

DOSSIER

TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

l'expertise technique et scientifique de référence

te7374

Principes de fonctionnement de l'interface radio LTE

Date de publication : 10/05/2013

Par :

Xavier LAGRANGE

Professeur Télécom Bretagne, Institut Mines-Télécom, Cesson-Sévigné, France

Ce dossier fait partie de la base documentaire
Réseaux cellulaires et téléphonie
dans le thème **Réseaux Télécommunications**
et dans l'univers **Technologies de l'information**

Document délivré le 20/12/2013

Pour le compte

7200082910 - bibliothèque universitaire scientifique de versailles // 193.51.25.237

Pour toute question :

Service Relation Clientèle • Éditions Techniques de l'Ingénieur • 249, rue de Crimée
75019 Paris – France

par mail : infos.clients@teching.com ou au téléphone : 00 33 (0)1 53 35 20 20

Principes de fonctionnement de l'interface radio *LTE*

par **Xavier LAGRANGE**

Professeur Télécom Bretagne, Institut Mines-Télécom, Cesson-Sévigné, France

1. Architecture d'un réseau <i>LTE-EPC</i>	TE 7 374 - 2
1.1 Objectifs de <i>LTE</i>	— 2
1.2 Éléments et interfaces d'un réseau <i>LTE</i>	— 2
1.3 Architecture en couches	— 3
2. Principes généraux de <i>LTE</i>	— 5
2.1 Principe de base de l' <i>OFDM</i>	— 5
2.2 Bloc de ressources	— 5
2.3 Principe de la transmission par paquets	— 6
3. Caractéristiques du signal <i>LTE</i>	— 7
3.1 Bande de fréquences et duplexage	— 7
3.2 Paramétrage <i>OFDM</i>	— 7
3.3 Modulations	— 9
3.4 Systèmes à antennes multiples	— 9
3.5 Utilisation des séquences de Zadoff-Chu	— 10
3.6 Signaux de référence	— 11
4. Multiplexage temporel	— 12
4.1 Trames et sous-trames	— 12
4.2 Duplexage	— 12
4.3 Synchronisation et avance en temps	— 12
5. Canaux physiques <i>LTE</i>	— 13
5.1 Voie balise	— 13
5.2 Mécanisme d'allocation sur <i>PDCCH</i>	— 15
5.3 Accès au canal sur <i>PRACH</i>	— 15
5.4 Transmission de données descendante sur <i>PDSCH</i>	— 16
5.5 Transmission de données montante sur <i>PUSCH</i>	— 17
5.6 Canal en diffusion <i>PMCH</i>	— 17
6. Chaîne de transmission	— 18
6.1 Canaux de transport	— 18
6.2 Code correcteur et code détecteur	— 19
6.3 Gestion des formats de transport	— 20
7. Couche MAC et protocole <i>HARQ</i>	— 21
7.1 Canaux logiques	— 21
7.2 Protocole <i>HARQ</i>	— 21
8. Couche <i>RLC</i>	— 22
9. Couche <i>PDCP</i>	— 23
10. Exemple de transmission multi-services	— 23
11. Construction des séquences de Zadoff-Chu	— 23
Pour en savoir plus	Doc. TE 7 374

Au cours des années 2000, il est apparu assez rapidement que le système **UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)**, même dans sa version haut-débit (**High Speed Data Packet Access**), resterait limité en terme

de débit, de latence et de capacité, du fait de sa transmission basée sur le CDMA et de la complexité de son architecture. En 2004, le 3GPP (**3rd Generation Partnership Project**) a donc lancé un groupe de travail pour des évolutions à long terme, ou **LTE** pour **Long Term Evolution**, de l'interface radio des systèmes de 3^e génération. Le travail de ce groupe a conduit à la spécification d'une interface radio totalement nouvelle et a déclenché un travail analogue de refonte complète de l'architecture des réseaux cœurs. L'ensemble de ce nouveau système est couramment désigné par **LTE** bien que le terme **LTE** ne s'applique qu'à l'interface radio.

Cet article se focalise sur la présentation de l'interface radio tout en présentant l'architecture générale du système. Le 3GPP produit des documents de spécifications par vagues successives appelées **Release**. L'interface radio **LTE** est définie dans un ensemble de recommandations publiées lors de la **Release 8** (les **releases** précédentes n'incluent que les systèmes **GSM** et **UMTS**). Cet article en présente les caractéristiques essentielles et s'appuie sur la **Release 8**. Ce qui est présenté reste cependant valide pour les **Releases** ultérieures.

1. Architecture d'un réseau LTE-EPC

1.1 Objectifs de LTE

Ce paragraphe présente les objectifs principaux de performance du **LTE** qui ont été fixés par le 3GPP dans la phase initiale du travail de spécification (voir [TE 7 371] pour plus de détail). L'ensemble de ces objectifs est tenu par le système dès la **Release 8**.

