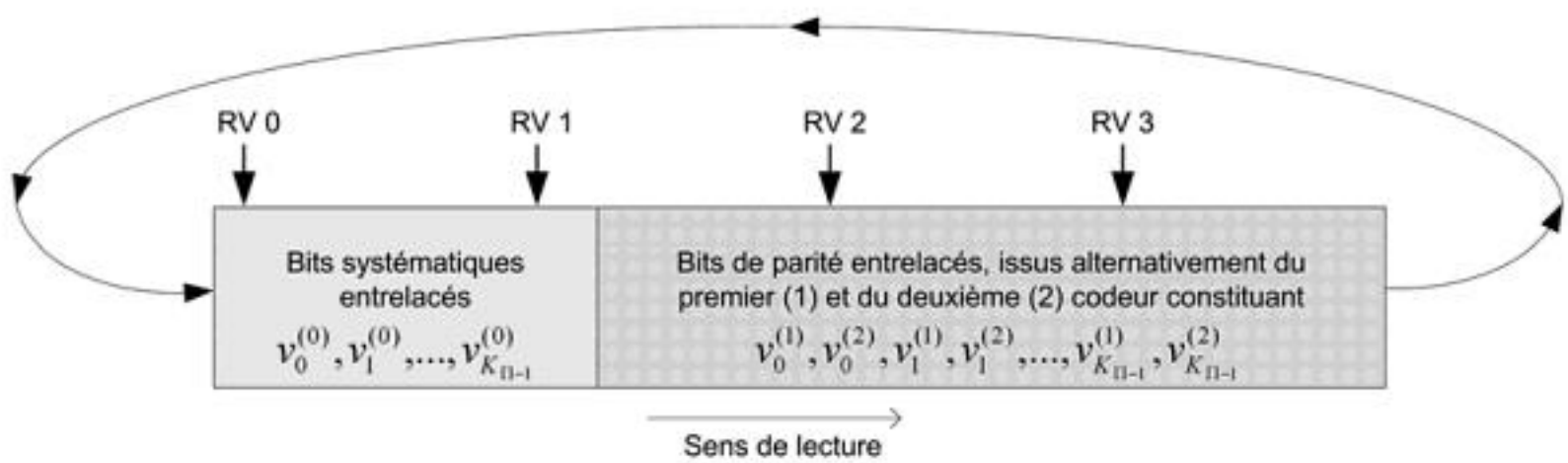


Figure 4-6
Registre circulaire utilisé pour l'adaptation de débit d'un bloc codé par turbo-code

Nous avons vu que lorsque le rendement de codage recherché est inférieur à 1/3, au moins une partie des bits codés est répétée : cette opération est réalisée en lisant le registre dans son intégralité une première fois, puis en reprenant la lecture à partir du point de départ jusqu'à ce que le nombre de bits codés à transmettre soit atteint. Au contraire, si le rendement recherché est supérieur à 1/3, seule une partie des bits codés est transmise. Cette opération est réalisée en ne lisant qu'une partie du registre pour former le bloc de sortie. Deux exemples sur la figure suivante illustrent comment les opérations de répétition et de poinçonnage sont réalisées à partir du registre circulaire, où R dénote le rendement de codage recherché.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

L'*adaptation de lien* consiste à adapter le débit instantané de la transmission à la qualité du canal, ce qui revient à décider du MCS à allouer à l'UE pour chaque transmission, en voie montante et en voie descendante. Cette opération est effectuée par le scheduler, qui est hébergé par la couche MAC, en se basant sur des mesures effectuées par la couche physique. L'adaptation de lien est ainsi une fonctionnalité reposant sur l'optimisation intercouches déjà évoquée au chapitre 3.

L'adaptation de lien s'effectue typiquement à chaque sous-trame où l'UE est servi dans le cas du scheduling dynamique. En revanche, elle reste fixe sur l'ensemble des sous-trames correspondant à une allocation semi-persistante.

Sélection du MCS

L'algorithme de décision du MCS à allouer à l'UE n'est pas normalisé et est laissé à l'implémentation. L'adaptation de lien demande cependant au scheduler d'avoir accès à une information sur la qualité de canal de l'UE, c'est-à-dire représentative des performances attendues de l'UE dans les conditions de canal courantes. Ces dernières dépendent de la puissance utile reçue, du niveau d'interférence sur les PRB considérés et du récepteur de l'UE. L'information sur la qualité du canal peut être un rapport signal sur interférence et bruit (SINR), qui en voie montante est typiquement calculé par l'eNodeB à partir des signaux de référence SRS émis par l'UE. En revanche, l'eNodeB ne peut mesurer la qualité du canal expérimentée par l'UE en voie descendante. L'UE doit donc effectuer cette mesure et la retourner à l'eNodeB selon une procédure normalisée. L'indicateur de qualité correspondant est le CQI et est décrit à la section suivante « Le CQI ».

Lorsque l'allocation de ressources est adaptative en fréquence (voir le chapitre 10), plusieurs SINR (ou CQI) par sous-bande doivent être utilisés. Une méthode répandue pour obtenir un seul MCS à partir de ces entrées multiples est d'utiliser une fonction de compression des SINR afin d'en déduire un SINR effectif représentant la qualité du canal sur les PRB considérés. Plusieurs fonctions de compression sont disponibles, mais on citera par exemple la fonction MIESM (pour *Mutual Information Effective SINR Metric*) [Brueninghaus *et al.*, 2005]. Le SINR effectif peut alors être testé sur des courbes précédemment tabulées donnant le BLER en fonction du SINR pour les MCS disponibles, afin de déterminer le MCS le plus élevé satisfaisant le BLER visé. La figure précédente illustre le principe de la sélection du MCS en fonction de la valeur du SINR effectif, pour un BLER cible de 10 %.

L'eNodeB est libre de suivre ou pas la recommandation de l'UE matérialisée par le CQI. En particulier, il a la possibilité d'ajuster les CQI (ou les MCS calculés à partir de ces derniers) par tout moyen qu'il juge approprié. Cette approche est nécessaire lorsqu'il faut palier une estimation du CQI trop optimiste ou pessimiste de la part de l'UE, ou un manque d'information de sa part pour estimer correctement l'interférence (par exemple l'interférence créée par un autre UE servi sur les mêmes ressources dans le cas du MU-MIMO). Une stratégie commune est d'utiliser le taux de retransmissions d'HARQ afin d'ajuster le MCS au fil du temps : si l'UE décode convenablement ses blocs de transport constamment dès la première transmission, un MCS moins robuste peut être employé ; au contraire, si l'UE demande trop de retransmissions, le MCS alloué est trop optimiste et un MCS plus robuste doit être adopté. Le taux de retransmissions cible (c'est-à-dire le BLER cible) est décidé par l'eNodeB, mais on considère généralement qu'un « bon » taux est de

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Caractéristiques des MCS pour la transmission de données

MCS	Voie descendante				Voie montante			
	I_{TBS}	Modulation	Rendement du code cible (approché)	Efficacité spectrale cible (approchée) (bit/symbole)	I_{TBS}	Modulation	Rendement du code cible (approché)	Efficacité spectrale cible (approchée) (bit/symbole)
0	0	QPSK	0.12	0.23	0	QPSK	0.10	0.20
1	1	QPSK	0.15	0.31	1	QPSK	0.13	0.25
2	2	QPSK	0.19	0.38	2	QPSK	0.16	0.31
3	3	QPSK	0.25	0.49	3	QPSK	0.20	0.41
4	4	QPSK	0.30	0.60	4	QPSK	0.25	0.50
5	5	QPSK	0.37	0.74	5	QPSK	0.31	0.62
6	6	QPSK	0.44	0.88	6	QPSK	0.37	0.73
7	7	QPSK	0.51	1.03	7	QPSK	0.43	0.86
8	8	QPSK	0.59	1.18	8	QPSK	0.49	0.98
9	9	QPSK	0.66	1.33	9	QPSK	0.55	1.11
10	9	16QAM	0.33	1.33	10	QPSK	0.62	1.23
11	10	16QAM	0.37	1.48	10	16QAM	0.31	1.23
12	11	16QAM	0.42	1.69	11	16QAM	0.35	1.41
13	12	16QAM	0.48	1.91	12	16QAM	0.40	1.60
14	13	16QAM	0.54	2.16	13	16QAM	0.45	1.80
15	14	16QAM	0.60	2.41	14	16QAM	0.50	2.01
16	15	16QAM	0.64	2.57	15	16QAM	0.54	2.14
17	15	64QAM	0.43	2.57	16	16QAM	0.57	2.28
18	16	64QAM	0.46	2.73	17	16QAM	0.63	2.52
19	17	64QAM	0.50	3.03	18	16QAM	0.69	2.77
20	18	64QAM	0.55	3.32	19	16QAM	0.75	3.01
21	19	64QAM	0.60	3.61	19	64QAM	0.50	3.01
22	20	64QAM	0.65	3.90	20	64QAM	0.54	3.25
23	21	64QAM	0.70	4.21	21	64QAM	0.59	3.51
24	22	64QAM	0.75	4.52	22	64QAM	0.63	3.77
25	23	64QAM	0.80	4.82	23	64QAM	0.67	4.02
26	24	64QAM	0.85	5.11	24	64QAM	0.71	4.26
27	25	64QAM	0.89	5.33	25	64QAM	0.74	4.45
28	26	64QAM	0.93	5.55	26	64QAM	0.77	4.63

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

de ces techniques sont néanmoins applicables dans la voie montante du LTE. Les techniques de réception, en revanche, sont applicables à la fois à l'UE et à l'eNodeB, car il est obligatoire pour un UE LTE de disposer d'au moins deux antennes de réception.

Diversité de transmission

Le canal de transmission MIMO et la diversité en communications numériques ont été présentés au chapitre 3 (« Rappels sur le canal radio », p. 60). Lorsque plusieurs antennes sont employées à l'émission et à la réception, il existe un canal de transmission entre chaque couple {antenne d'émission, antenne de réception}. Dans le cas particulier d'antennes parfaitement décorrélées (voir le chapitre 3, « Aspects spatiaux », p. 66), chaque canal est indépendant et l'ordre de diversité est donné par le produit du nombre d'antennes d'émission par le nombre d'antennes de réception.

La plus simple des techniques de diversité spatiale à l'émission, appelée *sélection d'antenne*, consiste à n'utiliser que l'antenne dont le signal est le mieux reçu par le récepteur. Cette technique demande à ce que l'émetteur ait connaissance de cette information. Dans le cas du FDD, la propriété de réciprocité du canal entre voie montante et voie descendante ne s'applique pas et l'émetteur ne peut acquérir cette information par ses propres moyens ; le récepteur doit donc la lui communiquer, on parle alors d'un fonctionnement *en boucle fermée*.

Une autre technique de diversité spatiale exploite la présence d'antennes multiples à l'émission par un codage faisant en sorte qu'un symbole de modulation soit transmis depuis plusieurs antennes, sans pour autant créer des propriétés non désirées dans le signal (comme un beamforming non intentionnel, voir la section suivante). Pour atteindre cet objectif, les codes utilisent généralement une dimension supplémentaire, le temps ou la fréquence : on parle alors de code *espace-temps* ou *espace-fréquence* respectivement. Nous donnerons des exemples de tels codes lors de la description des techniques de diversité spatiale à l'émission normalisées en LTE.

Beamforming

Le beamforming, ou formation de faisceaux, consiste conceptuellement pour l'émetteur à concentrer l'énergie rayonnée par les antennes dans la direction du récepteur qu'il souhaite servir. Cette concentration s'obtient de manière électronique en appliquant des déphasages au signal émis sur chacune des antennes, de sorte que les signaux reçus se combinent de manière cohérente au niveau des antennes de réception (voir le chapitre 3, p. 64). Ces déphasages se représentent en bande de base par des pondérations complexes de module unité, généralement multipliées par un terme d'amplitude destiné à assurer que l'énergie totale transmise soit indépendante du nombre d'antennes.

La mise en œuvre du beamforming est schématisée sur la figure suivante : un jeu de pondérations crée un faisceau pointant dans une direction particulière, fonction des pondérations appliquées. Dans la liaison descendante, à chaque UE correspond donc un jeu de pondérations particulier (le vecteur noté **w** sur la figure), ces dernières variant dans le temps à mesure que l'UE se déplace dans le réseau. Notons qu'un faisceau présente dans la réalité des lobes secondaires pointant dans d'autres directions que le faisceau principal, non représentés sur la figure.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

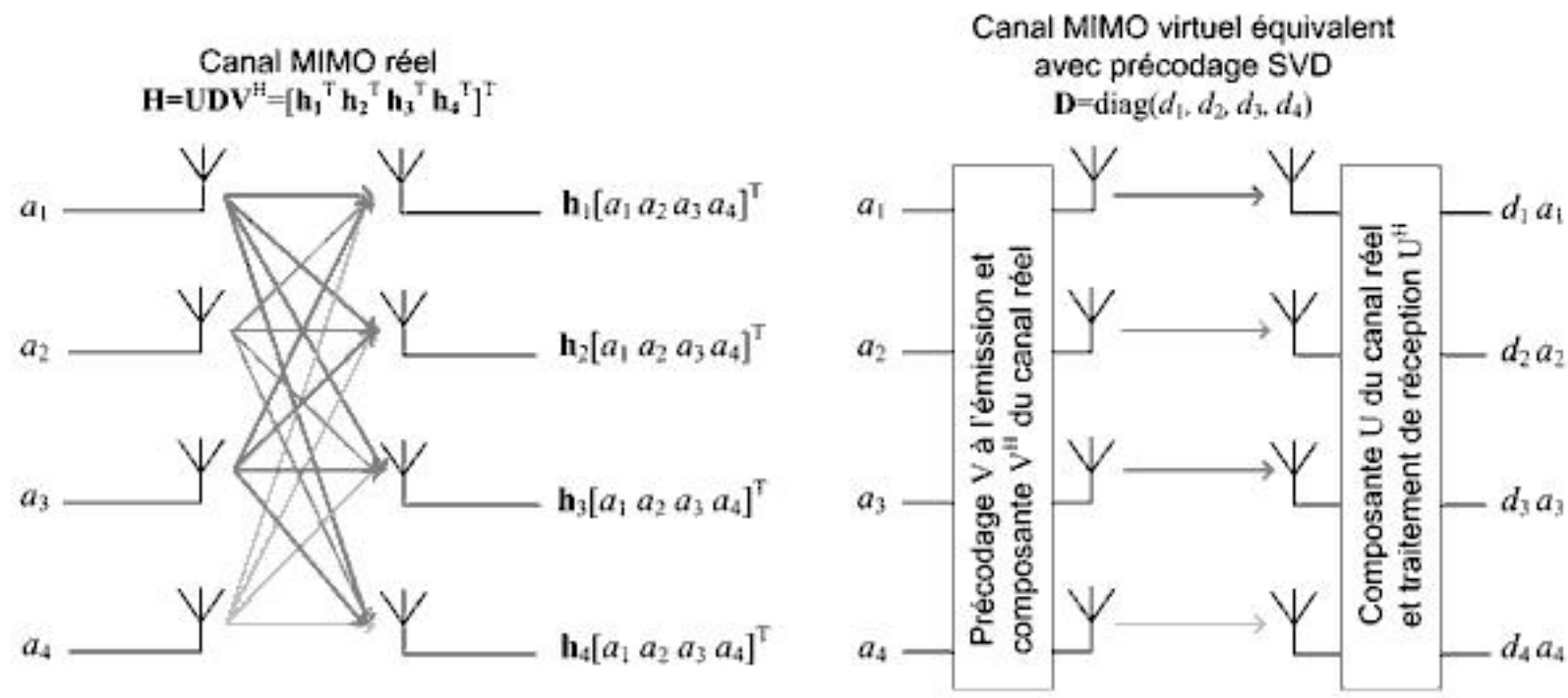


Figure 5-3
Principe du multiplexage spatial par précodage SVD

L'atténuation de puissance sur chaque couche dépend de la valeur singulière associée, notée d_i sur la figure précédente. Le nombre de couches spatiales pouvant être transmises sur un canal est donné par le rang de la matrice du canal, c'est-à-dire le nombre de valeurs singulières non nulles. En réalité, des valeurs singulières très faibles ne permettront pas une transmission utile sur le canal virtuel équivalent correspondant. Le nombre de couches spatiales efficaces dépend ainsi du conditionnement de la matrice du canal, c'est-à-dire du rapport entre les valeurs singulières extrêmes. Si ce rapport est proche de l'unité, le nombre de couches efficaces sera égal au rang de la matrice. Si au contraire ce rapport est élevé, seules les couches associées aux valeurs singulières dominantes seront utilisables (on dit alors que la matrice est mal conditionnée).

Établissons maintenant le lien avec la corrélation du canal. Rappelons que le rang d'une matrice est le nombre maximal de lignes (ou colonnes) linéairement indépendantes de cette matrice. Plus les antennes sont corrélées et plus les lignes et/ou colonnes de la matrice du canal se ressembleront à un instant donné. Prenons l'exemple d'un canal 4 × 4, comme sur la figure précédente. Si pour chaque antenne de réception, les canaux issus des différentes antennes d'émission sont identiques, les colonnes de la matrice **H** sont identiques et son rang vaut 1 : le multiplexage spatial n'est alors pas possible. Ce cas correspond à une corrélation totale des antennes d'émission. À l'inverse, si les antennes sont parfaitement décorrélées, la probabilité est quasi-nulle qu'à un instant donné les colonnes (ou les lignes) de la matrice soient linéairement dépendantes et le multiplexage spatial sera quasiment toujours possible. Sans aller jusqu'à ces cas extrêmes, plus les antennes sont corrélées et plus le nombre de valeurs singulières dominantes se réduit, limitant ainsi les possibilités de mettre en œuvre le multiplexage spatial. En particulier, lorsque l'UE est en vue directe d'une station de base qui emploie des antennes copolarisées, la matrice de canal ne comporte qu'une seule valeur singulière dominante, même si des trajets secondaires font que son rang est supérieur à 1. Le multiplexage spatial n'est alors pas possible et la transmission doit s'effectuer en précodage monocouche (beamforming). On utilisera dans la suite le terme de *rang du canal* pour désigner le nombre de couches spatiales efficaces transmissibles.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Dans la réalité, les antennes de réception ne sont pas forcément bien décorrélées, ni toujours de même qualité, de sorte que le gain de combinaison cohérente peut être inférieur à 3 dB. Cette situation se rencontre principalement au niveau de l'UE, où le faible espace disponible contraint la conception des antennes.

Une manière typique de mettre en œuvre la combinaison cohérente est le récepteur de type *Maximum Ratio Combining* (MRC). Le MRC multiplie le signal reçu sur chaque antenne par le conjugué complexe du coefficient du canal affectant le signal utile sur cette antenne (qui peut être estimé au récepteur via des signaux de référence prédéfinis transmis par la station de base). L'expression du filtre de réception MRC pour une couche spatiale est ainsi donnée par :

$$\mathbf{g}_{MRC} = \mathbf{h}$$

Cette opération a pour effet de mettre en phase le signal utile sur chaque branche de réception et de pondérer chaque branche en fonction de la puissance utile qu'elle a reçue : une branche ayant reçu un signal utile fort sera ainsi favorisée par rapport à une branche ayant reçu un signal utile de niveau plus faible, potentiellement plus sensible à l'interférence. Les sorties de chaque branche sont ensuite additionnées pour délivrer le signal de sortie. En OFDM et SC-FDMA, cette opération doit être effectuée pour chaque sous-porteuse. Notons qu'en raison de la combinaison cohérente qu'il effectue, le MRC peut également être vu comme réalisant un beamforming en réception. Comme il n'y a aucun traitement de réduction d'interférence, le MRC n'est pas adapté à recevoir des transmissions multicouches.

L'IRC rejette l'interférence dans le domaine spatial en réduisant la sensibilité du récepteur dans la direction des interférences, et favorise la réception du signal utile. L'IRC est identique dans son principe au récepteur MMSE décrit à la section « Multiplexage spatial mono-utilisateur (SU-MIMO) », p. 124. On emploie souvent le terme d'IRC lorsque la réduction de l'interférence intercellulaire est visée, tandis que le récepteur MMSE est plutôt associé à la réduction de l'interférence entre couches spatiales. Une différence entre MMSE et IRC réside dans la connaissance qu'a l'UE des caractéristiques de l'interférence et donc de la précision avec laquelle il peut calculer la matrice **R**. En effet, dans le cas de l'interférence entre couches, l'UE sait combien de couches il doit recevoir et est en mesure d'estimer le canal équivalent associé à chacune (formé du canal de propagation et du précodage appliqué à l'émetteur). Il peut alors construire les coefficients du récepteur à partir de cette connaissance, grâce à l'expression de la matrice de corrélation du signal reçu en fonction des matrices des canaux (chapitre 3, section « Représentation mathématique du signal », p. 71). Si seule l'information sur les autres couches attribuées à l'UE est prise en compte dans le calcul de la matrice, le récepteur traitera uniquement les interférences associées. En revanche, l'UE n'a pas forcément la possibilité d'estimer le canal des cellules voisines, ni de connaître le précodage qu'elles appliquent. Dans ce cas, la matrice de corrélation du signal doit être estimée par une moyenne (en temps et/ou en fréquence) du terme $\mathbf{r}\,\mathbf{r}^H$, où $\mathbf{r}$ est le vecteur des échantillons reçus sur les différentes antennes de réception, pour une sous-porteuse d'un symbole OFDM. En théorie, N antennes permettent de supprimer parfaitement N-1 sources d'interférence. Dans la réalité, le nombre de sources peut être important, tandis que le nombre d'antennes est limité (par exemple, à deux maximum sur un terminal de type smartphone). Néanmoins, l'IRC applique au signal un traitement qui maximise le SINR, ce qui peut se traduire par une réduction imparfaite de la contribution de plusieurs sources.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Influence des antennes

Les performances de ces différentes techniques sont liées aux caractéristiques des antennes, notamment à leur corrélation. En émission, nous avons vu que certaines techniques bénéficient de la corrélation des antennes (comme le beamforming et le MU-MIMO), tandis que d'autres (comme le SU-MIMO et la diversité de transmission) bénéficient au contraire de leur décorrélation.

L'opérateur peut donc choisir le type d'antennes qu'il souhaite déployer au niveau des stations de base en fonction de la technique MIMO qu'il désire privilégier. En pratique cependant, le type des antennes à installer est généralement dicté par des contraintes pratiques telles que leur taille et leur impact visuel (voir le chapitre 3, section « Aspects spatiaux », p. 66). Ainsi, les sites macro sont généralement équipés d'antennes à polarisation croisée (où les deux polarisations sont peu corrélées) car, pour un même nombre d'antennes, les radômes sont alors deux fois moins larges qu'avec des antennes proches de même polarisation (fortement corrélées). Des déploiements de plus de deux antennes à polarisation croisée (par exemple, quatre antennes sous la forme : « X X ») combinent des paires d'antennes corrélées avec des paires d'antennes décorrélées, et représentent ainsi un bon compromis pour la mise en œuvre des différentes techniques MIMO.

Structure générale des traitements MIMO en LTE

Les familles de techniques décrites précédemment sont toutes prises en charge dans la voie descendante du LTE : diversité spatiale en émission et réception, beamforming, SU-MIMO et MU-MIMO. Il existe également pour la voie descendante un mode mono-antenne, pour les systèmes équipés d'une seule antenne d'émission à l'eNodeB ; aucun traitement spatial à l'émission ne peut être mis en œuvre pour ce mode.

En voie montante, seule la sélection d'antenne est présente dans les spécifications de la Release 8. Le MU-MIMO est cependant applicable de manière transparente à la norme.

Les traitements MIMO en voie descendante sont décomposés en deux grandes étapes : l'association aux couches spatiales (*layer mapping*) et le précodage, comme illustré à la figure suivante.

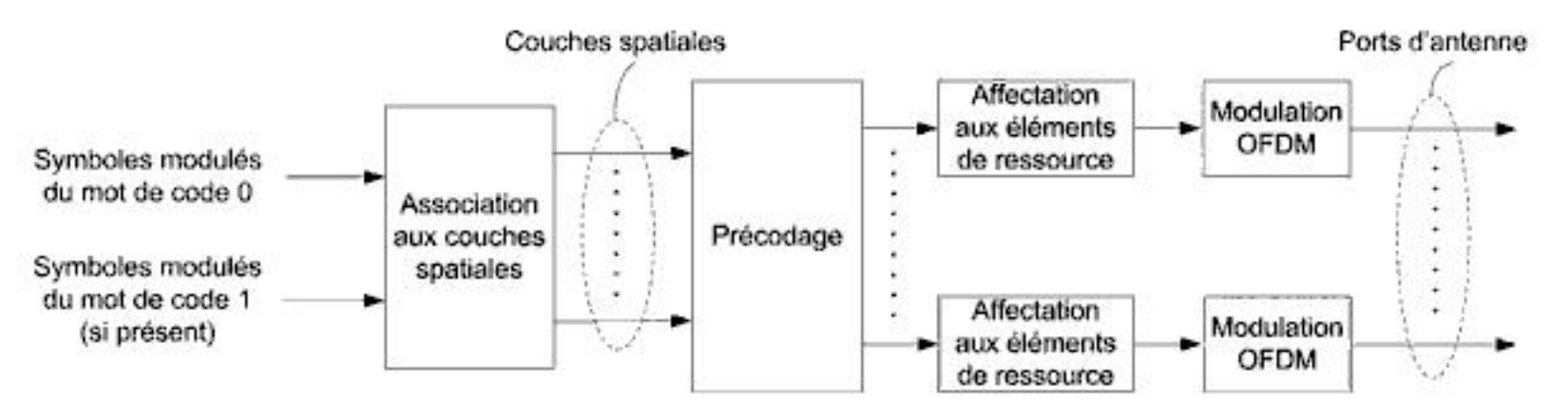


Figure 5-4
Grandes étapes du traitement MIMO dans la chaîne d'émission

Éléments sous droits d'auteur

Les opérations d'association aux couches spatiales et de précodage définies pour la voie descendante seront décrites pour chaque technique à la section « Schémas MIMO normalisés en voie descendante » (p. 135), tandis que les schémas MIMO utilisables en voie montante seront décrits à la section « Schémas MIMO possibles en voie montante », p. 142. Dans le reste de cette section, nous introduisons des définitions utiles pour comprendre les spécifications du MIMO en LTE.

Mot de code ou bloc de transport ?

Avant d'aller plus loin, il est nécessaire de clarifier la signification du terme *mot de code* (*codeword*), utilisé dans les spécifications de la couche physique. On note que ce mot de code constitue le bloc de données d'entrée de la chaîne de traitement MIMO à l'émission décrite sur la figure précédente. En réalité, le mot de code n'est autre que la version embrouillée et modulée du mot de code délivré en sortie de la chaîne de codage de canal décrite au chapitre 4. L'information qu'il contient est donc celle du bloc de transport associé. Néanmoins, les spécifications de la couche physique emploient également le terme de bloc de transport, aussi est-il important de comprendre quand utiliser l'un ou l'autre.

Comme nous le verrons à la section « Schémas MIMO normalisés en voie descendante » (p. 135), le multiplexage spatial en LTE gère la transmission jusqu'à deux blocs de transport sur les mêmes ressources temps-fréquence. Les blocs de transport sont numérotés de 1 à 2.

Les mots de code, eux, sont numérotés de 0 à 1. Le mot de code 0 est toujours activé pour la transmission du PDSCH, tandis que le mot de code 1 n'est activé que lorsque la transmission est de rang 2. Un mot de code est un conteneur, qui peut porter l'information du bloc de transport 1 ou celle du bloc de transport 2. Il est ainsi possible d'affecter les blocs de transport 1 et 2 aux mots de code 0 et 1, ou aux mots de code 1 et 0, respectivement. En outre, dans le cas où seul un des blocs doit être retransmis, la retransmission utilise toujours le mot de code 0, quel que soit le mot de code utilisé par le bloc de transport lors de la transmission initiale. Nous reviendrons sur cette fonctionnalité à la section « Association entre mots de code et couches spatiales », p. 137.

Nombre d'antennes et signaux de référence

Nombre d'antennes prises en charge

Le LTE Release 8 gère 1, 2 et 4 antennes d'émission pour toutes les techniques MIMO en mode FDD et pour la diversité de transmission et le multiplexage spatial en TDD. Le beamforming peut quant à lui être mis en œuvre en TDD pour un nombre quelconque d'antennes.

Le nombre d'antennes de réception n'est pas spécifié, mais le LTE gère jusqu'à 4 couches spatiales en voie descendante, ce qui signifie que le système tire parti des capacités de l'UE pour du multiplexage spatial jusqu'à 4 antennes de réception.

Le nombre d'antennes prises en charge est étroitement lié aux signaux de référence, qui permettent à l'UE d'estimer le canal de transmission. Cette dernière sert deux objectifs : le retour d'information sur l'état du canal à l'eNodeB et la démodulation.

Éléments sous droits d'auteur

MIMO et signaux de référence

Nous avons vu qu'en FDD l'UE doit retourner une information sur l'état de son canal à l'eNodeB. Pour ce faire, il estime le canal entre chaque antenne d'émission et chaque antenne de réception à l'aide de signaux de référence propres à chaque antenne d'émission. Le nombre maximal d'antennes gérées est par conséquent conditionné par l'existence dans les spécifications des signaux de référence, ainsi que des structures de retour associées. En Release 8, les signaux de référence adaptés au FDD sont spécifiques à la cellule et sont appelés CRS (*Common Reference Signals*). Ces signaux sont également utilisés pour la démodulation. Comme ils ne sont pas précodés alors que les symboles de données le sont, l'eNodeB doit signaler à l'UE (dans le PDCCH) la matrice de précodage utilisée à l'émetteur. Les matrices de précodage utilisables par l'eNodeB sont donc contraintes à appartenir à un ensemble restreint spécifié (appelé *dictionnaire*, comme nous le verrons par la suite). À partir de la connaissance du précodage appliqué et de l'estimation du canal de transmission, l'UE reconstruit le canal équivalent effectivement vu par les données, afin de les démoduler.

En TDD, l'eNodeB peut estimer le canal de l'UE en voie descendante à l'aide des signaux reçus de l'UE en voie montante, via la propriété de réciprocité du canal que nous avons déjà évoquée. De ce fait, l'UE n'a pas besoin en TDD de remonter d'information sur l'état de son canal, ni de connaître le nombre exact d'antennes en émission, sous réserve que :

- toutes les antennes utilisent le même signal de référence ;
- ce signal de référence soit précodé de la même manière que les données, donc qu'il soit *spécifique à l'UE* ;
- les chaînes radiofréquence de réception et d'émission de l'eNodeB sur les différentes antennes soient calibrées, afin de ne pas altérer la réciprocité du canal entre voie montante et voie descendante (voir le chapitre 3). La calibration n'est pas nécessaire en FDD, puisque l'information sur le canal en voie descendante que l'UE retourne à l'eNodeB prend en compte les effets des chaînes radiofréquence.

Le canal estimé par l'UE lors de la démodulation est alors le canal équivalent résultant de la combinaison du canal de propagation et du précodage appliqué par l'eNodeB. L'eNodeB n'a dans ce cas pas besoin d'indiquer à l'UE le précodage effectivement utilisé à l'émission. Ce mode de transmission est applicable pour une seule couche spatiale en Release 8 ; le multiplexage spatial en TDD ne peut donc être mis en œuvre via la réciprocité du canal et doit s'appuyer sur le retour d'informations de l'UE, ainsi que sur les signaux de référence spécifiques à la cellule CRS. De même, la diversité de transmission en TDD nécessite de s'appuyer sur les CRS.

Les signaux de référence seront détaillés au chapitre 7.

Notion de port d'antenne

La norme LTE utilise la notion de *port d'antenne* plutôt que celle d'antenne. Un port d'antenne est associé à un signal de référence qui permet de le distinguer, mais il peut être transmis via plusieurs antennes physiques, que l'UE n'a pas besoin de distinguer ni de dénombrer. Ainsi, l'eNodeB peut utiliser 8 antennes d'émission pour mettre en œuvre le beamforming en TDD, mais l'UE n'aura besoin de connaître qu'un seul port d'antenne pour effectuer la démodulation associée.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Beamforming et multiplexage spatial en boucle fermée

Le beamforming et le multiplexage spatial (SU- et MU-MIMO) sont mis en œuvre via un même cadre basé sur l'opération de précodage. En effet, le beamforming peut être vu comme un multiplexage spatial où une seule couche est transmise ; à l'inverse, le multiplexage spatial peut être vu comme un double beamforming, chaque faisceau portant une couche spatiale. L'information discriminante dans ce cadre entre beamforming et multiplexage spatial est ainsi le nombre de couches spatiales.

Association entre mots de code et couches spatiales

En fonction du rang du canal, transmis par l'UE à l'eNodeB via l'indicateur de rang RI, le scheduler détermine le nombre de couches spatiales à transmettre à l'UE. L'indication fournie par l'UE n'est interprétée que comme une *recommandation* par le scheduler, qui est libre de transmettre un nombre de couches inférieur au rang. Le nombre de mots de code transmis reste cependant limité à deux, avec la règle d'association entre mot de code et couche spatiale décrit à la figure suivante.

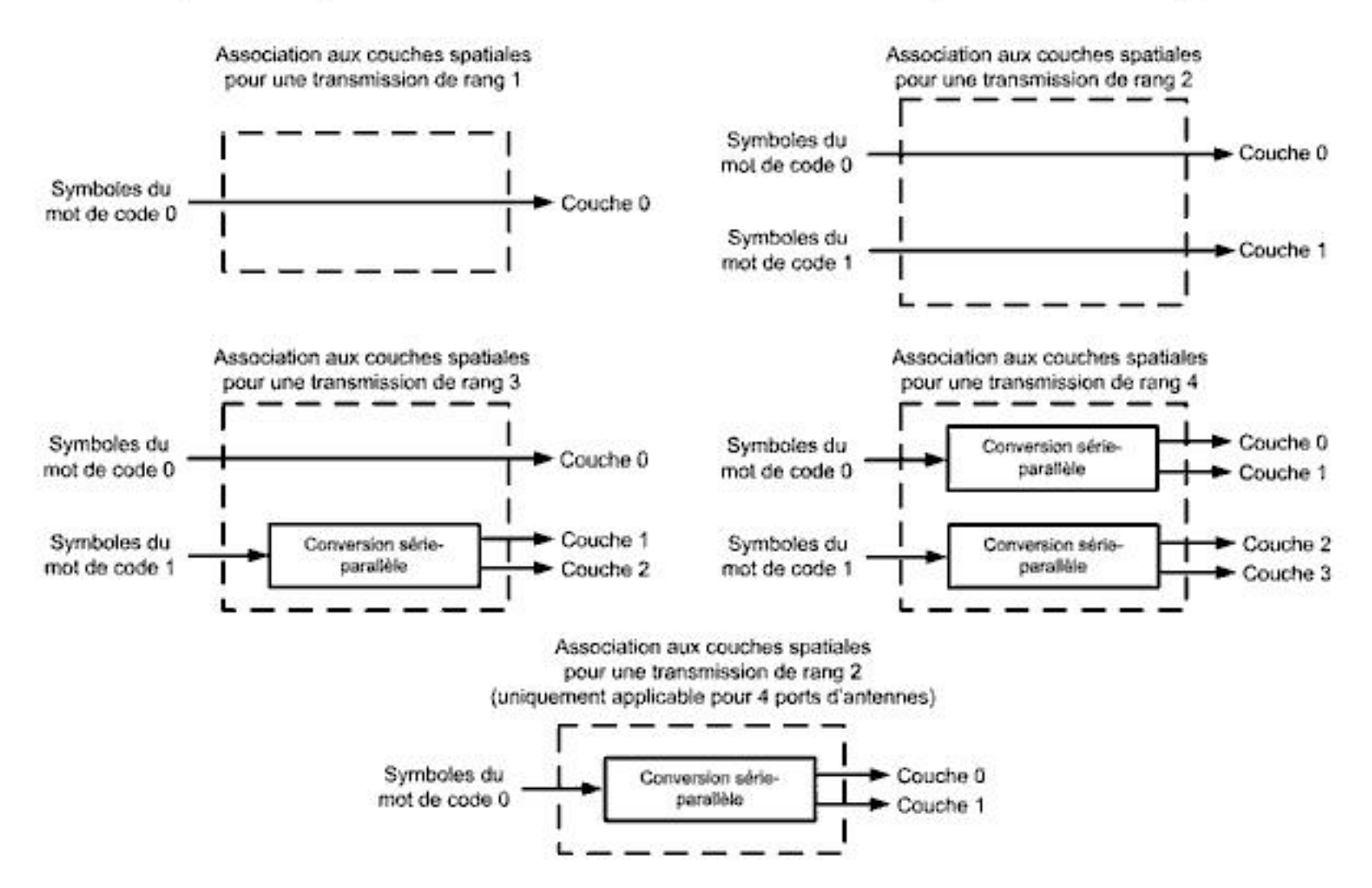


Figure 5-6
Règles d'association entre mots de code et couches spatiales

Limiter le nombre de mots de code à 2 pour 3 et 4 couches permet de réaliser un compromis entre l'efficacité spectrale en voie descendante et la charge de signalisation. En effet, transmettre un mot de code par couche a l'effet bénéfique d'améliorer la sélectivité des retransmissions (si besoin, on

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Principe de la signalisation pour le MIMO

Nous avons vu que l'UE peut retourner un indicateur PMI sur sa matrice de précodage préférée (un seul, quel que soit le rang du canal). En outre, l'UE retourne à l'eNodeB le rang de son canal, via l'indicateur RI. Enfin, lorsque l'UE est configuré pour remonter un PMI, il retourne toujours un CQI par mot de code ; dans le cas contraire, un seul CQI est retourné.

Lorsqu'un précodage en boucle fermée est appliqué à l'émission, l'eNodeB signale à l'UE le PMI et le nombre de couches effectivement utilisés pour la transmission. Cette information est transmise dans le PDCCH portant l'allocation du PDSCH. En TDD, la réciprocité du canal et l'utilisation d'un signal de référence spécifique à l'UE permettent de s'affranchir de cette signalisation (voir la section « Nombre d'antennes et signaux de références », p. 133). Dans le cas du MU-MIMO, l'eNodeB indique de plus dans le PDCCH une réduction de 3 dB de la puissance du PDSCH lorsque l'UE est multiplexé avec un autre sur les mêmes ressources, la puissance d'émission disponible devant être partagée entre les deux.

La signalisation et les différents modes de retour d'information pour le MIMO seront détaillés au chapitre 12.

Multiplexage spatial en boucle ouverte

Lorsque la vitesse de déplacement de l'UE ne garantit plus des remontées fiables de PMI, le LTE permet un mode de multiplexage spatial dit *en boucle ouverte*, où l'UE remonte uniquement le rang du canal et un CQI pour le mot de code 0, quel que soit le rang du canal.

Afin d'assurer plus de diversité, on a recours à une méthode appelée *diversité de retard cyclique* (CDD, pour *Cyclic Delay Diversity* en anglais), qui consiste à introduire un retard différent sur chaque antenne d'émission. Ce retard dans le domaine temporel revient à créer des trajets virtuels dans le canal, ce qui se traduit par de la sélectivité en fréquence, source de diversité. Le retard sur chaque antenne est spécifié dans [3GPP 36.211, 2009, section 6.3.4] par un déphasage linéaire en fréquence sur chaque sous-porteuse. L'application de ce déphasage est effectuée comme une étape de l'opération de précodage, où un précodeur supplémentaire dépendant de la sous-porteuse est ajouté.

Pour deux antennes d'émission, la matrice de précodage est fixée à la matrice identité. Dans le cas de 4 antennes d'émission, la matrice de précodage appliquée varie de façon cyclique, de telle sorte que 4 précodeurs différents sont appliqués cycliquement, un même précodeur restant appliqué à N sous-porteuses consécutives, où N est le nombre de couches spatiales de la transmission. Cette diversité de précodage fournit un gain appréciable pour les UE en forte mobilité [Samsung, 2008].

Un seul CQI est remonté par l'UE dans le cas de la CDD. En effet, le récepteur MMSE-SIC, qui demande de retourner un CQI par mot de code, n'est typiquement pas applicable dans les scénarios de forte mobilité car le CQI remonté pour le premier mot de code n'est pas assez fiable pour lui assurer de bonnes performances. Dans ces conditions, il est préférable de mettre en œuvre un égaliseur MMSE linéaire. Comme ce dernier offre le même SINR aux différentes couches spatiales en CDD, le même MCS est employé pour chaque mot de code ; retourner un CQI pour un seul des mots de code est donc suffisant.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

[3GPP MIMO, 2007] MIMO Ad-hoc session, *Text Proposal for TS36.211 for 4-Tx Antenna SU-MIMO Codebook*, Contribution R1-073206, 3GPP TSG RAN WG1 #49bis, juin 2007.

[Beverage, Peterson, 1931] H. H. Beverage and H. O. Peterson, *Diversity Receiving System of R.C.A. Communications, Inc., for Radiotelegraphy*, Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1931.

[Ericsson, 2007] Ericsson, *4 Tx Precoding Codebooks for Polarized Antenna Setup in LTE DL*, Contribution R1-073045, 3GPP TSG RAN WG1 #49bis, juin 2007.

[Gesbert *et al.*, 2007] D. Gesbert, M. Kountouris, R. W. Heath, C.-B. Chae, T. Sälzer, *Shifting the MIMO Paradigm*, IEEE Signal Processing Magazine, septembre 2007.

[Golub, Van Loan, 1996] G. H. Golub, C. F. Van Loan, *Matrix Computations*, 3e édition, The Johns Hopkins University Press, 1996.

[Nokia, 2006] Nokia, *Impact of the maximum number of codewords on the 4x4 LTE system performance*, Contribution R1-062829, 3GPP TSG RAN WG1 #46bis, octobre 2006.

[Nokia Siemens Networks, Nokia, 2008] Nokia Siemens Networks, Nokia, *Considerations on SC-FDMA and OFDMA for LTE-Advanced Uplink*, Contribution R1-084319, 3GPP TSG RAN WG1 #55, novembre 2008.

[Nokia Siemens Networks, Nokia, 2009] Nokia Siemens Networks, Nokia, *Comparing performance, complexity and latency of SC-FDMA SIC and OFDM MLD*, Contribution R1-090232, 3GPP TSG RAN WG1 #55bis, janvier 2009.

[Samsung, 2008] Samsung, *Open-Loop SM for High-speed UEs*, Contribution R1-080052, 3GPP TSG RAN WG1 #51bis, janvier 2008.

[Texas Instruments, 2006] Texas Instruments, *Codebook Design for E-UTRA MIMO Pre-coding*, Contribution R1-062650, 3GPP TSG RAN WG1 #46bis, octobre 2006.

[Texas Instruments, 2007] Texas Instruments, *Further Details on Codebook-Based Pre-coding for E-UTRA*, Contribution R1-070270, 3GPP TSG RAN WG1 #47bis, janvier 2007.

[Tse, Viswanath, 2005] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005.

[Visoz *et al.*, 2010] R. Visoz, A. O. Berthet, M. Lalam, *Semi-Analytical Performance Prediction Methods for Iterative MMSE-IC Multiuser MIMO Joint Decoding*, IEEE Transactions on Communications, septembre 2010.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

En pratique, l'IDFT est assurée par une transformée de Fourier rapide inverse (*IFFT*, pour *Inverse Fast Fourier Transform*), qui permet une implémentation de faible complexité dans les circuits réalisant les fonctions élémentaires pour le traitement du signal [Golub, Van Loan, 1996].