■ Un débit élevé

Anticipant l'augmentation des débits nécessaires, du fait du développement de l'accès à l'internet depuis un terminal mobile, le 3GPP a fixé un **objectif ambitieux en terme de débit** : 100 Mbit/s sur la voie descendante (réseau vers terminal) et 50 Mbit/s sur la voie montante pour un système disposant de 20 MHz de bande passante dans chaque sens. Cela correspond à une efficacité spectrale de 5 bit/s/Hz, significativement supérieure à la capacité des systèmes précédents stagnants aux alentours de 1 bit/s/Hz. Cet objectif correspond au débit qui peut être offert sur un réseau hors charge pour un terminal ayant des conditions parfaites de réception. Sur un réseau chargé, le débit est bien sûr partagé entre les différents utilisateurs.

■ Un système réactif

Le point le plus important en terme de performance du LTE est une latence inférieure à 5 ms sur un réseau peu chargé (délai entre la génération d'un paquet, par exemple dans le terminal, et l'arrivée à son destinataire).

Cette contrainte est imposée par la volonté de disposer d'un seul réseau basé sur le protocole IP (*Internet Protocol*) assurant tous les services, y compris ceux à forte contrainte temps-réel comme la téléphonie (voix sur IP).

L'autre objectif lié au délai, et qui détermine la réactivité du système, est la capacité à envoyer ou recevoir des données en au plus 100 ms pour un terminal en état de veille (c'est-à-dire non utilisé depuis quelques minutes); ce délai est réduit à 50 ms lorsque le terminal est connu du réseau d'accès (c'est-à-dire dispose d'un RNTI comme expliqué au § 2.3).

■ Un réseau facile à déployer

L'objectif de capacité d'un système **LTE** était de pouvoir gérer 200 terminaux dans un état actif pour une cellule disposant de 5 MHz de bande passante et de 400 terminaux avec plus de 5 MHz.

La fourniture d'un débit élevé oblige à utiliser une bande large (jusqu'à 20 MHz). Les opérateurs (surtout dans les déploiements initiaux) peuvent ne disposer que d'une seule porteuse (une paire en FDD comme traité au § 3.1). Il est donc nécessaire de concevoir un réseau qui puisse être déployé avec un motif de taille 1, c'est-à-dire : que la même fréquence porteuse soit utilisée sur toutes les cellules du réseau [10].

Cette contrainte de motif de taille 1, même si elle n'a pas été affichée en tant que telle, a une influence majeure sur les choix techniques : l'interface radio est basée sur l'**OFDMA** (*Orthogonal Frequency Multiple Access*) mais utilise dans certains cas particuliers les principes du **CDMA** (*Code Division Multiple Access*) (voir [9]). Les transmissions dans des cellules voisines s'appuient sur des codes ayant de bonnes propriétés de corrélation calculés à partir de l'identité physique de chaque cellule (**PCI**, *Physical-layer Cell Identity*, variant de 0 à 503).

Planifier un réseau **LTE** revient, en premier lieu, à affecter judicieusement l'identité physique à chaque cellule pour éviter que deux stations de base différentes qui peuvent être reçues simultanément sur une zone géographique, même de quelques centaines de m², n'aient la même identité physique. Le grand nombre d'identités physiques disponibles rend cette tâche relativement simple.

1.2 Éléments et interfaces d'un réseau LTE

En technologie **LTE**, le réseau cœur s'appelle **EPC** (*Evolved Packet Core*). Comme on le voit sur la figure 1, il est constitué [8] :

- d'une base de donnée centrale **HSS** (*Home Subscriber Server*) ;
- d'un ou plusieurs équipements gérant la localisation appelés **MME** (*Mobility Management Entity*) ;
- d'une ou plusieurs passerelle d'accès vers les réseaux tiers appelées **PDN-GW**, ou plus simplement **PGW** (*Packet Data Network Gateway*) ;
- de passerelles en plus grand nombre appelées **SGW** (*Serving Gateway*), chacune gérant une zone donnée (par exemple, une région).

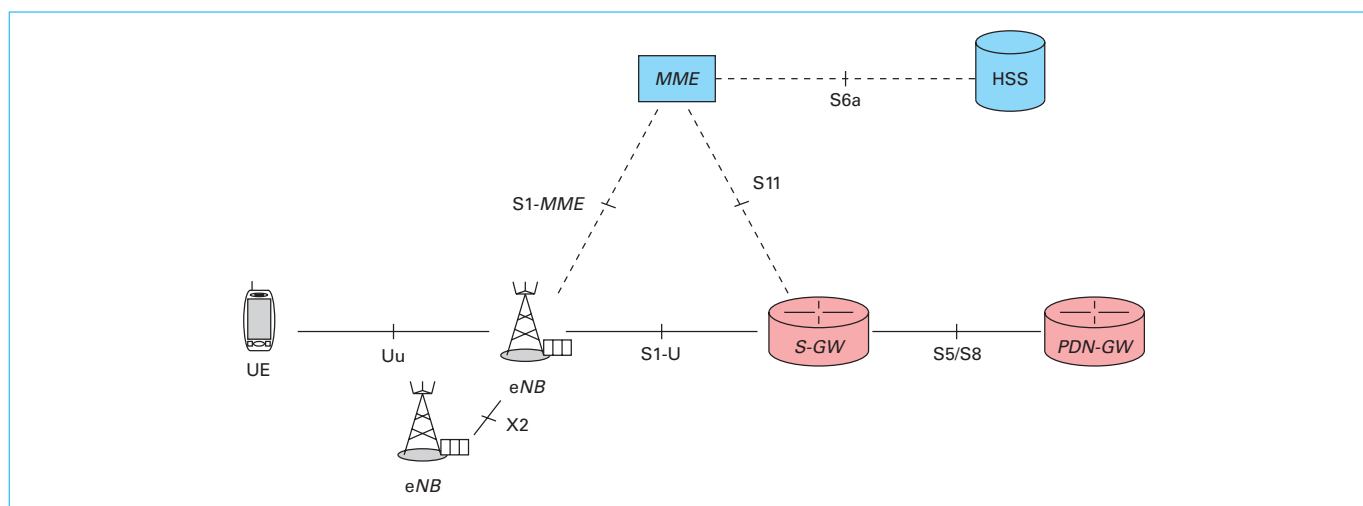


Figure 1 – Architecture générale d'un réseau EPC

Le réseau d'accès [1] est simplement constitué de stations de base appelées *eNodeB* ou *eNB* (*Evolved Node B*, le terme *Node B* étant repris de l'*UMTS*). Le terminal est appelé *UE* (*User Equipment*) comme dans l'*UMTS*.

L'architecture EPC est simplifiée par rapport à celle du GSM ou de l'*UMTS* en ce qui concerne le réseau d'accès. L'absence d'équipement intermédiaire similaire au *BSC* (*Base Station Controller*) ou au *RNC* (*Radio Network Controller*) conduit à centraliser les fonctions de transmission et de gestion de la ressource radio dans le *eNodeB*, et permet d'avoir des mécanismes adaptatifs et fortement réactifs sans coût excessif de signalisation.

Le *SGW* et le *PDN-GW* gèrent les flux des données utilisateurs.

Exemple

Un utilisateur télécharge un fichier sur son terminal depuis un serveur extérieur, le fichier est découpé en blocs, chacun des blocs étant placés dans un paquet IP. L'ensemble des paquets IP est transmis depuis le serveur vers le *PDN-GW*, puis du *PDN-GW* vers le *SGW* dont dépend le terminal à l'instant considéré. Le *SGW* transmet alors les paquets vers l'*eNodeB* gérant la cellule où se trouve le terminal puis l'*eNodeB* les transmet au terminal.

Le *MME* gère un ensemble de terminaux sur une zone donnée. Lorsqu'un terminal s'attache au réseau, met à jour sa localisation (changement de zone de suivi ou *tracking area*), ou demande l'établissement d'un flux de données, il échange de la signalisation avec le *MME* par l'intermédiaire du *eNodeB*. Le *MME* peut dialoguer avec le *HSS*, par exemple pour vérifier que l'abonné est bien autorisé sur le réseau considéré. Pour l'établissement des flux, le *MME* dialogue avec le *SGW* pour établir le tunnel permettant un routage direct des données utilisateurs (plan usager ou *user plane*) entre le *SGW* et l'*eNodeB* dont dépend le terminal.

Notons qu'aucun paquet de données utilisateurs ne transite à travers le *MME*, ce dernier ne gère que les paquets de signalisation (plan contrôle ou *user plane*). De ce fait, le nombre de paquets (par terminal) gérés par le *MME* est beaucoup plus faible que le nombre de paquets gérés par le *SGW*. Il est donc possible de mettre dans un réseau national beaucoup moins de *MME* que de *SGW*. En d'autres termes : la zone gérée par un *SGW* est plus restreinte que celle gérée par un *MME*.

Dans le réseau, chaque interface est identifiée par une lettre suivie généralement d'un nombre, comme on le vérifie sur la figure 1. Un trait entre deux équipements ne signifie pas bien sûr

qu'il y a une connexion directe entre deux équipements, mais que ceux-ci sont interconnectés entre eux et peuvent dialoguer grâce au protocole IP. L'interface présentée ici est l'interface radio, appelée « Uu », entre un terminal et le réseau.

1.3 Architecture en couches

1.3.1 Strates d'accès et de non accès

La pile de protocoles de l'interface Uu est représentée à la figure 2.

On distingue, comme pour l'*UMTS*, deux strates :

- la **strate d'accès AS** (*Access Stratum*) concerne l'ensemble des protocoles permettant le transport de messages entre le terminal et la station de base et la gestion des ressources radios. Elle est utilisée par la strate de non accès *NAS* (*Non Access Stratum*) ;
- la **strate de non accès NAS** (*Non Access Stratum*) prend à sa charge l'ensemble des fonctions qui ne sont pas strictement liées à une technologie radio :

- gestion de la mobilité,
- gestion de la sécurité,
- établissement de sessions, etc.

Tous les messages passent par la station de base *eNB*, mais cette dernière n'interprète en aucun cas les messages *NAS*. Elle se contente de les relayer vers le *MME*.

1.3.2 Fonctions de la couche physique

La couche physique comprend la définition :

- du mécanisme de transmission *OFDM* (*Orthogonal Frequency Multiplexing*) ;
- des techniques multi-antennaires utilisables ;
- des combinaisons de modulations et de codage correcteur d'erreurs possibles ;
- de la structure de multiplexage ;
- du principe de l'accès paquet.