Pour éviter qu'ils s'interfèrent, on laisse entre deux symboles OFDM consécutifs un intervalle de garde, qui absorbe les répliques du signal dues aux trajets multiples. En réalité, au lieu d'un intervalle de garde vide, on recopie la fin du symbole OFDM à son début, formant ainsi ce qu'on appelle un *préfixe cyclique* (CP). En plus d'effectivement supprimer l'interférence entre symboles OFDM, le CP fait apparaître le signal comme périodique (ou cyclique) sur l'horizon temporel formé du CP et du symbole OFDM. On peut montrer que cette dernière propriété a l'effet bénéfique de pouvoir exprimer le filtrage du symbole OFDM par le canal comme la multiplication dans le domaine fréquentiel du symbole porté par chaque sous-porteuse par un scalaire complexe égal à la réponse en fréquence du canal sur cette sous-porteuse [Tse, Viswanath, 2005]. Ainsi, le CP assure l'orthogonalité entre sous-porteuses dans le domaine fréquentiel, en assurant que le signal reçu sur une sous-porteuse contient uniquement une contribution du symbole émis sur cette même sous-porteuse, sans contribution des symboles émis sur les sous-porteuses adjacentes. Dans le domaine temporel, le CP donne les moyens au récepteur de récupérer l'intégralité du signal utile porté par chaque trajet du canal dans la fenêtre de traitement de la FFT (voir plus loin pour une description du démodulateur OFDM), comme illustré à la figure suivante. De même, il permet à la transmission de tolérer des erreurs de synchronisation en temps. Pour remplir ces rôles, le CP doit être dimensionné pour avoir une durée supérieure à la dispersion des retards du canal dans l'environnement considéré. Le préfixe cyclique est supprimé à la réception, puisqu'il ne porte pas d'information additionnelle par rapport à la partie utile du symbole OFDM. On note que le prix à payer pour les avantages offerts par le préfixe cyclique est une transmission d'énergie qui ne porte pas d'information, mais occupe des ressources radio qui ne peuvent donc pas être allouées à une transmission de données.

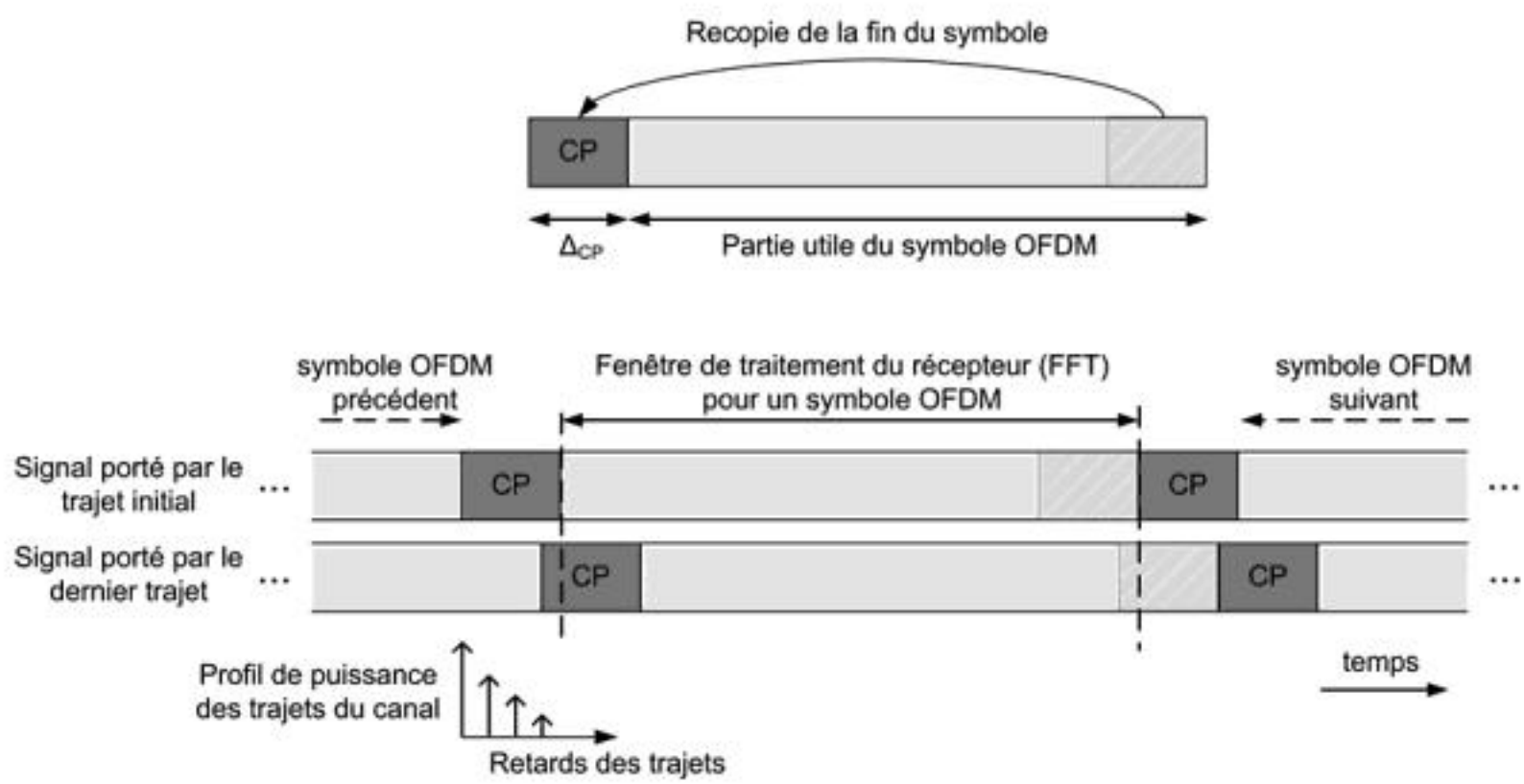


Figure 6-2
Illustration de la protection contre l'interférence entre symboles OFDM assurée par le préfixe cyclique

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

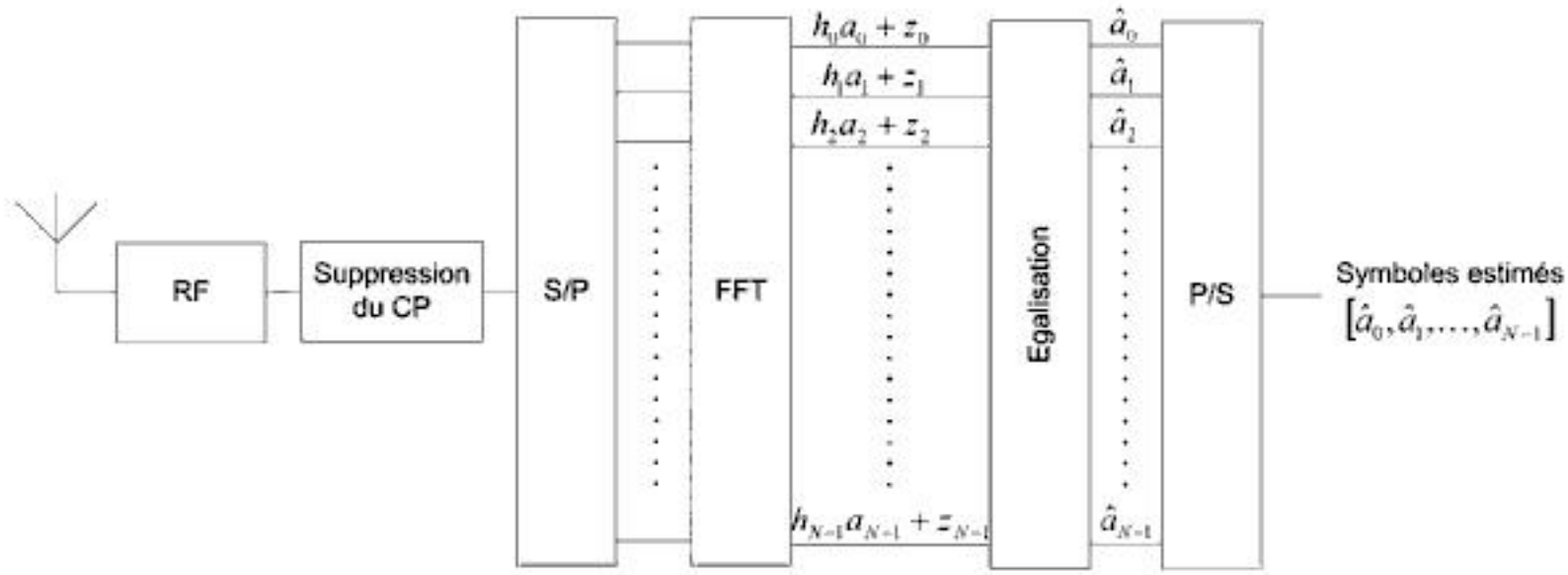


Figure 6-5
Schéma de principe d'un démodulateur OFDM

Du fait des spécificités de la modulation OFDM, des fonctions d'estimation du canal et de synchronisation spécifiques doivent être mises en œuvre. Le lecteur intéressé pourra, par exemple, se reporter à la référence [Li, Stüber, 2006] pour plus d'informations sur ces aspects.

Synthèse des avantages de l'OFDM

Les avantages de l'OFDM sont les suivants.

- *Flexibilité de déploiement sur différentes largeurs de bande* : l'OFDM s'adapte à différentes largeurs de bande en variant le nombre de sous-porteuses (et donc la taille de la FFT/IFFT et la période d'échantillonnage), les autres paramètres restant identiques. Cette propriété est bénéfique en termes d'adaptabilité à des disponibilités de spectre variées à travers différentes régions du globe.
- *Gestion de très larges bandes* : en transmission monoporteuse, la durée d'un symbole d'information est grossièrement égale à l'inverse de la largeur de bande occupée par la transmission [Proakis, 2000]. Pour une bande de 20 MHz, la durée du symbole en transmission monoporteuse devrait donc être de l'ordre de 50 nanosecondes, soit quatre fois moins que la durée d'un symbole élémentaire en UMTS (appelé chip) [3GPP 25.201, 2008]. Réduire la durée symbole augmente la longueur de la réponse impulsionnelle du filtre équivalent au canal de transmission ainsi que le nombre de trajets distinguables et, par là, l'interférence entre symboles et la sélectivité en fréquence du canal (voir le chapitre 3). Cela rend alors plus complexe l'égalisation dans le domaine temporel. En OFDM, l'orthogonalité entre les sous-porteuses supprime l'interférence entre symboles et l'égalisation s'effectue aisément dans le domaine fréquentiel.
- *Prise en charge du scheduling adaptatif en fréquence* : lorsqu'un utilisateur n'occupe pas toute la largeur de bande du système, l'OFDM permet de lui allouer sélectivement des sous-porteuses où la réponse en puissance du canal est forte, de manière à maximiser sa qualité de canal. Le scheduling adaptatif en fréquence sera détaillé au chapitre 10.
- *Adéquation au MIMO* (voir le chapitre 5) : grâce à l'absence d'interférence entre symboles, l'OFDM offre au MIMO de meilleures performances que le CDMA à récepteur équivalent, typiquement basé

Éléments sous droits d'auteur

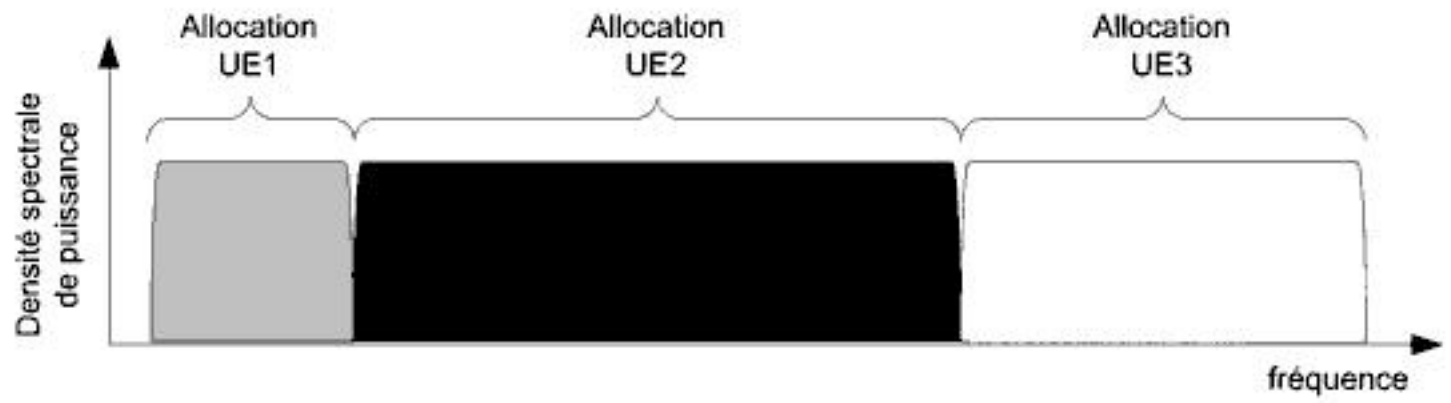
You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

la contrainte d'être toutes contiguës. Le précodage DFT et la contrainte de contiguïté ont pour effet de restaurer la propriété de transmission monoporteuse. On peut s'en convaincre aisément dans le cas où la DFT serait effectuée sur toute la bande du système ; dans ce cas, la cascade des opérations de DFT puis d'IFFT est équivalente à l'identité. Dans le cas d'une largeur de bande de DFT plus petite que celle du système, le SC-FDMA crée une transmission monoporteuse occupant le bloc de ressources alloué, comme illustré à la figure ci-dessous. On appelle ainsi cette variante de l'OFDM le FDMA monoporteuse ou SC-FDMA (pour *Single Carrier-FDMA*), ou encore le *DFT-Spread OFDM* qui signifie littéralement *OFDM étalée par DFT*. Dans le cas où la taille du bloc d'entrée (M) est inférieure à celle du bloc de sortie (N), un symbole transmis à un instant donné n'est cependant plus nécessairement égal à l'un des symboles d'entrée : en effet, on montre que sur le bloc de N symboles de sortie, N-M symboles sont alors une combinaison linéaire de l'ensemble des symboles du bloc d'entrée [Myung *et al.*, 2006].

Figure 6-9
Partage de la bande du système entre plusieurs UE en SC-FDMA



Propriétés et spécificités du SC-FDMA

Étant donné que dans le cas général un UE ne transmet pas sur l'ensemble de la bande du système en voie montante, un symbole transmis dans le domaine temporel est, la plupart du temps, une combinaison linéaire des symboles du bloc d'entrée. De ce fait, la métrique cubique du SC-FDMA n'est pas identique à celle d'une modulation monoporteuse conventionnelle, mais est située entre cette dernière et la métrique cubique de l'OFDM [Myung *et al.*, 2006]. Cette réduction de métrique cubique permet néanmoins d'améliorer l'efficacité énergétique de l'amplificateur de puissance et de réduire son coût par rapport à l'emploi de l'OFDM.

En revanche, le SC-FDMA conserve la plupart des propriétés utiles de l'OFDM :

- possibilité d'effectuer du scheduling adaptatif en fréquence, puisque la transmission peut être localisée sur les sous-porteuses où l'UE bénéficie d'une bonne qualité de canal ; la flexibilité d'allocation de ressources est cependant réduite, puisque les sous-porteuses ont la contrainte d'être contiguës ;
- facilité de l'égalisation dans le domaine fréquentiel, grâce au préfixe cyclique et au traitement par sous-porteuse réduit à une multiplication complexe ;
- agilité de l'application à différentes largeurs de bande ;
- possibilité d'adresser des allocations de ressources de tailles variables ;
- possibilité de multiplexage en fréquence de plusieurs UE.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

7

Signaux de référence

Sommaire : *Signaux de référence en voie descendante – Signaux de référence en voie montante – Contraintes de conception*

Les signaux de référence sont une composante clé de la performance d'un système radio mobile. Leur conception est étroitement liée au MIMO ainsi qu'au schéma de modulation multiporteuse. Ce chapitre présente les signaux de référence normalisés en LTE pour les voies descendante et montante.

Les signaux de référence (RS, pour *Reference Signals*), aussi appelés *pilotes*, sont des signaux connus à l'avance du récepteur qui permettent à l'UE d'estimer son canal et, plus généralement, d'effectuer les différentes mesures définies au niveau de la couche physique. Parmi ces dernières, on distingue en particulier la puissance reçue sur les signaux de référence (RSRP, pour *Reference Signals Received Power*) et la qualité du signal reçu sur les signaux de référence (RSRQ, pour *Reference Signals Received Quality*), dont la définition est donnée dans [3GPP 36.214, 2009].

PRÉCISION Principe de l'estimation de canal

Supposons qu'une seule antenne d'émission est active pour transmettre un élément de ressource k portant un signal de référence. Nous avons vu à la section « Représentation mathématique du signal » du chapitre 3, p. 71, que le signal reçu sur cet élément de ressource peut s'écrire comme suit, où l'indice $_k$ indique la dépendance à l'élément de ressource k et les autres notations sont celles du chapitre 3 :

$$\mathbf{r}_k = \sqrt{P}\mathbf{h}_k a_k + \mathbf{z}_k$$

Si a_k est un symbole de référence, *donc connu* du récepteur, ce dernier est en mesure d'estimer le canal en appliquant la relation suivante, où nous supposons que le symbole a_k est de module unité :

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \mathbf{r}_k a_k^* = \sqrt{P}\mathbf{h}_k + \mathbf{z}_k a_k^*$$

.../...

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

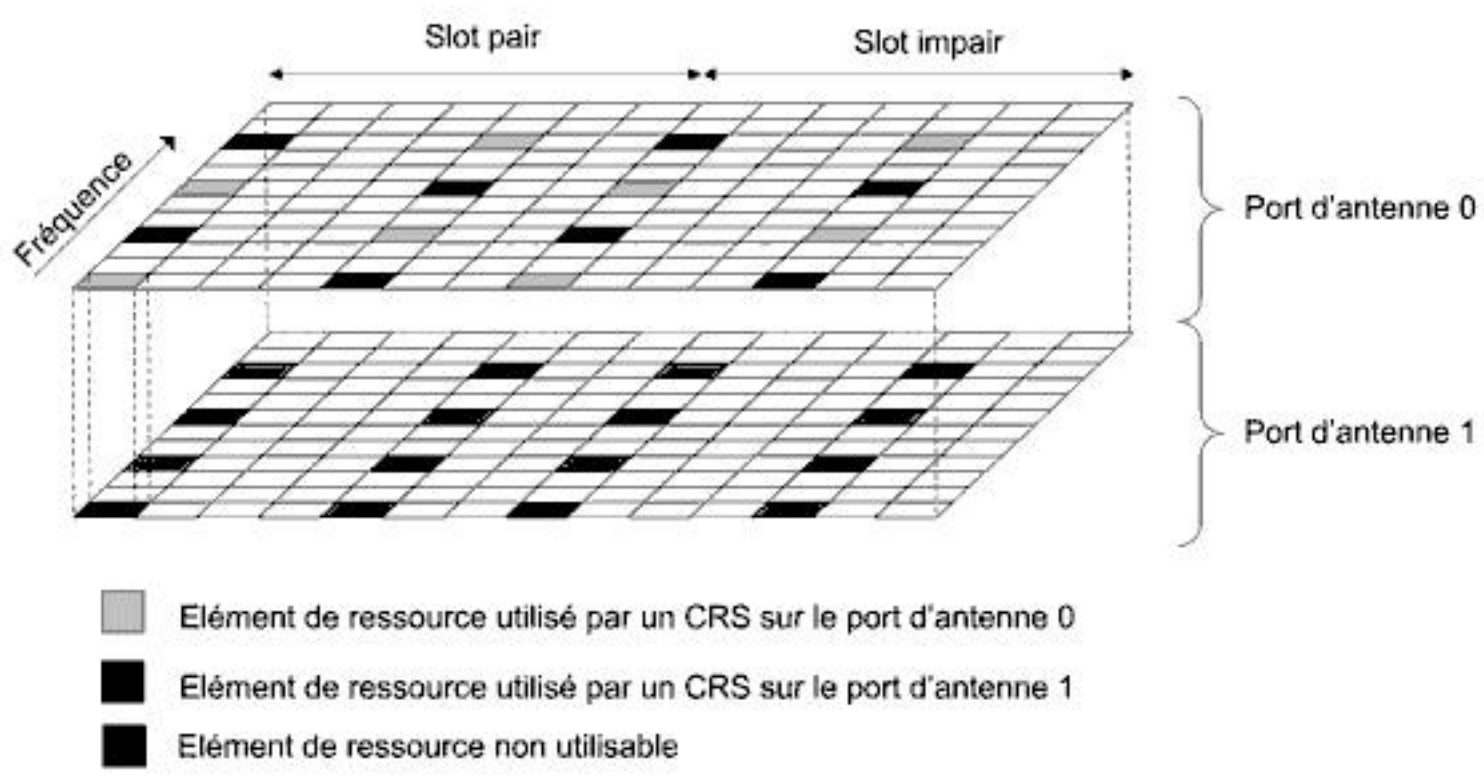
You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

La séparation dans le domaine temporel des éléments de ressource occupés par un signal de référence conditionne la capacité à poursuivre les variations temporelles du canal, tandis que leur séparation dans le domaine fréquentiel détermine la sélectivité en fréquence de l'estimation du canal. Enfin, la densité des éléments de ressource dédiés aux signaux de référence affecte la précision de l'estimation, comme indiqué en introduction de ce chapitre. Cependant, les ressources utilisées pour les signaux de référence ne peuvent pas être utilisées pour transmettre des données, ce qui représente une perte d'efficacité spectrale pour le système. Le motif d'un signal de référence doit donc réaliser un compromis entre la précision de l'estimation du canal et la perte de ressources pour la transmission de données.

Le motif normalisé est optimisé pour une vitesse de 120 km/h et reste fonctionnel pour de très hautes vitesses (par exemple, 350 km/h) [Motorola, 2007] tout en permettant de suivre les variations du canal en fréquence pour la majeure partie des environnement de propagation attendus (par exemple, urbain, rural). La densité de CRS dans la dimension temporelle, et donc la capacité de poursuite des variations du canal, sont moindres pour quatre ports d'antenne que pour deux ports. En effet, quatre antennes sont mieux adaptées aux environnements de faible mobilité, plus favorables au SU-MIMO en raison de la meilleure précision de l'information disponible à l'eNodeB sur le canal de l'UE (voir le chapitre 5). Le taux de perte de ressources (*overhead* en anglais) dû aux CRS est de 9,5 % et 14,3 % pour le CP normal, respectivement pour deux et quatre ports d'antenne.

Pour une transmission MIMO basée sur des CRS, le récepteur doit estimer un canal par antenne d'émission. Il existe dans ce cas un motif par port d'antenne, la transmission de données sur un port étant interdite sur les éléments de ressource occupés par les CRS d'un autre port afin d'éviter l'interférence sur les CRS, comme illustré à la figure suivante.

Figure 7-2
Disponibilité des éléments de ressource dans le cas de deux ports d'antenne CRS



Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Dans le domaine temporel, la propriété d'autocorrélation circulaire nulle permet de séparer les différents trajets multiples du canal, comme illustré à la figure suivante. Dans cette figure, $h_j^{(n)}$ est le coefficient du trajet j du canal de l'UE n.

De même, les signaux de référence de différents UE d'une même cellule peuvent être séparés en leur allouant une même séquence avec différents décalages cycliques, à condition que l'écart entre les décalages soit plus grand que la dispersion des retards du canal. La figure suivante représente également cet usage des séquences de Zadoff-Chu : l'UE 2 utilise une version décalée cycliquement de la séquence de l'UE 1, avec un décalage supérieur à la dispersion des retards du canal.

L'utilisation de décalages cycliques d'une même séquence crée une *zone de corrélation nulle* de la séquence de Zadoff-Chu, de largeur N_{CS}-1 échantillons, où N_{CS} est l'écart entre deux décalages cycliques consécutifs. En effet, si un trajet du canal d'énergie significative arrive avec un retard égal où supérieur à N_{CS} échantillons, il sera interprété par le récepteur comme un trajet de l'UE utilisant le décalage cyclique suivant, ce qui créera de l'interférence pour l'estimation de canal de cet UE. Les décalages cycliques doivent donc être attribués avec soin.

L'autocorrélation circulaire nulle est ainsi une propriété fondamentale pour la conception de la voie montante du LTE. On notera que la présence du préfixe cyclique lors de la transmission SC-FDMA (voir le chapitre 6) assure que la corrélation mise en œuvre au récepteur est circulaire en présence de trajets multiples.

L'intercorrélation circulaire entre deux séquences de Zadoff-Chu s'écrit :

$$\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} z_n^{(q)} z_{(n+\alpha) \bmod N}^{(p)*} = \frac{1}{\sqrt{N}} \text{ pour } q \neq p \text{ et tout } \alpha$$

Une faible intercorrélation circulaire entre deux séquences de même longueur assure une bonne estimation du canal en présence d'interférence d'UE d'autres cellules. Notons que cette faible intercorrélation n'est *garantie* que si N est un nombre premier, ce qui, comme nous allons le voir, n'est pas le cas en LTE.

La DFT d'une séquence de Zadoff-Chu étant elle-même une séquence de Zadoff-Chu, la séquence composant le signal de référence peut être créée directement dans le domaine fréquentiel, sans opération de précodage DFT. Dans le domaine fréquentiel, le décalage cyclique devient une rampe de phase, c'est-à-dire une multiplication de chaque échantillon de la séquence par $e^{j\alpha n}$, où α caractérise le décalage cyclique (temporel) et n est le numéro de la sous-porteuse. C'est de cette manière qu'est décrite la génération de la séquence de Zadoff-Chu dans les spécifications [3GPP 36.211, 2009, section 5.5.1].

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Ce décalage supplémentaire permet de faire en sorte que les DMRS des PUSCH de cellules contrôlées par le même eNodeB utilisent le même groupe à chaque slot (à condition que ces cellules aient le même motif de saut de groupe, ou que celui-ci soit désactivé). Dans ce cas en effet, les DMRS d'UE de cellules voisines recevant les mêmes allocations sur le PUSCH peuvent utiliser la même séquence de base en étant séparés par des décalages cycliques différents, leur assurant ainsi l'orthogonalité.

Pour le PUSCH, dans le cas de la planification de réseau, il est possible d'apporter un peu de caractère aléatoire à l'interférence intercellulaire à l'intérieur d'une même sous-trame en mettant en œuvre un saut de séquence à l'intérieur de chaque groupe (pour les groupes qui comportent deux séquences de chaque longueur). La séquence à utiliser à chaque slot est alors déterminée en fonction d'une séquence pseudo-aléatoire de Gold, dont le générateur est initialisé à chaque trame radio en fonction du PCI et du décalage de séquence associé au PUSCH. Le saut de séquence est configuré par RRC et est uniquement possible si le saut de groupe est désactivé.

Dans le cas du MU-MIMO, assurer l'orthogonalité entre les UE appariés requiert de leur allouer le même nombre de ressources et de les séparer par des décalages cycliques différents. Une alternative peut consister à déterminer pour chaque combinaison de séquences à l'intérieur d'un même groupe quels sont les décalages cycliques qui résultent en une intercorrélation faible, puis à allouer ces décalages cycliques aux UE appariés ; cette alternative est cependant extrêmement complexe à mettre en œuvre, notamment en raison du saut de groupe et de décalage cyclique entre deux slots d'une même sous-trame, qui sont appliqués au PUSCH comme nous allons le voir.

Sur le PUSCH, les DMRS occupent toutes les sous-porteuses allouées à l'utilisateur, sur le quatrième symbole temporel de chaque slot pour le préfixe cyclique normal, et sur le troisième pour le préfixe cyclique étendu, comme décrit à la figure suivante. Les éléments de ressource occupés par les DMRS représentent ainsi respectivement 14,3 % et 16,7 % de chaque PRB alloué pour les préfixes cycliques normal et étendu. Nous utiliserons dans la suite le terme *symbole DMRS* pour désigner un symbole temporel portant les DMRS. On constate que ces symboles sont régulièrement espacés si l'on considère plusieurs sous-trames, optimisant ainsi l'interpolation des estimations du canal afin de poursuivre ses variations dans le temps. La séquence de base ainsi que le décalage cyclique utilisés pour un UE donné varient à chaque slot.

Pour les DMRS sur le PUSCH, le décalage cyclique peut prendre 12 valeurs et est déterminé à la fois par un paramètre signalé par les couches supérieures et par un terme signalé dans le format DCI 0 du bloc de transport associé au PUSCH (afin de permettre le MU-MIMO). De plus, le décalage cyclique varie à chaque slot en fonction d'une séquence pseudo-aléatoire de Gold initialisée à chaque trame radio en fonction de l'identifiant PCI de la cellule et du décalage de séquence associé au PUSCH. Ce saut de décalage cyclique, comme le saut de séquence et de groupe de séquences, donne un caractère aléatoire à l'interférence, afin d'éviter qu'une configuration de DMRS conduisant à une réduction de performances pour un UE particulier se prolonge dans le temps.

Pour le PUCCH, les DMRS sont également transmis uniquement sur les sous-porteuses associées. Le PUCCH utilise donc toujours des séquences de base de longueur 1 PRB. Le nombre de symboles DMRS par slot dépend du format du PUCCH comme décrit dans le tableau suivant. Ces choix ont été effectués sur la base de résultats de simulation comparant les performances de démodulation pour différentes alternatives [Qualcomm, 2007]. Les mécanismes destinés à rendre aléatoire l'interférence

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

8

Format des canaux physiques en voie descendante

Sommaire : *Formats des canaux PDSCH, PBCH, PDCCH, PCFICH et PHICH – Modulation et position dans le plan temps-fréquence des canaux – Définition de la région de contrôle, des REG et CCE – Schémas MIMO pris en charge*

Ce chapitre donne la « carte d'identité » des canaux physiques en voie descendante. L'usage de chaque canal est brièvement rappelé, puis ses caractéristiques de transmission sont détaillées.

Les canaux physiques portent les données utilisateur ainsi que les informations de contrôle nécessaires au fonctionnement de la couche physique. Ce chapitre décrit la manière dont sont transmis les différents canaux physiques en voie descendante et détaille pour chaque canal les caractéristiques suivantes :

- schémas de codage et modulation ;
- modes de multiplexage éventuels, lorsque plusieurs canaux utilisent les mêmes ressources ;
- schémas MIMO possibles ;
- position dans la sous-trame.

Ce chapitre s'appuie principalement sur les spécifications [3GPP 36.211, 2009] et [3GPP 36.212, 2009]. Les canaux physiques pour la voie montante feront l'objet du chapitre 9.

La première section décrit succinctement le format du canal de données PDSCH. La deuxième section s'attache au canal de diffusion PBCH. Enfin, les trois dernières sections détaillent respectivement les formats des canaux de contrôle PDCCH, PCFICH et PHICH. Ces derniers sont construits sur des bases similaires (CCE, REG, distribution des ressources), expliquées à la section « Canal de contrôle en voie descendante (PDCCH) », p. 184.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Les ressources occupées par les canaux de contrôle sont exprimées en termes de *Control Channel Elements* ou CCE, un CCE étant formé de 9 *Ressource Element Groups* ou REG. Les CCE et REG seront définis à la section « REG et CCE », p. 186. Le tableau qui suit donne la taille des différents formats du PDCCH en nombre de REG, de CCE et de bits codés.

Formats du PDCCH

Format du PDCCH	Nombre de CCE	Nombre de REG	Nombre de bits codés du PDCCH
0	1	9	72
1	2	18	144
2	4	36	288
3	8	72	576

Pour un même format de DCI, c'est-à-dire un même nombre de bits d'information, le format 0 est le moins protégé et le format 3, le plus protégé. On utilisera ainsi le format 0 pour des UE dans de bonnes conditions radio, tandis que le format 3 sera réservé aux UE en limite de couverture. Il est naturellement nécessaire d'utiliser le format le plus faible permettant une bonne réception du PDCCH, en raison de la consommation de ressources croissante avec le numéro du format.

Codage de canal

Un CRC de 16 bits est ajouté à la suite de la séquence de bits portant le format de DCI. Le CRC est ensuite embrouillé bit à bit par l'identifiant RNTI de l'UE ou du groupe d'UE visé. Lorsque la sélection d'antenne en voie montante est configurée (voir le chapitre 5) et que le PDCCH porte une allocation de ressources pour la voie montante, le CRC est également embrouillé par un masque de 16 bits indiquant quelle antenne l'UE doit utiliser en émission. La séquence de bits résultante est encodée par le code convolutif décrit au chapitre 4, puis le débit est adapté de la manière associée. La procédure de décodage du PDCCH sera décrite au chapitre 12.

Position dans la sous-trame

Définition de la région de contrôle

Le PDCCH est toujours transmis sur les premiers symboles OFDM de la sous-trame, ce qu'on appelle la *région de contrôle* de la sous-trame. Pour les largeurs de bande supérieures à 10 PRB, la région de contrôle peut occuper 1, 2 ou 3 symbole(s) OFDM. La largeur de la région de contrôle conditionne le nombre de PDCCH pouvant être multiplexés et donc le nombre d'UE pouvant être servis dans une sous-trame.

Pour les petites largeurs de bande (inférieures ou égales à 10 PRB), la région de contrôle peut occuper 2, 3 ou 4 symboles OFDM, soit un symbole OFDM de plus que pour les largeurs de bande supérieures afin de compenser le faible nombre d'éléments de ressource disponibles pour l'information de contrôle dans un symbole OFDM.

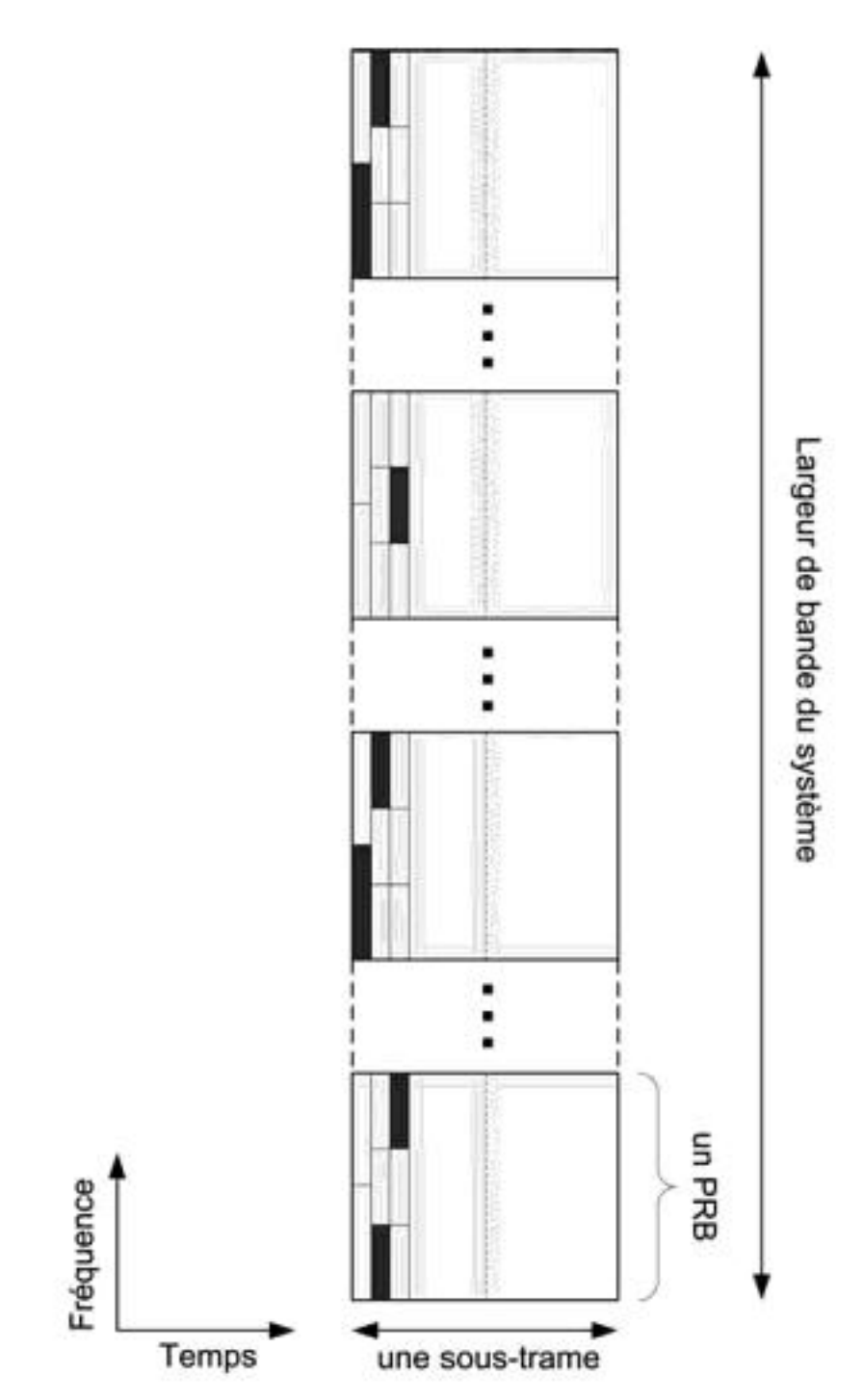
En TDD, la région de contrôle des sous-trames 1 et 6 ne peut occuper que 1 ou 2 symbole(s) OFDM pour les bandes plus larges que 10 PRB et uniquement 2 symboles OFDM pour les bandes de

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Figure 8-4
Exemple de position des REG formant un CCE alloué à la transmission d'un seul PDCCH, pour une région de contrôle de 3 symboles OFDM



Canal indicateur du format de contrôle (PCFICH)

Le PCFICH (*Physical Control Format Indicator CHannel*) porte l'indicateur de format de contrôle (CFI), qui indique à chaque sous-trame descendante (ainsi que dans le champ DwPTS en mode TDD) la taille de la région de contrôle de cette sous-trame, exprimée en nombre de symboles OFDM.

Le CFI peut prendre les valeurs 1, 2 ou 3. Pour les largeurs de bande supérieures à 10 PRB, la taille de la région de contrôle est donnée par la valeur du CFI. Pour les largeurs de bande inférieures ou égale à 10 PRB, la taille de la région de contrôle est donnée par CFI+1 et peut donc prendre les valeurs 2, 3 ou 4 [3GPP 36.212, 2009, section 6.7].

Éléments sous droits d'auteur

Codage de canal, modulation et schéma MIMO

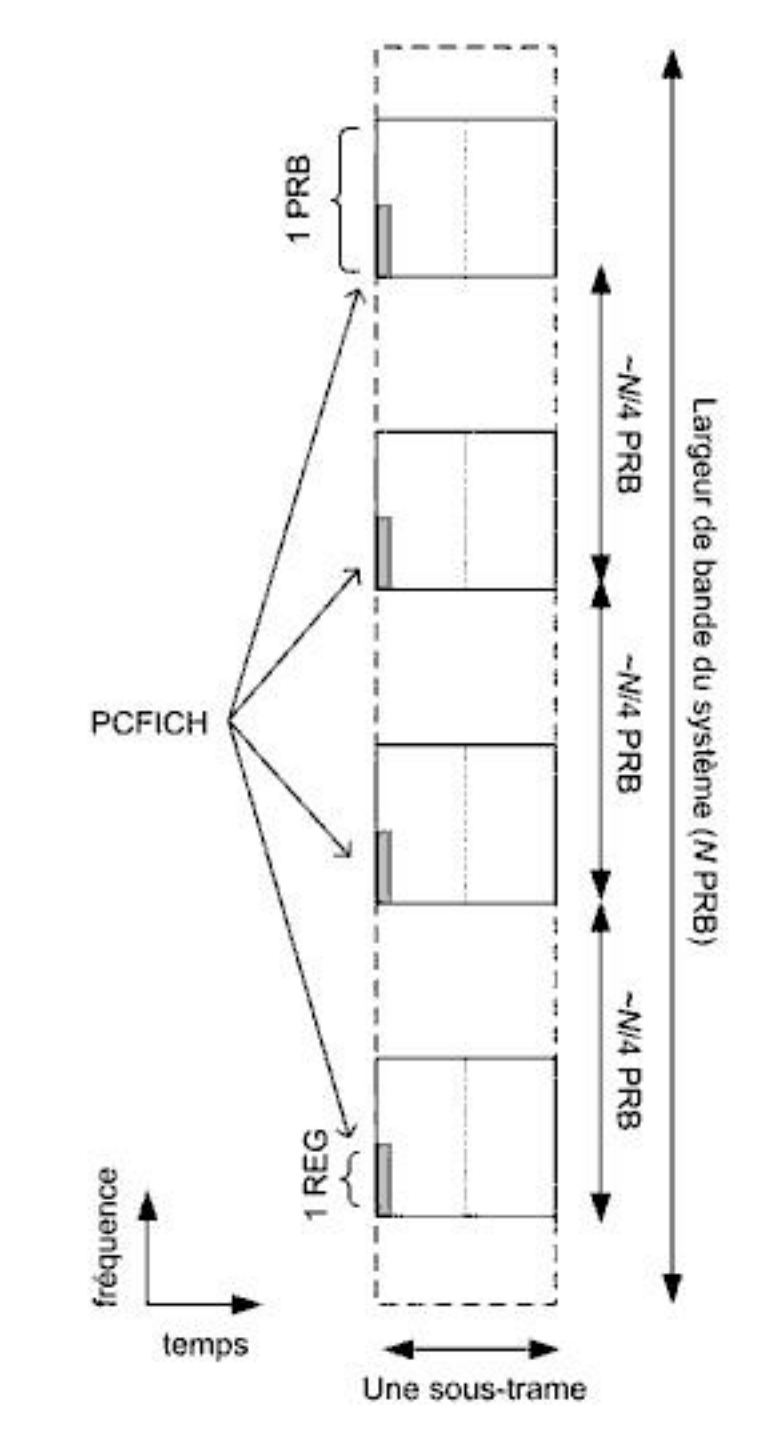
Chaque valeur de CFI est codée par une séquence binaire de longueur 32 [3GPP 36.212, 2009, section 5.3.4], ce qui conduit à un rendement de codage de 1/16 et donc à une forte protection. Les bits résultants sont embrouillés par une séquence spécifique à la cellule, puis modulés en QPSK pour donner 16 symboles modulés.

Le PCFICH est comme le PDCCH transmis sur les mêmes ports d'antenne que ceux utilisés pour le PBCH, à l'aide de la diversité de transmission lorsque plusieurs ports d'antenne sont configurés pour les CRS.

Position dans la sous-trame

La position du PCFICH dans la sous-trame est représentée à la figure suivante.

Figure 8-5
Exemple de position du PCFICH dans la sous-trame



Éléments sous droits d'auteur

Le PCFICH est transmis dans le premier symbole OFDM de la sous-trame, en 4 blocs de 4 symboles QPSK. Chaque bloc de 4 symboles est transmis sur un REG, les 4 REG d'un PCFICH étant régulièrement espacés sur la bande du système afin de fournir de la diversité fréquentielle. La position du REG initial du PCFICH dans la bande (PRB et REG du PRB) est fixée d'après l'identifiant de la cellule [3GPP 36.211, section 6.7.4]. Ainsi, les PCFICH de cellules voisines occupent des REG différents. Ceci permet de rendre aléatoire l'interférence intercellulaire sur le PCFICH, comme pour le PDCCH (voir la section « Transmission du PDCCH », p. 187).

Canal indicateur d'HARQ (PHICH)

Le PHICH (*Physical HARQ Indicator CHannel*) indique à l'UE, de manière dynamique, les ACK/NACK relatifs aux blocs de transport transmis sur la voie montante. Un PHICH est confiné à la région de contrôle d'une sous-trame.

Multiplexage des PHICH de plusieurs UE

Des PHICH d'UE différents peuvent être multiplexés sur les mêmes éléments de ressource, formant ce qu'on appelle un *groupe de PHICH*. La séparation des PHICH au sein d'un groupe s'effectue par des codes orthogonaux.

L'attribution d'une ressource PHICH à un UE donné consiste ainsi en un groupe de PHICH et un numéro de PHICH à l'intérieur du groupe, ce numéro déterminant le code orthogonal à utiliser (voir aussi le chapitre 12).