Afin de permettre des échanges entre le terminal et le réseau, elle spécifie différents canaux physiques permettant, par exemple, au terminal de se synchroniser correctement sur une station de base. Le service principal fourni par la couche physique est la transmission de bloc de données (le terme « donnée » signifiant des octets).

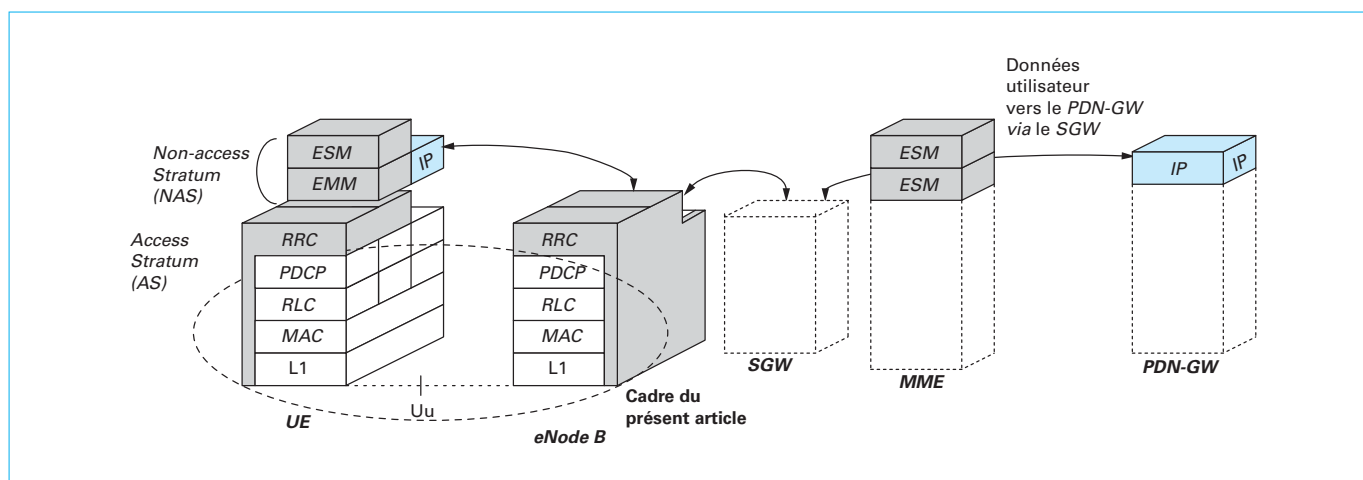


Figure 2 – Architecture en couches de l'interface radio de LTE

non interprétés par la couche physique et pas nécessairement des données utilisateurs, cela peut être des mesures radios).

1.3.3 Fonctions de la couche MAC

Un bloc de données peut ne pas être correctement reçu par le destinataire. Il est donc nécessaire de le retransmettre le plus rapidement possible pour garantir une faible latence. La gestion des acquittements (ACK), ou non acquittements (NACK), est faite par la couche MAC (*Medium Access Control*) suivant un protocole à retransmission ARQ (*Automatic Repeat reQuest*) : tout bloc qui n'est pas acquitté car il a été non reçu par le destinataire, ou dont l'acquittement n'est pas reçu correctement, est retransmis.

■ Définition du protocole HARQ

Le protocole est dit « hybride » ou *HARQ* (*Hybrid ARQ*), ce qui signifie que :

- l'émetteur d'un bloc de données peut retransmettre un bloc non correctement reçu en utilisant une redondance différente de celle utilisée lors de la précédente transmission (mécanisme appelé *Incremental Redundancy*) ;
- le récepteur est capable de combiner à la réception plusieurs blocs portant sur la même donnée d'origine. Une telle combinaison en réception permet de recevoir correctement une donnée alors que chaque bloc pris individuellement n'est pas correctement reçu.

Un protocole *HARQ* permet donc un meilleur débit à faible rapport signal sur bruit qu'un protocole ARQ simple.

■ But de HARQ

L'objectif du protocole *HARQ* de la couche MAC est surtout d'aller vite avant de garantir un très faible taux de pertes de trame. Si après 2 ou 3 tentatives, un bloc n'est pas reçu, le protocole *HARQ* abandonne les retransmissions et considère que le bloc est perdu. Le taux de trames perdues est typiquement de quelques pourcents. Le protocole *HARQ* travaille autant que possible sur de gros blocs qui peuvent contenir des données variées dans le même bloc : par exemple, un message de signalisation avec un paquet de voix sur IP et une partie d'un paquet IP correspondant à une page web en cours de téléchargement (figure 25). Cela signifie que la couche MAC assure le multiplexage de flux de données de différents types. Un flux de données est appelé *canal logique* (§ 7.1).

La capacité d'un réseau étant limitée, il n'est pas toujours possible de transmettre tous les blocs de données en attente au même moment. L'arbitrage entre les différents blocs (d'un même utilisateur ou d'utilisateurs différents) est réalisé par l'ordonnanceur MAC (ou *scheduler*). Comme la quantité de ressource nécessaire pour

transmettre une même taille de bloc dépend de la qualité du lien entre la station de base et le terminal considéré, l'ordonnanceur a un rôle central, car il doit contrôler conjointement non seulement la couche MAC, mais également les couches physiques et RLC, comme on le constate sur la figure 3 [12].

1.3.4 Fonctions de la couche RLC

Le protocole RLC (*Radio Link Control*) a pour objet de fournir une qualité spécifique au service demandé. Il y a autant d'instance du protocole RLC que de services.

On pourrait dire, en d'autres termes, qu'il y a plusieurs protocoles RLC qui fonctionnent en parallèle. Pour un service de voix sur IP, le protocole RLC ne procédera à aucune retransmission, si un bloc RLC est perdu. Pour un service de transfert de fichier il répétera le bloc RLC autant de fois que nécessaire jusqu'à une réception correcte par le destinataire.

Le protocole RLC a donc un rôle primordial dans la fourniture de la qualité de service.

1.3.5 Fonctions de la couche PDCP et des couches supérieures

La fonction d'une couche de convergence comme PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*) est de permettre le transport de manière unifiée de tout type de format de paquet : par exemple, message de signalisation ou paquet de données utilisateur.

Dans le cas de LTE, le rôle principal de PDCP est d'assurer le chiffrement et le déchiffrement. Il permet également la compression d'en-tête en utilisant le mécanisme ROHC (*Robust Header Compression*).

La signalisation liée aux fonctions radio est gérée dans la couche RRC (*Radio Resource Controller*). Les messages NAS (§ 1.3.1) sont systématiquement transportés dans des messages RRC. Ils sont relayés par le eNodeB mais non interprétés. Les couches au-dessus de RRC comme la couche de gestion de la mobilité EMM (*Enhanced Mobility Management*) et ESM (*Enhanced Session Management*) sont donc seulement présentes dans la MME et le eNodeB.

Les données utilisateurs sont systématiquement transportées dans des paquets IP. Ceux-ci sont également transportés par PDCP.

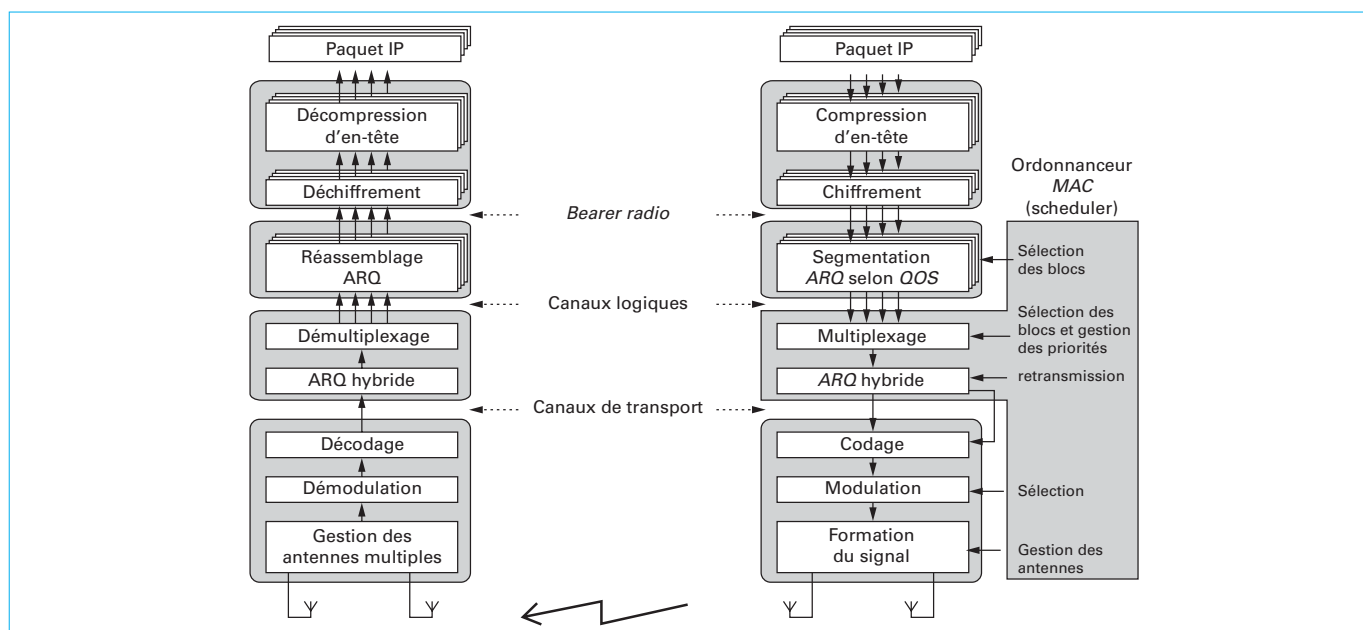


Figure 3 – Principales fonctions dans les couches protocolaires de l'UTRAN (pour une transmission de données par la station de base)

2. Principes généraux de LTE

Dans ce chapitre, nous présentons un aspect essentiel du LTE, qui est l'accès paquet.

Pour garder un aspect pédagogique, nous faisons abstraction d'un grand nombre de mécanismes et simplifions volontairement le processus.