En FDD, le nombre de groupes de PHICH (et donc le nombre de ressources allouées à la transmission du PHICH) est constant à chaque sous-trame et est décidé de manière propre à la cellule. Ainsi, pour une bande de 10 MHz en FDD, les ressources réservées à la transmission du PHICH dans une sous-trame peuvent représenter 6, 12, 21 ou 39 REG, ces nombres pouvant être lus comme le pourcentage de la largeur de bande occupée si le PHICH est transmis dans le premier symbole OFDM (ce qui est le cas du PHICH de durée normale, qui sera introduit plus loin).

En TDD, le nombre de groupes de PHICH par sous-trame peut varier en fonction de la configuration voie montante/voie descendante et de l'indice de la sous-trame [3GPP 36.211, section 6.9].

Codage de canal, modulation et étalement

Un acquittement est codé par une séquence de 3 bits, tous à « 1 » pour un ACK et tous à « 0 » pour un NACK. Les bits d'un PHICH sont modulés en BPSK.

Les symboles obtenus sont ensuite étalés par le code orthogonal déjà mentionné, de longueur (ou *facteur d'étalement*, SF) SF=4 pour le CP normal et SF=2 pour le CP étendu. Le facteur d'étalement réduit pour le CP étendu est motivé par une sélectivité en fréquence attendue plus importante dans les environnements où il est employé, qui dégraderait l'orthogonalité entre les PHICH d'UE différents pour un facteur d'étalement SF=4. Huit codes sont disponibles pour SF=4 et quatre codes

Éléments sous droits d'auteur

pour SF=2. La moitié de ces codes comporte un déphasage de $\pi/2$, transformant ainsi potentiellement la constellation des symboles portant le PHICH en QPSK. Un groupe de PHICH peut ainsi contenir jusqu'à 8 PHICH pour le CP normal et jusqu'à 4 PHICH pour le CP étendu. La séquence de symboles résultant de l'étalement (de longueur 3×SF) est ensuite embrouillée par une séquence pseudo-aléatoire d'éléments {±1} spécifique à la cellule.

Comme pour le PDCCH, la puissance du PHICH peut être réglée individuellement pour chaque UE.

La séquence transmise pour un groupe de PHICH est la somme des séquences des PHICH de ce groupe. En réception, après désembrouillage de la séquence reçue correspondant au groupe, l'UE récupère son PHICH en corrélant cette séquence avec son code orthogonal. En effet, cette opération annule totalement la contribution des autres PHICH du groupe (à condition qu'il n'y ait pas d'interférence entre sous-porteuses).

Dans le cas du CP étendu, la taille de la séquence obtenue pour un groupe de PHICH (6 éléments) doit être alignée avec la taille d'un groupe de 3 REG (12 RE). Ceci est effectué en insérant des paires de zéros entre chaque paire de symboles consécutifs, une paire de zéros supplémentaire étant ajoutée à la fin de la séquence pour les groupes de PHICH de numéro pair, et au début de la séquence pour les groupes de numéro impair. Ainsi, la position des éléments non nuls d'un groupe de numéro pair correspond à la position de zéros d'un groupe de numéro impair, et vice-versa. Ceci permet de multiplexer deux groupes de PHICH sur le même ensemble de 3 REG pour le CP étendu, en additionnant leurs séquences de symboles respectives.

Dans le cas du CP normal, chaque groupe de PHICH occupe des ressources exclusives.

Position dans la sous-trame

Chaque groupe de PHICH est transmis sur trois REG non attribués au PCFICH et régulièrement espacés sur la largeur de bande du système, afin de bénéficier de la diversité en fréquence. La position du REG de départ est fixée en fonction de l'identifiant de la cellule, de manière à rendre l'interférence intercellulaire sur le PHICH aléatoire, comme pour le PDCCH et le PCFICH. Le numéro du groupe de PHICH détermine les ressources qu'il occupe à partir de ce REG de départ.

Il existe deux durées de PHICH, la configuration selon l'une ou l'autre étant décidée par les couches supérieures. Les PHICH de durée normale sont transmis sur le premier symbole OFDM de la sous-trame, tandis que les PHICH de durée étendue sont transmis sur tous les symboles OFDM de la région de contrôle (les trois premiers lorsque la région de contrôle en comporte quatre), comme illustré à la figure suivante. Notons que seuls les PRB utilisés pour la transmission du PHICH sont représentés sur cette figure ; en particulier, dans le cas (a), les REG du premier symbole OFDM des autres PRB peuvent être utilisés pour la transmission du PCFICH et du PDCCH.

Transmettre le PHICH sur plusieurs symboles OFDM au lieu d'un seul offre plus de flexibilité dans la répartition de la puissance d'émission entre différents canaux. En effet, à nombre total de canaux de contrôle par sous-trame constant, un plus grand nombre de canaux différents est transmis sur un

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Schéma MIMO

Comme les autres canaux de contrôle, le PHICH est transmis à l'aide de la diversité de transmission si plusieurs ports d'antenne sont configurés, les ports utilisés étant obligatoirement les mêmes que ceux utilisés pour le PBCH. Notons que pour 4 ports d'antenne, un schéma de diversité de transmission modifié par rapport à celui présenté au chapitre 5 est utilisé [3GPP 36.211, section 6.9.2].

Références

[3GPP 36.211, 2009] Spécification technique 3GPP TS 36.211, *E-UTRA, Physical channels and modulation*, v8.9.0, décembre 2009.

[3GPP 36.212, 2009] Spécification technique 3GPP TS 36.212, *E-UTRA, Multiplexing and channel coding*, v8.8.0, décembre 2009.

Éléments sous droits d'auteur

Éléments sous droits d'auteur

9

Format des canaux physiques en voie montante

Sommaire : *Format du PUSCH – Multiplexage des données et des informations de contrôle sur le PUSCH – Formats du PUCCH – Modulation, multiplexage et position dans le plan temps-fréquence des canaux*

Nous allons ici donner la « carte d'identité » des canaux physiques en voie montante. L'usage de chaque canal est brièvement rappelé, puis ses caractéristiques de transmission sont détaillées.

Ce chapitre constitue le jumeau du précédent et décrit la manière dont sont transmis les différents canaux physiques, cette fois en voie montante. Les caractéristiques suivantes sont détaillées pour chaque canal physique :

- schémas de codage et de modulation ;
- modes de multiplexage éventuels, lorsque plusieurs canaux utilisent les mêmes ressources ;
- position des ressources en fréquence dans la sous-trame.

Cette description s'appuie principalement sur les spécifications [3GPP 36.211, 2009] et [3GPP 36.212, 2009]. Elle fait appel aux notions de codage de canal exposées au chapitre 4. En outre, les connaissances sur les séquences de Zadoff-Chu présentées au chapitre 7 sont utiles à la compréhension de la mise en œuvre du PUCCH.

Le chapitre est divisé en deux grandes parties : la première section est consacrée au PUSCH, tandis que la seconde section est dédiée au PUCCH.

Éléments sous droits d'auteur

Canal de données en voie montante (PUSCH)

Le canal physique partagé en voie montante PUSCH (*Physical Uplink Shared CHannel*) porte les données du canal de transport UL-SCH. Un PUSCH est confiné à une sous-trame dans le domaine temporel et à un certain nombre de PRB (identique dans chaque slot) dans la dimension fréquentielle, l'attribution de ces ressources à un UE étant décidée par le scheduler (voir le chapitre 10). Notons qu'un UE ne peut transmettre plus d'un PUSCH simultanément.

Lorsque des informations de contrôle doivent être transmises dans une sous-trame où une transmission de PUSCH est prévue, celles-ci sont également transmises sur le PUSCH, multiplexées avec les données UL-SCH. Les données de contrôle peuvent être :

- des informations sur l'état du canal (CQI, PMI, RI) ;
- des acquittements d'HARQ pour les blocs de transport reçus en voie descendante.

Elles peuvent résulter d'une transmission prévue initialement sur le PUCCH ou d'une demande de retour de CQI/PMI apériodique par l'eNodeB (voir le chapitre 12). Il est également possible que le PUSCH ne porte que des données de contrôle, si un retour de CQI/PMI apériodique est demandé par l'eNodeB alors que l'UE n'a pas de données UL-SCH à transmettre.

La figure suivante résume les grandes étapes du traitement d'émission du PUSCH d'un UE.

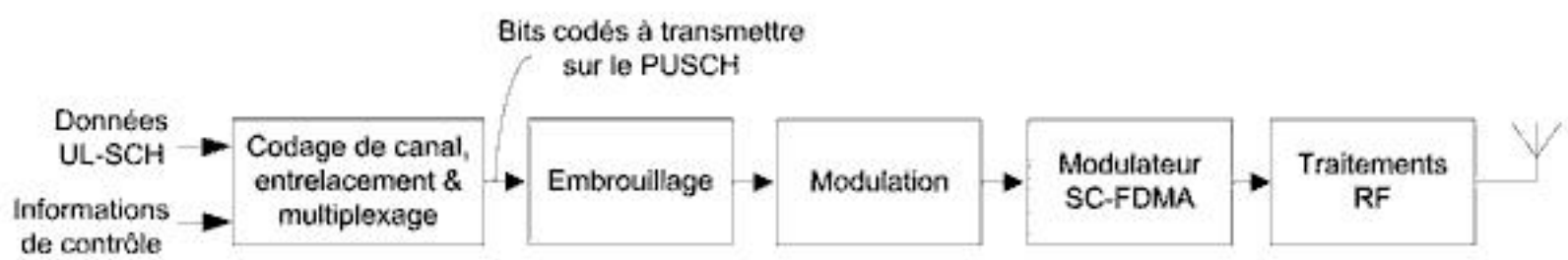


Figure 9-1
Principaux traitements d'émission du PUSCH d'un UE

Ces étapes sont détaillées dans les sections suivantes, à l'exception des traitements radiofréquence (RF), qui sont normalisés via des critères de performances minimales [3GPP 36.101, 2009].

Codage de canal, multiplexage et entrelacement

Le codage de canal s'effectue séparément pour les données UL-SCH et pour les informations d'ACK/NACK, RI et CQI/PMI, chaque type d'information de contrôle étant codé indépendamment. Les différents types de bits codés sont ensuite multiplexés et entrelacés avant la modulation. En effet, il est important de noter que tous les types d'information transportés sur le PUSCH utilisent la même modulation (QPSK, 16QAM ou 64QAM). L'agencement de ces différentes opérations est illustré à la figure 9-2.

Le codage de canal est décrit à la section ci-après pour l'UL-SCH, puis à la section suivante pour les informations de contrôle. Enfin, la dernière section, p. 199, présente comment les bits codés résultants sont multiplexés et entrelacés.

Éléments sous droits d'auteur

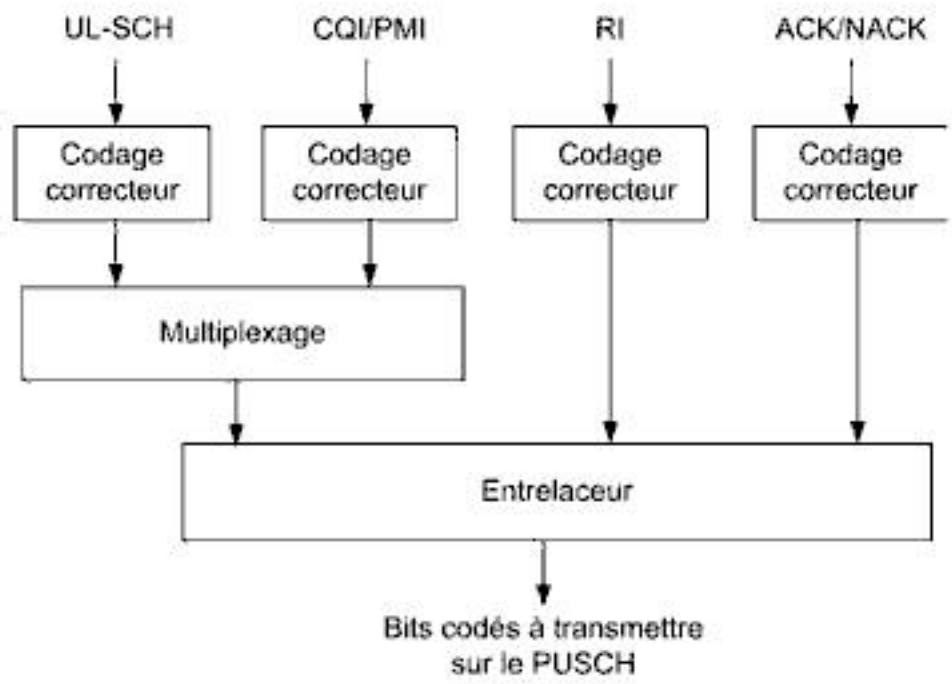


Figure 9-2
Codage, multiplexage et entrelacement des données UL-SCH et des informations de contrôle sur le PUSCH

Codage de canal pour les données UL-SCH

Le codage de canal pour les données UL-SCH est basé sur le turbo-code (voir le chapitre 4). Vingt-neuf schémas de modulation et codage (MCS) sont disponibles pour chaque taille d'allocation de ressources en fréquence et correspondent chacun à une modulation et une taille de bloc de transport en nombre de bits d'information. On rappelle que le rapport entre le nombre de bits d'information et le nombre de bits codés effectivement transmis définit le rendement du codage, qui caractérise la protection contre les erreurs apportée par le codage de canal. Les modulations QPSK, 16QAM, et 64QAM peuvent être utilisées sur le PUSCH. Le MCS est indiqué via le PDCCH, tandis que la version de redondance à transmettre est signalée par le PDCCH dans le cas d'une retransmission adaptative et est déterminée par l'UE selon une règle prédéfinie pour une retransmission non adaptative (voir le chapitre 11).

Codage de canal pour les informations de contrôle

Lorsque des informations de contrôle sont multiplexées avec des données UL-SCH, le nombre de symboles de modulation pour la transmission de chaque type d'information de contrôle (ACK/NACK, RI ou CQI/PMI) est calculé par l'UE selon une formule de la forme :

$$Q' = \min\left(\left\lceil \frac{O_{bits}^{type}}{O_{bits}^{UL-SCH}} \cdot N_{symboles}^{PUSCH} \cdot \beta^{type} \right\rceil, N_{symboles}^{\max,type}\right)$$

Les termes de cette formule sont définis comme suit :

- O_{bits}^{UL-SCH} et O_{bits}^{type} représentent le nombre de bits d'information respectivement pour le canal UL-SCH et l'information de contrôle de type *type* (CQI/PMI, RI ou ACK/NACK). Dans le cas du CQI/PMI, ce nombre inclut aussi le nombre de bits de CRC.
- $N_{symboles}^{PUSCH}$ est le nombre total de symboles de modulation disponibles dans l'allocation du PUSCH signalée sur le PDCCH pour la transmission initiale. Ce nombre est fonction de la

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

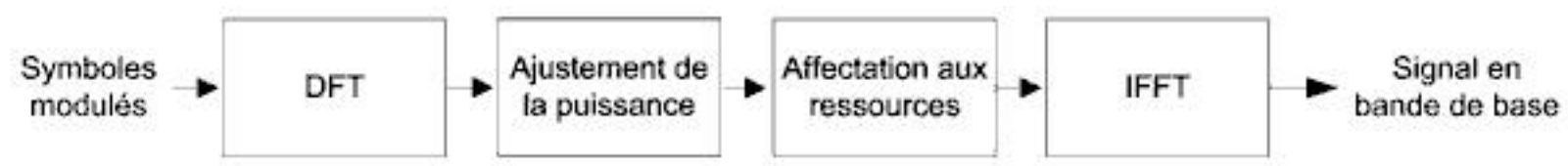


Figure 9-4
Étapes de la modulation SC-FDMA

Les échantillons complexes obtenus en sortie de la DFT (appelée *transform precoding* dans les spécifications) sont multipliés par un facteur de mise à l'échelle afin de satisfaire la puissance définie par le contrôle de puissance (voir le chapitre 10). Les échantillons résultants sont alors affectés aux sous-porteuses allouées à l'UE. L'opération d'IFFT produit finalement le signal temporel en bande de base, destiné à être traité par l'étage radiofréquence avant émission.

Le PUSCH est transmis sur les ressources qui ne sont pas occupées par le PUCCH, ni par les signaux de référence (DMRS, SRS). Les ressources à utiliser sont indiquées dans l'allocation pour la voie montante signalée sur le PDCCH. Le chapitre 10 décrira les types d'allocation de ressources pris en charge pour le PUSCH, notamment le saut de fréquence.

Canal de contrôle en voie montante (PUCCH)

Le canal physique de contrôle en voie montante PUCCH (*Physical Uplink Control CHannel*) porte les informations de contrôle sur la voie montante pour un UE, ce dernier ne pouvant transmettre qu'un seul PUCCH dans une sous-trame donnée. Les informations de contrôle portées par le PUCCH sont :

- les informations sur l'état du canal CQI, PMI, RI, lorsqu'elles sont retournées périodiquement ;
- les requêtes de scheduling ;
- les acquittements d'HARQ pour les blocs de transport reçus en voie descendante.

Ces informations de contrôle, ainsi que leur procédure de retour sur le PUCCH, seront détaillées au chapitre 12. Lorsqu'un PUSCH est alloué à l'UE sur une sous-trame où une transmission de PUCCH est prévue, les informations de contrôle associées sont transmises sur le PUSCH comme décrit à la section précédente.

Vue d'ensemble des formats de PUCCH

Il existe plusieurs formats de PUCCH, qui diffèrent par le type d'information qu'ils portent et leur charge utile. Le tableau qui suit récapitule les différents formats ainsi que leurs principales caractéristiques.

Formats de PUCCH

Format de PUCCH	Modulation	Nombre de bits codés par sous-trame	Usage
1	ON/OFF	N/A	Requête de scheduling (SR)
1a	BPSK	1	ACK/NACK pour un seul bloc de transport, avec ou sans SR
1b	QPSK	2	ACK/NACK pour deux blocs de transport (SU-MIMO), avec ou sans SR
			.../...

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

requête de scheduling. L'information sur la SR est alors portée par les ressources utilisées pour transmettre les ACK/NACK : si l'UE envoie une SR, il transmet les ACK/NACK sur les ressources PUCCH allouées à la transmission des SR ; sinon, les ressources prévues pour la transmission des ACK/NACK sont utilisées.

Le symbole complexe résultant de la modulation (ON/OFF, BPSK, QPSK selon le format employé) est embrouillé par un facteur 1 ou $e^{j\pi/2}$, ce qui permet à l'eNodeB de déterminer si le signal reçu est de l'interférence due au décalage cyclique adjacent (utilisé potentiellement par un autre PUCCH de la cellule), ou le signal effectivement désiré [Panasonic, NTT DoCoMo, 2008]. Le symbole embrouillé est ensuite étalé par le code orthogonal. Chaque symbole résultant de l'étalement module alors la séquence de base, affectée d'un décalage cyclique spécifique au symbole SC-FDMA et au slot. Après avoir été associée aux sous-porteuses assignées, la séquence résultante est envoyée au bloc IFFT pour créer le symbole SC-FDMA correspondant.

Il existe également un format de PUCCH 1/1a/1b dit *raccourci*, où le dernier symbole SC-FDMA du second slot n'est pas transmis. Un code orthogonal de longueur 3, basé sur une séquence DFT, est alors utilisé pour le second slot. L'UE doit utiliser le format de PUCCH raccourci pour chaque sous-trame configurée par la cellule pour la transmission de SRS (transmis dans le dernier symbole de la trame, voir le chapitre 7), même s'il ne transmet pas de SRS dans cette sous-trame, afin de ne pas créer d'interférence sur les SRS transmis par d'autres UE.

Capacité de multiplexage

La capacité de multiplexage sur le PUCCH pour les formats 1/1a/1b est contrôlée par :

- le CP, qui détermine le nombre de codes (trois séquences orthogonales sont possibles pour le CP normal et deux pour le CP étendu) ;
- le paramètre $\Delta_{\text{shift}}^{\text{PUCCH}}$, qui définit la différence entre deux décalages cycliques consécutifs pour des ressources utilisant le même code orthogonal.

Le paramètre $\Delta_{\text{shift}}^{\text{PUCCH}}$ est signalé par le protocole RRC et peut être réglé en fonction de la dispersion des retards du canal et de la capacité de multiplexage désirée pour le PUCCH. Ainsi, la capacité de multiplexage par PRB du PUCCH de format 1/1a/1b est donnée par :

$$C_{\text{MUX}}^{\text{PUCCH A/N}} = N_{oc} \times 12 / \Delta_{\text{shift}}^{\text{PUCCH}}$$

où N_{oc} est le nombre de séquences orthogonales possibles en fonction de la valeur du CP. Par exemple, les configurations suivantes sont possibles pour le CP normal [Samsung *et al.*, 2008] :

- $\Delta_{\text{shift}}^{\text{PUCCH}} = 1$: 36 ressources ACK/NACK par PRB : pour les déploiements urbains où la dispersion des retards des canaux est faible et où une capacité de multiplexage maximale est nécessaire ;
- $\Delta_{\text{shift}}^{\text{PUCCH}} = 2$: 18 ressources ACK/NACK par PRB : adaptée à la plupart des déploiements urbains ;
- $\Delta_{\text{shift}}^{\text{PUCCH}} = 3$: 12 ressources ACK/NACK par PRB : pour les cellules où la dispersion des retards des canaux est élevée mais où le CP normal est utilisé.

Éléments sous droits d'auteur

Formats de PUCCH 2, 2a, 2b

Codage de canal et modulation

La figure suivante représente le modulateur du PUCCH pour les formats 2/2a/2b pour le premier slot, pour un CP normal. Les traitements effectués pour le second slot sont similaires, les opérations de codage, embrouillage et modulation étant communes aux deux slots. Les notations sont identiques à celles de la figure précédente ; *d(n)* est le symbole modulé d'indice *n*.

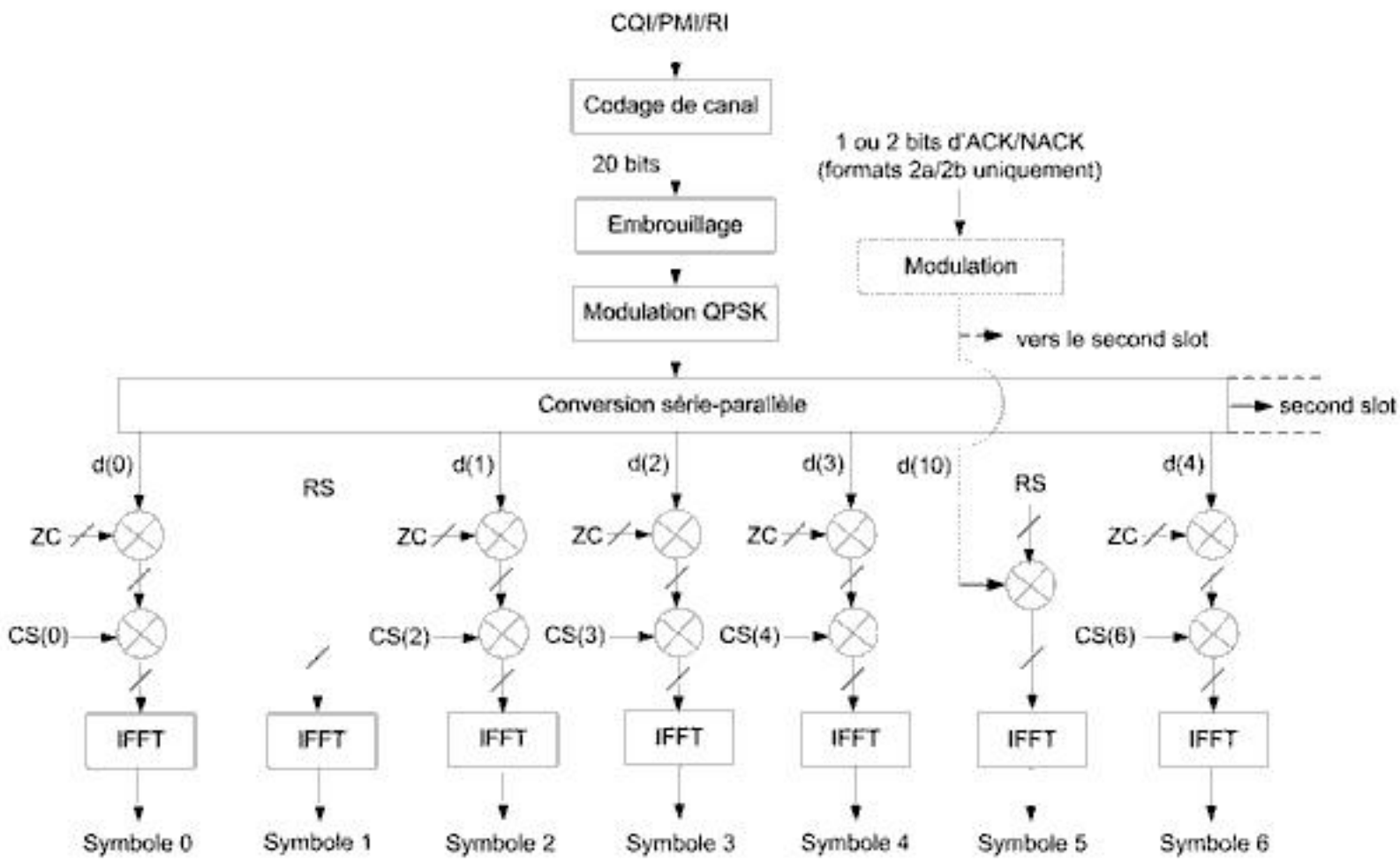


Figure 9-6
Modulateur pour les formats PUCCH 2/2a/2b, pour le CP normal

Les bits d'information portant les CQI/PMI/RI sont encodés sur 20 bits après codage de canal par un code de Reed-Muller (20, *A*), où *A* est le nombre de bits d'information en entrée du codeur. Les bits codés sont ensuite embrouillés par une séquence pseudo-aléatoire spécifique à l'UE. Les bits résultants sont modulés pour donner une séquence de symboles QPSK $\{d(0), d(1), \ldots, d(9)\}$. Chaque symbole modulé est porté par un symbole SC-FDMA spécifique. Pour ce faire, le symbole *d(n)* module une séquence de base affectée d'un décalage cyclique différent à chaque symbole SC-FDMA. Puis, après association aux sous-porteuses affectées, la séquence résultante est envoyée au bloc IFFT afin de produire le symbole SC-FDMA correspondant.

Les mécanismes de saut et de redistribution de paramètres pour rendre l'interférence aléatoire présentés pour les PUCCH de format 1/1a/1b s'appliquent également aux PUCCH de format 2/2a/2b, sauf en ce qui concerne le code orthogonal, non défini pour ces formats.

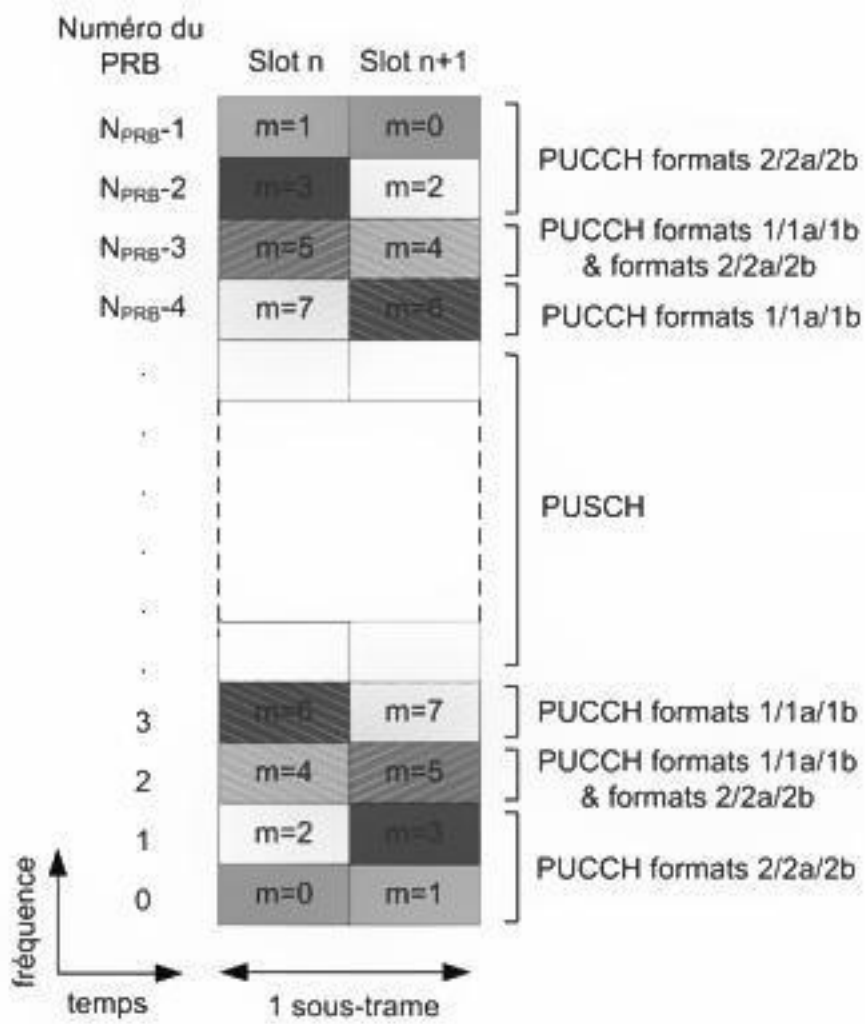
Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

UE transmettant des ACK/NACK et à ceux transmettant des CQI/PMI/RI représenterait une consommation de ressources trop importante. Notons que dans ces ressources mixtes, les décalages cycliques alloués aux formats 1/1a/1b (respectivement 2/2a/2b) sont consécutifs et séparés des décalages cycliques alloués aux formats 2/2a/2b par un décalage cyclique de garde [Nokia Siemens Networks *et al.*, 2008]. Ce dernier améliore l'orthogonalité entre les deux types de formats au prix d'une réduction de la capacité de multiplexage. L'orthogonalité est nécessaire car les deux formats de PUCCH ont des SINR d'opération différents et ainsi des puissances d'émission potentiellement différentes. Si l'orthogonalité n'est pas parfaite (par exemple, si la dispersion des retards du canal d'un UE est plus étendue que l'écart entre deux décalages cycliques), l'un des formats de PUCCH pourrait interférer sur l'autre significativement.

Figure 9-7
PRB occupés par le PUCCH. Un PUCCH occupe les PRB identifiés par la même valeur de m.



Notons enfin que le réglage de la taille de la zone de PUCCH via le paramètre $N_{\mathrm{RB}}^{(2)}$ permet à l'eNodeB de contrôler la largeur de bande du système effective en voie montante. Celle-ci peut ainsi être dimensionnée selon une largeur arbitraire (par exemple, 8 MHz), éventuellement de manière asymétrique, comme représenté à la figure suivante. En effet, l'eNodeB peut réserver plus de PRB pour la transmission du PUCCH qu'il n'en utilise réellement. De plus, il contrôle la bande utilisée par les SRS, comme l'allocation des PRB pour la transmission du PUSCH. En particulier, rien n'empêche ces derniers d'être alloués dans la zone du PUCCH. Cette fonctionnalité, appelée *surprovision du PUCCH* (*PUCCH over-provisioning*, en anglais), peut notamment être mise à profit pour protéger un autre système opérant sur une bande proche de la bande montante du LTE en FDD, avec lequel se posent des problèmes de coexistence.

Éléments sous droits d'auteur

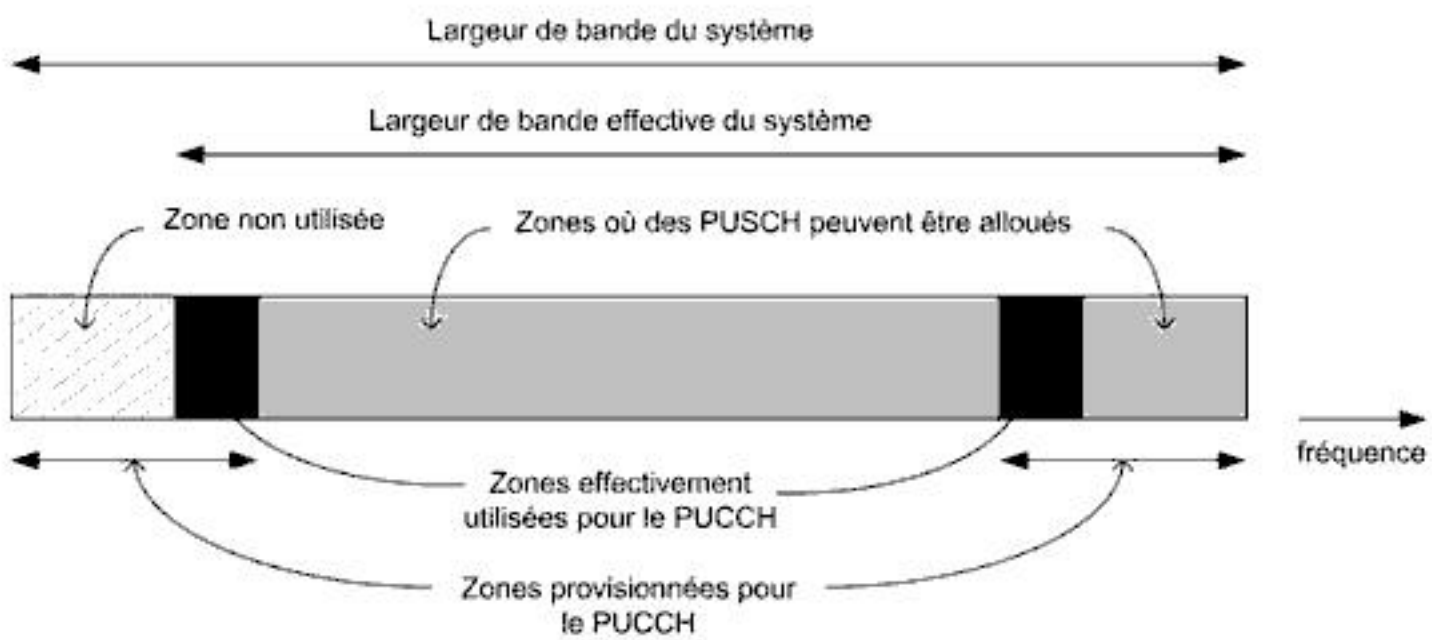


Figure 9-8
Surprovision du PUCCH pour créer une bande de garde sur la bande montante en FDD

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 36.211, 2009] Spécification technique 3GPP TS 36.211, *E-UTRA, Physical channels and modulation*, v8.9.0, décembre 2009.

[3GPP 36.212, 2009] Spécification technique 3GPP TS 36.212, *E-UTRA, Multiplexing and channel coding*, v8.8.0, décembre 2009.

[3GPP 36.213, 2009] Spécification technique 3GPP TS 36.213, *E-UTRA, Physical layer procedures*, v8.8.0, septembre 2009.

[Nokia Siemens Networks *et al.*, 2008] Nokia Siemens Networks, Nokia, Texas Instruments, *ACK/NACK channelization for PRBs containing both ACK/NACK and CQI*, Contribution R1-080931, 3GPP TSG RAN WG1 #52, février 2008.

[Panasonic, NTT DoCoMo, 2008] Panasonic, NTT DoCoMo, *Necessity of the scrambling for ACK/NACK on PUCCH*, Contribution R1-082403, 3GPP TSG RAN WG1 #54, juillet 2008.

[Samsung, 2007] Samsung, *Selection of Orthogonal Cover Walsh Codes for High Speed UL ACK*, Contribution R1-074091, 3GPP TSG RAN WG1 #50bis, octobre 2007.

[Samsung *et al.*, 2008] Samsung, Nokia, Nokia Siemens Networks, Panasonic, TI, *Joint proposal on uplink ACK/NACK channelization*, Contribution R1-080035, 3GPP TSG RAN WG1 #51bis, janvier 2008.

Éléments sous droits d'auteur

10

Allocation de ressources

Sommaire : *Principe du scheduling – Informations normalisées pour mettre en œuvre le scheduling – Scheduling dynamique et semi-persistant – Types d'allocation de ressources en fréquence – Coordination d'interférence intercellulaire (ICIC) – Contrôle de puissance*

L'allocation de ressources ou scheduling vise à partager des ressources radio communes entre les UE. Elle forme donc une fonctionnalité clé de l'interface radio pour les performances du système et le maintien de la qualité de service envers l'utilisateur. Ce chapitre décrit le principe du scheduling, ainsi que la manière dont il est traité en LTE. Les fonctions étroitement associées au scheduling sont également décrites dans ce chapitre : la coordination d'interférence et le contrôle de puissance.

Rôle du scheduling et principes généraux

La transmission de données en LTE, comme en EDGE et en HSPA, repose sur des canaux partagés dont l'accès est géré dynamiquement en fonction de paramètres de qualité de service (QoS) et typiquement en fonction de la qualité de canal perçue par l'UE. L'accès au canal est déterminé par le scheduler, aussi parfois appelé *ordonnanceur* en français, dont la tâche est de décider des paramètres suivants.

- Quels UE servir à chaque TTI ? Cette fonctionnalité est illustrée à la figure suivante.
- Quelles ressources en fréquence (PRB) allouer à chaque UE servi (nombre de PRB et positions) ?
- Quel traitement spatial appliquer pour un UE donné dans le cadre du MIMO, en particulier combien de couches spatiales utiliser ?
- Quelle puissance appliquer, principalement en voie montante ?

Éléments sous droits d'auteur

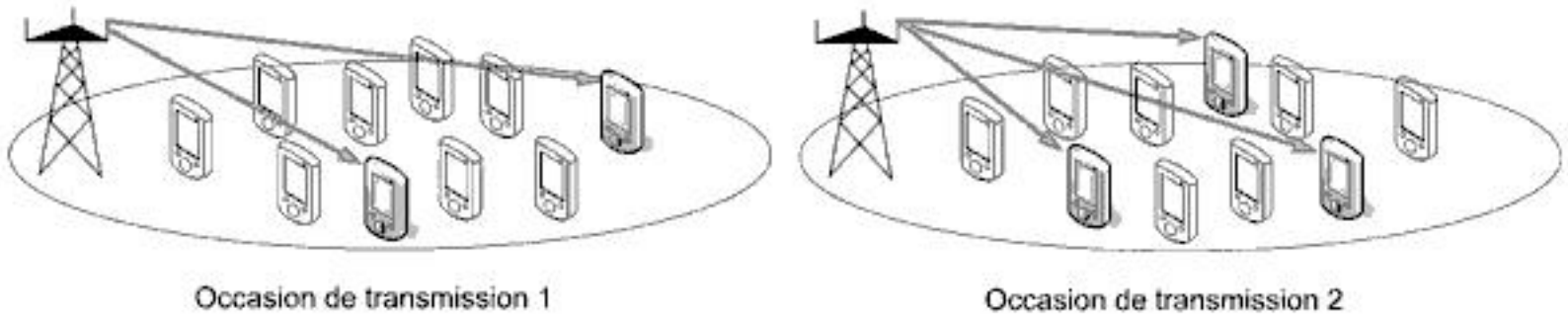


Figure 10-1
Sélection par le scheduler des UE à servir, ici en voie descendante

La fonction de scheduling est hébergée par la couche MAC de l'eNodeB, mais s'appuie sur les mesures effectuées par la couche physique des UE (respectivement de l'eNodeB) pour optimiser l'allocation des ressources en voie descendante (respectivement en voie montante). Le scheduling entre ainsi dans la classe des fonctions conçues selon une optimisation intercouches (ici entre la couche physique et la couche MAC), dont l'exploitation est l'une des caractéristiques fortes des systèmes de communication modernes et en particulier du LTE.

Le scheduler est amené à exploiter les trois dimensions temporelle, fréquentielle et spatiale, que nous décrivons maintenant.

Dimension temporelle

Les données sont transmises sur des canaux partagés entre les UE du système. La raison de ce choix est double. D'une part, les besoins en ressources radio des UE peuvent varier considérablement au cours du temps en fonction du type de service requis. Au cours d'un appel voix par exemple, les périodes de silence sont nombreuses ; or pendant ces périodes, aucune donnée n'est transmise. Réserver des ressources radio pour la durée d'un appel voix revient ainsi à les gaspiller pour le système, puisqu'elles pourraient être allouées à un autre UE pendant les périodes de silence. Il est donc plus efficace pour le système de mutualiser les ressources radio en canaux partagés et de les allouer aux UE en fonction de leurs besoins instantanés.

L'autre avantage d'un accès partagé est le gain de *diversité multi-utilisateur*. Cette diversité exploite les variations rapides (*fast fading*) du canal de transmission afin de servir les UE lorsque celui-ci est dans un état favorable, typiquement un état d'évanouissement constructif. Or, les canaux de transmission d'UE différents sont affectés de manière indépendante par les évanouissements rapides. Ainsi, plus le nombre d'UE actifs est élevé et plus la probabilité que le canal de l'un d'eux soit en état d'évanouissement constructif à un instant donné est importante. Avec un grand nombre d'UE actifs simultanés, les UE servis peuvent généralement l'être avec une qualité de canal meilleure que la moyenne, bénéficiant ainsi d'un débit plus important sur les ressources allouées. Pour le système, il s'ensuit un débit total plus élevé, puisque chaque ressource allouée porte une plus grande quantité de données.

Le scheduling pouvant exploiter les variations rapides du canal est dit *dynamique*. Pour ce faire, les ressources temporelles allouées doivent être très brèves. En LTE, la granularité de l'allocation de ressources en temps, ou TTI, est d'une sous-trame, soit 1 milliseconde. En d'autres termes, le scheduler est libre de choisir les UE à servir ainsi que leur allocation de PRB à chaque sous-trame.

Éléments sous droits d'auteur

Afin que le scheduling puisse suivre les évanouissements rapides du canal, l'eNodeB doit disposer d'une information sur la qualité du canal de l'UE, qui permette d'estimer le débit que celui-ci peut atteindre dans les conditions radio qu'il rencontre. Cette information s'obtient au moyen du retour par l'UE d'un CQI, présenté au chapitre 4. Nous reviendrons sur les indicateurs nécessaires à la mise en œuvre du scheduling dans la section « Entrées du scheduler remontées par l'UE », p. 217.

Dimension fréquentielle

Nous avons vu au chapitre 3 que les ressources radio se présentent comme une grille temps-fréquence divisée en un certain nombre de blocs de ressources élémentaires appelés PRB, leur nombre dans la dimension fréquentielle dépendant de la largeur de bande du système. Rappelons qu'un PRB a pour dimensions 180 kHz en fréquence et 0,5 ms en temps. Les PRB en LTE sont toujours alloués par paire, un PRB de la paire étant alloué sur chaque slot de 0,5 ms d'une sous-trame (voir la section correspondante pour les différents types d'allocations en fréquence, p. 226). Cette possibilité d'allouer des ressources spécifiques en fréquence est propre aux systèmes OFDM.

Par rapport aux systèmes EDGE et HSPA, le LTE introduit ainsi une dimension supplémentaire à exploiter par le scheduler : la dimension fréquentielle. Tout comme l'adaptation aux évolutions du canal dans la dimension temporelle, le scheduler peut tirer parti des variations du canal dans la dimension fréquentielle, en allouant à chaque utilisateur des PRB bénéficiant de conditions radio favorables. On parle alors de scheduling *adaptatif en fréquence*, ou encore *sélectif en fréquence*. La figure 10-2 illustre le principe du scheduling adaptatif dans les dimensions temporelle et fréquentielle (de manière idéaliste, car elle suppose que le scheduler possède une information parfaite sur les canaux des UE et qu'il n'y ait pas de délai entre l'acquisition de cette information et la transmission sur les ressources allouées, ce qui n'est évidemment pas le cas en pratique). Le critère d'allocation de ressources illustré ici consiste à attribuer chaque PRB à l'UE qui en tire le meilleur parti. Nous verrons à la section « Stratégies de scheduling » (p. 215), que ce critère, appelé max-CQI, n'est pas recommandé en pratique.