2.1 Principe de base de l'OFDM

L'interface radio est basée sur la transmission multiple sur des porteuses orthogonales OFDM. Sur la voie montante, il s'agit d'une variante appelée SC-FDMA (Single Carrier – Frequency Division Multiplex Access).

■ Principe

Le principe de l'OFDM est de transmettre sur un très grand nombre de sous-porteuses en parallèle. Grâce à une utilisation astucieuse de la transformée de Fourier et à la recopie d'une partie des symboles transmis (principe du préfixe cyclique), il est possible de réaliser simplement un émetteur et un récepteur en utilisant une seule étape de transposition en fréquences [TE 7 372].

■ Mode de transmission

La transmission OFDM peut réellement être considérée comme une transmission sur des canaux parallèles indépendants et n'interférant pas (figure 4). Cela est bien sûr seulement vrai dans un système idéal. Il est cependant possible de bien comprendre l'ensemble des mécanismes du LTE en supposant cela vrai, sans que cela n'entraîne une simplification outrancière.

2.2 Bloc de ressources

La transmission est organisée en blocs de ressources ou RB (Resource Block). Un bloc de ressources est défini sur un ensemble de 12 sous-porteuses contiguës comme indiqué à la

figure 5. Il y a plusieurs configurations possibles, mais le bloc de ressources dure toujours 0,5 ms.

■ Dans la **configuration la plus courante**, un bloc est constitué de 7 transmissions successives et contient donc 7×12 symboles fréquentiels appelés « éléments de ressource » ou *Resource Element*. Le bloc de ressource occupe une bande égale à 180 kHz.

Un bloc de ressources n'est jamais transmis seul mais toujours par paire. Une paire dure, par conséquent, 1 ms et représente la période fondamentale en LTE : cette dernière est appelée *sous-trame* ou *Sub-frame*. Une paire de bloc de ressources peut être vue comme l'atome de base de LTE.

Exemple

Un opérateur LTE se voit allouer une certaine largeur de bande spectrale. S'il dispose de 5 MHz, cela correspond à 25 blocs de ressources dans l'espace des fréquences et la station de base alloue ces blocs en fonction des demandes des utilisateurs.

Si le réseau ou un terminal a, à un instant donné, quelques dizaines d'octets à transmettre, le réseau va allouer une paire de blocs de ressources pendant 1 ms (sur la voie montante ou descendante selon le sens de transmission). Si les données à transmettre sont conséquentes, la station de base alloue plusieurs blocs (figure 6).

Si le nombre de blocs disponibles est insuffisant, elle procède alors à une segmentation : le protocole RLC va découper le bloc de données en plusieurs blocs, chacun étant transmis pendant la durée élémentaire de 1 ms.

■ En d'autres termes, le TTI (Time Transmission Interval) est de 1 ms et il n'y a pas d'entrelacement des données sur de longues durées. Un tel entrelacement permettrait d'améliorer le débit utile pour un même rapport signal sur bruit, mais conduirait à des latences trop importantes.

L'interface radio LTE permet donc la combinaison de l'OFDMA (Orthogonal Frequency Multiple Access) et du TDMA (Time Division Multiple Access).

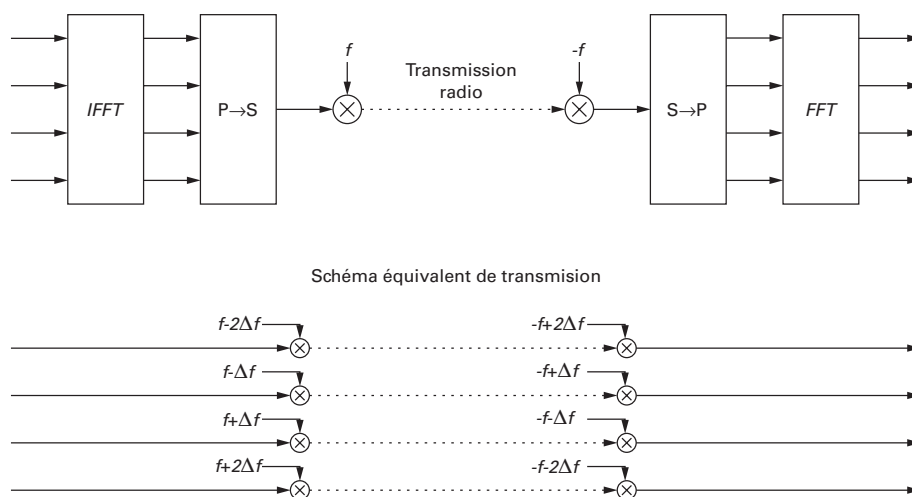


Figure 4 – Principe de transmission en OFDM et schéma équivalent

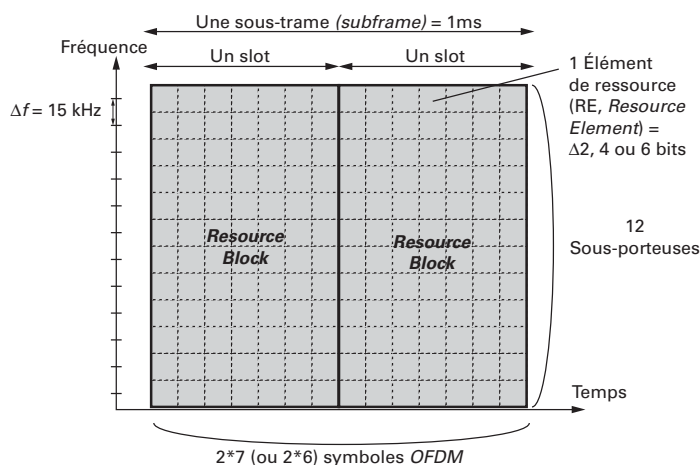


Figure 5 – Concept de bloc de ressources ou RB (Resource Block)

Si le rapport signal sur bruit au récepteur est trop faible, le bloc peut ne pas être correctement reçu. Il sera retransmis le plus rapidement possible par le protocole *HARQ* au sein de la couche *MAC* (typiquement 8 ms plus tard).

2.3 Principe de la transmission par paquets

Comme on l'a vu (§ 2.2), la station de base dispose d'un certain nombre de paires de ressources (par exemple 25 si la bande est de 5 MHz) qu'elle peut allouer à chaque milliseconde. L'allocation est indiquée dans les premiers symboles de chaque sous-trame (figure 6).

Ce mécanisme s'applique à la voie descendante comme à la voie montante avec quelques différences (tableau 1) :

– l'indication d'allocation porte sur la même sous-trame sur la voie descendante et sur la 4^e sous-trame suivante pour la voie

montante, cela laisse le temps au terminal de préparer la transmission et évite de devoir concevoir des terminaux duplex ;

– il est possible d'allouer plusieurs paires de RB pour un même terminal mais, pour la voie montante, les paires doivent être contiguës (contrainte liée au *SC-FDMA*).

■ Message d'allocation

Un message d'allocation est appelé un *DCI* (*Downlink Control Information*). Il contient principalement le schéma de modulation et de codage à utiliser et une « carte d'allocation » qui indique les numéros de RB alloués. Plusieurs formats de codage de cette carte sont définis afin de minimiser le nombre de bits consommés. De plus, le *DCI* ne contient pas l'adresse complète du terminal auquel il est adressé mais une identité courte, comparable à un numéro de circuit dans les anciens réseaux de paquets orientés circuits, appelée *RNTI* (*Radio Network Temporary Identity*). Cette identité est codée sur 16 bits et elle est entièrement gérée par la station de base.