Le scheduling adaptatif en fréquence implique que l'UE retourne une information sur la qualité du canal dans la dimension fréquentielle. Cette information prend la forme d'un CQI par sous-bande. La granularité de ces sous-bandes et les différents modes de retour seront décrits au chapitre 12.

En raison de la variation de la réponse en fréquence du canal au cours du temps, le scheduling adaptatif en fréquence est nécessairement dynamique.

La dimension fréquentielle permet en outre de coordonner l'interférence entre cellules voisines. Ces techniques, appelées ICIC (pour *Inter-Cell Interference Coordination*) seront décrites à la section « Coordination d'interférence intercellulaire (ICIC) », p. 233.

L'allocation en fréquence peut également influer sur la densité spectrale de la puissance (DSP) d'émission. En voie descendante, la DSP varie en fonction de la région de la bande du système dans laquelle est servi l'UE, lorsque des techniques d'ICIC sont appliquées. En voie montante, il existe un lien étroit entre le débit de l'UE, sa puissance d'émission et le nombre de PRB qui lui sont alloués. En effet, la puissance d'émission de l'UE est répartie sur les PRB utilisés, contrairement à la voie descendante où l'eNodeB n'est pas limité en puissance. Ainsi, en voie montante, un UE en

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

- Le scheduler *Max-CQI* alloue des ressources aux UE qui bénéficient des meilleures conditions radio. Ce scheduler maximise le débit total du système mais n'est pas équitable, puisque les UE en mauvaise condition radio, en particulier ceux situés en bordure de cellule, ne sont jamais servis. Pour cette raison, le critère max-CQI ne présente pas d'intérêt pratique s'il est utilisé seul. En revanche, si un autre critère est utilisé pour choisir les UE à servir dans le domaine temporel, le critère max-CQI peut être utilisé dans le domaine fréquentiel pour attribuer chaque PRB à l'UE qui en tirera le meilleur parti (par exemple sous la contrainte d'un nombre donné de PRB par UE).
- Le scheduler *Proportional Fair* alloue des ressources aux UE qui maximisent une métrique du type *débit instantané atteignable à l'instant courant par l'UE divisé par son débit moyen*. Ce scheduler réalise un compromis entre les deux schedulers précédents, puisqu'il tient compte à la fois des conditions radio (à débits moyens similaires, l'UE avec la meilleure qualité de canal instantanée sera sélectionné en priorité), mais aussi de l'équité entre les UE (à qualités instantanées du canal similaires, l'UE ayant reçu le débit le plus faible jusque-là sera sélectionné en priorité).

Le nombre d'UE à servir dans un TTI donné est décidé par le scheduler. Si plusieurs UE sont en compétition pour l'accès à la ressource, un compromis doit être trouvé entre le nombre d'UE à servir simultanément (plus ce nombre est élevé et meilleure est la diversité multi-utilisateur), la charge de signalisation des allocations de ressources (qui augmente avec le nombre d'UE) et la consommation d'énergie de l'UE (qui est d'autant plus importante que la transmission est longue).

Les algorithmes de scheduling peuvent être paramétrés pour offrir (voire garantir) un débit minimal en bordure de cellule, ou plus généralement pour fournir un compromis entre la capacité de la cellule et l'équité entre utilisateurs. Les algorithmes de scheduling doivent également intégrer différentes gestions de priorités, par exemple entre :

- services à débit ou latence garantis (voix, streaming) et services *best effort* (FTP, HTTP), et plus généralement entre des radio bearers associés à des QCI différents (voir le chapitre 17) ;
- transmissions initiales et retransmissions HARQ ;
- services d'urgence et services aux abonnés ;
- satisfaire les requêtes de la cellule dont ils ont la charge et des requêtes d'autres cellules liées à la coordination d'interférence entre cellules voisines.

Entrées et sorties du scheduler

Si l'algorithme de scheduling n'est pas normalisé, en revanche certaines de ses entrées le sont. Ces dernières peuvent être classées selon la manière dont elles sont acquises par le scheduler :

- par des remontées de l'UE ;
- reçues des eNodeB voisins (pour l'ICIC).

De même, les mécanismes de signalisation informant les UE des décisions prises par le scheduler sont également normalisés. La figure suivante résume les entrées et sorties normalisées du scheduler.

Éléments sous droits d'auteur

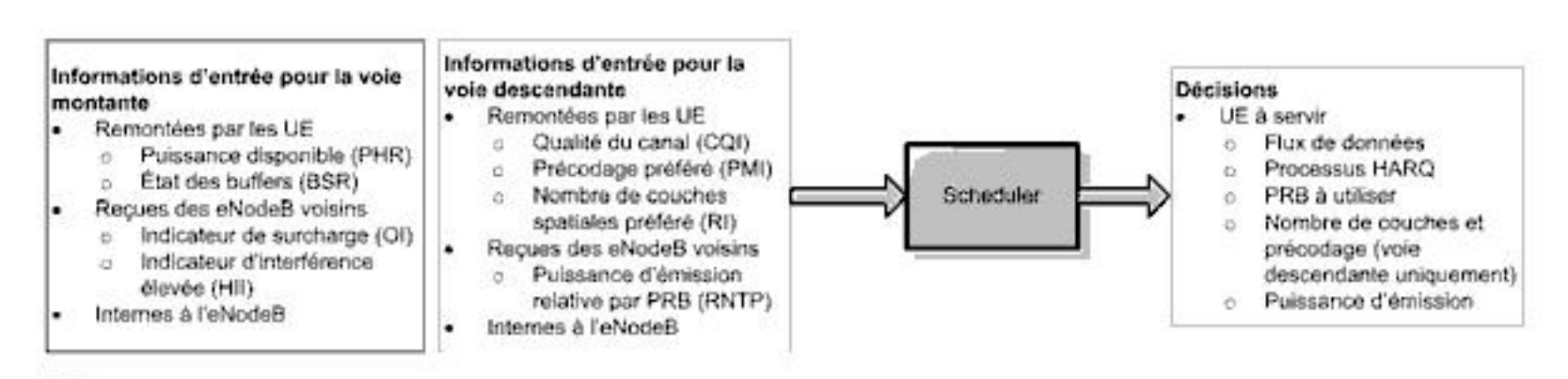


Figure 10-3
Entrées et sorties types du scheduler en LTE

Les entrées du scheduler remontées par l'UE ainsi que les procédures normalisées associées seront discutées en détail à la section suivante. Les informations reçues des autres eNodeB seront détaillées à la section « Coordination d'interférence intercellulaire (ICIC) » (p. 233), qui présente les techniques d'ICIC.

D'autres informations nécessaires au scheduler sont implicitement disponibles à la station de base et ne sont donc pas toutes normalisées. Nous listons ci-après les principales, sans prétendre à l'exhaustivité. On trouve notamment dans cette catégorie les informations suivantes pour chaque UE :

- la catégorie de l'UE : de cette catégorie dépend le débit maximal que l'UE peut recevoir ou transmettre dans un même TTI, le nombre maximal de couches spatiales supportées sur la voie descendante, la prise en charge de la modulation 64QAM sur la voie montante ou encore la taille totale de la mémoire tampon (buffers) RLC (pour l'ensemble des radio bearers) ;
- les caractéristiques des radio bearers de l'UE (GBR ou MBR, priorités) : l'eNodeB doit ainsi privilégier l'atteinte du débit garanti GBR (*Guaranteed Bit Rate*) pour les bearers concernés, devant la réalisation du MBR (*Maximum Bit Rate*) pour les bearers à débit non garanti ;
- l'état d'avancement de la transmission des données (état des buffers, besoin de retransmissions) ;
- les intervalles de mesure : l'eNodeB ne doit pas transmettre de données à l'UE pendant les intervalles de mesures (*gaps*) qui peuvent être aménagés pour permettre à l'UE de réaliser des mesures interfréquences ou intersystèmes ;
- l'état des ressources physiques disponibles.

Les sorties de scheduler, c'est-à-dire les décisions d'allocation de ressources, sont communiquées à l'UE via le PDCCH. Les différents types d'allocations de ressources selon la dimension temporelle et la dimension fréquentielle seront décrits aux sections « Types d'allocation de ressources en temps » (p. 222) et « Types d'allocation de ressources en fréquence » (p. 226) respectivement.

Entrées du scheduler remontées par l'UE

Pour remplir sa mission, le scheduler doit disposer d'informations spécifiques à l'émetteur et au récepteur, comme la qualité du canal vue par le récepteur et l'état des buffers à l'émetteur. L'eNodeB possède certaines de ces informations suivant qu'il constitue l'émetteur ou le récepteur.

Éléments sous droits d'auteur

Les autres informations doivent être retournées par l'UE et sont donc normalisées. Par exemple, les paramètres du canal nécessaires au scheduling doivent être remontés par l'UE pour la voie descendante, mais sont directement mesurés par l'eNodeB en voie montante, à partir des signaux de référence SRS émis par l'UE. Il en est de même pour l'état des buffers, qui est remonté par l'UE pour la voie montante, mais est disponible à l'eNodeB pour la voie descendante.

On distingue deux types d'informations remontées par l'UE : celles relatives à la couche physique et celles relatives aux autres couches. Parmi les premières se trouvent :

- les informations sur l'état du canal pour le scheduling en voie descendante, qui comprennent l'indicateur de qualité de canal CQI, l'indicateur de rang RI et l'indicateur de matrice de précodage préférée PMI, les deux derniers étant spécifiques à la mise en œuvre du MIMO ;
- la réserve de puissance disponible au niveau de l'UE pour une transmission en voie montante (PHR, pour *Power Headroom Report*).

La seconde catégorie d'informations remontées est associée à la métrique suivante :

- le rapport sur l'état des buffers de l'UE (*Buffer Status Report* ou BSR), pour le scheduling de la voie montante.

Dans ce qui suit, nous détaillons ces informations ainsi que la manière dont elles sont utilisées par le scheduler et, le cas échéant, les procédures normalisées afin de les fournir au scheduler.

Informations sur l'état du canal (CQI, RI et PMI)

Les CQI, RI et PMI constituent des indicateurs sur l'état du canal mesuré par l'UE en voie descendante. Ces indicateurs sont déterminés par l'UE et retournés à l'eNodeB afin de permettre le scheduling pour la voie descendante.

Les CQI et RI/PMI sont décrits de manière détaillée aux chapitres 4 et 5 respectivement. Leurs modes de retour par l'UE font intervenir une signalisation spécifique de la couche physique détaillée au chapitre 12. Nous résumons ici l'utilisation qui est faite par le scheduler de ces indicateurs.

Le CQI correspond à un engagement de l'UE sur le débit qu'il estime être capable de recevoir dans les conditions radios actuelles. Le LTE offre plusieurs modes possibles pour retourner le CQI :

- un CQI large bande, qui traduit la qualité moyenne du canal sur toute la bande du système et peut être utilisé pour mettre en œuvre un scheduling tirant parti uniquement des variations temporelles du canal ;
- un CQI par sous-bande, pour plusieurs sous-bandes, dont l'ensemble permet de mettre en œuvre le scheduling adaptatif en fréquence.

Le CQI est utilisé pour déterminer quels UE servir à un instant donné et quels PRB allouer à l'UE lorsque l'allocation de ressources est adaptative en fréquence. Il est notamment utilisé pour calculer la métrique du scheduler Proportional Fair.

Les indicateurs RI et PMI sont utilisés par le scheduler pour déterminer les paramètres MIMO de la transmission vers un UE. Le RI indique le nombre maximal de couches spatiales toléré par l'UE et

Éléments sous droits d'auteur

donc si l'UE peut recevoir plusieurs couches ou non. Une seule valeur de RI est remontée pour toute la bande.

Pour les modes de transmission en boucle fermée, un PMI est de plus remonté par l'UE afin d'assister le scheduler dans le choix des coefficients de précodage à utiliser, pour le SU-MIMO et le MU-MIMO. Le PMI renvoie l'indice de l'entrée préférée du dictionnaire de précodage, qui peut être par exemple déterminée comme la matrice de précodage qui maximise le débit de l'UE. En MU-MIMO, le PMI sert au scheduler pour identifier des UE pouvant être servis sur les mêmes ressources tout en s'interférant de manière réduite, par exemple car ils demandent à être servis dans des faisceaux pointant dans des directions éloignées. Une valeur de PMI peut être retournée pour la totalité de la largeur de bande du système, ou une valeur peut être retournée par sous-bande.

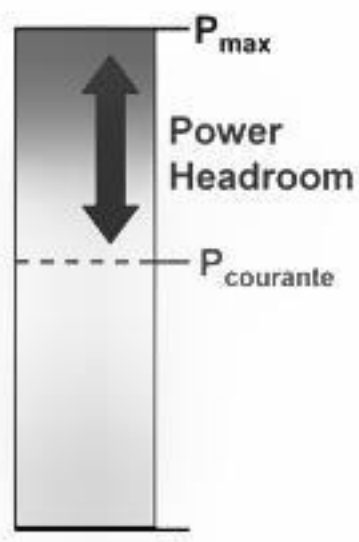
Pour les systèmes TDD, un PMI n'est pas nécessaire car l'eNodeB est en mesure d'estimer le canal expérimenté par l'UE en voie descendante grâce à la propriété de réciprocité du canal (voir le chapitre 5). Le scheduler utilise alors directement les mesures de l'eNodeB.

Il est important de noter que les valeurs de CQI, RI et PMI remontées par l'UE n'ont qu'une valeur indicative afin d'assister le scheduler dans ses choix, celui-ci restant maître de ses décisions quant aux MCS, nombre de couches et coefficients de précodage spatial à appliquer.

Power Headroom Report

La réserve de puissance (*Power Headroom*) dont dispose l'UE pour émettre des données en voie montante est mesurée par la différence entre la puissance d'émission maximale de l'UE et celle qu'il estime nécessaire pour réaliser la prochaine transmission, comme illustré à la figure suivante. Cet écart est régulièrement mesuré par l'UE et est remonté à l'eNodeB dans le rapport de réserve de puissance ou PHR (pour *Power Headroom Report*).

Figure 10-4
Notion de Power Headroom



L'UE détermine la puissance nécessaire pour transmettre des données en fonction de ses conditions radio, éventuellement assisté par des commandes de contrôle de puissance dynamiques transmises par l'eNodeB (voir la section « Contrôle de puissance », p. 239). Avant d'utiliser les ressources

Éléments sous droits d'auteur

allouées pour une transmission, l'UE détermine si un PHR doit être transmis à l'eNodeB. Celui-ci peut être déclenché par deux critères :

- une modification importante de l'atténuation du canal montant, estimée par l'UE d'après le canal descendant (l'atténuation a augmenté de plus d'un seuil prédéfini, par exemple 3 dB) ;
- l'expiration de la temporisation d'envoi périodique du PHR (par exemple le dernier PHR a été transmis depuis plus de 500 ms).

Cette temporisation et ce seuil en dB sont configurés par la couche RRC.

Le PHR est envoyé par l'UE sous la forme d'un élément de contrôle MAC, qui peut être multiplexé avec d'autres éléments de contrôle ou des blocs de données lors de la transmission de la PDU MAC.

Buffer Status Report

L'UE peut en outre, dans certaines conditions, fournir des informations plus ou moins précises à l'eNodeB sur l'état de ses buffers. Il transmet pour cela l'indicateur *Buffer Status Report* (BSR). Les données transmises dans cet indicateur peuvent être utilisées par le scheduler dans l'organisation des allocations de ressources. En particulier, l'eNodeB peut, à partir du BSR, estimer au fil du temps le remplissage des buffers de l'UE en fonction des allocations de ressources effectuées depuis la remontée du BSR.

Plusieurs types de BSR sont définis dans les spécifications, associés à des critères de déclenchement différents au sein de l'UE : le BSR régulier, le BSR périodique et le BSR de remplissage (ou *padding BSR*).

Un BSR de type régulier est déclenché notamment lorsque :

- l'UE n'avait aucune donnée à transmettre, mais des données sont désormais disponibles au niveau des couches RLC et/ou PDCP pour transmission par l'UE ;
- des données de priorité supérieure à celles déjà présentes dans les buffers deviennent disponibles pour transmission au niveau des couches RLC et/ou PDCP ;
- la temporisation d'envoi du BSR régulier a expiré et des données sont toujours disponibles pour transmission.

Le BSR régulier traduit donc un changement majeur dans l'état des buffers du mobile, ou agit comme un rappel auprès de l'eNodeB, indiquant que des données sont toujours en attente de transmission.

Le BSR périodique est déclenché de la façon suivante : à chaque fois qu'un BSR est transmis par l'UE (quel que soit son type), une temporisation est démarrée qui, à son expiration, déclenche un nouveau BSR. Ce type de BSR est utilisé typiquement en situation de trafic établi, pour rafraîchir la connaissance qu'a l'eNodeB de l'état des buffers en l'absence de modification notable qui pourrait déclencher un BSR régulier.

Le BSR de remplissage, enfin, est opportuniste : lorsque certains bits d'une unité de données MAC sont inutilisés, l'UE profite de ces ressources libres pour transmettre un BSR.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

parti de la connaissance de la qualité de canal (quasi-) instantanée des UE, afin d'optimiser les débits utilisateur ainsi que le débit total de la cellule.

En plus de l'adaptation dans le domaine temporel, nous avons vu que le scheduling dynamique peut être adaptatif en fréquence pour une efficacité maximale. Pour la voie descendante, un CQI par sous-bande doit alors être retourné par l'UE. En raison de la pénalité sur la capacité en voie montante que représente pour le système la remontée des CQI par sous-bande, le scheduling adaptatif en fréquence est généralement utilisé en voie descendante pour les services demandant un débit élevé.

Pour être efficaces, les décisions prises par le scheduler sur la base des informations sur l'état du canal de l'UE doivent être toujours valides au moment où la transmission s'effectue. En effet, les informations sur l'état du canal sont naturellement sensibles à la variation du canal dans le temps. L'efficacité du scheduling dynamique (à plus forte raison lorsqu'il est adaptatif en fréquence) dépend ainsi de la vitesse de l'UE. Pour cette raison, les stratégies de scheduling exploitant les informations instantanées sur l'état du canal sont restreintes aux vitesses faibles à moyennes de l'UE (typiquement jusqu'à 30 km/h). Il en est ainsi pour le scheduling adaptatif en fréquence, comme pour les modes MIMO en boucle fermée.

Pour les hautes vitesses, il est recommandé de filtrer les informations sur la qualité du canal (CQI pour la voie descendante) au cours du temps, de manière à se baser sur des informations moyennes plutôt que des informations instantanées sujettes à imprécision. En voie descendante, il est de plus recommandé dans ces conditions de distribuer les ressources allouées en fréquence sur la bande du système afin de maximiser la diversité en fréquence. Notons que cette allocation distribuée est également appropriée lorsqu'aucune information fréquentielle sur la qualité du canal n'est disponible. Enfin, pour les hautes vitesses de l'UE, il est préférable de mettre en œuvre des schémas MIMO en boucle ouverte, qui ne s'appuient pas sur un PMI, lui aussi sensible aux variations temporelles du canal.

L'allocation de ressources est signalée dans le PDCCH et est valide en voie descendante pour la sous-trame qui porte le PDCCH pour une allocation dynamique. En voie montante, le numéro de la sous-trame pour laquelle l'allocation dynamique est valide est fixé par une règle normalisée. Une allocation dynamique signalée à la sous-trame n est valide pour la sous-trame montante $n+4$ en FDD. En TDD, le délai entre la réception du PDCCH et la transmission n'est pas fixe, mais dépend de la configuration voie montante/voie descendante.

La signalisation des décisions d'allocation de ressources sera décrite en détail au chapitre 12.

Scheduling semi-persistant

Contrairement au scheduling dynamique, le scheduling semi-persistant (abrégé en SPS, pour *Semi-Persistent Scheduling*) préréserve des PRB pour une durée donnée, avec une période prédéfinie entre chaque allocation. Ce mode d'allocation est adapté à des flux réguliers, dont les unités de données sont produites et émises périodiquement : voix et visiophonie, par exemple. En effet, d'une part les besoins en ressources de ces services sont prévisibles, d'autre part la surcharge de signalisation induite par la transmission des allocations de ressources en scheduling dynamique serait trop importante par rapport au petit volume de données porté par chaque transmission. En revanche, dans le cas d'un trafic intermittent, avec des unités de données de taille variable, ce mécanisme

Éléments sous droits d'auteur

semi-persistant conduirait à un délai de transmission plus long (les données n'étant transmises que lors des allocations périodiques) et à une transmission inefficace (des unités pouvant être de taille très inférieure à l'allocation préétablie). Pour limiter ces effets, il serait alors nécessaire de procéder à des allocations dynamiques entre deux allocations périodiques, ce qui réduit l'intérêt de l'utilisation de ce mécanisme semi-persistant.

Dans le cas d'une allocation de ressources semi-persistante, seules l'activation, la relâche et les éventuelles retransmissions sont signalées sur le PDCCH. Les transmissions initiales sont effectuées sur les ressources préréservées, sans aucune signalisation additionnelle sur le PDCCH. Il faut bien comprendre que l'allocation semi-persistante ne vise pas une économie de traitement par l'UE. En effet, celui-ci doit toujours tenter de décoder le PDCCH à chaque sous-trame, pour le cas où des informations lui seraient transmises via une allocation dynamique : retransmissions, relâche de l'allocation, ou données liées à un flux moins régulier (par exemple, navigation sur Internet pendant un appel voix). L'intérêt de ce mécanisme réside essentiellement dans la diminution de la signalisation associée à l'allocation de ressources. Ceci permet de libérer des ressources du PDCCH et donc une plus grande capacité, puisque les ressources ainsi libérées peuvent être allouées aux PDCCH d'autres UE. Ce gain de capacité est particulièrement important pour le nombre d'appels voix simultanés pouvant être écoulés par la cellule. En effet, les allocations de PDSCH et de PUSCH pour un paquet VoIP occupent typiquement très peu de PRB en fréquence, de sorte que le PDCCH serait le facteur limitant la capacité d'appels voix si toutes ces allocations devaient être signalées dynamiquement.

Nous décrivons dans ce qui suit comment une allocation semi-persistante est mise en œuvre, ce qui implique les opérations de :

- configuration : pour indiquer les paramètres de l'allocation à l'UE ;
- activation : pour indiquer qu'une transmission est déclenchée, suivant l'allocation semi-persistante précédemment configurée ;
- relâche : pour signaler la fin de l'allocation semi-persistante. L'UE doit alors relâcher les ressources pour qu'elles puissent être réallouées à un autre UE.

Configuration d'une allocation semi-persistante

Une allocation semi-persistante est configurée par l'eNodeB au moyen de la signalisation RRC. Les informations suivantes sont notamment indiquées à l'UE :

- le SPS-RNTI (*Semi-Persistent Scheduling RNTI*), attribué à l'UE pour cette allocation et qui sera ensuite utilisé sur le PDCCH pour activer et relâcher l'allocation semi-persistante, et réaliser les éventuelles retransmissions entre deux transmissions périodiques (voir le chapitre 12) ;
- la période de récurrence de l'allocation, c'est-à-dire l'intervalle de temps entre deux transmissions de données ;
- le nombre de processus HARQ utilisés pour le traitement de ces transmissions par l'UE (pour la voie descendante uniquement).

La période de récurrence de l'allocation est intimement liée au rythme auquel l'application fournit les blocs de données. Le nombre de processus HARQ dépend essentiellement de cette période de récurrence.

Éléments sous droits d'auteur

Cette configuration n'est effective que lorsque l'allocation semi-persistante est activée. Après la relâche de l'allocation semi-persistante, cette configuration est conservée en mémoire par l'UE jusqu'à ce qu'une autre configuration lui soit signalée, ou que la connexion RRC soit relâchée.

L'allocation semi-persistante peut être configurée indépendamment en voie montante et en voie descendante, le SPS-RNTI étant commun aux deux voies.

Activation d'une allocation semi-persistante

L'activation d'une allocation SPS s'effectue par un PDCCH dont le CRC est embrouillé par le SPS-RNTI précédemment alloué à l'UE. Afin de valider que le PDCCH porte bien une activation d'allocation SPS, plusieurs champs du format de DCI porté par le PDCCH doivent être fixés à des valeurs prédéfinies comme indiqué dans [3GPP 36.213, 2009, section 9.2]. En particulier, le paramètre HARQ indiquant la transmission de nouvelles données (NDI, pour *New Data Indicator*, voir le chapitre 11) doit être positionné à 0. Si ce n'est pas le cas, l'UE doit considérer le PDCCH comme non valide.

Les informations suivantes sont signalées dans le PDCCH :

- les ressources allouées en fréquence de façon semi-persistante, c'est-à-dire les PRB à utiliser ;
- le schéma de modulation et codage (MCS, voir le chapitre 4) de la transmission, qui reste fixe tout au long de l'allocation semi-persistante.

À chaque nouvelle occurrence de l'allocation, l'UE décode le PDCCH de la sous-trame associée. Si aucun PDCCH ne porte son C-RNTI, cette occurrence est bien utilisée pour la transmission semi-persistante et, dans ce cas, il décode ou transmet les données suivant le schéma d'allocation indiqué lors de l'activation. En revanche, si un PDCCH portant le C-RNTI de l'UE est présent, l'UE décode les ressources allouées dynamiquement par le PDCCH. L'allocation dynamique peut donc « écraser » ponctuellement une occurrence de l'allocation semi-persistante. En effet, l'UE ne peut pas recevoir dans le même TTI une allocation semi-persistante et une allocation dynamique.

Il faut noter que cette allocation semi-persistante ne peut être utilisée que pour des transmissions initiales. Les retransmissions sont réalisées via une allocation dynamique, indiquée par un PDCCH portant le SPS-RNTI et le NDI à 1 ou par le PHICH (voir le chapitre 11).

La figure suivante illustre le cas d'un UE ayant reçu la configuration d'une allocation SPS pour la voie descendante dans un message RRC. Cette configuration est typiquement réalisée via la procédure *RRC Connection Reconfiguration*, par exemple lors de l'établissement d'un bearer EPS pour un appel VoIP. La période de l'allocation est ici fixée à 20 ms (rythme de création des paquets par le codec voix) et un SPS-RNTI est attribué à l'UE. L'activation SPS est effectuée sur le TTI 0, pris comme référence temporelle ici, sur lequel l'UE reçoit la première PDU MAC associée à cette allocation (PDU 1). Au TTI 20, l'UE reçoit la seconde PDU, sans signalisation sur le PDCCH. Au TTI 25, l'UE reçoit une allocation dynamique, signalée par un PDCCH portant son C-RNTI. Cette allocation est destinée ici à lui transmettre une PDU de grande taille associée à un autre radio bearer, par exemple liée à la navigation de l'utilisateur sur Internet pendant son appel voix. Une allocation dynamique serait également déclenchée si la PDU 2 devait être retransmise, mais elle serait alors signalée à l'aide du SPS-RNTI.

Éléments sous droits d'auteur

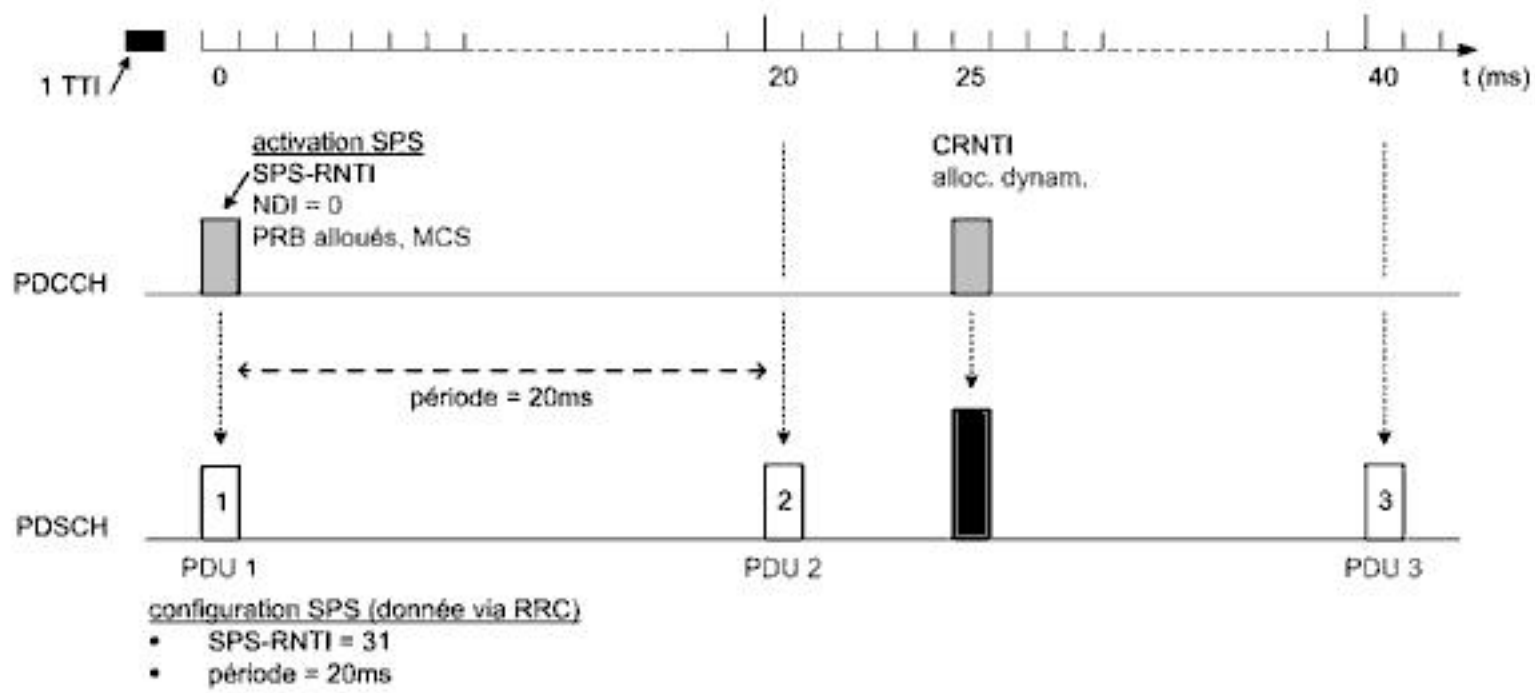


Figure 10-6
Exemple d'activation d'allocation SPS, avec une allocation dynamique survenant dans la seconde période SPS

Relâche de l'allocation semi-persistante

La relâche de l'allocation de ressources est effectuée par l'eNodeB par l'intermédiaire d'un PDCCH dont le CRC est embrouillé par le SPS-RNTI de l'UE et qui porte le NDI à 0. L'indication de relâche est codée en fixant à des valeurs prédéfinies différents champs du format de DCI porté par le PDCCH [3GPP 36.213, 2009, section 9.2]. Comme pour l'activation, le PDCCH est considéré comme non valide si ces champs ne correspondent pas aux valeurs prédéfinies.

Si le PDCCH est validé, l'UE renvoie alors un acquittement à l'eNodeB pour confirmer cette relâche.

L'UE doit, par ailleurs, relâcher l'allocation SPS pour la voie montante s'il ne transmet pas de données pendant N occurrences consécutives de l'allocation SPS. Ce nombre N, compris entre 2 et 8, est configuré par RRC lors de la configuration de l'allocation SPS.

Types d'allocation de ressources en fréquence

Il existe plusieurs types d'allocations en fréquence, qui diffèrent par les allocations qu'ils autorisent et par la manière de les signaler. L'allocation de ressources s'effectue toujours par *paire de PRB*, un PRB de la paire étant alloué sur chaque slot d'une sous-trame où l'UE est servi. L'allocation signalée sur le PDCCH porte ainsi toujours sur les deux slots de la sous-trame visée. Un seul index des PRB alloués est signalé pour les deux slots, mais les PRB alloués peuvent être identiques sur les deux slots, ou varier entre les deux selon des règles normalisées fonction du type d'allocation.

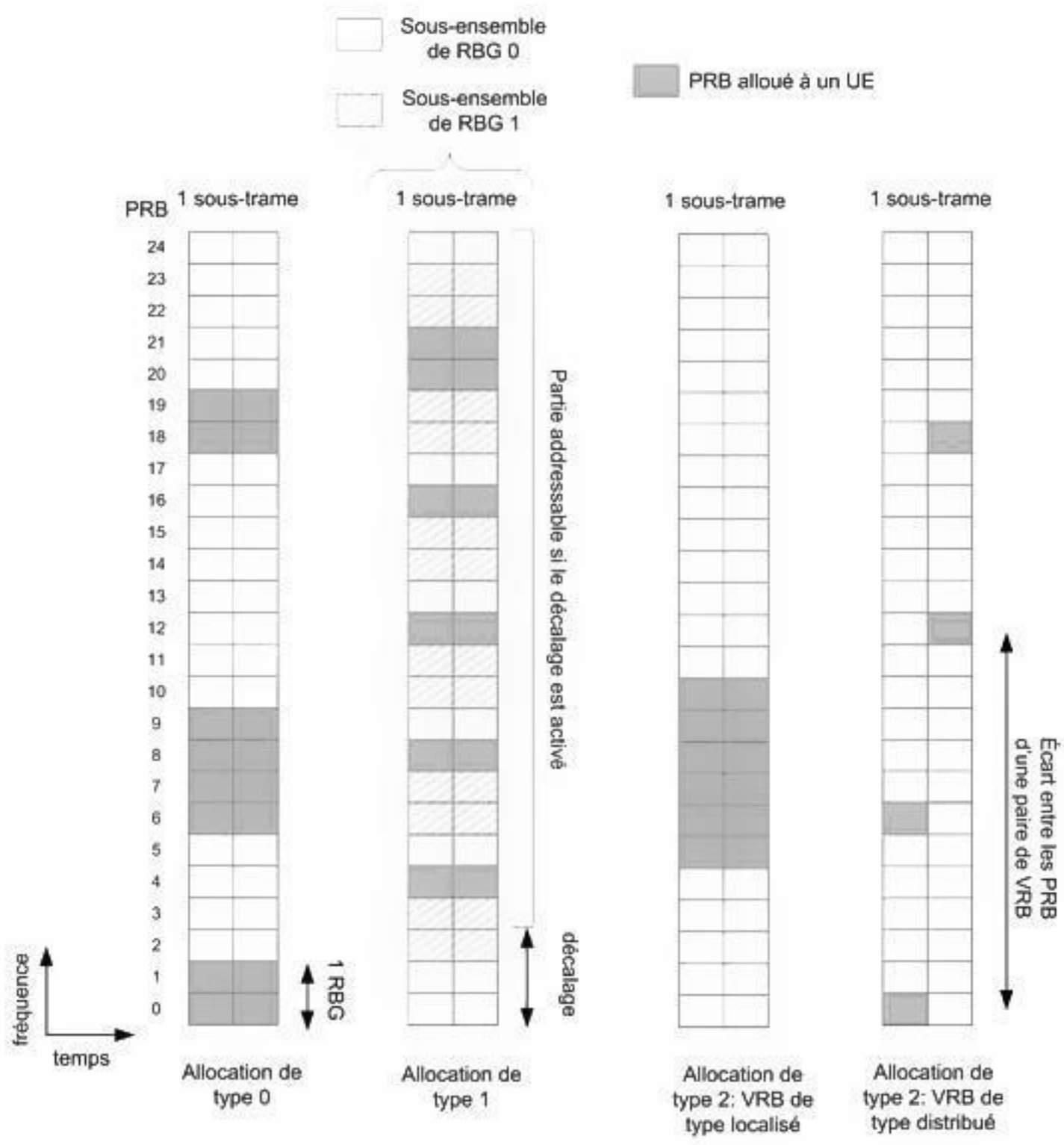
Nous décrivons tout d'abord les types d'allocation en voie descendante, puis le type d'allocation pour la voie montante.

Éléments sous droits d'auteur

En voie descendante

Trois types d'allocation sont possibles en voie descendante, chacun étant associé à une manière de positionner les PRB assignés dans la grille d'allocation temps-fréquence et de signaler l'allocation résultante. Les différents types d'allocation sont illustrés sur la figure suivante et décrits dans le reste de cette section.

Figure 10-7
Exemples d'allocations de ressources pour une bande de 5 MHz, pour les différents types d'allocation en voie descendante



L'allocation de type 0

Le type 0 alloue des groupes (éventuellement disjoints) de PRB consécutifs en fréquence. Les PRB alloués sur les deux slots sont identiques. Un groupe de PRB consécutifs en fréquence est appelé

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

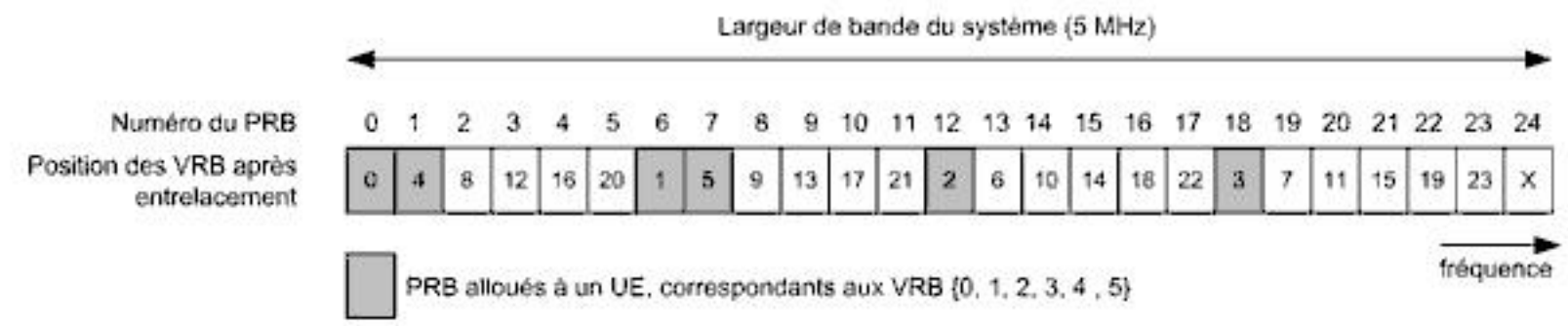


Figure 10-8
Exemple d'allocation de type 2 sur un slot

Le type 2 peut donc gérer des allocations localisées comme des allocations distribuées, cette dernière étant particulièrement optimisée pour des mots de code de petite taille. L'allocation de type 2 est uniquement applicable aux formats de DCI 1A, 1B, 1C et 1D. Pour les formats de DCI 1A, 1B ou 1D, un bit supplémentaire indique si les VRB sont de type localisé ou distribué, tandis que pour le format 1C les VRB sont toujours de type distribué.

Les allocations de ressources sont signalées à l'UE dans le PDCCH, comme décrit au chapitre 12.

En voie montante

En voie montante, seul un ensemble de VRB de type contigu peut être alloué, de manière similaire à l'allocation de type 2 pour la voie descendante. En effet, la voie montante se doit de respecter la propriété de transmission monoporteuse (voir le chapitre 6), ce qui implique que les ressources d'un UE soient contiguës en fréquence. Une valeur d'indication de ressources (RIV) correspondant à un PRB de départ et un nombre de PRB alloués de manière contiguë est signalée dans le format de DCI 0.

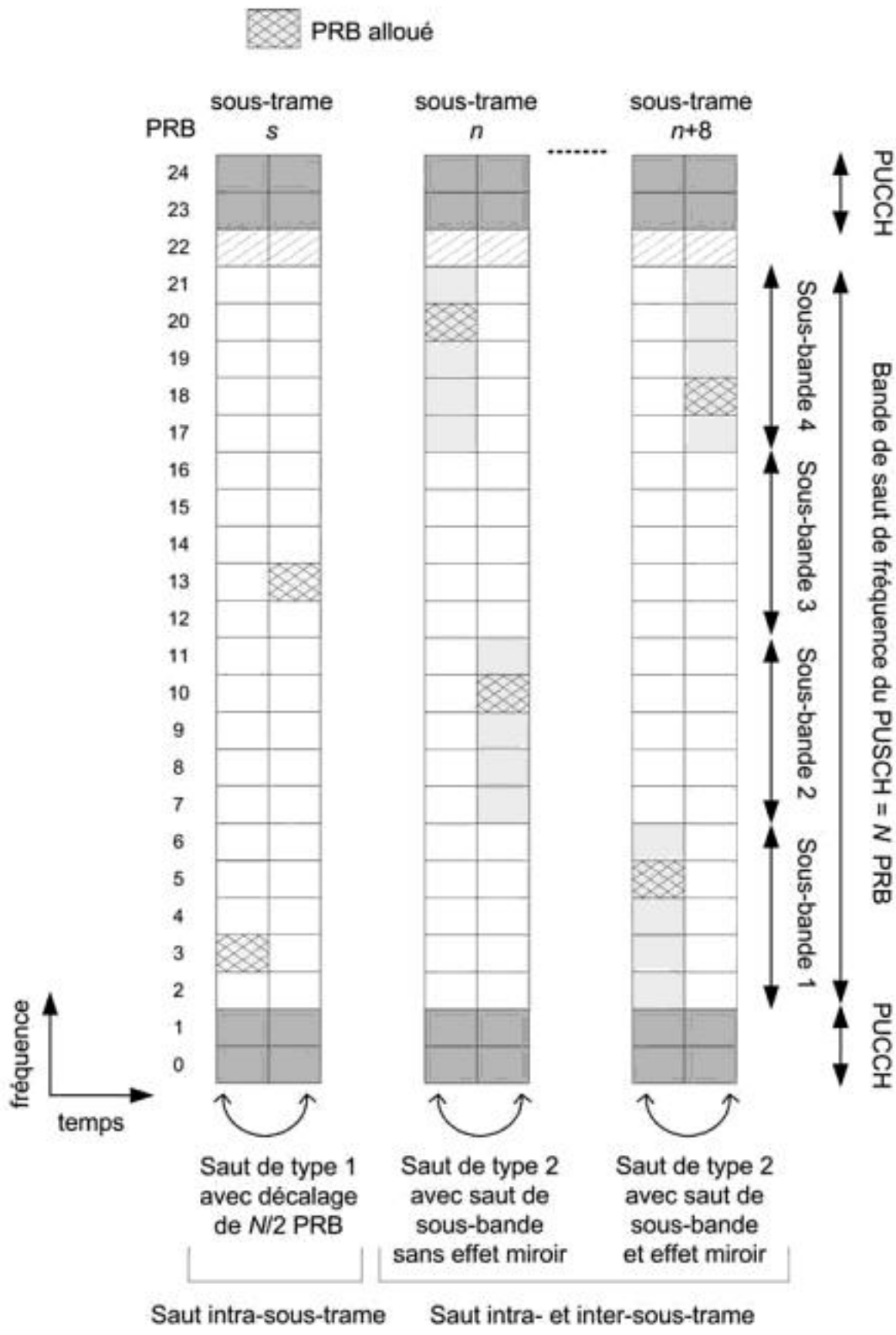
Afin de fournir de la diversité en fréquence et de moyenner l'interférence intercellulaire, ce qui est particulièrement bénéfique pour les paquets de petite taille (par exemple pour la VoIP) et les UE en forte mobilité, la transmission du PUSCH supporte un saut de fréquence similaire à celui des VRB de type distribué de l'allocation de type 2 en voie descendante. Le saut de fréquence consiste à faire varier les PRB utilisés pour la transmission du PUSCH à chaque slot, comme illustré à la figure suivante. La mise en œuvre ou non du saut de fréquence est spécifique à chaque UE et peut être activée pour les allocations de ressources dynamiques ou semi-persistantes et les allocations relatives à la transmission du *Message3* de la procédure d'accès aléatoire.

La mise en œuvre du saut de fréquence pour le PUSCH est activée par un bit dans le PDCCH. Dans le cas contraire, le saut de fréquence n'est pas employé.

Deux modes de saut de fréquence sont définis : d'une part le saut intra- et inter-sous-trame et, d'autre part, le saut inter-sous-trame uniquement. Le saut intra-sous-trame apporte de la diversité au sein d'un mot de code, puisque ce dernier est transmis sur deux régions de la bande du système. Le saut inter-sous-trame fournit de la diversité aux retransmissions non adaptatives d'un même bloc de transport, en les positionnant sur différentes régions de la bande. La configuration dans l'un ou l'autre mode de saut est semi-statique (signalée par RRC) et spécifique à la cellule.

Éléments sous droits d'auteur

Figure 10-9
Exemples de sauts de fréquence du PUSCH de type 1 et type 2, pour une bande de 5 MHz (25 PRB)



Saut de fréquence intra- et inter-sous-trame

Les types suivants de saut de fréquence sont définis :

- le saut par décalage fixe en fréquence dit *de type 1* ;
- le saut par motif de saut prédéfini, dit *de type 2*.

Éléments sous droits d'auteur

Dans le cas du saut de fréquence de type 1, les PRB à utiliser au premier slot de la trame sont donnés par l'allocation de ressources, tandis que les PRB à utiliser au second slot s'obtiennent à partir de ceux du premier slot par un décalage fixe en fréquence indiqué dans le PDCCH [3GPP 36.213, 2009, section 8.4]. Ce décalage est égal à :

- la moitié de la bande occupée par le PUSCH pour une bande totale du système inférieure à 10 MHz ;
- soit la moitié, soit plus ou moins le quart de la bande occupée par le PUSCH lorsque la bande totale du système est supérieure ou égale à 10 MHz.

Un décalage de la moitié de la bande du PUSCH fournit une grande diversité, tandis qu'un décalage d'un quart de bande apporte un gain de diversité tout en maintenant l'allocation de ressources dans une partie donnée de la bande. Cette dernière propriété permet, comme dans l'allocation de type 2, de réserver une partie de la bande du système pour des transmissions localisées et/ou de faciliter la coordination d'interférence. Un exemple de saut de fréquence de type 1 est donné à la figure précédente.

Dans le cas du motif de type 2, les PRB à utiliser dans un slot particulier sont donnés par la combinaison de l'allocation de ressources et d'un motif de saut prédéfini spécifique à la cellule [3GPP 36.211, 2009, section 5.3.4]. La bande du système est dans ce cas divisée en M sous-bandes, où M est signalé par RRC et peut prendre les valeurs 1, 2, 3 ou 4. Le nombre maximal de PRB pouvant être alloué à un UE utilisant le saut de fréquence est alors donné par N/M, où N est le nombre total de PRB utilisés par la cellule pour la transmission du PUSCH.

Deux mécanismes sont utilisés pour mettre en œuvre le saut de fréquence avec motif prédéfini : le saut de sous-bande et l'effet miroir, illustrés à la figure précédente. Dans le saut de sous-bande, la position des ressources allouées saute de sous-bande en sous-bande à chaque slot selon un motif prédéfini, la position des ressources restant fixe par rapport à la sous-bande. L'effet miroir consiste à utiliser les PRB symétriques à ceux indiqués, par rapport au centre de la sous-bande. L'application de l'effet miroir (ON/OFF) s'effectue selon un motif prédéfini indépendant du motif utilisé pour le saut de sous-bande.

Lorsqu'une seule sous-bande est configurée (qui est alors égale à la bande totale du PUSCH), le motif de saut prédéfini ne met en jeu que l'effet miroir. On notera que dans ce cas les UE qui se voient allouer des ressources au milieu de la bande bénéficient de peu de diversité. Le scheduler peut alors prioriser l'allocation des ressources situées aux extrémités de la bande pour les UE utilisant le saut de fréquence. Lorsque plusieurs sous-bandes sont configurées, le motif de saut est basé à la fois sur le saut entre sous-bandes et l'effet miroir.

Le saut de type 2 est particulièrement adapté aux allocations de ressources semi-persistantes, qui ne sont indiquées sur le PDCCH qu'au début de la transmission.

On notera que les formules donnant les ressources à utiliser en présence de saut de fréquence dans [3GPP 36.211, 2009, section 5.3.4] et [3GPP 36.213, 2009, section 8.4] ne travaillent que sur la bande occupée par le PUSCH. Afin que l'UE puisse tenir compte du nombre de PRB réservés pour le PUCCH dans le calcul de son allocation, celui-ci lui est signalé par les couches supérieures sous la forme du paramètre *pusch-HoppingOffset*.

Éléments sous droits d'auteur

Le nombre de sous-bandes est signalé par les couches supérieures. Le type de saut à utiliser (type 1 ou type 2) est signalé dans le PDCCH, par 1 bit pour une bande du système inférieure à 10 MHz et 2 bits sinon.

Les bits signalant le type de saut sont prélevés sur ceux donnant l'allocation de ressources, ce qui a pour effet de réduire le nombre de PRB consécutifs en fréquence pouvant être alloués à l'UE en présence de saut de fréquence, à 10, 10 et 20 PRB consécutifs respectivement pour 5, 10 et 20 MHz de bande totale. Le saut de type 2 ajoute la contrainte supplémentaire que le nombre de PRB consécutifs maximal soit limité à la taille d'une sous-bande. La réduction de la taille d'allocation de ressources en présence de saut de fréquence est justifiée par le fait que la diversité en fréquence est surtout profitable aux petites allocations.

Saut de fréquence inter-sous-trame

Le mode de saut de fréquence inter-sous-trame uniquement utilise également les types de saut 1 et 2, mais se différencie du mode intra et inter-sous-trame de la manière suivante.

Dans le cas du saut de fréquence de type 1, l'allocation correspondant au premier slot est utilisée pour les numéros de (re)transmission pairs du bloc de transport correspondant, tandis que l'allocation pour le second slot est utilisée pour les numéros de retransmission impairs.

De même, dans le cas du saut de fréquence de type 2 où une seule sous-bande est configurée, l'effet miroir est appliqué uniquement aux numéros de retransmission impairs du bloc de transport transmis. Dans le cas du saut de fréquence de type 2 où plusieurs sous-bandes sont configurées, le saut s'effectue de la même façon que dans le cas intra- et inter-sous-trame, si ce n'est que le motif de saut s'applique à chaque sous-trame et non plus à chaque slot.

Ces mécanismes ont pour but de fournir de la diversité en fréquence dans le cas des retransmissions d'HARQ non adaptatives (voir le chapitre 11), pour lesquelles les ressources allouées pour la transmission initiale seraient sinon réutilisées.

Coordination d'interférence intercellulaire (ICIC)

L'interférence intercellulaire est l'un des principaux facteurs limitant la capacité des réseaux mobiles. En GSM, il est courant d'employer un motif de réutilisation de fréquences de telle sorte que des cellules voisines n'utilisent pas les mêmes fréquences, réduisant ainsi l'interférence entre cellules. En UMTS et HSPA, chaque cellule réutilise l'ensemble de la bande de fréquences disponible, les cellules et UE étant séparés par des codes robustes vis-à-vis de l'interférence. On parle alors d'un motif de réutilisation de fréquences unité. En LTE, un déploiement typique s'effectue également selon un motif de réutilisation de fréquences unité. La dimension fréquentielle de l'allocation de ressources en LTE permet cependant de mettre en œuvre des mécanismes de coordination d'interférence intercellulaire, qui offrent une gestion des ressources plus efficace que la simple réutilisation de fréquences. Cette fonctionnalité est couramment appelée ICIC en LTE, pour *Inter-Cell Interference Coordination*.

Éléments sous droits d'auteur

Nous présentons dans ce qui suit les grandes familles de techniques d'ICIC, ainsi que les mécanismes normalisés en LTE pour permettre l'échange d'informations de coordination entre eNodeB voisins.

ICIC en voie descendante

Principe

Le principe général de l'ICIC est de protéger certaines ressources temps-fréquence de l'interférence intercellulaire, en appliquant des restrictions sur la puissance d'émission sur ces ressources de manière coordonnée avec les cellules voisines. Ces ressources protégées sont destinées à être allouées aux UE sévèrement affectés par l'interférence intercellulaire, typiquement ceux situés en bordure de cellule. Par contraste, les ressources non protégées sont allouées aux UE souffrant peu de l'interférence intercellulaire, typiquement les UE situés dans la partie intérieure de la cellule. En effet, ces derniers reçoivent une puissance importante de leur cellule serveuse, tandis que la puissance reçue des cellules voisines est réduite du fait des pertes de propagation liées à la distance des antennes associées. Ces UE sont donc naturellement protégés de l'interférence intercellulaire.

Les ressources protégées peuvent être créées ou mises à jour au cours du temps afin de s'adapter aux variations du trafic et des conditions radio des UE au sein d'un groupe de cellules. La réactivité de cette reconfiguration est conditionnée par la latence avec laquelle les messages de coordination sont échangés entre cellules voisines. On distingue ainsi trois grands niveaux de coordination.

- La coordination *statique* : les ressources protégées restent fixes au cours du temps, ou varient avec une périodicité très longue (de l'ordre de la journée).
- La coordination *semi-statique* : des messages de coordination peuvent être échangés avec une latence de l'ordre de la dizaine ou de la centaine de millisecondes. Cette coordination permet de s'adapter aux conditions du trafic, mais pas de suivre les variations du canal radio.
- La coordination *dynamique* : les messages de coordination sont échangés avec une latence de l'ordre de la milliseconde. Cette coordination peut suivre les variations du canal radio.

Que ces ressources protégées soient créées de manière statique, semi-statique ou dynamique, il est de la responsabilité du scheduler de les allouer aux UE qui en ont effectivement besoin. L'ICIC est donc intimement liée au scheduling.

Il existe deux grandes familles de techniques d'ICIC :

- la réutilisation fractionnaire de fréquences, souvent abrégé en FFR (pour *Fractional Frequency Reuse*) ;
- la réutilisation souple de ressources, aussi appelée *Soft Reuse*.

La figure suivante décrit des exemples de configuration de la puissance d'émission en fonction de la fréquence pour ces deux familles de techniques. Dans chaque cas, la bande du système est découpée en sous-bandes, chacune d'entre elles pouvant être classifiée en sous-bande *protégée* ou *non protégée*.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Il est important de noter que ces mécanismes de signalisation sur X2 visent à coordonner des cellules contrôlées par des eNodeB différents. En effet, la coordination de cellules contrôlées par un même eNodeB s'effectue naturellement sans échange avec les eNodeB voisins. De ce fait, une information complète sur les allocations de ressources prévues dans ces cellules au cours des prochains TTI est disponible au niveau du scheduler, cette disponibilité étant immédiate puisque non soumise à la latence de l'interface X2. Un scheduling dynamiquement coordonné entre cellules voisines peut alors être mis en œuvre, par opposition à la coordination semi-statique imposée par les échanges sur l'interface X2. Un tel scheduling évite par exemple de réutiliser dans une cellule des ressources temps-fréquence attribuées dans une cellule voisine à un UE localisé à la bordure entre ces deux cellules, mais n'applique cette restriction que lorsque des UE effectivement localisés dans cette région demandent à être servis, ce qui est plus efficace que de restreindre l'accès à ces ressources de manière semi-statique.

Calcul du CQI et démodulation en présence d'ICIC

Le CQI est calculé par l'UE à partir des signaux de référence CRS. Or ces derniers sont transmis avec une puissance constante sur la bande du système. De ce fait, le calcul du CQI par l'UE ne tient pas compte des adaptations de puissance dues à l'ICIC. Afin d'évaluer la qualité de canal que l'UE percevra effectivement sur ces ressources, l'eNodeB doit par conséquent ajuster le CQI reçu de l'UE en fonction de la variation de puissance appliquée au PDSCH sur les ressources allouées. Alternativement, l'eNodeB peut configurer le rapport entre l'EPRE des CRS et l'EPRE du PDSCH (défini à la section « Contrôle de puissance », p. 239) en fonction de la puissance de la sous-bande dans laquelle il a l'intention de servir l'UE, de sorte que ce dernier retourne directement un CQI représentatif de sa performance future. Dans ce cas néanmoins, le CQI ne sera précis que pour les sous-bandes transmises avec la puissance correspondant au rapport d'EPRE configuré, et l'eNodeB devra employer un mécanisme de compensation pour déduire le CQI sur les autres sous-bandes. Quelle que soit la méthode employée, le retour d'un CQI par sous-bande est avantageux afin de tenir compte des restrictions de puissance mises en œuvre par les eNodeB voisins.

La connaissance de la puissance du PDSCH est également nécessaire à l'UE pour la démodulation des modulations d'ordre élevé, comme la 16QAM et la 64QAM (voir aussi la section « En voie descendante », p. 240). Dans le cas de l'ICIC, l'eNodeB doit donc, en principe, signaler à l'UE la valeur du rapport d'EPRE relatif à la sous-bande où l'UE sera servi. La signalisation par RRC de ce rapport contraint le scheduler à servir l'UE sur une même sous-bande pendant une période de temps relativement longue, ce qui limite la flexibilité de l'allocation de ressources. Une parade à cette contrainte est de servir l'UE avec la modulation QPSK sur les sous-bandes ne correspondant pas au rapport d'EPRE signalé, puisque sa démodulation ne nécessite pas la connaissance de la puissance du PDSCH.

Le choix de la stratégie à adopter sur ces aspects est laissé à l'implémentation des eNodeB.

ICIC en voie montante

En voie montante, un UE en bordure de cellule émet typiquement avec une puissance plus importante qu'un UE au centre de la cellule, tout en étant de fait plus proche des cellules voisines. Lorsqu'une cellule sert un UE en bordure de cellule, il est ainsi bénéfique pour une cellule interférée

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

- en fonction du service : les allocations semi-statiques (par exemple pour la VoIP) étant associées à un MCS fixe pendant de longues périodes, il peut être nécessaire de contrôler le PDSCH en puissance en fonction des remontées de CQI afin d'assurer la qualité du service ;
- pour la coordination d'interférence, comme décrit à la section « Coordination d'interférence intercellulaire (ICIC) » (p. 233).

Ainsi, l'eNodeB a la possibilité d'ajuster individuellement la puissance allouée au PDSCH de chaque UE.

L'adaptation de la puissance du PDSCH due au MU-MIMO (0 ou -3 dB, suivant qu'un ou deux UE sont multiplexés) est signalée de manière dynamique dans le PDCCH.

La connaissance de la puissance qui serait reçue pour le PDSCH en l'absence de transmission est importante pour déterminer le CQI. Afin de permettre à l'UE de définir cette information, l'eNodeB lui indique le rapport entre l'énergie émise par élément de ressource (EPRE, pour *Energy Per Resource Element*) pour les CRS et l'EPRE pour le PDSCH. Ce rapport est spécifique à l'UE et est signalé de manière semi-statique par le protocole RRC. Plus précisément, la valeur signalée vaut pour les symboles OFDM où les CRS sont absents, la valeur pour les autres symboles s'en déduisant selon une règle normalisée [3GPP 36.213, 2009, section 5.2]. L'EPRE exclut l'énergie utilisée pour la transmission du préfixe cyclique et est moyennée sur l'ensemble des points de la constellation de la modulation considérée. À partir de la mesure de la puissance des CRS en réception, l'UE déduit quelle puissance serait reçue du PDSCH avant que celui-ci soit effectivement émis. Notons qu'une seule valeur de rapport d'EPRE est signalée pour l'ensemble de la bande, même si la puissance d'émission varie sur la bande, ce qui est notamment le cas de l'ICIC. Le calcul du CQI en présence d'ICIC est discuté à la section correspondante (p. 237).

La signalisation par l'eNodeB du rapport entre l'EPRE des CRS et l'EPRE du PDSCH assiste également l'UE dans son estimation de la puissance du PDSCH, dont une connaissance précise est indispensable à l'opération de démodulation lorsque des modulations d'ordre élevé sont utilisées (16QAM et 64QAM). Même si ce rapport peut être estimé par l'UE pour la démodulation, au prix d'une dégradation de performance tolérable [Qualcomm, 2008], la norme garantit à l'UE qu'il peut s'appuyer sur le rapport d'EPRE signalé. Comme pour le calcul du CQI, des précautions particulières doivent donc être prises pour la démodulation en présence d'ICIC ; elles sont discutées à la section correspondante (p. 237).

Notons enfin que la puissance émise sur les CRS (spécifique à la cellule) est également signalée à l'UE (par le paramètre *Reference-signal-power*), ce qui lui permet, à partir de la mesure de puissance reçue des CRS, d'estimer ses pertes de propagation.

L'allocation de puissance aux canaux de contrôle (comme le PDCCH) est effectuée individuellement par canal afin de garantir une bonne réception de ces canaux cruciaux pour le bon fonctionnement du système. En particulier, la puissance du PDCCH d'un UE donné peut être ajustée individuellement. La puissance des canaux de contrôle n'est pas signalée à l'UE. En effet, l'UE ne calcule pas de CQI pour ces canaux et la modulation QPSK qu'ils utilisent ne nécessite pas d'estimer précisément leur puissance.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

particulièrement bénéfique lorsque la qualité du canal varie dans le temps de manière difficile à prévoir, par exemple à cause de la fluctuation de l'interférence due au scheduling dynamique.

Dans le cas de la redondance incrémentale, une information redondante supplémentaire est transmise afin d'aider le décodage. Cette information supplémentaire est typiquement constituée (au moins en partie) de bits de parité non encore transmis, ce qui revient à réduire le rendement effectif du code au fil des retransmissions. Le décodeur opère alors sur la séquence formée des bits reçus au cours des (re)transmissions successives. L'IR adapte ainsi itérativement le rendement du code effectivement utilisé (par exemple, un turbo-code en LTE), en fonction du canal. En comparaison avec la combinaison de Chase, une retransmission en IR apporte donc le gain de performances du code employé par rapport à un codage à répétition. Un autre avantage de l'IR est que le nombre de bits de parité émis à chaque retransmission n'est pas contraint à être égal à celui de la transmission initiale. L'émetteur peut ainsi ajuster finement la quantité de redondance nécessaire en fonction de sa connaissance du canal.

Lorsqu'une retransmission porte uniquement des bits codés nouveaux, on parle d'IR *totale*. L'IR *partielle* est également possible, où une retransmission est formée en partie de nouveaux bits et en partie de bits déjà transmis. Ces derniers sont alors combinés avec leurs versions déjà présentes dans le buffer selon la combinaison de Chase. On pourra se reporter au livre [Lin, Costello, 2004] pour une présentation détaillée des mécanismes HARQ.

Par son adaptation du rendement de codage aux conditions radio, l'HARQ améliore l'efficacité spectrale. En effet, les transmissions initiales peuvent être effectuées selon un schéma de codage moins protégé, une redondance supplémentaire n'étant ajoutée que si les conditions radio le nécessitent. Par contraste, un schéma sans HARQ doit mettre en œuvre un rendement du code satisfaisant impérativement le BLER cible en toute circonstance, donc nécessairement plus faible, même lorsqu'une protection moindre serait suffisante. La figure suivante illustre ce gain, en comparant la durée de transmission de dix blocs de transport selon deux schémas de transmission visant tous deux un même BLER résiduel : l'un sans HARQ (le schéma 1) avec un rendement de code R_1, et l'autre avec HARQ (le schéma 2), de rendement de code R_2 pour les transmissions initiales. Le bloc de transport 2 subit une forte interférence et ne peut être décodé par le schéma 2, tandis qu'au même moment la protection plus forte du schéma 1 lui permet de résister à cette perturbation. Le bloc 2 doit donc être retransmis pour le schéma 2. Néanmoins, on constate que malgré la retransmission, le schéma 2 transmet les dix blocs de transport sans erreur plus rapidement que le schéma 1.

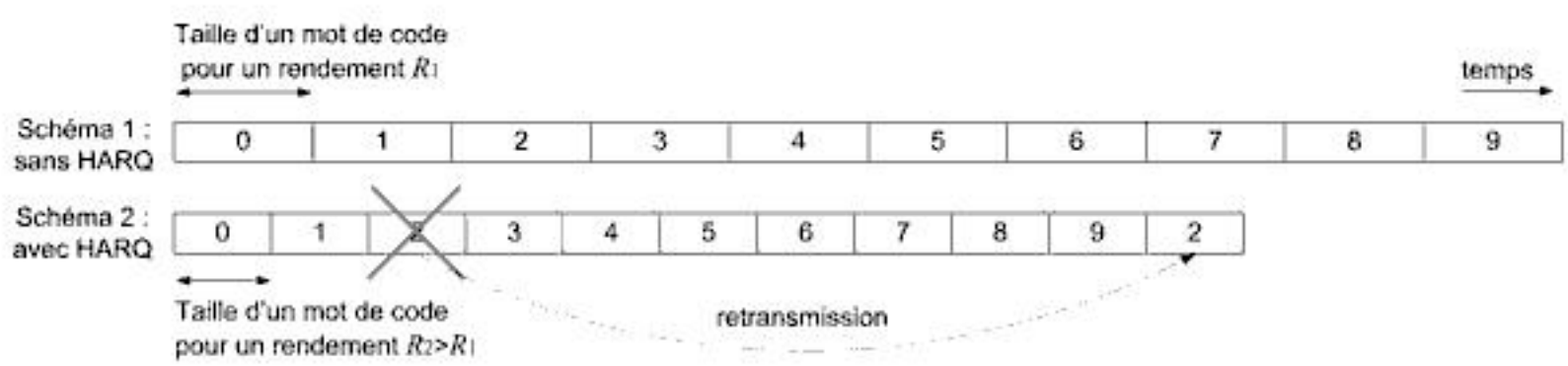


Figure 11-2
Gain d'efficacité spectrale grâce aux retransmissions

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

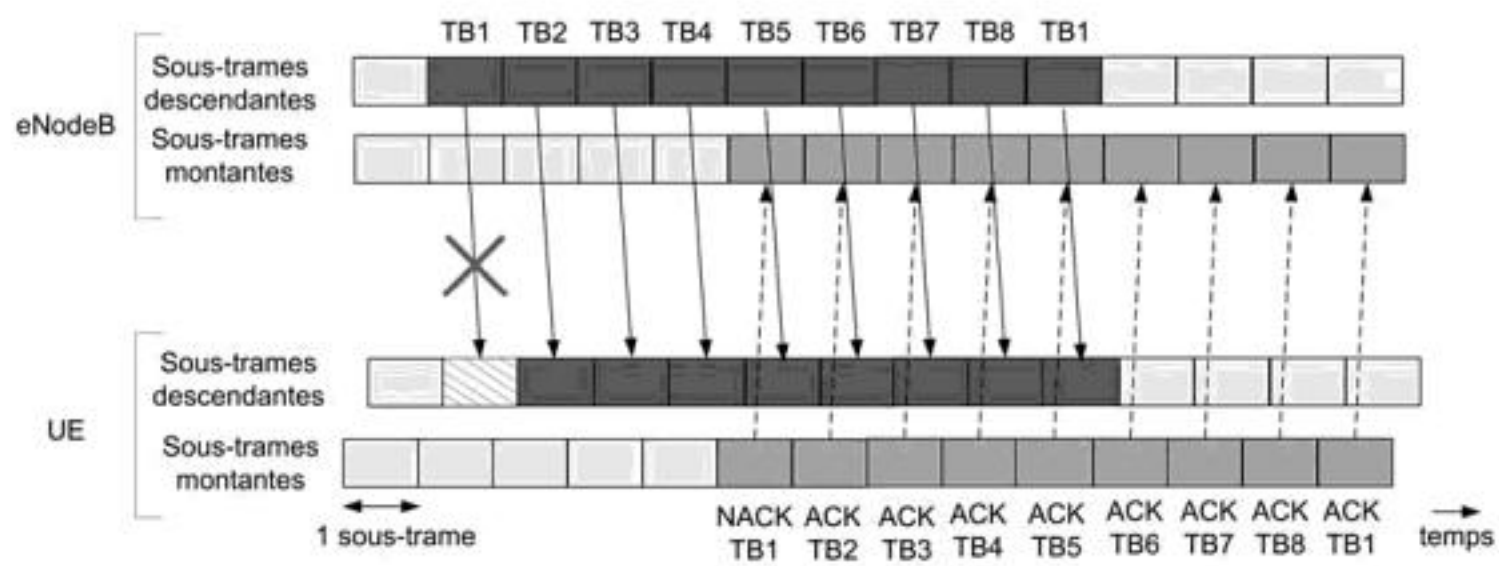
You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Il existe un délai de traitement entre la réception d'un bloc de transport et la transmission de l'acquittement correspondant, pendant lequel le récepteur doit effectuer la démodulation et le décodage du bloc, créer l'acquittement et préparer son émission (codage et modulation, auxquels s'ajoutent le scheduling et le multiplexage dans le cas de l'eNodeB). En LTE, un budget de temps de 3 ms est alloué pour effectuer ces tâches, ce budget incluant l'avance de temps nécessaire lorsque l'UE transmet des acquittements en voie montante. Un délai de traitement similaire existe entre la réception de l'acquittement et la préparation de la retransmission éventuelle, au niveau de l'émetteur du bloc de transport.

Aussi, le temps d'inactivité de l'émetteur entre la transmission initiale et une retransmission est de plusieurs millisecondes. Afin que cette inactivité ne pénalise pas le débit, plusieurs processus HARQ opèrent simultanément. Ce mécanisme est appelé *N stop-and-wait*. La figure suivante illustre ce mécanisme en reprenant le même exemple, mais cette fois avec 8 processus HARQ : le bloc de transport TB1 transmis via le premier processus HARQ n'est pas convenablement décodé et doit être retransmis, tandis que tous les blocs transmis via les autres processus HARQ sont convenablement décodés dès leur transmission initiale.

Figure 11-5
Illustration du mécanisme N stop-and-wait, dans la liaison descendante du LTE FDD



En LTE FDD, il existe 8 processus HARQ par UE en voie montante, tandis qu'en voie descendante l'UE en supporte jusqu'à 8. En TDD, le nombre de processus HARQ en voie montante et en voie descendante dépend de la configuration voie montante/voie descendante [3GPP 36.213, 2009, sections 7 et 8]. En MIMO, l'eNodeB peut transmettre deux blocs de transport vers un même UE sur un TTI. Dans ce cas, le même processus HARQ gère la transmission de ces deux blocs de transport.

HARQ synchrone et asynchrone

Lorsqu'un processus HARQ est contraint d'opérer sur des TTI prédéterminés pour ses (re)transmissions, on parle d'HARQ *synchrone*. Au contraire, lorsqu'un processus HARQ peut opérer sur n'importe quel TTI, l'HARQ est dit *asynchrone*. L'HARQ synchrone dispense de signaler le numéro du processus HARQ associé à la transmission initiale comme aux retransmissions, ce qui est plus efficace spectralement, mais réduit la flexibilité de l'allocation de ressources. En LTE,

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Dans le cas d'un bloc transmis initialement à l'aide d'une allocation dynamique (signalée par l'identifiant C-RNTI sur le PDCCH), l'UE détermine qu'il s'agit d'une retransmission si la valeur du paramètre NDI reçu avec le bloc est identique à la dernière valeur enregistrée pour ce processus HARQ. Si, au contraire, la valeur du NDI a changé (par exemple, est passée de 0 à 1) pour ce processus, le processus HARQ considère qu'il s'agit d'un nouveau bloc.

Si le bloc a été précédemment envoyé à l'UE via une allocation semi-persistante, l'UE reconnaît la retransmission au fait qu'elle est signalée par son indicateur SPS-RNTI sur le PDCCH, avec le NDI à 1. Le processus HARQ indiqué sur le PDCCH permet à l'UE de déterminer à quelle transmission initiale cette retransmission est associée. Cette différence d'utilisation du NDI avec le cas d'une retransmission via C-RNTI tient au fait que le couple {SPS-RNTI, NDI=0} est réservé à l'activation et à la relâche de l'allocation SPS (voir le chapitre 10).

On notera qu'une retransmission dans le sens descendant est toujours effectuée à l'aide d'une allocation dynamique (via C-RNTI ou SPS-RNTI), que la transmission initiale soit réalisée de façon dynamique ou semi-persistante.

Si l'UE détermine qu'il s'agit d'un nouveau bloc, les données présentes dans le buffer sont remplacées par le nouveau bloc. Dans le cas d'une retransmission, le bloc est combiné avec les données déjà présentes (issues de transmissions précédentes du même bloc). Dans les deux cas, l'UE essaie de décoder les données du buffer. S'il y parvient, l'unité de données MAC (PDU) est analysée : l'en-tête est interprété et les différents éléments de cette PDU sont, selon leur type, transmis à la couche RLC (cas, par exemple, des données du plan usager ou d'une signalisation RRC), ou conservés et interprétés par la couche MAC (cas d'une commande de l'eNodeB pour activer le mode DRX). Par ailleurs, l'UE envoie un acquittement positif à l'eNodeB pour lui signaler qu'une retransmission n'est pas nécessaire. Si le décodage échoue, l'UE transmet à l'eNodeB un acquittement négatif.

Dans certains cas cependant, aucun acquittement n'est délivré par l'UE. C'est notamment le cas lors du décodage des informations de la cellule, diffusées via le BCH à l'ensemble des mobiles. D'une part, cela conduirait à une charge de signalisation inacceptable sur la cellule ; d'autre part, ces informations sont transmises avec une forte protection, de sorte que la probabilité de mal décoder le BCH est très faible. Enfin, les données du BCH sont répétées périodiquement, permettant aux UE de les décoder en combinant ces répétitions (voir le chapitre 8).

La figure 11-8 illustre le traitement HARQ sur la voie descendante pour un UE ayant une allocation SPS active, pour un appel VoIP par exemple, et qui reçoit par ailleurs des données via des allocations dynamiques (par exemple, pour la signalisation IMS ou la réception d'une photo).

- Au TTI 0, l'UE reçoit un bloc sur l'allocation SPS, traité par le processus HARQ 1. L'entité HARQ ne parvient pas à décoder correctement le bloc et retourne un NACK à l'eNodeB sur le PUCCH.
- L'eNodeB retransmet le bloc via une allocation dynamique, signalée par le SPS-RNTI de l'UE sur le PDCCH. Cette allocation indique le processus HARQ 1, le NDI à 1 et la version de redondance RV1.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

- ou si l'UE a reçu une allocation signalée avec l'identifiant C-RNTI et si la valeur du paramètre NDI est identique à celle précédemment reçue pour ce processus HARQ ; l'UE effectue alors une retransmission adaptative ;
- ou encore si l'UE a reçu une allocation signalée avec l'identifiant SPS-RNTI, avec un NDI à 0 ; l'UE effectue alors une retransmission adaptative.

Ainsi, les ressources allouées de façon semi-persistante sont utilisées pour des transmissions initiales, comme pour le sens descendant. De même, la signalisation explicite des retransmissions (adaptatives) ou des transmissions initiales via le PDCCH suit un schéma similaire au sens descendant. En revanche, on voit que la réception par l'UE d'un acquittement négatif (NACK) suffit à déclencher une retransmission à la prochaine occasion de transmission du processus HARQ concerné.

Lorsqu'un acquittement positif a été reçu par l'UE pour un bloc N, l'UE ne supprime pas ce bloc avant la transmission du prochain bloc (N+1) par le même processus HARQ. Ainsi, il sera capable de le renvoyer si l'eNodeB le lui demande avant la transmission du bloc N+1. Cela peut se produire dans le cas où l'acquittement négatif NACK envoyé par l'eNodeB a été corrompu lors de la transmission et décodé par l'UE comme un acquittement positif ACK. La retransmission éventuelle du bloc ne se fera alors que par une demande explicite de l'eNodeB (via le PDCCH).

Puisqu'elles peuvent ne pas être commandées directement par l'eNodeB (cas d'une transmission semi-persistante), les transmissions sur la voie montante ou les acquittements associés peuvent entrer en collision avec des intervalles de mesure (appelés *measurement gaps* dans les spécifications 3GPP). En effet, ces intervalles sont programmés par l'eNodeB, avec une période de récurrence, par exemple pour que l'UE effectue des mesures sur une autre fréquence LTE, ou sur un autre système (UMTS, GSM, CDMA2000).

Deux types de collision peuvent ainsi se produire.

- Un acquittement d'un bloc émis sur la voie montante est attendu dans un TTI où un intervalle de mesure est programmé : dans ce cas, l'UE doit considérer qu'il a reçu cet acquittement. Si l'eNodeB n'a en fait pas pu décoder ce bloc, il devra demander sa retransmission via le PDCCH (retransmission adaptative).
- Une transmission ou une retransmission doit avoir lieu sur la voie montante pendant un intervalle de mesure : l'UE annule alors cet envoi et procède à une retransmission après l'intervalle de mesure, sur les mêmes ressources (retransmission non adaptative).

Pour limiter l'émission répétée d'un même bloc, l'eNodeB configure via la signalisation RRC le nombre maximal de retransmissions HARQ que peut effectuer l'UE. Si ce seuil est atteint, l'UE supprime le bloc du buffer associé au processus HARQ qui traite ce bloc. Dans le sens descendant au contraire, le seuil n'est pas indiqué par la signalisation et l'eNodeB peut effectuer autant de retransmissions qu'il le souhaite ; un nombre maximal de retransmissions est cependant généralement également fixé. On notera que, pour la voie descendante comme pour la voie montante, si le bloc HARQ n'est toujours pas correctement reçu après le nombre maximal de retransmissions, une retransmission ARQ du bloc sera éventuellement demandée par la couche RLC.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

12

Signalisation de contrôle PHY-MAC

Sommaire : *Signalisation des allocations de ressources – Formats de DCI, identifiants RNTI et décodage du PDCCH – Transmission des acquittements d'HARQ (ACK/NACK) – Transmission des requêtes de scheduling (SR) – Retour d'information sur l'état du canal (CQI, PMI, RI) – Retour d'information de contrôle sur le PUSCH*

Ce chapitre décrit la manière dont sont transmises les informations nécessaires à l'étroite coopération entre la couche physique et la couche MAC, notamment pour signaler les allocations de ressources, transmettre les acquittements d'HARQ et retourner les informations sur l'état du canal.

L'optimisation de l'interfonctionnement entre la couche physique et la couche MAC, qui est l'une des clés de l'interface radio du LTE, repose sur l'échange dynamique d'informations de contrôle entre l'eNodeB et l'UE. Cet échange dynamique assure la réactivité du système, notamment des mécanismes liés à la connaissance de l'état du canal (remontées d'informations, affectation de ressources) et à la latence des transmissions de données (acquittements). Les informations échangées ainsi que le canal physique qui les porte sont récapitulés ci-après :

- informations d'allocation de ressources dynamique, pour les voies montante et descendante (PDCCH) ;
- informations sur la modulation et le codage utilisés par l'eNodeB en voie descendante ou à utiliser par l'UE en voie montante pour une transmission de données (PDCCH) ;
- acquittements d'HARQ (ACK/NACK) pour la voie montante (PDCCH, PHICH) et la voie descendante (PUCCH, PUSCH) ;
- retour d'informations de contrôle (CQI, PMI, RI) pour l'adaptation de lien et le MIMO en voie descendante (PUCCH, PUSCH), requête de transmission apériodique de CQI (PDCCH) ;

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Détail du format de DCI 2

Champ		Nombre de bits d'information	
		Générique	Pour FDD, une bande de 10 MHz et 2 ports d'antenne
Type d'allocation de ressources (0/1) ; ce champ est absent et le type 0 est supposé si $N_{RB}^{DL} \leq 10$		1 si $N_{RB}^{DL} > 10$, 0 sinon	1
Affectation des PRB		$\lceil N_{RB}^{DL} / P \rceil$	17
Commande de contrôle de puissance pour le PUCCH		2	2
Indice d'allocation en voie descendante (DAI, seulement présent en TDD)		2	0
Numéro du processus HARQ		3 (FDD), 4 (TDD)	3
Indicateur d'échange entre bloc de transport et mot de code (indique l'association entre bloc de transport et mot de code lorsque deux mots de code sont transmis, voir le chapitre 5, section « Mot de code ou bloc de transport ? », p. 133)		1	1
Pour le bloc de transport 1	MCS	5	5
	Indicateur de nouvelles données	1	1
	Version de redondance	2	2
Pour le bloc de transport 2	MCS	5	5
	Indicateur de nouvelles données	1	1
	Version de redondance	2	2
Information de précodage (PMI et nombre de couches)		3 pour 2 ports d'antenne à l'eNodeB 6 pour 4 ports d'antenne à l'eNodeB	3
			Total : 43

Adressage du PDCCH et identifiant RNTI

L'indication des destinataires d'un PDCCH s'effectue au moyen d'un identifiant RNTI spécifique à un UE ou à un groupe d'UE. L'identification s'effectue via le codage de canal, en embrouillant le CRC du PDCCH par l'identifiant RNTI associé. Afin de déterminer si un ou plusieurs PDCCH lui sont destinés, l'UE doit tenter de décoder de manière « aveugle » un ensemble de PDCCH candidats. La procédure de décodage du PDCCH sera décrite à la section suivante.

Outre l'identification de l'UE destinataire, l'identifiant RNTI code également la nature des données visées par le format de DCI. Par exemple, l'identifiant RNTI indique à l'UE si une allocation de ressources en voie descendante vise des données de service, des Informations Système, ou encore des informations liées à une procédure d'accès aléatoire. Dans le cas de données de service, l'identifiant RNTI indique si l'allocation de ressources portée par un format de DCI est dynamique ou semi-persistante (par exemple, pour un appel voix). L'identifiant RNTI détermine ainsi l'interprétation des informations portées par le format de DCI, et donc les traitements à mettre en œuvre en émission ou en réception pour l'allocation reçue.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Enfin, la précision du PMI est déterminée par la taille du dictionnaire employé pour le déterminer. Afin de réduire la charge sur la voie montante, le retour de PMI peut être configuré pour ne considérer qu'un sous-ensemble du dictionnaire utilisé par l'eNodeB.

Retour périodique et retour apériodique

On distingue tout d'abord deux grandes familles de modes de retour :

- le retour périodique, sommaire et économe en ressources radio, configuré selon une périodicité fixée par RRC ;
- le retour apériodique, détaillé et plus coûteux en ressources, déclenché par l'eNodeB.

Le retour périodique est porté par le PUCCH lorsque l'UE n'a pas de données à transmettre, et par le PUSCH lorsqu'une allocation est fournie à l'UE pour la voie montante. Le retour apériodique est lui exclusivement porté par le PUSCH. Il est requis par l'eNodeB via un PDCCH avec format de DCI 0 ou par l'allocation relative à la transmission du *Message3* de la procédure d'accès aléatoire (*Random Access Response Grant*), par l'intermédiaire du champ *CQI request*.

La charge utile possible sur un PUCCH est limitée ; de plus, les ressources PUCCH restreintes ne permettent pas à chaque UE de transmettre un PUCCH à chaque sous-trame. C'est pourquoi les modes de retour possibles sur ce canal n'incluent pas d'information détaillée, mais seulement une information suffisante pour autoriser la transmission.

En revanche, le PUSCH permet de véhiculer beaucoup plus d'information. L'eNodeB peut ainsi déclencher un retour apériodique sur le PUSCH afin d'activer un mode de retour plus précis, par exemple pour mettre en œuvre un scheduling adaptatif en fréquence plus performant. En particulier, les retours d'information sur l'état du canal les plus complets, qui remontent simultanément des CQI ou des PMI pour toutes les sous-bandes du système, ne peuvent être effectués que sur le PUSCH car la quantité de données associée excède la capacité du PUCCH. On notera qu'en raison de la charge plus importante sur la voie de retour, il est préférable de n'utiliser ces modes que pour les UE que l'eNodeB a l'intention de servir à court terme. Le retour apériodique peut également être employé par l'eNodeB pour rafraîchir sa connaissance des conditions de canal large bande d'un UE entre deux occurrences de retour périodique, si celles-ci sont configurées avec une périodicité longue.

Les retours apériodique et périodique sont décrits dans les deux sections suivantes. Notons que le retour périodique est optionnel, de sorte que l'eNodeB peut n'utiliser que le mode de retour apériodique.

Dans le cas où un retour périodique et un retour apériodique sont prévus pour être transmis sur la même sous-trame, l'UE doit transmettre le retour apériodique uniquement.

Retour apériodique

Le retour apériodique de CQI, PMI et RI sur le PUSCH est déclenché par une commande reçue dans un format de DCI 0, ou par une allocation en réponse à un accès aléatoire. En FDD, le retour s'effectue à la sous-trame montante $n+4$ pour un format de DCI 0 reçu à la sous-trame descendante n. En TDD, la sous-trame à utiliser dépend de la configuration voie montante/descendante,

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

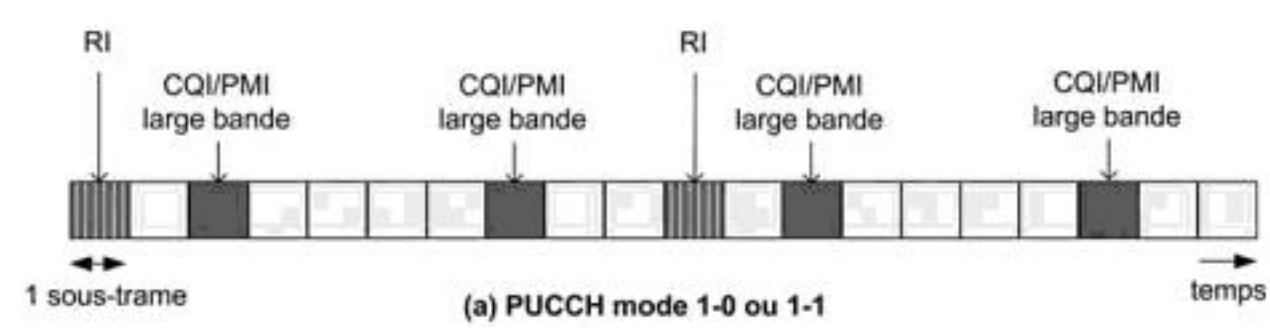
You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

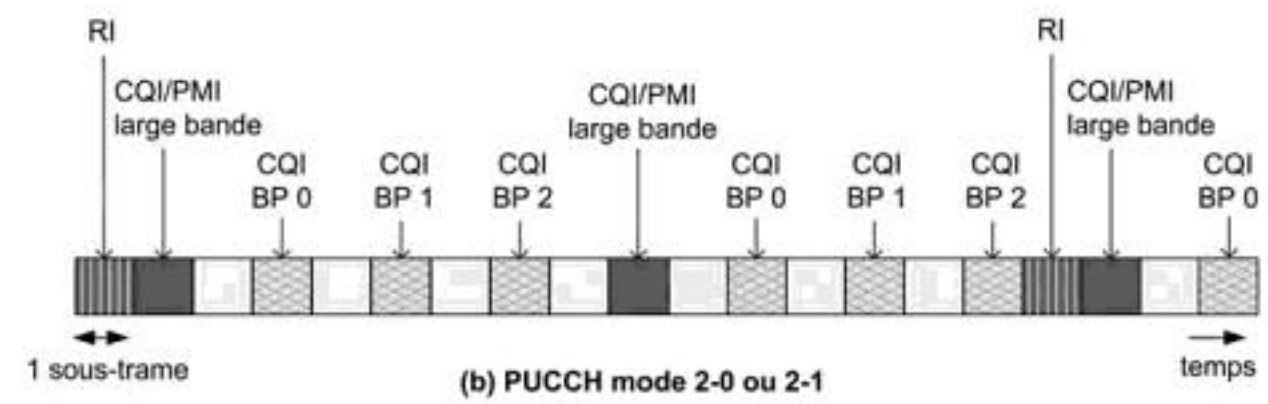
la périodicité de remontée des CQI/PMI large bande. Dans le cas de remontées de CQI par sous-bande, K cycles de remontée pour chaque partie de bande sont effectués entre deux retours de CQI large bande, où K est configuré par RRC. La précision temporelle de l'information retournée augmente naturellement lorsque la périodicité du retour décroît, tout comme la charge de signalisation sur le PUCCH. Le réglage de la périodicité des retours est donc, une fois encore, affaire de compromis.

Un exemple de configuration des modes de retour périodiques des CQI/PMI/RI dans le domaine temporel est illustré à la figure suivante, pour une largeur de bande de 10 MHz. Pour les modes 1-0 et 1-1, le RI est remonté une fois par trame radio, tandis que les CQI/PMI sont remontés toutes les cinq sous-trames. Pour les modes 2-0 et 2-1, les remontées de RI et de CQI/PMI large bande sont respectivement de période 16 et 8 sous-trames ; un cycle complet de remontées de CQI par sous-bande balayant les différentes parties de bande (notées BP 0, BP 1 et BP 2) est effectué entre chaque remontée de CQI/PMI large bande (ce qui correspond à K=1), les CQI par sous-bande étant remontés toutes les deux sous-trames.

Figure 12-6
Exemples de configuration des modes de retour sur le PUCCH



(a) PUCCH mode 1-0 ou 1-1



(b) PUCCH mode 2-0 ou 2-1

Des collisions sont possibles entre différents types de retour et sont résolues par des priorités définies dans [3GPP 36.213, 2009, section 7.2.2] : seul le retour prioritaire est alors transmis, les autres étant abandonnés. En particulier, les règles de priorité suivantes sont définies.

- La transmission du RI est prioritaire sur celle des CQI/PMI.
- La transmission d'ACK/NACK est prioritaire sur les CQI/PMI/RI lorsque leur multiplexage n'est pas configuré.
- La transmission de requête de scheduling est prioritaire sur les CQI/PMI/RI.

Ces règles s'expliquent par le fait que les CQI/PMI sont conditionnés à la valeur de RI remontée pour les modes de transmission 3 et 4. Si le RI avait changé depuis le dernier retour mais n'était pas remonté, les CQI/PMI retournés à sa place ne représenteraient plus correctement le canal. De plus, le RI est typiquement remonté moins souvent que les CQI/PMI, ce qui laisse moins d'opportunités de le mettre à jour.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

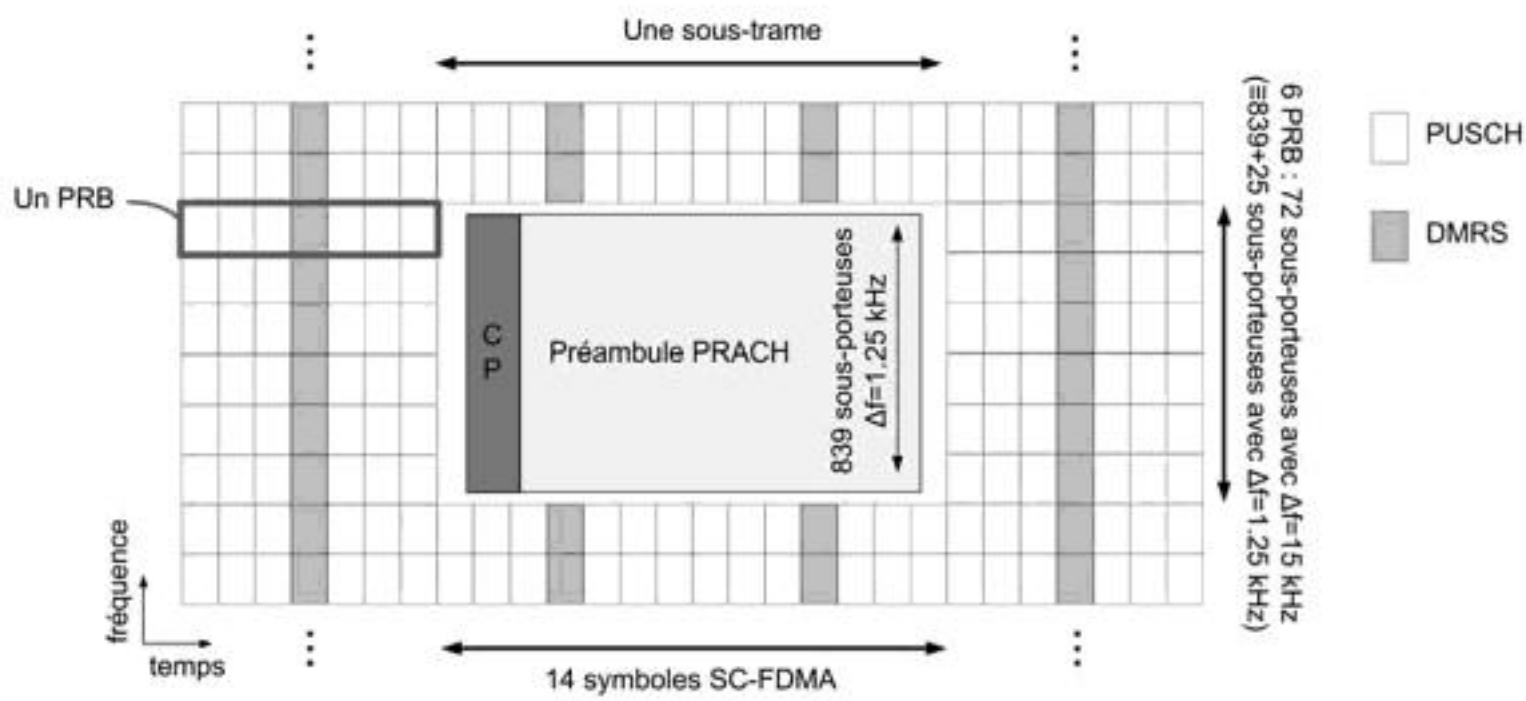


Figure 13-5 *Exemple de ressources du PRACH (ici le format 0) et multiplexage avec le PUSCH d'autres UE*

On notera que l'eNodeB peut choisir d'allouer les ressources identifiées pour le PRACH à des transmissions de PUSCH.

Synchronisation du PRACH

Contrairement au PUSCH où les instants d'émission des UE sont contrôlés de sorte que leurs signaux soient reçus de manière synchronisée à l'eNodeB, l'émission des PRACH des UE d'une cellule n'est pas coordonnée. Cela se traduit à l'eNodeB par la réception de chaque PRACH avec un retard dépendant de la position de l'UE source dans la cellule.

L'eNodeB doit cependant assurer que le PRACH est reçu dans les sous-trames allouées à ses occasions de transmission, afin de ne pas interférer les transmissions synchronisées. En l'absence de synchronisation sur la voie montante, le seul repère de l'UE vis-à-vis de l'opération de l'eNodeB est la voie descendante. C'est pourquoi il est spécifié que le début de la transmission du préambule pour les formats 0-3 doit être aligné avec le début de la sous-trame en voie montante à l'UE, sans avance temporelle. Cette dernière contrainte revient à aligner le début du préambule avec le début d'une sous-trame descendante reçue par l'UE en FDD et à appliquer une légère avance (20,3 µs) en TDD.

Avant d'aller plus loin, il est nécessaire d'introduire le RTD (pour *Round Trip Delay*), qui désigne le délai du trajet aller-retour entre l'eNodeB et un UE. Le RTD maximal dans la suite désignera le RTD associé à un UE situé sur la bordure la plus lointaine de la cellule.

Une sous-trame descendante est reçue à l'UE avec un délai de propagation égal à un demi-RTD par rapport à l'instant de sa transmission par l'eNodeB, comme illustré à la figure suivante. Ceci conduit ainsi l'eNodeB à recevoir le préambule avec un retard égal au RTD par rapport au début de sa plage de réception d'une sous-trame montante, si celle-ci est alignée avec la transmission d'une sous-trame descendante.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

d'autre, comme illustré à la figure de la section « Ressources utilisées », p. 289. Ce choix représente un bon compromis entre le nombre de séquences ZC différentes pouvant être construites (important pour minimiser la probabilité de collision entre PRACH d'UE différents), les probabilités de détection et de fausse alarme, ainsi que la protection offerte par les sous-porteuses nulles vis-à-vis d'interférences du PUSCH [Texas Instruments, 2007].

Formation de l'ensemble de préambules d'une cellule

Lors de l'accès aléatoire avec risque de collision, l'UE choisit de manière aléatoire sa séquence de préambule parmi un ensemble de 64 séquences propre à la cellule. Les séquences d'un ensemble sont formées par différentes valeurs de décalage cyclique d'une séquence de Zadoff-Chu, dont l'indice est diffusé à tous les UE de la cellule dans les Informations Système. Plus d'une séquence de Zadoff-Chu peut être nécessaire si le nombre de décalages cycliques disponibles dans une séquence n'est pas suffisant. Les séquences supplémentaires à utiliser alors se déduisent de l'indice de la séquence signalée, selon un ordre défini dans [3GPP 36.211, 2009, section 5.7.2]. L'ensemble de séquences à utiliser par chaque cellule requiert une opération de planification du réseau, afin d'assurer que deux cellules proches n'utilisent pas le même ensemble.

Les différentes séquences disponibles pour l'ensemble des cellules ont été classées en deux groupes, suivant que leur métrique cubique est inférieure ou non à celle de la QPSK (1,2 dB) [Texas Instruments *et al.*, 2007]. Le groupe de séquences de métrique cubique faible sera préférablement utilisé par les grandes cellules, afin de maximiser la couverture du PRACH, tandis que l'autre groupe pourra être utilisé par les petites cellules, où la puissance limitée des UE ne sera pas un handicap pour que le PRACH soit reçu avec une puissance suffisante à l'eNodeB.

Les valeurs de décalage cyclique utilisées par une cellule sont multiples d'une valeur N_{CS} spécifique à cette cellule. Le paramètre N_{CS} signalé par RRC, détermine la taille de la zone de corrélation nulle de la séquence de Zadoff Chu, égale à N_{CS}-1 éléments (voir le chapitre 7). Afin de maintenir l'orthogonalité entre deux préambules construits à partir d'une même séquence décalée cycliquement de N_{CS} éléments, la relation suivante doit alors être satisfaite, où Δ est la dispersion des retards du canal et T_e est la durée d'un élément de la séquence :

$$N_{CS} > \frac{RTD + \Delta}{T_e}$$

La valeur N_{CS} doit donc être configurée en fonction de la taille de la cellule, plus celle-ci étant large et plus N_{CS} devant être élevé. En revanche, plus N_{CS} est élevé et plus le nombre de préambules orthogonaux pouvant être construits à partir d'une même séquence est faible. La valeur de N_{CS} conditionne ainsi le nombre de séquences de Zadoff-Chu nécessaires à la constitution d'un ensemble de 64 préambules par cellule et, donc, l'orthogonalité entre les préambules d'une même cellule. En effet, des séquences de Zadoff-Chu différentes ne sont pas orthogonales (même si elles conservent une intercorrélation faible). Un ensemble de 16 valeurs de N_{CS} a été défini, les valeurs choisies ayant été déterminées de façon à minimiser l'effet de leur nombre limité sur le nombre de préambules orthogonaux par cellule pour chaque taille de cellule possible [Huawei, 2007]. On pourra se reporter à cette dernière référence pour une correspondance indicative entre la valeur de

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

pour l'envoi des données (*Message3*) et l'identifiant temporaire C-RNTI éventuellement affecté par l'eNodeB.

Si, au contraire, aucune des réponses reçues dans la fenêtre de réception n'est associée au RA-RNTI et au préambule utilisé, l'UE considère la tentative infructueuse et réitère la procédure tant que le nombre maximal d'essais n'a pas été atteint. À chaque nouvelle tentative, le compteur est incrémenté et la puissance de transmission du préambule est augmentée d'un pas. Si le nombre maximal de tentatives est atteint, la couche MAC indique à la couche RRC l'échec de la procédure.

La figure suivante illustre le cas d'un UE ayant sélectionné aléatoirement le préambule 58 et qui ne reçoit aucune réponse à son premier envoi. La seconde transmission du préambule est suivie d'une réponse, mais qui n'est pas destinée à cet UE puisque le message MAC transmis sur le PDSCH porte un autre préambule (22). Cela signifie qu'un autre UE a émis le préambule 22 sur la même ressource PRACH, identifiée par le RA-RNTI. Finalement, la troisième tentative est fructueuse : une réponse avec le préambule 58 est reçue, 6 TTI après l'émission du préambule par l'UE.

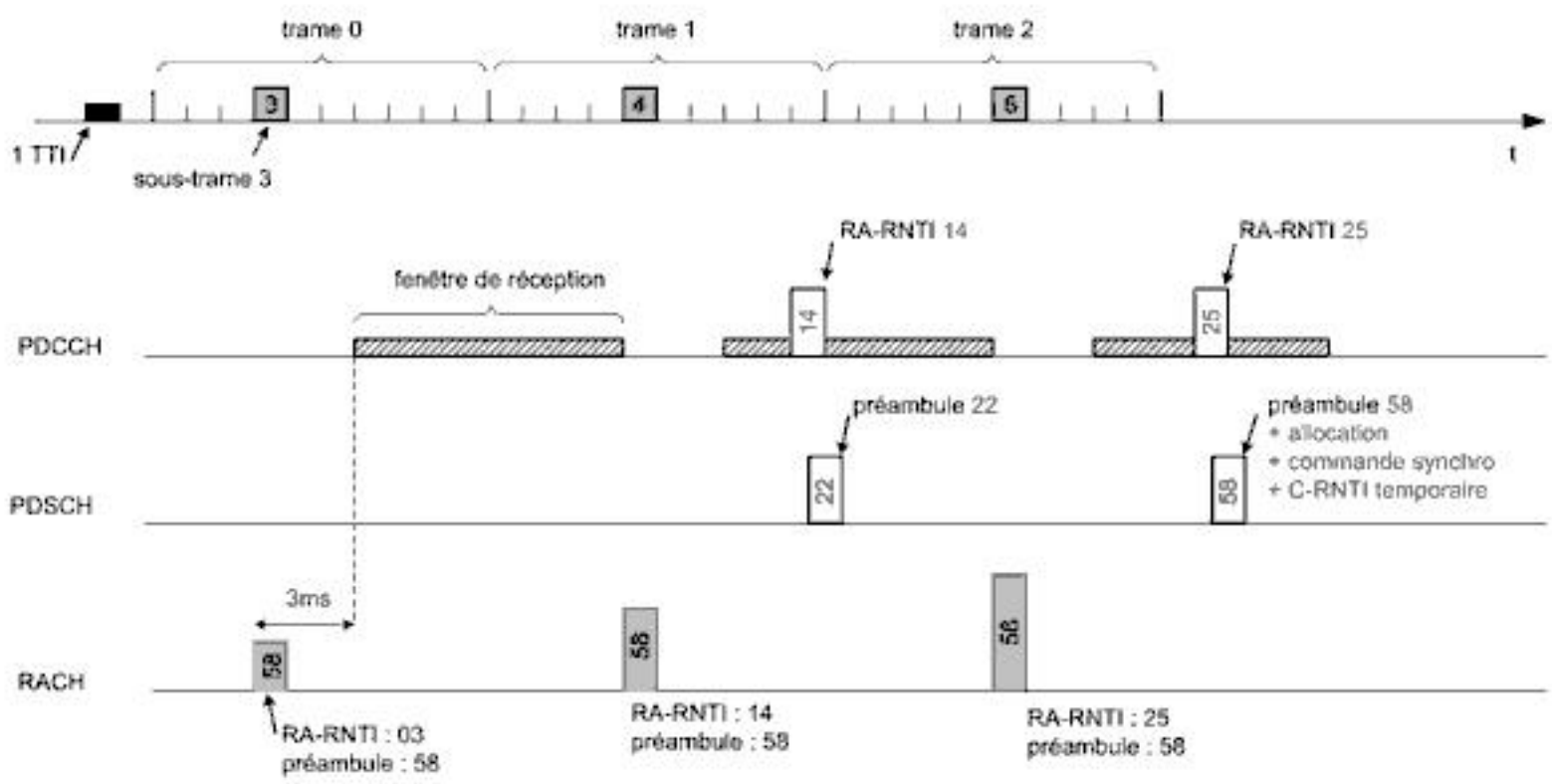


Figure 14-3
Transmission du préambule sur le canal RACH

Si le préambule a été alloué par l'eNodeB (préambule dédié), la procédure aboutit dès que la réponse de l'eNodeB est reçue, puisque ce préambule ne peut être utilisé que par cet UE (il ne peut avoir été choisi par un autre UE).

En revanche, lorsqu'il est choisi de façon aléatoire, un même préambule peut être utilisé par deux UE dans la même ressource PRACH (temps - fréquence). Dans ce cas de figure, chacun des deux UE recevant la réponse avec le RA-RNTI et le préambule va penser que cette réponse lui est destinée et utiliser l'allocation indiquée dans la réponse. Le conflit va donc se poursuivre dans la

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

volumineux lors du téléchargement d'une page, qu'il faut acheminer rapidement pour garantir une bonne expérience de l'utilisateur (notion d'interactivité).

Pour écouler le trafic voix tout en limitant l'utilisation des ressources radio, l'eNodeB fait ici le choix de configurer et activer une allocation semi-persistante à l'UE, avec une période de 20 ms : une transmission sur cette allocation est effectuée toutes les 20 ms, pour chaque paquet de voix reçu par l'eNodeB. D'autre part, le trafic web étant réduit à ce moment, il ordonne à l'UE de basculer en mode DRX, par l'intermédiaire de la commande MAC adéquate, afin de limiter sa consommation. Lorsque des données liées au trafic web arriveront dans le sens descendant (de la S-GW), il pourra les transmettre à l'UE via des allocations dynamiques lorsque celui-ci sera éveillé, voire décider de désactiver le mode DRX (via un message RRC) s'il considère que l'activité du trafic ne justifie plus son utilisation.

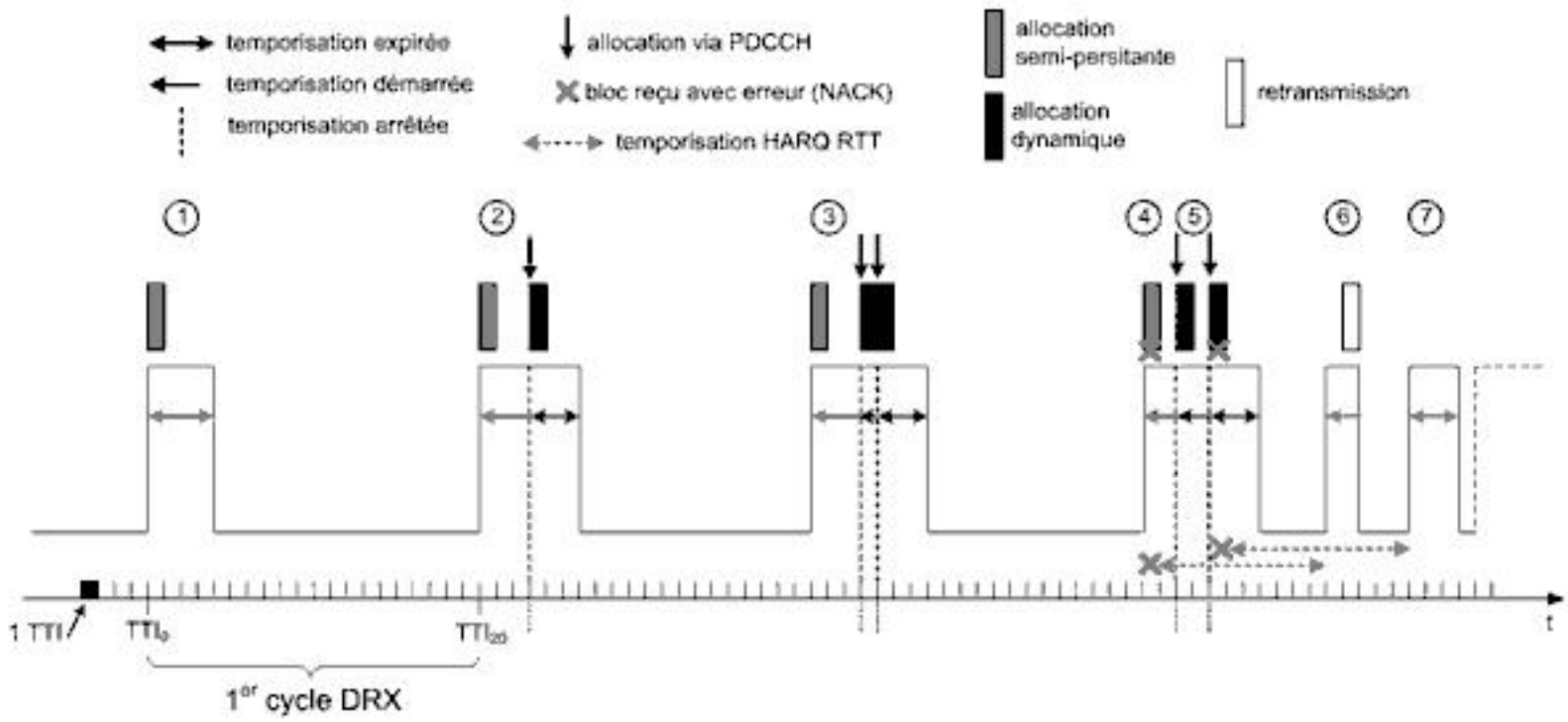


Figure 14-7
Exemple d'utilisation du DRX

Au début du scénario décrit sur la figure précédente, l'UE est donc en mode DRX, avec une allocation semi-persistante.

1. Au TTI $_0$, l'UE reprend le décodage du PDCCH et reçoit dès le premier TTI un bloc transmis sur l'allocation semi-persistante. Cet événement ne déclenche pas la temporisation d'inactivité DRX et l'UE retourne au repos à la fin de la période d'éveil (qui dure dans cet exemple 4 sous-trames, soit 4 ms), n'ayant reçu aucune allocation via le PDCCH. Il demeure dans cet état jusqu'à la fin du premier cycle, soit pendant 16 ms.
2. Au début du second cycle, l'UE reçoit un nouveau bloc via l'allocation semi-persistante. 3 TTI plus tard (au TTI $_{23}$), le PDCCH signale une allocation dynamique. L'UE arrête alors la temporisation de la période d'éveil et lance la temporisation d'inactivité DRX (qui vaut 3 ms dans cet exemple). L'UE ne recevant aucune autre allocation sur le PDCCH pour une transmission initiale,

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

- Si des ressources sont encore disponibles sur l'allocation reçue, il sert les canaux logiques par ordre de priorité décroissante, jusqu'à ce que l'ensemble des données disponibles pour transmission soient servies, ou qu'il ne reste plus de place sur l'allocation.
- Au TTI suivant la transmission sur la voie montante, chaque panier récupère un nouveau jeton. Ainsi, l'état de remplissage P_i augmente de la taille du jeton pour le panier i.

Ce faisant, l'UE doit faire en sorte de maximiser la transmission de données utiles, en limitant autant que possible le recours à la segmentation des blocs de données. Le solde P_i du panier i peut ainsi devenir négatif, si l'UE a plus de données à transmettre que de crédits dans son panier. Dans ce cas en effet, un crédit supplémentaire est accordé pour éviter une segmentation excessive des blocs de données, qui conduirait à une utilisation inefficace des ressources : une segmentation implique l'ajout d'informations de contrôle pour que l'eNodeB reconstitue le bloc initial. De ce fait, il est possible qu'un canal logique qui a des données à transmettre ne puisse pas les envoyer lorsqu'une nouvelle allocation est reçue, si le solde de son panier (P_i) est encore négatif ou nul ; son solde doit devenir à nouveau positif pour qu'il puisse utiliser les ressources allouées. Cela a pour but d'éviter qu'un canal logique ne monopolise les allocations de ressources, bien au-delà du niveau autorisé par son PBR. Cependant, les spécifications 3GPP donnent des règles générales, en laissant aux constructeurs une liberté d'implémentation : un UE peut par exemple utiliser au maximum l'allocation pour des PDU du canal logique de priorité 0 (sans les segmenter), quitte à avoir un crédit P_0 largement négatif, tandis qu'un autre choisira d'utiliser l'allocation pour ce canal dans la limite du crédit P_0 (sans segmentation), puis d'utiliser l'espace restant pour le canal logique suivant.

Exemple

Un exemple est donné sur le schéma 14-8, dans lequel deux radio bearers sont actifs.

Le radio bearer 1 (ou canal logique 1) a la priorité la plus élevée et un PBR de 1 Mb/s, tandis que le PBR du canal 2 est de 2 Mb/s. Avec un TTI de 1 ms, leurs paniers se remplissent donc respectivement de 1 kilobit et 2 kilobits à chaque TTI. Pour une raison de lisibilité, les jetons sont normalisés à 1 unité = 1 kilobit sur le schéma.

Ainsi, au bout de 5 TTI sans allocation, leurs paniers respectifs contiennent 5 unités et 10 unités.

Au TTI $_5$, une allocation pour le sens montant est reçue. Comme le panier du canal 1 n'est pas vide ($P_1 > 0$) et que des données de ce canal sont disponibles pour transmission, l'UE commence par allouer des ressources à ce canal logique. La taille de l'allocation (11 unités) étant supérieure à la quantité de données présente dans le buffer (7 unités), toutes ces données peuvent être transmises sur cette allocation. Cependant, l'UE octroie 2 jetons « à crédit » au canal 1 puisque le remplissage du panier n'est que de 5 unités. La conséquence est que ce canal ne pourra transmettre des données au prochain TTI, le remplissage étant désormais « négatif » ($P_1 = -2$).

L'UE procède ensuite de la même façon pour le canal 2, de priorité inférieure. Comme P_2 est égal à 10, ce canal peut être servi. L'espace disponible sur l'allocation est de 4 unités, mais le buffer contient 2 blocs de données dont les tailles respectives sont 1 unité et 6 unités, soit un total de 7 unités. Afin de maximiser la transmission de données, l'UE procède à la segmentation du bloc de 6 unités en deux blocs de 3 unités : cela lui permet de remplir l'allocation en y insérant le bloc de

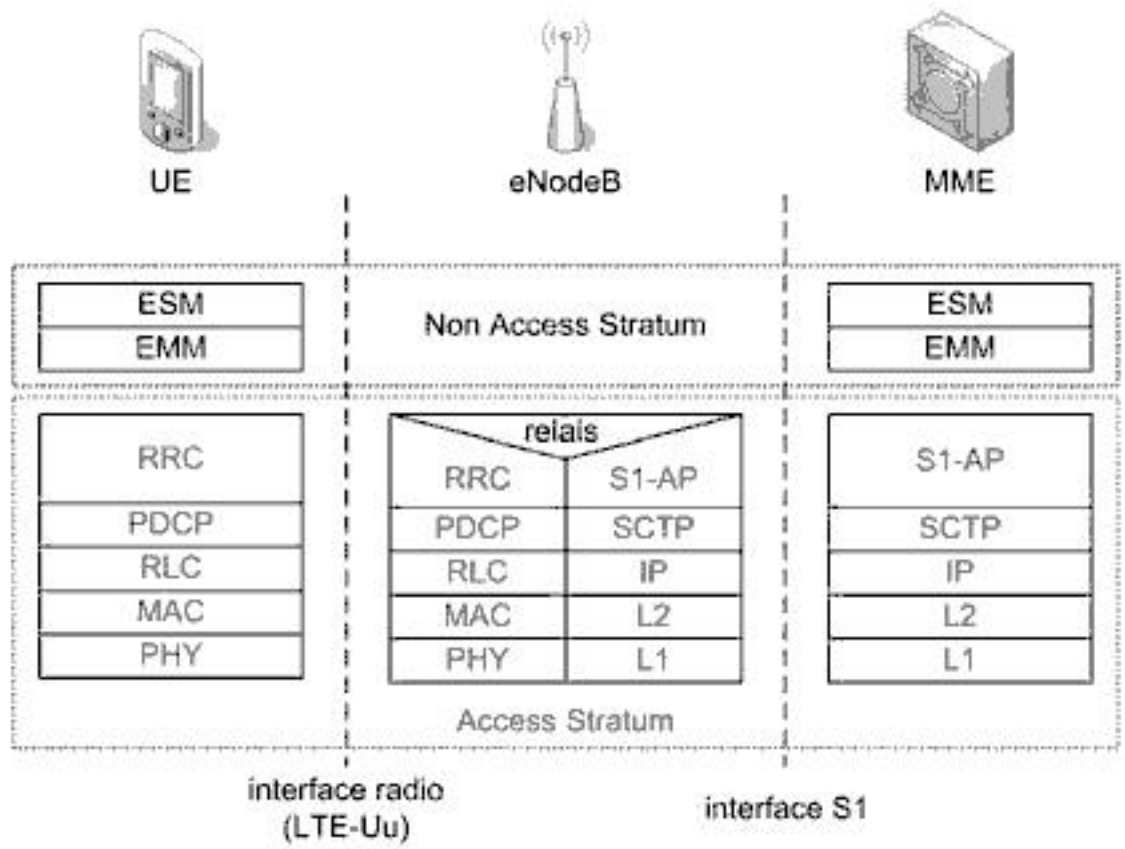
Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Figure 15-3
Découpage AS-NAS dans le système LTE



Comme nous le verrons aux chapitres 18 et 19, un UE LTE peut néanmoins être joint via le réseau LTE par le domaine CS de l'UMTS et du GSM, pour les procédures de *CS Fallback*. Ces procédures utilisent cependant le protocole ESM, dans lequel des messages et des champs d'information spécifiques ont été prévus.

Le protocole EMM

Fonctions et procédures EMM

Le rôle premier du protocole EMM est de gérer la mobilité de l'UE vis-à-vis du réseau cœur, c'est-à-dire son enregistrement au réseau et la mise à jour de sa localisation. L'objectif est de masquer cette mobilité au protocole ESM. Ainsi, ce dernier s'affranchit des problématiques d'enregistrement et de joignabilité de l'UE, et gère les appels entrants et sortants comme si l'UE était un téléphone fixe.

Pour ce faire, EMM réalise la mise à jour de la localisation de l'UE, mais fournit également une connexion sécurisée entre l'UE et le MME pour l'échange de la signalisation ESM.

On distingue trois types de procédures EMM : les procédures élémentaires, dites *communes*, les procédures *spécifiques*, utilisant des procédures élémentaires, et les procédures visant à établir une connexion de signalisation. Les procédures élémentaires regroupent notamment les procédures d'authentification, de réallocation d'identifiant temporaire NAS (GUTI), d'établissement de la sécurité NAS et d'identification. Les procédures EMM spécifiques sont celles qui permettent d'enregistrer et de détacher l'UE du réseau, et de mettre à jour sa localisation. Enfin, les dernières visent par exemple à établir une connexion NAS sécurisée entre l'UE et le réseau cœur (procédure *Service Request*) ou à notifier l'UE d'un appel entrant (procédure de paging).

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

utilisées par le MME pour activer, modifier ou désactiver un contexte de bearer EPS. Ces dernières peuvent être déclenchées par une demande de l'UE, ou sur demande du réseau cœur (P-GW par exemple), par exemple pour assurer une qualité de service spécifique à un usage.

Ces procédures ESM ne peuvent être déclenchées que lorsqu'un contexte EMM et une connexion NAS sécurisée sont établis. La seule exception est la demande de connectivité par défaut, qui est lancée par l'UE lors de l'enregistrement au réseau (voir le chapitre 16).

Coordination entre les sous-couches ESM et SM

Lors d'une mobilité vers le GPRS ou l'UMTS, l'UE et le réseau conservent les contextes de bearer EPS qui peuvent être maintenus dans le système cible et traduisent les paramètres de chaque contexte EPS vers les paramètres équivalents dans ce système. En particulier, les paramètres de QoS sont déclinés dans ceux utilisés par le système cible, selon la Release 3GPP implémentée.

Échanges entre NAS et RRC

Dans la pile protocolaire de l'UE, la sous-couche EMM est immédiatement supérieure à la couche RRC. Le protocole RRC assure pour les deux protocoles EMM et ESM le transport des messages NAS sur l'interface radio.

Pour EMM en particulier, RRC encapsule le premier message NAS (*Attach Request*, *Tracking Area Update Request*, *Detach Request*, *Service Request*) dans le message *RRC Connection Setup Complete* afin d'accélérer l'établissement de la connexion EMM. Les autres messages EMM et ESM sont en revanche transmis dans des messages RRC dédiés au transport de la signalisation NAS et qui ne véhiculent aucune autre information.

Au sein de l'UE, la couche RRC délivre également à la sous-couche EMM des informations NAS issues des Informations Système de la cellule (qui relèvent du protocole RRC) et qui lui sont nécessaires pour la sélection de réseau et la mise à jour de localisation ; c'est par exemple le cas de la liste des PLMN pris en charge, ainsi que du code de la Tracking Area à laquelle appartient la cellule, tous deux transmis dans le bloc d'Informations Système SIB1.

Les messages ESM sont transmis de façon transparente par EMM à RRC, sans modification ni ajout d'en-tête EMM. Cependant, un message ESM ne peut être envoyé tant que la connexion sécurisée EMM n'est pas établie avec le MME.

Références

Le lecteur souhaitant approfondir le sujet pourra consulter les documents suivants.

[3GPP TS 24.008] Spécification technique 3GPP TS 24.008, *Mobile radio interface Layer 3 specification, Core network protocols*, v8.16.0, mars 2012 : protocoles NAS UMTS et GSM/GPRS

[3GPP TS 24.301] Spécification technique 3GPP TS 24.301, Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS), v8.10.0, juin 2011 : protocoles NAS LTE

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

La localisation auprès du réseau

L'objectif de la localisation du terminal mobile auprès du réseau est de rendre l'utilisateur joignable dès lors qu'il a effectué son enregistrement au réseau et tant qu'il demeure sous tension.

En effet, et comme nous le verrons au chapitre 18, l'enregistrement au réseau ne se fait pas uniquement lorsque l'UE est mis sous tension : ce dernier doit veiller à informer le réseau lorsqu'il change de zone de localisation. L'enregistrement initial, au même titre que les mises à jour ultérieures, permet, dès lors qu'il est réalisé, de délivrer des appels ou des messages à l'utilisateur.

Quelques définitions

Cette partie propose des définitions pour les nouveaux termes utilisés dans la suite de ce chapitre.

- PLMN : signifie littéralement *Public Land Mobile Network*, c'est-à-dire un réseau mobile public présent dans un pays donné. Le PLMN est matérialisé par un code, diffusé sur les cellules qui constituent le réseau. Ce code est lui-même formé de deux parties distinctes.
  - Le *Mobile Country Code* (MCC), qui désigne le pays du PLMN, est formé de trois chiffres. Pour la France, ce code vaut 208 en valeur décimale.
  - Le *Mobile Network Code* (MNC), qui identifie le réseau de l'opérateur au sein du pays, est formé de deux à trois chiffres.
- *Home PLMN* (ou HPLMN) : PLMN d'origine de l'utilisateur. Lorsqu'une personne souscrit un abonnement auprès d'un opérateur, cette souscription est associée à un PLMN, qui est alors désigné Home PLMN.
- *Visited PLMN* (ou VPLMN) : PLMN visité par l'utilisateur. L'UE d'un utilisateur peut être amené à s'enregistrer sur un autre PLMN que le HPLMN, par exemple en cas d'itinérance. Ce nouveau PLMN est dit *visité*. Il peut s'agir d'un PLMN du même pays que le HPLMN (cas d'itinérance nationale) ou appartenant à un pays différent (on parle alors d'itinérance internationale).
- *Equivalent PLMN* (ou EPLMN) : PLMN équivalent au HPLMN. L'UE doit considérer un PLMN équivalent de la même façon que celui d'origine dans la procédure de recherche de PLMN, c'est-à-dire avec la plus haute priorité. Ce mécanisme de PLMN équivalent peut être utilisé par un opérateur pour fournir à ses utilisateurs une couverture plus large que celle de son propre réseau, par le biais d'accords d'itinérance avec d'autres opérateurs. L'EPLMN est utilisé dans le cas du partage de réseau par des opérateurs. Une partie du pays peut ainsi être couverte par l'opérateur A tandis que le complément est couvert par l'opérateur B.
- *Tracking Area* (TA) : littéralement *zone de pistage*. La Tracking Area désigne en LTE une zone de localisation, constituée de cellules voisines les unes des autres. Chaque cellule du réseau appartient à une et une seule TA dont elle diffuse l'identifiant.
- *Radio Access Technology* (ou RAT) : technologie d'accès radio. Les technologies d'accès radio définies par le 3GPP sont : le GSM/GPRS/EDGE, l'UMTS et le LTE. Au sein d'un réseau mobile, une technologie d'accès radio peut être portée sur une ou plusieurs bande(s) de fréquences. Par ailleurs, un opérateur peut déployer une ou plusieurs RAT. Par exemple en France, la RAT GSM/GPRS/EDGE est déployée sur les bandes 900 MHz et 1 800 MHz,

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

permettant à l'UE d'identifier son identifiant physique PCI (*Physical Cell Identifier*). La procédure de recherche de cellules par la couche physique est décrite au chapitre 13. Dans le reste de ce chapitre, nous supposons que cette procédure a été effectuée et que l'UE connaît les PCI des cellules dans son voisinage.

Lorsqu'il procède à la recherche de cellules, l'UE peut utiliser des informations enregistrées lors des précédents accès au réseau afin d'accélérer la procédure : par exemple, les fréquences LTE et les identifiants physiques (PCI) des cellules sélectionnées avant la mise hors tension. Cette *sélection à mémoire* peut être typiquement utilisée lors de la mise sous tension (par exemple, l'UE détecte qu'il n'a pas changé de pays, voire de zone de localisation), mais également après une perte de couverture (par exemple, l'utilisateur entre puis ressort d'un parking, l'UE recherche alors en priorité les cellules mesurées avant l'entrée dans le parking, plutôt que de lancer un scan de l'ensemble de la bande de fréquence), ou encore après un rejet par le réseau (par exemple si l'UE a sélectionné une cellule appartenant à une zone réservée et cherche à revenir sur les cellules précédemment sélectionnées).

Si ces cellules ne sont pas disponibles, il procède à une *sélection initiale* en balayant toutes les fréquences porteuses des bandes LTE qu'il prend en charge. Pour chacune de ces fréquences, la seule exigence de la norme 3GPP est qu'il recherche la meilleure cellule. Cela signifie en pratique qu'il peut comparer rapidement les niveaux de signal des cellules détectées sur la fréquence porteuse, puis vérifier l'éligibilité de cette cellule. On comprend que les phases de détection et de comparaison des cellules peuvent faire l'objet d'implémentations différentes et sont des éléments de différenciation entre constructeurs puisqu'ils peuvent fortement influer sur la rapidité de l'enregistrement au réseau, mais aussi sur la consommation du terminal. Un constructeur pourrait faire le choix de ne pas mémoriser de telles informations, tandis que d'autres algorithmes se différencieront dans le type d'informations enregistrées, leur durée de rétention ou le comportement après une perte de couverture.

Dans le modèle de sélection de PLMN, décrit à la section « Principe » (p. 332), la partie AS du terminal mobile détermine la meilleure cellule de chaque fréquence porteuse avant de remonter à la partie NAS les PLMN découverts, puis procède à la sélection de cellule sur le PLMN choisi par cette dernière. On peut raisonnablement penser que l'UE sélectionne d'emblée une des cellules du PLMN qu'il a précédemment mesurées, plutôt que d'initier une nouvelle recherche de cellules.

Plus généralement, la recherche des cellules est du ressort de l'implémentation du constructeur. Par exemple, l'UE peut commencer par balayer les fréquences les plus basses du spectre radio, pour finir par les fréquences les plus élevées, en adaptant sa méthode de recherche à la technologie associée sur cette bande, ou balayer d'abord les fréquences d'une RAT donnée (ex. LTE), puis d'une autre RAT etc.

Pour déterminer si une cellule détectée est éligible, l'UE vérifie que le niveau de signal mesuré remplit le critère suivant :

$$\text{Signal_mesuré} > \text{Seuil_sélection} + \text{Offset_rech_PLMN} - \text{Compensation_puiss}$$

Dans cette équation, les paramètres Seuil_sélection, Offset_rech_PLMN et Compensation_puiss sont définis comme indiqué ci-dessous :

- Seuil_sélection : seuil d'éligibilité de la cellule diffusé dans les Informations Système, d'après une mesure de RSRP (en dBm). Sa valeur peut être identique dans une large zone d'un PLMN, voire le PLMN entier, mais doit être diffusée par chaque cellule.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

confirmant l'enregistrement de ce dernier au réseau. Ce message EMM *Attach Accept* contient notamment :

- une liste des Tracking Areas sur lesquelles l'UE est enregistré ;
- le message ESM *Activate Default EPS Bearer Context Request*.

Ce message est destiné à l'UE et n'est donc ni décodé ni interprété par l'eNodeB, qui le transmet ensuite dans un message RRC (étape 8). Le message ESM *Activate Default EPS Bearer Context Request* permet au MME de répondre à la demande initiale du mobile d'établir un bearer EPS par défaut pour le transfert de données. Il contient notamment l'APN associé au bearer EPS établi, l'adresse de l'UE sur le PDN du bearer (son adresse IPv4 ou IPv6) et les paramètres de QoS du bearer.

Le MME informe également l'eNodeB des paramètres de QoS et de l'identifiant du bearer dans le message S1AP. Ce dernier indique en outre les paramètres de connexion GTP du plan usager sur la S-GW, fournis par celle-ci dans l'étape précédente. Par ailleurs, l'eNodeB reçoit dans ce message les capacités radio du mobile, le contexte de sécurité (clé K_{eNodeB}) et les restrictions de mobilité à appliquer éventuellement à l'UE (par exemple handover interdit vers le GSM/GPRS).

8. Après la création du contexte de l'UE, l'eNodeB active la sécurité AS (chiffrement et intégrité) par l'envoi à l'UE du message RRC *Security Mode Command*. À partir de ce moment, tout message ultérieur de l'UE sur cette connexion RRC doit être chiffré et protégé en intégrité, notamment la réponse *Security Mode Complete*. Dans la foulée, et sans attendre cette réponse de l'UE, l'eNodeB, lorsqu'il reçoit le message *RRC Connection Reconfiguration Complete*, active le radio bearer de Signalisation SRB2, utilisé pour l'envoi sécurisé de messages RRC et NAS, ainsi que le ou les radio bearer(s) de données associés au Contexte EPS activé (procédure NAS). Cette seconde procédure ne peut aboutir si la procédure de sécurité a échoué (par exemple, si l'UE n'a pas reçu la commande de l'eNodeB ou si la configuration reçue n'est pas applicable). Ces deux procédures sont en effet toutes deux déclenchées par la même procédure S1 d'établissement de contexte, qui échoue si l'une des procédures RRC échoue. Dans ce cas, l'eNodeB relâche la connexion RRC. La procédure d'enregistrement sera alors reprise par l'UE selon des mécanismes EMM (temporisation et compteur de tentatives). À l'issue de ces procédures, le plan usager est établi sur l'interface radio. L'eNodeB doit donc être prêt à recevoir et traiter des données de l'UE et à les transférer à la S-GW, ce qui pourra se produire après l'étape 10.
9. Sur réception d'une réponse positive de l'UE à la procédure de reconfiguration RRC, l'eNodeB informe le MME que l'E-RAB (associé au bearer EPS par défaut) a bien été établi. Il doit alors être prêt à recevoir des données de la S-GW pour cet E-RAB.
10. L'UE termine la procédure NAS d'enregistrement en retournant au MME le message EMM *Attach Complete*, encapsulé sur l'interface radio dans un message RRC, et dans un message S1AP sur l'interface S1. Ce message EMM contient essentiellement l'acquittement ESM de l'UE pour l'activation du contexte de bearer EPS (message *Activate Default EPS Bearer Context Request*).
11. Lorsque le MME a reçu d'une part la confirmation de l'eNodeB pour l'établissement de l'E-RAB (étape 9) et d'autre part la réponse positive de l'UE, il contacte la S-GW pour lui commu-

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

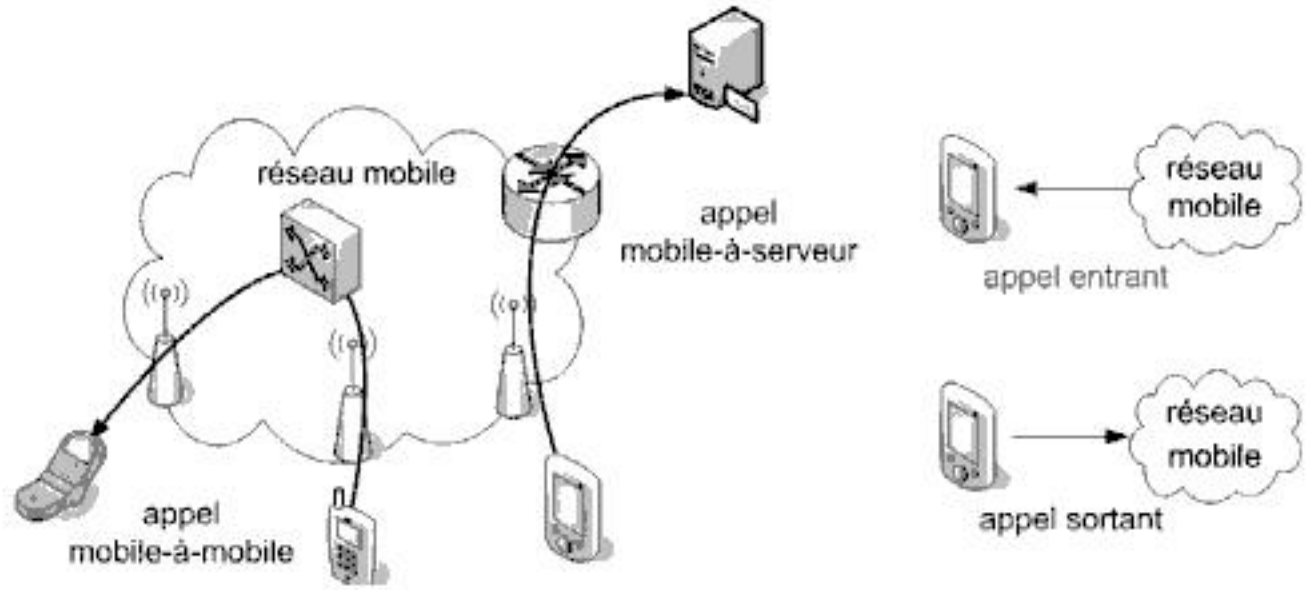
Les différents types d'appels

Un appel est établi par l'UE lorsque celui-ci a besoin d'échanger des données avec un autre terminal mobile (on parle alors d'appel *mobile-à-mobile*), avec un terminal fixe, ou avec une plate-forme de services (appel *mobile-à-serveur* ou *serveur-à-mobile*). Un appel voix entre deux UE est un exemple d'appel mobile-à-mobile, puisque les données de voix sont échangées entre les deux terminaux (même si un transcodage peut avoir lieu dans le réseau). La navigation sur le portail de l'opérateur ou sur Internet depuis un mobile met en œuvre un appel mobile-à-serveur (serveur HTTP par exemple). Cette différenciation entre appel mobile-à-mobile et appel mobile-à-serveur réside donc essentiellement dans la finalité de l'appel, qui se traduit dans les échanges applicatifs, alors que la procédure entre l'UE et le réseau mobile est identique.

En revanche, la procédure d'établissement d'appel entre l'UE et le réseau sera différente selon que l'UE est à l'initiative de l'appel (appel *sortant*) ou le reçoit (appel *entrant*). Cette distinction s'applique aussi bien à un appel mobile-à-mobile, qu'à un appel entre mobile et serveur. En effet, un serveur peut prendre l'initiative d'une connexion vers un mobile, par exemple pour lui transmettre un message multimédia (MMS) ou un courriel.

Un appel entrant se distingue par une étape de notification vers le mobile, pour l'informer qu'un appel doit être établi. La suite de la procédure — l'établissement de l'appel à proprement parler — est identique au cas de l'appel sortant.

Figure 17-1
Différents types d'appels dans le réseau mobile



Les échanges au sein du terminal mobile

Lorsque l'utilisateur initie un appel sur son terminal mobile, il effectue une action sur une application. Celle-ci communique avec le système d'exploitation (souvent appelé OS, pour *Operating System* en anglais) du terminal, qui assure le lien avec les couches basses, en charge de l'établissement de l'appel avec le réseau mobile. Au sein de ces couches également, des échanges d'information ont lieu afin d'utiliser les fonctions dévolues à chacune. Ces échanges intercouches peuvent être modélisés par des

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

En outre, un bearer EPS est caractérisé par des paramètres protocolaires, qui permettent le routage de bout-en-bout des données transmises sur ce bearer, mais également par des paramètres de Qualité de Service. Nous détaillerons les principaux paramètres dans la suite de ce chapitre.

Un radio bearer de données transporte les paquets de données d'un bearer EPS entre l'UE et l'eNodeB. Pour un bearer EPS établi, il existe un seul radio bearer de données, parfois désigné par la forme abrégée DRB, pour *Data Radio Bearer*, par opposition aux radio bearers de signalisation (SRB, pour *Signaling Radio Bearer*), utilisés aussi sur l'interface radio mais pour le transport des messages RRC et NAS. Un DRB est établi par la procédure de reconfiguration de la connexion RRC.

Le radio bearer est formé des éléments suivants :

- un canal logique de données DTCH pour un DRB, ou un canal logique de signalisation DCCH pour un SRB (voir le chapitre 3) ;
- une configuration PDCP, pour la compression d'en-tête (pour un DRB), la protection des unités de données (pour un DRB ou un SRB) et la gestion des données lors du handover (pour DRB) ;
- une configuration RLC, pour le paramétrage des acquittements en mode RLC-AM notamment ;
- une configuration MAC, qui indique notamment le groupe auquel appartient le radio bearer pour le *Buffer Status Report* (voir le chapitre 14).

Ces paramètres de configuration sont déterminés par l'eNodeB en fonction des capacités du terminal et des caractéristiques du bearer EPS communiquées par le MME.

Enfin, l'établissement d'un bearer EPS implique nécessairement la création d'un *contexte de bearer EPS* au sein du MME, de la P-GW, de la S-GW et de l'UE. Ce contexte associé au bearer EPS demeure actif dans ces équipements lorsque les bearers des interfaces radio et S1 sont relâchés sans désactivation explicite du contexte de bearer EPS. Les terminaisons de tunnel GTP sur la S-GW et la P-GW sont maintenues dans ce cas, avec le contexte EPS. Ce contexte de bearer EPS est similaire au contexte PDP utilisé en GPRS et UMTS, qui peut subsister alors que le *Radio Access Bearer* (RAB) est relâché.

Lors de l'établissement d'une connexion logique sécurisée entre l'UE et le MME, un contexte radio est créé au sein de l'eNodeB pour l'UE, à l'initiative du MME. Ce contexte contient des données sur les bearers actifs de l'UE (DRB notamment), la connexion RRC, la mobilité de l'UE et la sécurité AS établie avec l'UE. Il est transmis à l'eNodeB cible lors d'un handover LTE. Il ne s'agit pas d'un contexte de bearer EPS.

Bearer par défaut et bearer dédié

Le préalable à l'application de mécanismes de Qualité de Service répondant aux besoins spécifiques de chaque type de trafic est d'identifier et traiter distinctement des flux dont les caractéristiques et les contraintes diffèrent de façon notable. Les concepts de bearer EPS par défaut et de bearer EPS dédié ont été définis dans cette optique.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Le PDB constitue une valeur limite *souple* : si le délai de certains paquets de données dépasse le PDB, ils ne sont pas nécessairement supprimés. Il est toutefois attendu que les unités de données seront pour la plupart délivrées avec un délai bien inférieur à ce seuil. Le PDB doit être interprété ainsi : « 98% des unités de données sont transmises avec un délai inférieur ou égal à la valeur du PDB ». Dans certains cas de congestion cependant, cet objectif peut ne pas être atteint.

La contribution essentielle au PDB provient de l'interface radio, alors que le transit sur le réseau de l'opérateur (entre l'eNodeB et la P-GW) est de l'ordre d'une dizaine de millisecondes. Cependant, ce délai entre l'eNodeB et la P-GW peut varier suivant la situation de l'UE et la stratégie de l'opérateur : en cas d'itinérance internationale par exemple, et si l'opérateur d'origine fait le choix de faire transiter les données par son réseau, le trafic à destination de l'UE transitera donc par la P-GW du réseau d'origine avant d'atteindre le réseau visité. Le délai entre la P-GW et l'eNodeB pourra par exemple dépasser 50 ms pour une itinérance Europe - États-Unis et n'inclut donc pas le délai de transmission sur l'interface radio. On comprend que certains services comme le jeu interactif peuvent être difficiles à assurer dans ce type de scénario.

Le paramètre *taux d'erreur résiduel* ou *Packet Error Loss Rate* (PELR) désigne le taux d'erreur sur la transmission des unités de données de niveau 2, par exemple le taux de paquets IP traités au sein du réseau mais qui n'ont pu être délivrés à la couche PDCP de l'UE. Pour un QCI donné, la valeur du PELR s'applique dans les sens montant et descendant. On notera que cet objectif de fiabilité dans la transmission des données n'est pas forcément atteint en cas de congestion. L'objet du PELR est de permettre une configuration appropriée des couches de liaisons de données (par exemple RLC et MAC dans l'E-UTRAN). Le taux d'erreur entre l'eNodeB et la P-GW est considéré comme négligeable (hors cas de congestion) ; le PELR s'applique donc essentiellement à l'interface radio, entre UE et eNodeB.

L'ARP

Principe

Le paramètre ARP (pour *Allocation and Retention Priority*) a pour but de déterminer dans une situation de congestion si l'établissement du bearer EPS peut être accepté, aux dépens d'un autre bearer déjà établi, ou doit être rejeté. Il existe déjà en UMTS, pour le même usage.

L'ARP est constitué des éléments suivants :

- le niveau de priorité (grandeur numérique de 1 à 15, 1 étant le niveau de priorité le plus élevé) ;
- la capacité de préemption (valeur binaire : oui/non) ;
- la vulnérabilité à la préemption (valeur binaire : oui/non).

Le niveau de priorité permet, dans une situation de limitation des ressources, d'assurer que le bearer de plus haute priorité sera établi. Par ailleurs, l'ARP peut être utilisé en cas de restriction de ressources pour décider de relâcher un ou plusieurs bearer(s) EPS au profit d'un nouveau bearer de plus haute priorité : il s'agit du mécanisme de préemption. La *capacité de préemption* indique si l'établissement du bearer peut conduire à la relâche d'un bearer de plus faible priorité, pour libérer les ressources nécessaires, si toutefois ce bearer moins prioritaire est *vulnérable à la préemption*.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

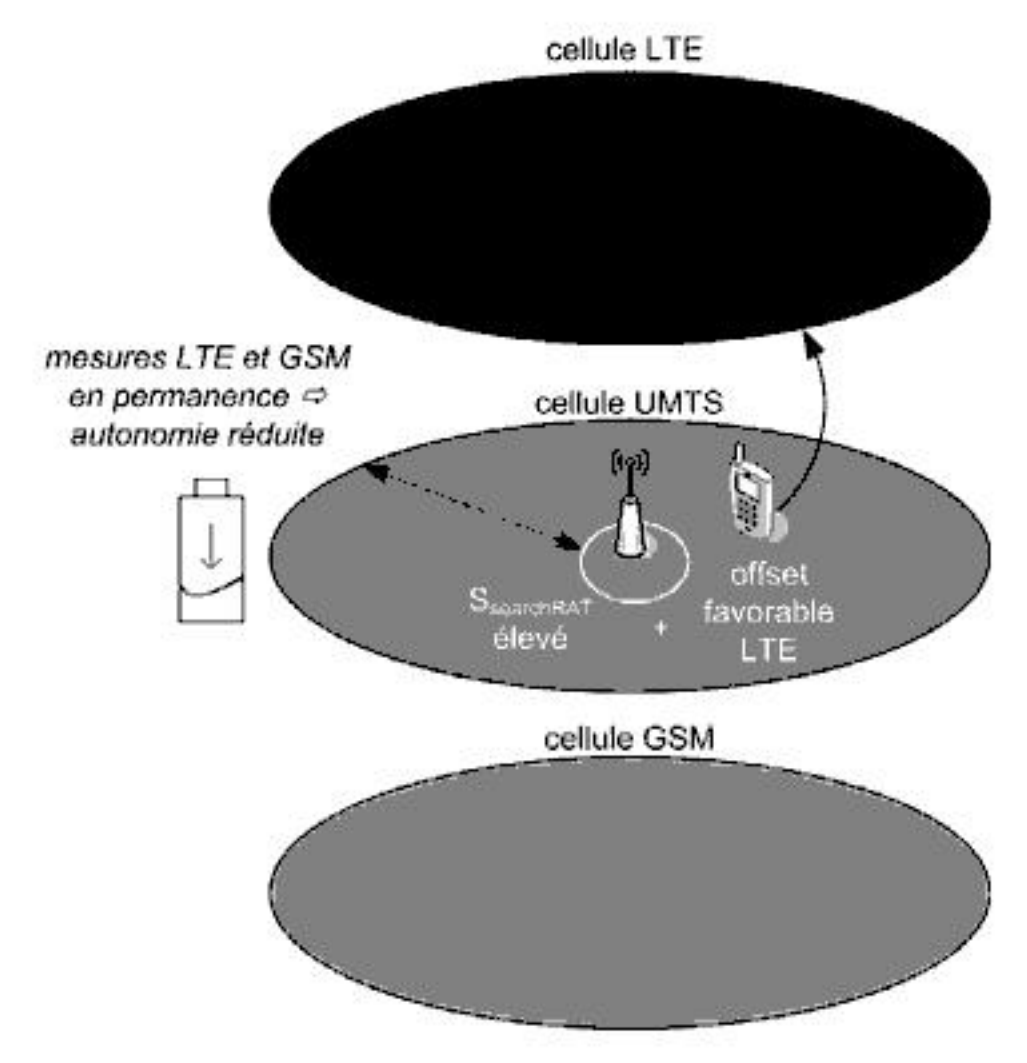


Figure 18-2
Effet d'une valeur élevée de $S_{searchRAT}$ en UMTS et d'un offset favorable au LTE, sans mécanisme de priorité (antennes LTE, UMTS et GSM colocalisées)

Spécificités de la resélection en LTE

Priorités : principe et signalisation

En LTE, la resélection de cellule est gouvernée par des priorités associées aux différentes fréquences LTE et aux différentes RAT présentes. Ainsi, toutes les cellules portées par une fréquence donnée auront la même priorité entre elles, tandis que les cellules d'une autre fréquence ou RAT pourront avoir une priorité différente.

Ces priorités sont signalées sur les Informations Système de la cellule serveuse : tous les UE présents sur cette cellule reçoivent donc les mêmes priorités. Cependant, l'opérateur peut également indiquer des priorités spécifiques à un UE, par une signalisation dédiée lorsqu'il est connecté. Ceci permet par exemple à l'opérateur de réserver une fréquence LTE à certains abonnés ou à certains types de terminaux, ou même de faire basculer les abonnés n'utilisant pas les services de données sur une RAT différente du LTE (GSM par exemple).

Ces priorités dites *dédiées* sont communiquées à l'UE lors de la relâche de la connexion RRC, ou lorsque l'UE se trouve sur une autre RAT (elles sont conservées lors d'une resélection inter-RAT), éventuellement avec une durée de validité. Elles se substituent au sein de l'UE aux priorités communes, diffusées sur la cellule serveuse.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

- Les paramètres $S_{intrasearch}$ et $S_{nonintrasearch}$ sont diffusés dans les Informations Système de la cellule serveuse. $S_{ServingCell}$ correspond au niveau de signal de la cellule serveuse mesuré par l'UE.
- On notera que l'opérateur a la possibilité d'indiquer des listes de cellules LTE interdites (*blacklist*), qu'elles soient sur la même fréquence que la cellule serveuse ou sur une fréquence LTE différente.

Choix de la cellule cible

Le choix de la cellule cible se fait selon des critères différents suivant la priorité de la fréquence ou de la RAT qui la porte, par rapport à la priorité de la cellule serveuse. On distingue ainsi quatre cas :

- cellule appartenant à une couche (RAT ou fréquence LTE) de priorité supérieure à celle de la cellule serveuse, couche que nous appellerons L1 ;
- cellule appartenant à une couche (RAT ou fréquence LTE) de priorité inférieure à celle de la cellule serveuse, couche que nous appellerons L3 ;
- cellule appartenant à une fréquence LTE de priorité égale à celle de la cellule serveuse ;
- cellule appartenant à la même fréquence LTE que la cellule serveuse, couche que nous appellerons L2.

Les deux derniers scénarios sont traités de la même façon, puisque la cellule voisine et la cellule serveuse ont la même priorité.

Resélection d'une cellule appartenant à une fréquence LTE ou une RAT (L1) de plus haute priorité

L'UE resélectionne une cellule de la couche L1 si elle vérifie les conditions suivantes.

- Plus d'une seconde s'est écoulée depuis l'arrivée de l'UE sur la cellule serveuse (sur L2).
- Le critère suivant est vérifié : $S_{nonServingCell,x} > Thresh_{x,high}$ pendant une durée $Treselection_{RAT}$.

$Thresh_{x,high}$ représente le seuil de resélection de la couche L1 pour un UE provenant d'une couche de priorité inférieure et $S_{nonServingCell,x}$ est le niveau de signal mesuré sur la cellule voisine. $Thresh_{xhigh}$ est diffusé sur les Informations Système de la cellule courante, avec les autres paramètres associés à la couche L1 (comme la priorité ou la fréquence de cette couche). $Thresh_{x,high}$ aura typiquement une valeur faible, afin de favoriser la resélection d'une cellule de cette couche L1 dès que l'UE la reçoit avec un signal suffisant. Le paramètre $Treselection_{RAT}$ correspond à $Treselection_{UTRA}$ dans le cas où la cellule voisine évaluée est une cellule UMTS, à $Treselection_{GERAN}$ s'il s'agit d'une cellule GSM/GPRS, et à la valeur associée à la fréquence LTE dans le cas d'une cellule interfréquence LTE. Ces valeurs sont également diffusées dans les Informations Système de la cellule (valeur en secondes). Ainsi, pour la configuration représentée par la figure à la section « Priorités : principe et signalisation » (p. 372), la cellule LTE courante diffusera quatre valeurs différentes Treselection : pour les deux fréquences LTE, la couche UMTS et la couche GSM/GPRS. Pour une RAT ou une fréquence donnée, la même valeur est utilisée pour les différents scénarios de resélection présentés dans ce chapitre (cette section et les deux suivantes).

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Ces terminaux bénéficient alors des avantages escomptés de ce mécanisme : simplicité de la configuration, réduction de la consommation. En UMTS par exemple, si les priorités sont utilisées, les critères de resélection sont tout à fait similaires à ceux définis en LTE. L'utilisation des priorités sur les RAT LTE et UMTS aide ainsi l'opérateur à modéliser plus facilement le comportement des UE LTE sur son réseau.

Ce nouveau modèle n'est cependant pas obligatoire et l'opérateur peut aussi bien faire le choix de ne pas l'introduire sur les technologies d'accès déjà déployées, afin de limiter les modifications sur celles-ci (mise à jour logicielle, efforts de paramétrage et de tests). Dans ce cas, seuls les mécanismes de resélection existants seront utilisés, par tous les UE (Release 8 ou antérieurs).

Dans tous les cas, les UE dont l'implémentation est antérieure à la Release 8 continueront de suivre le modèle existant. Cela signifie que, si l'opérateur fait le choix de généraliser le mécanisme des priorités, un double paramétrage sera diffusé sur les Informations Système des cellules UMTS et/ou GSM/GPRS : celui associé au mode de resélection *historique*, basé sur un classement des cellules voisines mesurées et sur un jeu d'offsets éventuels, et celui utilisant les priorités absolues.

Les performances de l'UE en resélection

Quelle importance ?

Les performances intrinsèques de l'UE dans les procédures radio, et en particulier lors des resélections, sont primordiales :

- pour la qualité de l'expérience utilisateur, notamment pour assurer une connectivité stable et que l'utilisateur reste joignable ;
- mais aussi vis-à-vis de la charge et de l'efficacité du réseau.

Par exemple, un UE qui surestime dans sa mesure le niveau de RSRP de la cellule serveuse aura tendance à rester « trop longtemps » sur cette cellule alors que le signal radio est dégradé, et donc à basculer tardivement sur une cellule voisine meilleure que la serveuse. Le risque associé en mode veille lors d'un appel entrant est de devoir émettre plusieurs fois le message de paging avant que l'UE ne le reçoive, voire que l'utilisateur ne reçoive pas du tout l'appel si l'UE ne peut décoder le paging (émis sans contrôle de puissance). Par ailleurs, lors de l'établissement de la connexion (pour un appel sortant par exemple, ou après la réception d'un paging), la position de l'UE l'obligera à émettre sur le RACH avec une puissance élevée (voir le chapitre 14), induisant ainsi des interférences importantes sur les autres cellules.

Inversement, si l'UE sous-estime le RSRP de la cellule serveuse, il aura tendance à resélectionner trop tôt une cellule voisine, ce qui peut entraîner des resélections plus nombreuses, voire un risque de « ping-pong » entre cellules. Ce phénomène diminue significativement l'autonomie de l'UE et, en bordure de Tracking Area (TA), surcharge sensiblement le réseau : si la TA ne fait pas partie de la liste des TA auxquelles il est enregistré, l'UE déclenchera une procédure de mise à jour à chaque resélection entre les deux cellules. Le MME peut détecter un tel phénomène et décider d'enregistrer l'UE sur ces deux TA (voir la suite de ce chapitre). Enfin, cette sous-estimation du RSRP conduit à

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

19

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'usager 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'usager. En revanche, elle est simple pour le réseau et n'entraîne pas de charge de signalisation entre les nœuds source et cible.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

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 interfréquences 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 interfréquences 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 interfréquences et poursuivre la réception de données sur la cellule serveuse. Une telle configuration matérielle implique un coût accru du terminal.

Mesures intrafréquences et interfréquences

En LTE, une cellule se caractérise dans le domaine fréquentiel par sa fréquence centrale fc 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.

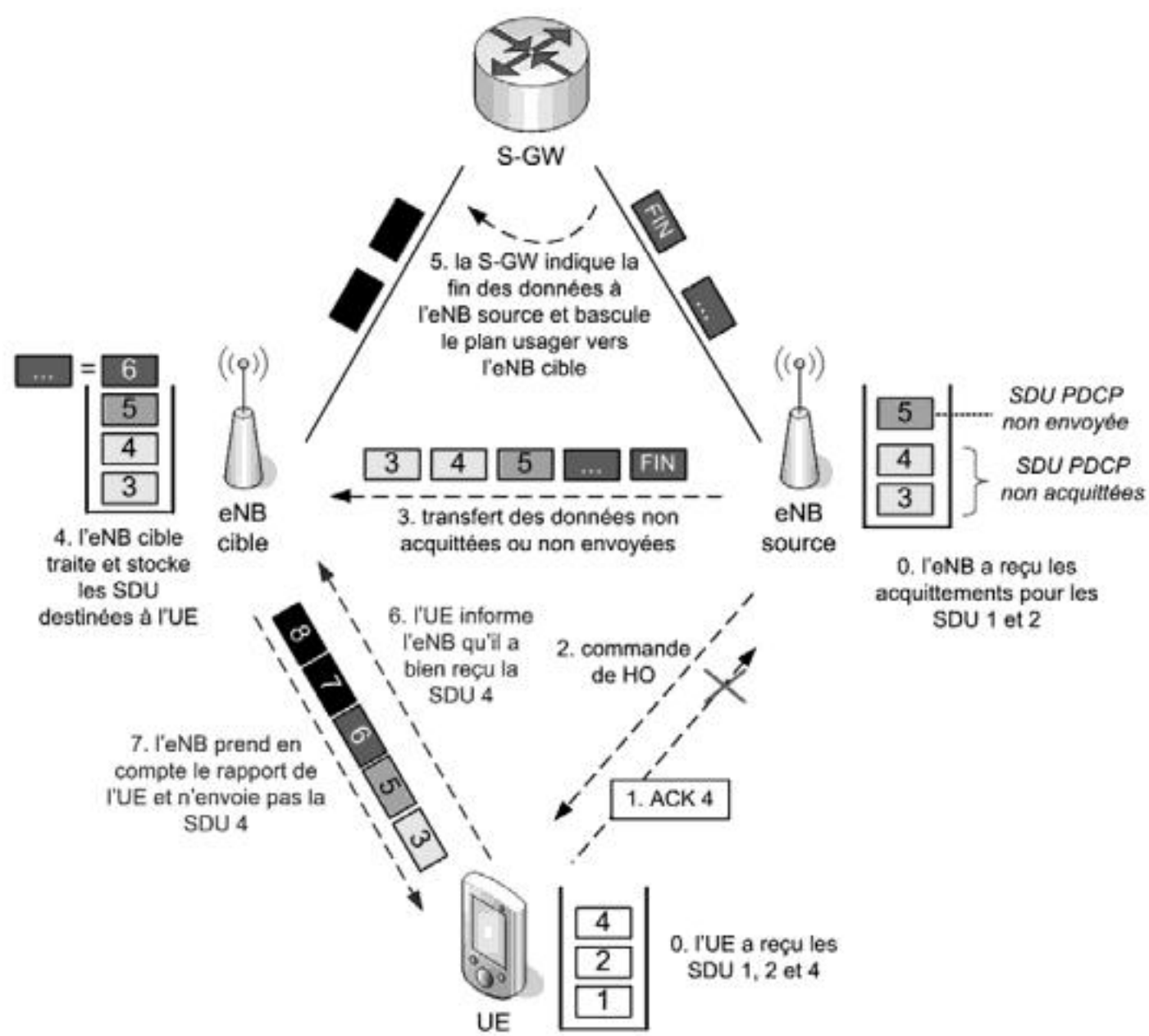
Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

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-

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

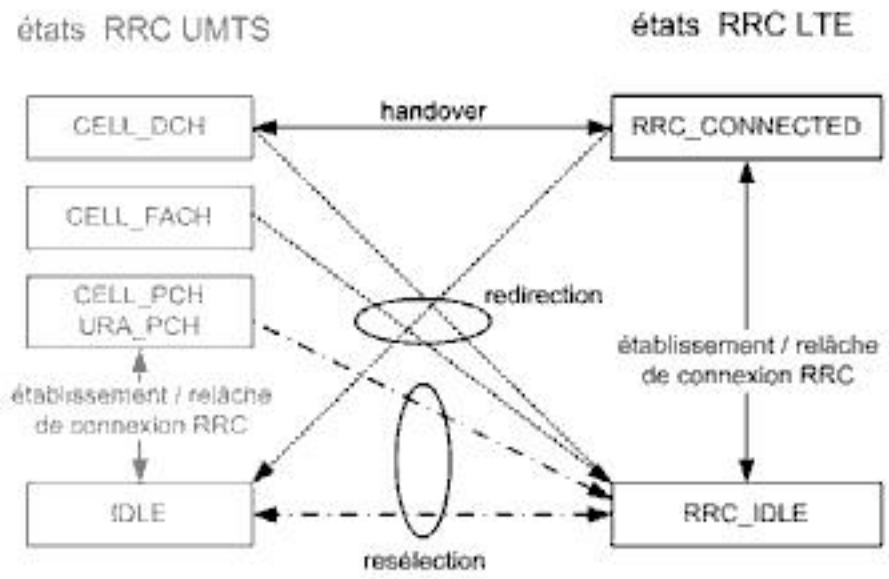
- Redirection lors de l'établissement ou de la relâche de la connexion RRC, similaire à la redirection existant en UMTS. Ce mécanisme peut être utilisé en LTE par exemple lors d'une procédure de CS Fallback (voir la section « Le mécanisme CS Fallback », p. 432) pour renvoyer l'UE en 3G ou en 2G afin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

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

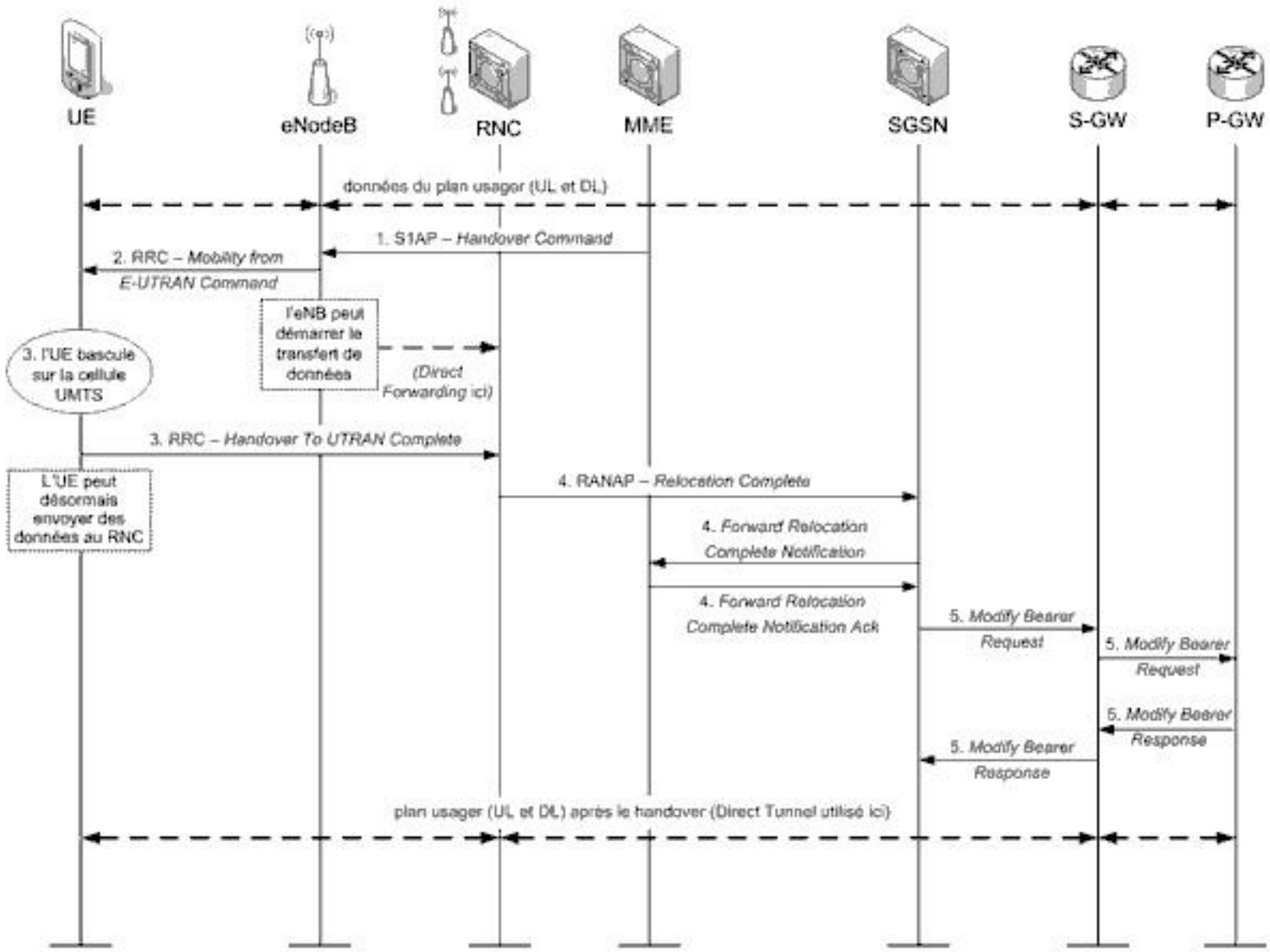


Figure 19-15
Cinématique de la phase d'exécution du handover LTE vers UMTS (pas de changement de S-GW)

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.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

La resélection GPRS vers LTE en mode connecté

En GPRS, l'UE peut effectuer des resélections 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.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Quelques définitions

Cette partie propose des définitions des notions de confidentialité, d'intégrité et d'authentification, qui sont utilisées dans la suite de ce chapitre.

L'authentification

L'authentification désigne la procédure par laquelle une entité A vérifie que l'entité B avec laquelle elle communique est bien autorisée à utiliser l'identité présentée. L'authentification d'un UE consiste donc pour le réseau à s'assurer que l'UE est bien autorisé à utiliser l'identité de l'abonné qu'il prétend représenter. De même, l'authentification du réseau par l'UE vise à assurer à l'abonné que le réseau auquel l'abonné tente d'accéder est bien celui qu'il prétend être et détient bien les informations confidentielles de l'abonné, liées à sa souscription. Nous verrons ainsi que l'authentification mise en œuvre en LTE a un double objectif : authentifier le réseau autant que l'UE qui y accède. On parle ainsi d'*authentification mutuelle*.

La confidentialité

Une information est dite confidentielle lorsqu'elle ne peut être partagée qu'avec des entités, individus ou processus autorisés. Le niveau de confidentialité d'une information indique la nature et le nombre de ces éléments (entités, individus, processus) avec lesquels elle peut être partagée. Ce niveau de confidentialité est lié à la sensibilité de l'information et aux conséquences que sa distribution à des éléments non autorisés implique pour l'individu ou la personne morale à laquelle cette information est associée. Suivant la sensibilité de l'information, sa confidentialité peut alors être assurée par des règles et mécanismes différents : l'information peut ainsi n'être jamais transmise par l'entité qui la détient, mais utilisée pour produire des informations dérivées qui ne permettront pas de remonter à l'information d'origine, ou encore être protégée par un mécanisme de chiffrement, afin d'assurer que seule l'entité capable de réaliser le déchiffrement aura accès à cette information.

À titre d'exemple, une clé secrète K est partagée entre la carte UICC insérée dans un terminal mobile et un équipement du réseau, l'AuC. L'authentification de l'abonné auquel la carte est associée repose sur cette clé : elle permet de reconnaître un abonné et, par voie de conséquence, de facturer à celui-ci les services utilisés sur le réseau mobile. Cette clé est donc une information très sensible et ne doit jamais sortir de la carte UICC ou de l'AuC.

L'intégrité

La protection de l'intégrité a deux objectifs :

- la protection de l'intégrité proprement dite : assurer que la donnée n'a pas été altérée par un tiers après son envoi initial ;
- l'authentification de la source : vérifier que la source de cette donnée est bien celle indiquée dans le message.

La protection de l'intégrité n'implique pas le chiffrement des données, qui peuvent être transmises en clair. En revanche, celles-ci sont adjointes d'une signature produite par l'émetteur à partir des données

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Gestion des clés

Un environnement sécurisé existe au sein de l'eNodeB et est utilisé par celui-ci pour la manipulation des clés et les opérations sensibles : en particulier, pour le chiffrement/déchiffrement, l'intégrité, la gestion des contextes de sécurité des UE, les séquences du boot. Les clés ne doivent jamais quitter cet environnement (sauf si besoin lié aux procédures normalisées de l'interface S1).

Interfaces terrestres

Sur les interfaces S1 et X2, des associations de sécurité (SA en anglais, pour *Security Association*) sont établies entre eNodeB et MME d'une part, et entre les eNodeB d'autre part. Les plans de contrôle et usager des interfaces S1 et X2 doivent être protégés à l'aide du protocole IPsec ESP [IETF RFC3948]. En particulier, avant l'échange de messages de signalisation sur ces interfaces, une authentification et un échange de clés sont réalisés suivant la procédure IKEv2 [IETF RFC5996], basée sur des certificats. Le mode tunnel d'IPsec doit être implémenté par l'eNodeB, mais le mode transport est également autorisé et peut être utilisé pour limiter la taille additionnelle des paquets (*overhead*). On notera cependant que l'usage d'IPsec n'est pas requis lorsque ces interfaces sont déjà protégées et considérées fiables (par exemple dans le cas d'un accès physique sécurisé).

Les mêmes règles s'appliquent à l'interface utilisée pour l'opération et la maintenance (O&M) des eNodeB. Le trafic associé à cette interface est typiquement porté par le même lien que l'interface S1 et, de ce fait, les mécanismes mis en œuvre pour la protection de cette interface peuvent être simplement réutilisés pour l'interface de gestion. Pour cette raison, le 3GGP impose que le protocole IPsec ESP soit implémenté sur cette interface si son accès physique n'est pas sécurisé.

On notera également que l'interface X2 ne porte aucun trafic lié à la gestion des eNodeB (O&M, pour *Operation & Maintenance*).

L'architecture de la sécurité

On peut distinguer cinq domaines d'application de la sécurité :

1. le domaine de l'accès au réseau, qui regroupe les fonctions assurant à l'abonné un accès sécurisé aux services du réseau et qui protège en particulier des attaques sur l'interface radio ;
2. la sécurité interne au réseau, qui permet aux nœuds du réseau de protéger leurs échanges de signalisation et les données utilisateur (par exemple par un tunnel IPsec entre eNodeB et SGW) et de parer aux éventuelles attaques sur les interfaces terrestres ;
3. la sécurité du domaine de l'abonné, visant à garantir un accès sécurisé à l'USIM par la protection des échanges entre le terminal et l'USIM, l'authentification de l'utilisateur (saisie du code PIN) et la vérification du terminal par l'USIM ;
4. la sécurité du domaine applicatif, qui assure la protection des messages entre l'application sur le terminal et le fournisseur de l'application ;
5. la visibilité de la sécurité pour l'utilisateur : fonctions informant l'utilisateur qu'une fonction de sécurité est utilisée ou non et des conséquences éventuelles sur l'accès aux services.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

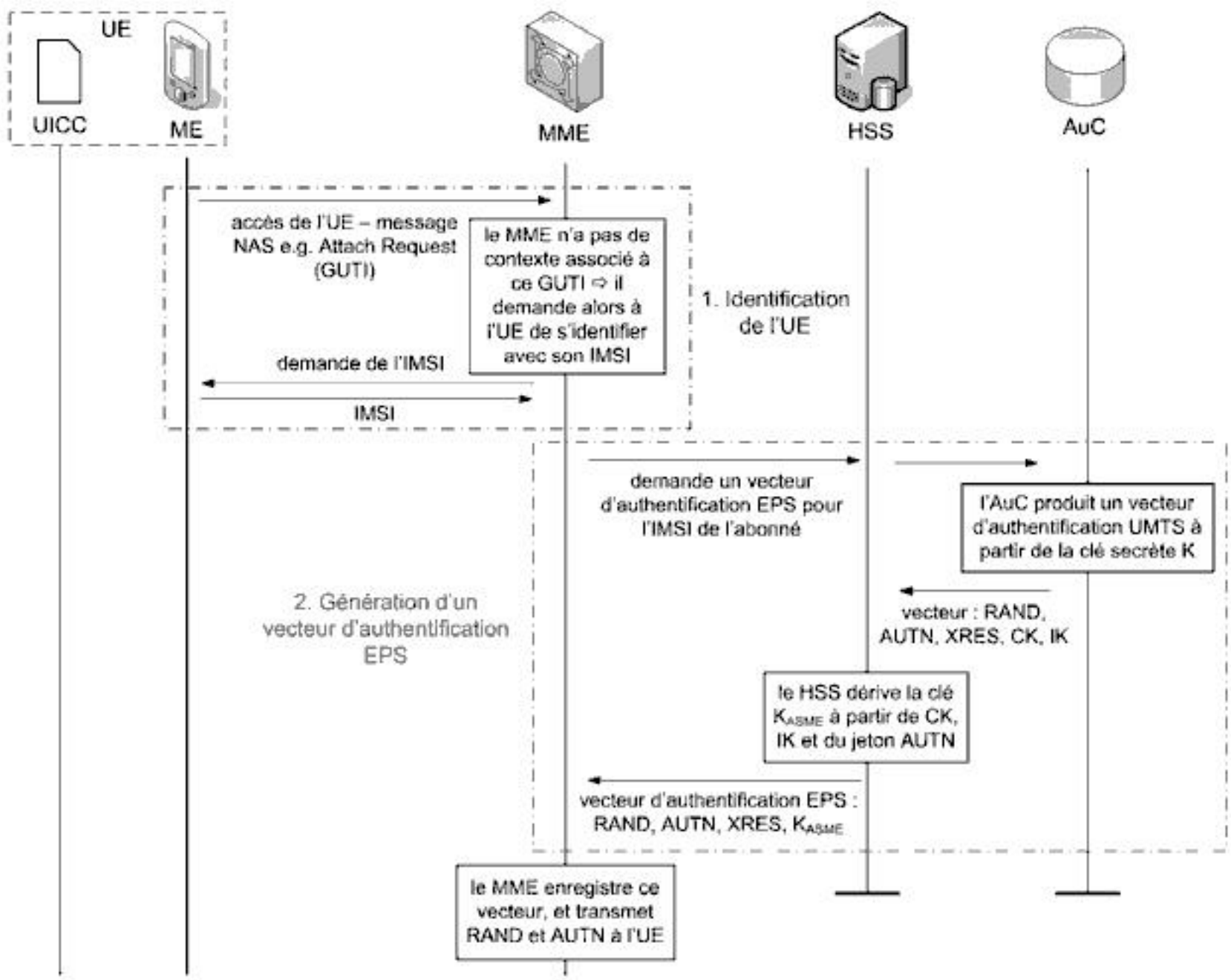


Figure 20-2
La procédure d'authentification EPS (étapes 1 et 2)

La création du vecteur d'authentification EPS

Les données utilisées pour l'authentification sont fournies, en LTE comme en UMTS, par le HSS. Il sollicite l'AuC pour obtenir un *vecteur d'authentification UMTS*, constitué des cinq éléments suivants :

- un jeton AUTN, utilisé pour l'authentification du réseau par l'UE ;
- le paramètre XRES, qui est le résultat attendu lors du challenge de l'UE ;
- un nombre aléatoire RAND, utilisé pour calculer les nombres AUTN et XRES et assurer leur unicité ;
- la clé de chiffrement UMTS CK ;
- la clé d'intégrité UMTS IK.

Le HSS dérive de ce quintuplet un *vecteur d'authentification EPS*, formé des trois premiers éléments et de la clé K_{ASME}, issue des clés CK et IK. Ce vecteur ne peut donc être utilisé que par un MME et non par un SGSN, même si le vecteur d'origine peut l'être. De même, un vecteur

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

4. Suite à la demande du MME, l'UE retourne son IMSI.
5. Le MME demande alors au HSS un vecteur d'authentification pour l'IMSI fourni par l'UE. Le vecteur d'authentification EPS retourné contient les éléments suivants : K_{ASME}, RAND, AUTN, XRES.
6. Le MME démarre une procédure d'authentification EPS AKA avec l'UE (section « L'authentification de l'abonné dans le système EPS » de ce chapitre, p. 449). Les messages S1AP et RRC encapsulant ce message ne sont pas représentés sur le schéma, pour des raisons de lisibilité. On notera que cette procédure est également réalisée lorsque la vérification du code MAC-I est négative, même si le contexte de l'UE existe (GUTI connu), ou lorsque ce code est absent du message NAS. À l'issue de cette procédure, le MME et l'UE disposent de la même clé K_{ASME} et le MME peut poursuivre avec la procédure de sécurité NAS. Il dérive alors les clés K_{NASint} et K_{NASenc} à partir de K_{ASME} et des identifiants des algorithmes qu'il a sélectionnés.
7. Le MME utilise alors K_{NASint} pour protéger le message EMM *Security Mode Command*, dans lequel il indique les algorithmes utilisés et le KSI de la clé K_{ASME} du contexte courant (le MME peut détenir plusieurs clés K_{ASME} associées à des contextes différents du même UE). Il transmet ensuite ce message à l'UE. Ce dernier vérifie la validité du code d'intégrité MAC inclus dans le message et dérive à son tour les clés NAS à partir des informations fournies par le MME, de K_{ASME} et de la fonction de dérivation. Il retourne au MME le message EMM *Security Mode Complete*, protégé et chiffré. Le MME utilise la valeur du numéro de séquence indiqué par l'UE dans ce dernier message NAS pour calculer K_{eNB} à partir de K_{ASME}.

La suite des échanges est alors identique au scénario 1 (étape 4).

La gestion de la sécurité en mobilité

Mobilité au sein du système EPS

La clé K_{eNB}, dérivée à partir de K_{ASME}, est associée à la connexion RRC établie entre l'eNodeB et l'UE sur la cellule courante. Cela implique qu'elle doit être renouvelée lors de chaque handover. Cette règle évite sa réutilisation en situation de mobilité, par un autre eNodeB notamment (qui peut être contrôlé par un autre opérateur). En effet, les procédures de signalisation avec l'UE ne doivent pas lui révéler l'architecture du réseau de l'opérateur (par exemple un changement d'eNodeB, ou la présence d'une interface X2 entre les eNodeB). De ce fait, la procédure de handover au sein d'un même eNodeB ou entre deux eNodeB différents doit être la même vis-à-vis de l'UE, y compris pour la gestion de la sécurité.

Cependant, la nouvelle clé (que nous noterons K_{eNB}*) doit être disponible avant que l'UE ne bascule sur la cellule cible, pour que les messages et données échangés sur cette cellule soient immédiatement protégés. Ainsi, cette clé doit être calculée par l'eNodeB cible et l'UE à partir de K_{eNB} utilisée dans la cellule d'origine. Cela signifie que K_{eNB}* peut être également déterminée par l'eNodeB source, l'UE et l'eNode cible ne partageant pas encore d'information *exclusive* propre à la future connexion. En répétant plusieurs fois ce scénario de handover, on voit que des clés successives peuvent être dérivées à partir de la même clé d'origine K_{eNB}, ce qui peut fragiliser la sécurité du système.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

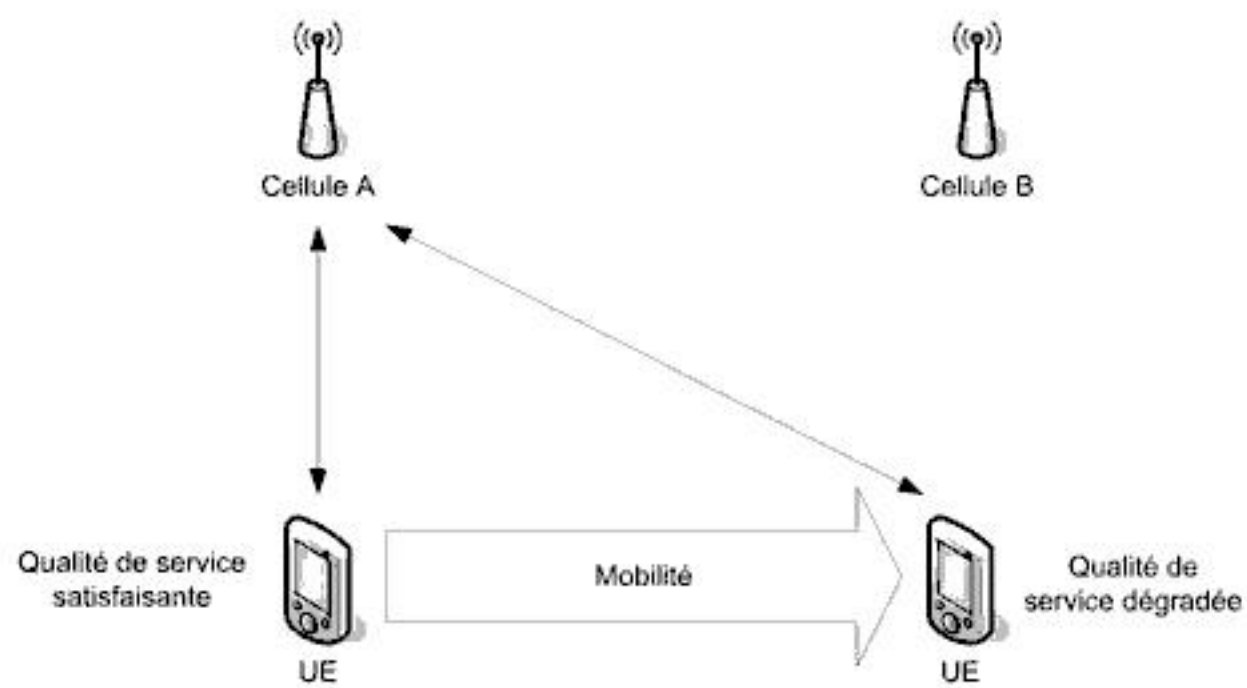
You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

- Les conclusions des études peuvent être entachées d'erreurs du fait de l'imperfection des modèles de propagation utilisés, de l'imprécision des bases de données topographiques disponibles, ou enfin d'oublis de l'ingénieur en charge de l'étude.

La non-déclaration d'une relation de voisinage implique une qualité de service dégradée (coupures d'appels, dégradation de la qualité vocale, réduction des débits, etc.), comme illustré sur la figure suivante.

Figure 21-4
Conséquence d'un manque de relation de voisinage



Sur cette figure, le mobile est en communication avec la cellule A et en mobilité en direction de la cellule B. La relation de voisinage entre les cellules A et B n'est pas déclarée. Malgré les meilleures conditions radio offertes par la cellule B, le mobile reste connecté avec la cellule A. La procédure de handover ne peut être déclenchée, ce qui se traduit par une dégradation de la qualité de service offerte à l'abonné. Pour l'opérateur, cet oubli est souvent révélé par un taux de coupures d'appel élevé sur la cellule A.

L'ANR (*Automatic Neighbor Relation*) a pour objectif d'automatiser la déclaration des relations de voisinage :

- intrasystèmes et intrafréquences ;
- intrasystèmes et interfréquences ;
- intersystèmes.

Principes techniques

Dans la plupart des cas, la procédure de handover a pour objectif de connecter le terminal à la cellule qui lui offre les meilleures conditions radio. Plusieurs méthodes sont envisageables afin de déterminer les cellules voisines. On peut ainsi appliquer :

- une méthode théorique basée sur des simulations de propagation électromagnétique indiquant les zones de recouvrement entre la cellule étudiée et les cellules voisines ;

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Principes techniques

En Release 8, le degré de normalisation de la procédure de sélection automatique des PCI est encore limité. En effet, le 3GPP a uniquement défini des bases générales d'implémentation de la procédure. Ainsi, au sein de l'eNodeB, la sélection du PCI d'une cellule peut être basée sur deux types d'algorithmes :

- un algorithme centralisé ;
- un algorithme distribué.

L'algorithme centralisé est basé sur une signalisation par le système O&M de la valeur du PCI que l'eNodeB doit sélectionner. Ce dernier ne revêt donc aucun caractère d'automatisation et de gain de temps réalisé par l'opérateur.

Bien que partiellement défini par le 3GPP, l'algorithme distribué peut au contraire permettre une automatisation complète de la sélection du PCI par l'eNodeB. Le système O&M signale une liste de valeurs de PCI au sein de laquelle l'eNodeB réalise son choix. L'eNodeB restreint cette liste en supprimant les PCI :

- remontés par les UE ;
- remontés par des eNodeB voisins via l'interface X2 ;
- identifiés selon une méthode propre au constructeur.

L'eNodeB doit alors sélectionner sa valeur de PCI aléatoirement au sein de la liste des PCI qui subsistent.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

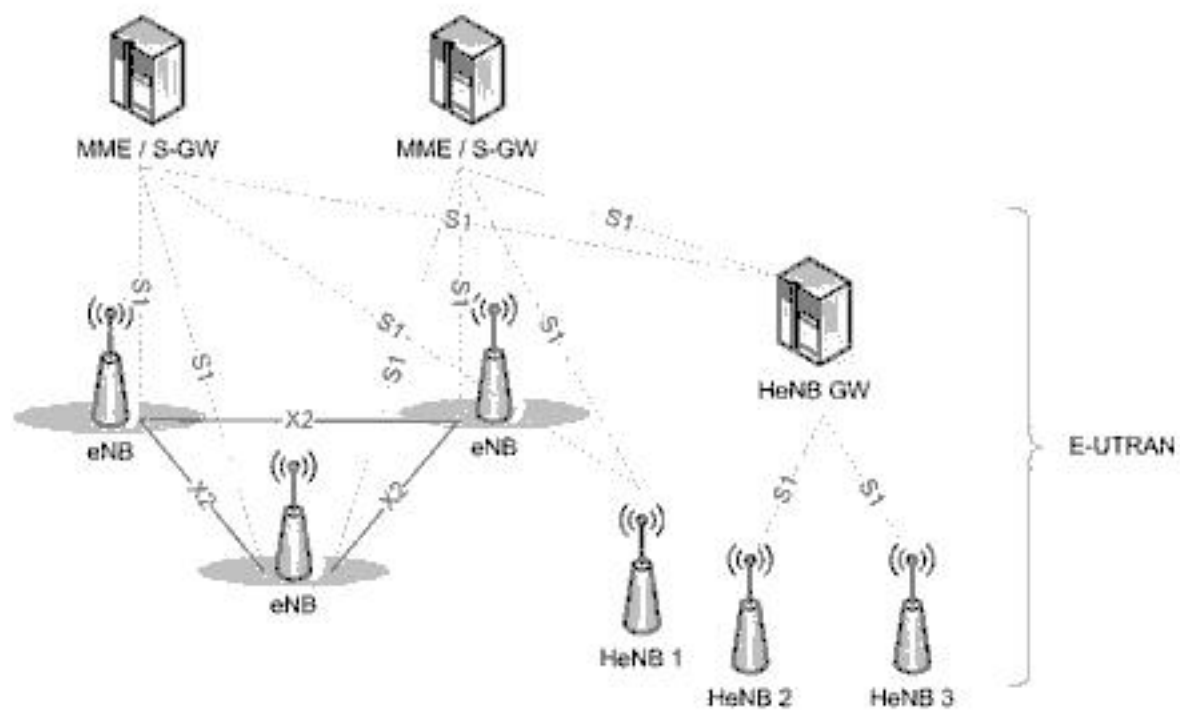
You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

L'entité HeNB GW (*Home eNodeB Gateway*) est une passerelle optionnelle réduisant le nombre d'interfaces S1-MME à connecter au niveau de l'EPC. Cette entité logique revêt tout son sens dans le cas d'un déploiement massif d'HeNB pour le grand public. La HeNB GW sert alors de concentrateur pour le plan de contrôle (S1-MME), réduisant ainsi le nombre de connexions SCTP simultanées au niveau du MME. On peut également imaginer que les utilisateurs procéderont à des démarrages et arrêts fréquents de leur HeNB, engendrant une forte charge du MME liée à la relâche et au rétablissement des connexions SCTP. La HeNB GW peut servir à masquer ces phénomènes au MME.

Un HeNB ne peut être connecté qu'à une unique HeNB GW à un instant donné, appelée la HeNB GW *serveuse*. De même, un HeNB connecté à l'EPC via la HeNB GW ne peut être connecté simultanément qu'à un seul MME. En d'autres termes, la fonction S1-Flex décrite au chapitre 2 ne s'applique pas aux HeNB dans le cas d'un raccordement à une HeNB GW. La HeNB GW peut toutefois être reliée à plusieurs MME.

La figure suivante décrit un exemple d'architecture impliquant des déploiements simultanés d'eNB et de HeNB au sein d'un même PLMN.

Figure 22-3
Architecture générale LTE incluant eNodeB, HeNB et HeNB GW



Sur cette figure, l'HeNB1 est connecté directement à deux MME, ce qui illustre le fait que la fonction S1-Flex peut s'appliquer aux HeNB dans le cas d'un raccordement direct entre EPC et HeNB. Les HeNB2 et HeNB3 sont quant à eux reliés à une HeNB GW. Cette figure illustre la latitude laissée à l'opérateur en termes d'architecture. On peut imaginer que pour un déploiement limité d'HeNB, l'opérateur n'installera pas de HeNB GW. En revanche, un déploiement plus massif implique logiquement le déploiement d'une HeNB GW.

La connectivité X2 entre les HeNB n'est pas permise en Release 8, par volonté de simplicité du réseau de transport, notamment pour un scénario de déploiement impliquant un grand nombre (par exemple des millions) de HeNB. Par conséquent, le seul schéma de handover envisagé pour les HeNB est celui basé sur l'interface S1. Par ailleurs, il est à noter qu'une interface X2 ne peut être établie ni entre deux HeNB GW, ni entre une HeNB GW et un HeNB.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

statique et spécifique à l'UE. Les UE limités en puissance peuvent toujours être configurés selon le mode de la Release 8, où l'information de contrôle destinée à être retournée sur le PUCCH est transmise sur le PUSCH lorsque celui-ci est alloué.

Dans le cas de l'agrégation de porteuses, le PUSCH et le PUCCH peuvent être transmis sur deux porteuses différentes.

Améliorations du MIMO en voie descendante

L'amélioration du MIMO en voie descendante porte sur deux fonctionnalités principales :

- l'ajout de la prise en charge du MIMO 8 × 8 ;
- l'amélioration du MIMO Multi-utilisateurs (MU-MIMO, voir le chapitre 5).

Ces deux fonctionnalités ont motivé la définition de nouveaux signaux de référence en voie descendante, que nous abordons également dans cette section.

MIMO 8 × 8

Le MIMO 8 × 8 requiert 8 antennes d'émission à l'eNodeB et 8 antennes de réception à l'UE. En ce qui concerne l'eNodeB, 8 antennes sont pour l'instant difficiles à déployer sur des sites macro du fait de la largeur d'un radôme unique, ou alternativement de l'accroissement du nombre de radômes requis sur le site. En revanche, il semble plus aisé de déployer 8 antennes d'émission sur des stations de base de faible puissance, comme des eNodeB pico, où les contraintes sur la taille des antennes sont moindres. En ce qui concerne l'UE, un si grand nombre d'antennes de réception est à réserver à des terminaux de grande taille, comme des tablettes ou des ordinateurs portables.

La prise en charge du MIMO 8 × 8 est motivée par l'atteinte de l'efficacité spectrale crête visée par le 3GPP pour le LTE-Advanced. Huit antennes d'émission peuvent être mises en œuvre dès la Release 8 via le mode de transmission TM7. Cependant, la transmission est restreinte à une seule couche spatiale, c'est-à-dire au beamforming. Une première amélioration a été effectuée en Release 9, où le multiplexage spatial de deux couches a été introduit, donnant naissance au mode de transmission TM8. Ce travail a été étendu en Release 10, en portant le nombre de couches spatiales possibles à 8. Le MIMO mono-utilisateur (SU-MIMO) est ainsi géré avec jusqu'à 8 couches affectées à un seul UE, le nombre de blocs de transport multiplexés restant égal à deux. En outre, le MU-MIMO est géré avec jusqu'à 4 couches spatiales à partager entre les UE, chaque UE pouvant se voir allouer jusqu'à deux couches spatiales. Nous reviendrons plus en détail au MU-MIMO à la section « Amélioration du MU-MIMO », p. 512.

Aucun schéma de diversité de transmission n'a été normalisé pour le cas de 8 antennes, car les gains de diversité par rapport au cas de quatre antennes sont faibles. Cependant, les schémas de diversité de transmission normalisés en Release 8 pour 4 antennes peuvent être appliqués à 8 antennes via un procédé appelé la *virtualisation d'antennes*. Ce dernier consiste à transmettre le signal correspondant à un port d'antenne via deux (ou plus) antennes physiques, comme décrit à la figure suivante. Un précodeur spécifique à l'implémentation et variant typiquement dans le temps et/ou selon les PRB assure que cette opération ne donne pas de direction privilégiée (beamforming) à la transmission.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

couche spatiale, ou 2 UE avec chacun 2 couches spatiales. En pratique, il est cependant rare de trouver plus de deux UE à apparier pour 4 antennes d'émission.

La commutation dynamique entre SU- et MU-MIMO est possible grâce à l'indication dans le PDCCH selon un format de DCI 2C de la ou des séquence(s) DMRS affectée(s) à l'UE pour la démodulation du PDSCH (une séquence par couche). L'avantage de cette commutation dynamique est que si l'eNodeB ne peut trouver deux UE à apparier, il peut se replier sur une allocation SU-MIMO à un seul UE. Cette disposition améliore le débit total sur la cellule par rapport au TM5 de la Release 8, où un UE ne peut être servi que sur une couche spatiale si l'eNodeB ne trouve pas d'autre UE avec lequel l'apparier. Le MU-MIMO amélioré est également mis en œuvre par le nouveau mode de transmission TM9.

Il est à noter que le TM8 introduit en Release 9 constitue une première étape vers le TM9, avec les mêmes propriétés de MU-MIMO mais un mode SU-MIMO limité à deux couches. Le TM8 est cependant en pratique réservé au TDD, car l'absence de CSI-RS pour l'estimation du canal en Release 9 demande de conserver autant de ports CRS qu'il y a d'antennes pour estimer le canal en FDD. Ceci pénalise le gain de performance apporté par le MU-MIMO amélioré, comme nous l'avons montré à la section précédente.

MIMO en voie montante

Nous avons expliqué au chapitre 5 que la sélection d'antenne et le MU-MIMO sont possibles en voie montante en LTE Release 8. Néanmoins, ces traitements ne sont mis en œuvre que par une seule antenne d'émission au niveau de l'UE, les transmissions multi-antennes n'étant pas normalisées. Les transmissions multi-antennes en voie montante sont introduites en Release 10, notamment afin d'atteindre les critères d'efficacité spectrale en moyenne sur la cellule ainsi qu'en bordure de cellule. Les fonctionnalités suivantes sont possibles, pour 2 et 4 antennes d'émission :

- SU-MIMO jusqu'à 4 couches spatiales pour le PUSCH (nécessite 4 antennes en émission et 4 antennes en réception) ;
- MU-MIMO jusqu'à 4 couches spatiales au total (2 couches maximum par UE) pour le PUSCH ;
- diversité de transmission pour le PUCCH.

Si deux antennes d'émission peuvent être intégrées dans des terminaux de type dongle et smartphone, quatre antennes d'émission sont à réserver à des terminaux plus larges, de type tablette ou ordinateur portable. La puissance totale d'émission reste inchangée par rapport à un UE mono-antenne, la puissance disponible étant partagée entre les antennes. Comme en voie descendante, l'émission de plusieurs couches spatiales requiert donc que l'UE soit en bonnes conditions radio (SINR suffisant et rang du canal supérieur à 1).

Notons qu'un mode monoport d'antenne en voie montante est également défini pour les UE avec plusieurs antennes d'émission, dans lequel l'émission est identique au cas d'un UE mono-antenne *du point de vue de l'eNodeB*. L'implémentation exacte de ce mode est laissée aux constructeurs d'UE ; les antennes multiples peuvent ainsi par exemple être utilisées via la virtualisation d'antennes. Ce mode monoport d'antenne est le mode d'opération par défaut jusqu'à ce que l'eNodeB acquière la connaissance du nombre d'antennes de l'UE.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Index

1G 5
2G 5, 6, 33
3G 5, 8, 33
3GPP 1, 8, 15
3GPP2 17
4G 11

A

Abis 35
accès
  aléatoire 144, 281, 288, 292, 294, 300
    signalisation 263, 266
  au réseau 328
  fermé 495
  ouvert 495
Access Point Name 351
Access Stratum 36, 39, 319
ACK *Voir* HARQ
acquittements *Voir* HARQ
adaptation
  de débit *Voir* codage de canal
  de lien 99, 112
    en boucle ouverte 114
adresse IP 343
agilité en fréquence 13, 19
agrégation de porteuses 503, 521, 525, 529
algorithme de sécurité
  AES 444
  SNOW 3G 444
Allocation and Retention Priority 355
allocation de ressources
  distribuées 155
  localisées 155
Almost Blank Subframes 523
always-on 9, 351, 388
AMBR *Voir* APN-AMBR et UE-AMBR
amplificateur de puissance 140, 154
AMPS 6
ANR 480
  intersystème/interfréquence 482
  intra-LTE intrafréquence 481
antennes 67, 122, 125, 127, 132, 527
  à polarisation croisée 67, 132, 140, 509, 512
  calibration 76
  copolarisées 67
  corrélation des ~ 509
  de même polarisation 509
  distribuées 528
  nombre d'~ 133
  port d'~ 134
  sélection d'~ 121, 142
APN 42, 340, 351
APN-AMBR 340, 355
appel
  d'urgence 343
  entrant 346
  mobile-à-mobile 346
  mobile-à-serveur 346
  serveur-à-mobile 346
  sortant 346
ARCEP 23
architecture 4
  plate 43
ARIB 16
ARP 50, 355
ARQ 243
AS 319
ATIS 16
ATM 35
attachement 337
attachement *Voir* aussi enregistrement
attaque « man in the middle » 328
AuC 42, 442, 447
Authentication Centre *Voir* AuC
authentification 323, 328, 442
  1 sur N 329
  AKA 328
  challenge d'~ 328
  données d'~ 328
  EPS 449
  jeton d'~ 449
  mutuelle 328, 442, 449
  simple 328
  UMTS 449
  vecteur d'~ 449
AUTN *Voir* authentification (jeton)
autoconfiguration 475
Automatic Neighbor Relation 480
autonomie 370
auto-optimisation 31, 475
avance de temps 92, 158, 292, 308
azimuth 4

B

backhaul (réseau) 52, 236, 517, 519, 527
bande
  de cohérence 65, 151
  de garde 95, 150
  du système 95
  largeur de ~ 209
  partie de ~ 276, 277
BBU 527
beamforming *Voir* MIMO
bearer 349
  EPS 50, 343, 345, 349
  EPS dédié 345, 350

Éléments sous droits d'auteur

EPS par défaut 337, 345, 350
GBR 355
non-GBR 314, 355
S1 349
S5/S8 349
bits
de parité 106
systématiques 106
blacklist 376, 400
BLER 112
bloc de transport 88, 133
bordure de cellule 234
BSC 35
BSR 218, 220, 301, 350
de remplissage 220
périodique 220
régulier 220
BTS 34
buffer circulaire 246, *Voir aussi* registre circulaire
Buffer Status Report 350
bundling Voir empaquetage

C

Call Control 320, 435
canal
angles d'arrivée 66
angles de départ 66
assigné 75
capacité du ~ 69
de transmission 60
largeur de bande 95
matrice du ~ 71
qualité du ~ 68, 113
radio 60
rang du ~ 125
réciprocité du ~ 76, 122, 134, 141
représentation mathématique 71
retour d'information 272, 509
trajets distinguables 61
canaux 85
de transport 85, 87
BCH 88, 103
DL-SCH 88, 103
PCH 88, 103
RACH 88
UL-SCH 88, 103
logiques 85, 86, 350
BCCH 87
CCCH 87
DCCH 87
DTCH 87
groupes de ~ 221
PCCH 87
physiques 86, 88
en voie descendante 181
en voie montante 195
ePDCCH 529
PBCH 89, 183, 283
PBCH, codage de canal 183
PBCH, MIMO 183
PBCH, modulation 183
PBCH, position 183
PCFICH 89, 188
PCFICH, codage de canal 189
PCFICH, MIMO 189
PCFICH, modulation 189
PCFICH, position 189
PDCCH 89, 184, 262, 529
PDCCH, adressage 265
PDCCH, capacité 263
PDCCH, codage de canal 185
PDCCH, contrôle de puissance 241
PDCCH, décodage 266
PDCCH, entrelacement 187
PDCCH, espaces de recherche 143, 267
PDCCH, formats 184
PDCCH, formats de DCI 264
PDCCH, MIMO 187
PDCCH, position 185
PDCCH, validation 225, 226
PDSCH 89, 182
PDSCH, codage de canal 182
PDSCH, contrôle de puissance 241
PDSCH, modulation 182
PHICH 89, 190, 250, 271
PHICH, codage de canal 190
PHICH, durée 191
PHICH, étalement 190
PHICH, groupe de PHICH 190, 191
PHICH, MIMO 193
PHICH, modulation 190
PHICH, multiplexage 190
PHICH, position 191
PHICH, ressources 271
PMCH 163
PRACH 89, 288
PRACH, formats 289
PRACH, multiplexage avec le PUSCH 289
PRACH, occasion de transmission 288
PRACH, préambule 288, 292
PRACH, préambules d'une cellule 294
PRACH, préfixe cyclique 291
PRACH, procédure d'émission 296
PRACH, ressources 289
PRACH, structure 288
PRACH, synchronisation 290
PRACH, temps de garde 288, 291
PUCCH 89, 201
PUCCH, capacité de multiplexage (formats 1/1a/1b) 205
PUCCH, capacité de multiplexage (formats 2/2a/2b) 207
PUCCH, codage de canal (formats 1/1a/1b) 202, 203
PUCCH, codage de canal (formats 2/2a/2b) 206
PUCCH, diversité de transmission 515
PUCCH, embrouillage (formats 1/1a/1b) 205
PUCCH, format 1b avec sélection de canal 270, 505
PUCCH, format 3 505
PUCCH, format raccourci 205
PUCCH, formats 201
PUCCH, formats 1, 1a, 1b 202
PUCCH, formats 2, 2a, 2b 206
PUCCH, modulation (formats 1/1a/1b) 202
PUCCH, modulation (formats 2/2a/2b) 206
PUCCH, multiplexage 208

Éléments sous droits d'auteur

PUCCH, position 208
PUCCH, répétition 268
PUCCH, ressources 207, 270
PUCCH, sur-provision 209
PUSCH 89, 196
PUSCH, allocation discontinue 506
PUSCH, codage de canal 196
PUSCH, codage de canal pour les données UL-SCH 197
PUSCH, codage de canal pour les informations de contrôle 197
PUSCH, modulation SC-FDMA 200
PUSCH, multiplexage avec le PUCCH 279, 507
PUSCH, multiplexage des données et du contrôle 199
PUSCH, saut de fréquence inter-sous-trame 233
PUSCH, saut de fréquence intra- et inter-sous-trame 231
PUSCH, transmission d'informations de contrôle 196, 279
capability 524
capacité 5, 11, 17, 18, 28, 29
d'appel voix 29
radio de l'UE 338, 418
réseau de l'UE 338
catégories d'UE 26, 217, 524
CAZAC (séquences) 168
CC 320, 435
CCE 186, 267
CDD 141
CDMA 7, 8, 14, 147, 203
CDMA2000 8, 11, 47
Cell Change Order 414, 427
cellule 2
acceptable 368
barrée 368, 369
CSG 331, 368, 369
éligible 336, 368
meilleure 368
recherche de ~ 282, 335
resélection de ~ 331, 369
réservée 369
sélection de ~ 331, 335, 370
sélection initiale 336
serveuse 368
cellules
femto 3, 489, 520
macro 3
micro 3
pico 3, 520
CFI 188
Chase (combinaison de) 244, 247
chiffrante 459
chiffrement 82, 328, 444
chipset 379
clé
CK, IK 447, 449
d'intégrité 328
d'intégrité NAS KNASint 454
d'intégrité RRC KRRCint 454
de chiffrement 328
de chiffrement des données KUPenc 454
de chiffrement NAS KNASenc 454
de chiffrement RRC KRRCenc 454
KASME 447
KeNB 448
KeNB* 465
KeNodeB 342
secrète 328
secrète K 442, 449
cloud computing 25
C-NETZ 6
codage de canal 99, 100, 151
adaptation de débit 108
bloc de codage 103
code à répétition 103, 109
code convolutif 103, 104
code de Reed-Muller 108
code en bloc 103, 107
concaténation 103
CRC 142
détection d'erreurs 102
entrelacement 108
entrelaceur QPP 106
longueur de contrainte 104
MCS 112
poinçonnage 109
pour l'HARQ 244, 246
rendement de codage 100, 108, 244
segmentation 103
tail biting 105
turbo-code 103, 105
code
d'embrouillage 417
MAC 443, 452
MAC-I 460
orthogonal 203
PIN 445, 448
Code Division Multiple Access 147
coexistence entre systèmes 209
cohérente
combinaison ~ 64, 128
démodulation ~ 65
collision 300
CoMP 525
compression d'en-tête 78, 82
confidentialité 328, 442
configuration des interfaces S1 et X2 477
consommation 367, 371
conteneur RRC 419, 426
contexte
de bearer EPS 350
de sécurité EPS 456
PDP 343
PDP secondaire 355
contrôle
d'admission 421
de flux 83
de puissance 238, 239
commandes TPC 240
en voie descendante 240
fractionnaire 240
signalisation 263
sur le PUCCH 240
sur le PUSCH 239
sur les SRS 240
contrôleur de stations de base 35, 43
coordination d'interférence intercellulaire 233
corrélation 66
circulaire 168, 169, 171
entre antennes 66
matrice de ~ 72, 126, 129

Éléments sous droits d'auteur

couche
AS 319
NAS 319
physique 81
spatiale 123, 132
couverture 214, 246, 268, 289, 293, 519
perte de ~ 332, 335
CPC 10, 16
CQI *Voir* retour d'information
CRC 101, 102
C-RNTI *Voir* RNTI
CRS *Voir* signaux de référence
CS Fallback 322, 337, 344, 386, 394, 414, 427, 432
CS over HSPA 428
CSG 331, 491, 496, 520
CSI-RS *Voir* signaux de référence
CT 15
CWTS 16
cycle DRX 309

D

DAI 270
data forwarding 398
Data Radio Bearer 350
DCCH 350
DC-HSDPA 10, 16
DC-HSUPA 17
DCI (format de) 143, 225, 226, 264
débit 5, 12, 18, 68, 524
garanti 216, 217
décalage
cyclique 168, 172, 202
de séquence (DMRS) 172
déclaration automatique
de PCI 477, 487
de relations de voisinage 477, 478
décodages aveugles (du PDCCH) 267
délai de transmission 356
démodulation 241
détachement 323, 343
DFT 122, 140, 156
DFT (vecteur) 122
DFT-Spread OFDM 157
dictionnaire *Voir* MIMO
Direct Forwarding 421
Direct Tunnel 421
dispersion
angulaire 66
des retards 65
diversité 63
de retard cyclique (CDD) 141
fréquentielle 151
pour le PUCCH 208
pour les ACK/NACK et RI 199
multi-utilisateur 212
ordre de ~ 64
spatiale 121
temporelle 246
dividende numérique 23, 500
DL 5
DMRS *Voir* signaux de référence
domaine 4, 33, 36
circuit 36, 41
paquet 36
Doppler (effet) 63, 151, 295
doublon 82, 406, 408
DRB 350
DRX 309, 388, 402
DSCP 54
DTCH 350
duplex 23
duplexage 5, 73
duplexeur 74
DwPTS 93, 186, 283

E

échantillonnage 151
fréquence d'~ 158, 159
EDGE 7
efficacité spectrale 7, 28, 501
crête 28
égalisation 65, 151, 153, 158
égaliseur 126
EGCI 403
eICIC 519
basée sur l'agrégation de porteuses 521
dans le domaine temporel 522
EIR 443
éligibilité
critère d'~ 368
éligible
cellule 336
embrouillage 110
émissions hors-bande 75, 208
EMM 321
EMM_CONNECTED 323
EMM_DEREGISTERED 324
EMM_IDLE 323
EMM_NULL 324
EMM_REGISTERED 324
empaquetage
d'ACK/NACK 269
de TTI 262
de TTI (de sous-trames) 251
eNodeB 38
donneur 517
enregistrement 323, 327
au réseau 337
entrelacement *Voir* codage de canal
entrelaceur 105
EPC 33
EPRE 237, 241
EPS 33
EPS AKA *Voir* authentification EPS
EPS bearer *Voir* bearer EPS
EPS Mobility Management 321
EPS Session Management 321
équilibrage de charge 504
Equipment Identity Register 443
E-RAB 349
ESM 321
espaces de recherche 267
estimation du canal 153, 161
états
EMM 323
RRC 331
ETSI 15, 16
ETSI/TISPAN 17
E-UTRAN 38
évanouissements 246
en fréquence 151
en temps 212
rapides 61, 63
événement 401

F

fading *Voir* évanouissements
FDD 5, 23, 73, 74, 91
FDD half-duplex 74, 93
FDMA 6
feedback *Voir* retour d'information

Éléments sous droits d'auteur

femto *Voir* cellules
FFR 234
FFT 149, 158
fibre optique 527
filtre de trafic 352
forçage à zéro 65

G

gaps 217
gaps *Voir* mesure (intervalles)
GBR 26, 50, 217, 355
génération 5
GERAN 15, 34
GGSN 36
GMM 321
Gn 46
GPRS 7, 16, 36
GPRS Mobility Management 321
GPS 522
GSM 6, 285
GTP-C 49
GTP-U 48, 54
Guaranteed Bit Rate 355
GUMMEI 388, 478
GUTI 340, 391, 443, 450, 456
Gx 40

H

half-rate 7
handover 19, 30, 281, 303, 394, 478
  hard 395
  interfréquence 394
  inter-RAT 394
  intersystème *Voir* handover inter-RAT
  intrafréquence 394
  soft 395
hard handover 395
HARQ 9, 27, 83, 100, 243
  acquittements 103, 248, 268
    codage de canal 107
    empaquetage 269
    multiplexage 269
    pour le TDD 269
    répétition 268, 270
  asynchrone 249
  codage de canal (pour l'~) 246
  processus HARQ 248
  règles temporelles 250
  retransmission adaptative 247, 256
  retransmission non adaptative 233, 247, 255
  synchrone 249, 255
  temporisation d'aller-retour 311
  version de redondance 109
HeNB 31, 490
HeNB GW 492
HII 238
Home routed 45
Home Subscriber Server 351, 447
HPLMN 45, 334, 335
HSDPA 9, 16
HSPA 9
HSPA+ 9, 16
HSS 37, 40, 42, 338, 351, 447
HSUPA 9, 16
hysteresis 369, 377

I

ICIC 213, 233
  démodulation 237
identifiant de cellule *Voir* PCI
identification 323, 328
IDFT 148
Idle mode Signaling Reduction 389
IEEE 14, 17
IEEE 802.16e 14
IETF 17
IFDMA 175
IFFT 149, 158
IKEv2 446
IMEI 329, 443
IMEISV 443
IMS 428, 432
IMSI 329, 443, 450
IMT 21, 500
  bandes de fréquences 21
IMT-2000 20, 500
IMT-Advanced 20, 31, 500
Informations Système 85, 266, 369
intégrité 82, 328, 442
interface
  A 36
  Gb 36
  Iu-CS 36
  Iu-PS 36
  Iur 35
  SGs 434
  X2 44
interférence 68, 111
  de canal adjacent 75, 95, 150
  entre couches 129
  entre sous-porteuses 151
  entre symboles 65
  entre symboles OFDM 149, 151
  entre utilisateurs 127
  intercellulaire 3, 69, 123, 129, 233, 520
    pour les canaux de contrôle en voie descendante 187
  intracellulaire 155
  mécanismes pour rendre l'interférence aléatoire sur le PUCCH 204
  traitement de réception 524
intervalle
  de garde (entre symboles OFDM) 149
  de mesure *Voir* mesures
Inverse Discrete Fourier Transform 148
Inverse Fast Fourier Transform 149
IP 35, 53, 343
IP Multimedia Subsystem 428
IPsec 353, 446
IPv6 353
IR *Voir* redondance incrémentale
IRC 126, 129
ISR 385, 389
itinérance 45
Iub 35

J

jeton (panier à) 315

K

KASME 340, 449
KeNB* 403
Key Set Identifier 456
KSI 456
KSIASME 340

L

LA 384
LAC 384

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Reed-Muller (code de) 108, 206
REG 186
région de contrôle 185, 267, 521
registre
  à décalage 104
  circulaire 109
relais 516
Release 16
Release 10 31, 499
Release 9 31, 508, 513
Release 99 8
remapping (des paramètres du PUCCH) 204
rendement de codage 100
répéteur 293, 516, 518
requête de scheduling 178, 201, 204, 205
réseau
  auto-organisé 475
  cœur 4, 35, 40
  d'accès 4, 34, 43
  enregistrement au ~ 337
  hétérogène 3, 519, 527
resélection 281, 393
  de cellule 331, 369
  priorités de ~ 372
réserve de puissance 218
rétablissement RRC 409
retour d'information 123, 138, 141, 272, 509
  apériodique 273
    modes 274
  CQI 103, 113, 114, 272
    calcul 275
  large bande 272
  par sous-bande 113, 272, 274, 276
  périodique 273, 276
    configuration 277
    modes 276
    priorités 278
  PMI 103, 272, 509
    calcul 139, 276
  précision 272
  RI *Voir* retour d'information
  types 276
retransmission *Voir* HARQ
réutilisation
  de fréquences 233
  souple de ressources 234
RIV 229
RLC 27, 83, 350
RLC-AM 406
RNC 35
RNL 52
RNTI 265
  C-RNTI 225
  RA-RNTI 304
  SPS-RNTI 224
RNTP 236
roaming 6
RoHC 82
Routing Area 384
Routing Area Code 384
RRC 84, 347
  signalisation ~ 96
RRC_CONNECTED 84, 331
RRC_IDLE 84, 331
RRH 525, 527, 528
RRM 44, 418
RS *Voir* signaux de référence
RSRP 161, 368, 523
RSRQ 161, 523
RSSI 426
RTD - Round Trip Delay 290
RV *Voir* version de redondance

S

S1 53
S11 40, 51
S12 46
S1-AP 54, 495
S1-Flex 44, 54
S1-MME 40, 54
S1-U 40, 53
S3 46
S5/S8 40
S6-a 40
SA 15
SAE 33
saut
  de fréquence 229
    du PUSCH 230
  de groupe (de séquences DMRS) 172
  de sous-bande (pour le PUSCH) 232
SC-FDMA 156
scheduling 9, 113, 127, 142, 211
  adaptatif en fréquence 213, 223, 247
  coordonné 526
  coordonné entre cellules (voir aussi CoMP) 237
  dynamique 212, 213, 222
  entrées/sorties 216, 217
  équité 215
  interporteuses 505, 521
  Max-CQI 213, 216
  pour les hautes vitesses 223, 230
  Proportional Fair 216
  requête de ~ 221, 271
  Round Robin 215
  semi-persistant 143, 223, 232, 252, 266, 270
    activation 225
    configuration 224
    relâche 226
  signalisation des allocations 262
  stratégies 215
  types d'allocation en fréquence 226
    en voie montante 230, 507
    type 0 (voie descendante) 227
    type 1 (voie descendante) 228
    type 2 (voie descendante) 229
scrambling code *Voir* code d'embrouillage
SCTP 54
SDU 79
SDU PDCP 406
secondary PDP context *Voir* contexte PDP secondaire
secteur 4
sécurité NAS 323
SeGW 492
sélection
  de canal *Voir* PUCCH
  de cellule 331, 335, 370
  de PLMN 331
  initiale de cellule 336
sélectivité en fréquence 65, 141

Éléments sous droits d'auteur

séquence
de base 202
de base (DMRS) 171
groupes de ~ 171
de Gold 111, 166
Service Request 322
services 24
Session Initiation Protocol 435
Session Management 321
SGSN 36
S-GW 40, 41
Short MAC-I 403, 411
Short Message Service 434
SIB 85, 88
signal 71
matrice de corrélation 72
signalisation
charge de ~ 248
de contrôle PHY-MAC 261
Signalling Radio Bearer 338, 350
signaux
de référence 90, 134, 161, 510
CRS 163, 283, 510, 511, 529
CRS, motif 164, 166
CRS, power boosting 166
CRS, puissance 241
CSI-RS 510, 526
DMRS (voie descendante) 510
DMRS (voie montante) 167, 515, 526
décalage de séquence 172
groupes de séquences de base 171
motif 173
overhead 173, 174
saut de groupe de séquences 172
séquence 170
séquence de base 171
en voie descendante 163, 510
en voie montante 167, 515
overhead 165, 511
pour le PUCCH 204
spécifiques à un UE 163, 164, 511
SRS 113, 175, 515
SRS dynamiques 515
SRS, contrôle de puissance 176
SRS, motif 175
SRS, saut de fréquence 176
SRS, séquence 176
de synchronisation 282
MIMO 287
position 283
PSS 282
PSS, séquence 285
SSS 282
SSS, détection cohérente 287
SSS, séquence 286
physiques 90
SIM 328
Single Carrier Frequency Division Multiple Access 156
SINR 68
SIP 435, 436
slot 92
SM 321
SMS 6, 25, 434
soft handover 395
Soft Reuse 234
SORTD 515
sous-porteuse 148, 151
DC 159
sous-trame 91
MBSFN 512
presque vide 523
spéciale 92
spectre 5, 13, 20
SPID 373
SPS 223
SR 221
SRB 338, 350
SRS *Voir* signaux de référence
SR-VCC 394, 414, 428, 435
SSS *Voir* signaux de synchronisation
station
de base 3, 14, 34
S-TMSI 306
stop-and-wait 248
strate 33, 36
SVD 124
symbole
DMRS 173
OFDM 148
SC-FDMA 156
synchronisation 151, 153, 308, 522, 524
en fréquence 76, 282, 285
en temps 76, 285
opérations de ~ 288
sous-trame 283, 284
symbole 282
trame 283, 285, 286
système d'exploitation *Voir* OS

T

TA 385, 496
table de relations de voisinage 484
TAC 385
TACS 6
taux d'erreur résiduel 356
TBS 115
TCI 486
TCP 51, 243
TDD 6, 73, 75, 91
configurations voie montante/voie descendante 93
TDM 35
TDMA 7
TD-SCDMA 8
TE 34
temps
de cohérence 63
de garde 77, 92
pour le PRACH 288
TFT 51, 353
TG *Voir* temps de garde (pour le PRACH)
Time Alignment Timer 308
time-to-trigger 401, 413
timing advance 158
TMSI 338
TNL 52
TNT 23
token bucket 315
TPC 240
Tracking Area 326, 330, 385
Tracking Area Code 385
Traffic Flow Template 353
trame radio 91
transformée de Fourier rapide inverse 149

Éléments sous droits d'auteur

transmission monoporteuse 157
transport (format de) 300
trisectorisation 4
TSG 15
TTA 16
TTI 91
turbo-code *Voir* codage de canal
Turbo-SIC 127, 156

U

UDP 54
UE 4, 34, 448
UE-AMBR 355
UICC 328, 340, 442
UIT 20, 500
UL 5
UMTS 8, 16, 106, 147
UMTS AKA *Voir* authentification UMTS
UpPTS 93, 178, 295
User Equipment 448
USIM 328, 448
UTRAN 34

V

vecteur
  d'authentification
    EPS 447, 450
    UMTS 451
version de redondance 109, 246
virtualisation d'antennes 508
vitesse 379, 413
voie
  descendante 5
  montante 5
VoIP 29, 37, 82, 116, 225, 311, 414, 435
  capacité 255
voix
  service de ~ 223, 224, 225, 230, 241, 244
  sur IP *Voir* VoIP
VPLMN 45, 335
VRB 229

W

W-CDMA 8
WiFi 435
WiMAX 2.0 501
WiMAX mobile 14, 47
WRC 20

X

X2 56, 236, 238, 493, 523
X2-AP 57
X2-C 56, 57
X2-U 56

Z

Zadoff-Chu (séquences de) 168, 202, 285, 293
zone de corrélation nulle 169

Composé par Sandrine Escobar
N° d'éditeur : 8821
Imprimé en France par Jouve
Dépôt légal : octobre 2012

Éléments sous droits d'auteur