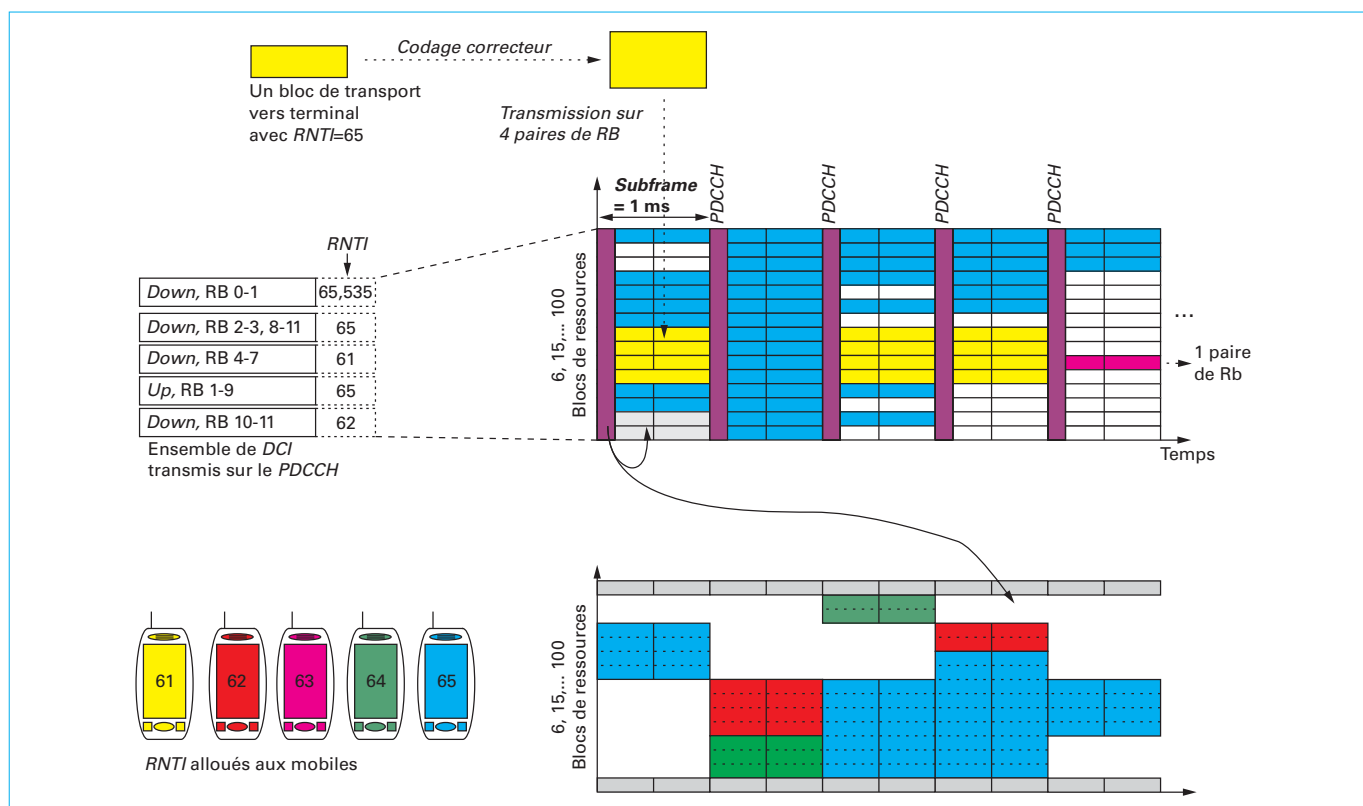


Figure 6 – Principe de l'accès paquet en LTE (cas d'un système à 1,4 MHz)

Réception

Un bloc de transport peut être reçu avec des erreurs, et il est nécessaire de mettre en œuvre un mécanisme d'acquiescement.

- Pour une transmission de données par le terminal (voie montante), l'acquiescement (positif ou négatif) est envoyé par la station de base sur les premiers symboles (comme pour les messages DCI mais en utilisant des éléments de ressources différents).
- Pour une transmission de données par la station de base, un mécanisme de type CDMA est mis en place pour permettre à chaque terminal destinataire des données de transmettre un acquiescement sans trop brouiller les acquiescements des autres terminaux (voir la description du PUCCH au § 5.4).

Demandes du terminal

L'allocation étant effectuée par la station de base, il faut permettre au terminal d'exprimer ses demandes.

- Si le terminal est en train de recevoir des données, il peut adjoindre aux acquiescements qu'il transmet une demande de ressource.
- Si le terminal est en veille, certaines sous-trames sont régulièrement accessibles à tout terminal pour transmettre sa requête.

On a, par conséquent, un accès de type Aloha synchronisé (*slot-timed Aloha*). Ce type d'accès est également utilisé pour un terminal qui arrive dans une nouvelle cellule et qui ne dispose pas de RNTI. En effet, l'acquisition d'un RNTI est un préalable indispensable à toute transmission.

3. Caractéristiques du signal LTE

3.1 Bande de fréquences et duplexage

Le système LTE peut être déployé sur un grand nombre de bande de fréquences comme on peut le constater sur le tableau 1. Certaines bandes sont dites « appairées », c'est-à-dire qu'elles contiennent deux blocs distants d'au moins quelques MHz (l'écart dépend de la gamme de fréquence et il est en général d'autant plus grand que la fréquence est élevée).

Il est possible d'y déployer un système FDD (*Frequency Division Duplex*, § 4.2). Les bandes ne contenant que des blocs uniques sont réservées pour le TDD (*Time Division Duplex*).

3.2 Paramétrage OFDM

Sur la voie descendante, la transmission LTE se fait en OFDM. Le nombre de sous-porteuses dépend de la largeur de bande dont dispose l'opérateur. En revanche, quelle que soit la configuration, chaque sous-porteuse occupe 15 kHz de bande. Le nombre de sous-porteuses utiles peut varier de 72 (avec une sous-porteuse centrale nulle supplémentaire sur la voie descendante) à 1 200 suivant la bande spectrale disponible (de 1,4 à 20 MHz). L'ensemble des configurations est représenté dans le tableau 2.

Préfixes

La transmission OFDM nécessite l'insertion d'un préfixe cyclique à chaque symbole OFDM. Le principe est de recopier la fin du symbole en début de transmission. La durée du préfixe cyclique doit être

Tableau 1 – Bandes de fréquences susceptibles d'accueillir un système LTE

Numéro	Bande pour la voie montante (MHz)	Bande pour la voie descendante (MHz)	Mode	Écart Duplex	Autre système pouvant utiliser la bande
1	1 920-1 980	2 110-2 170	FDD	190	UMTS I
2	1 850-1 910	1 930-1 990	FDD	80	PCS 1900/UMTS II
3	1 710-1 785	1 805-1 880	FDD	95	GSM 1800/UMTS II
4	1 710-1 755	2 110-2 155	FDD	400	UMTS IV
5	824-849	869-894	FDD	45	GSM 850/UMTS V
6	830-840	875-885	FDD	45	GSM 850/UMTS VI
7	2 500-2 570	2 620-2 690	FDD	120	UMTS VII
8	880-915	925-960	FDD	45	GSM 900E/UMTS VIII
9	1 749,9-1 784,9	1 844,9-1 879,9	FDD	95	GSM 1800/UMTS IX
10	1 710-1 770	2 110-2 170	FDD	400	
11	1 427,9-1 447,9	1 475,9-1 495,9	FDD	48	
12	698-716	728-746	FDD	30	
13	777-787	746-756	FDD	– 31	
14	788-798	758-768	FDD	– 30	
17	704-716	734-746	FDD	30	
...					
33	1 900-1 920		TDD	n.a.	UMTS
34	2 010-2 025		TDD	n.a.	UMTS
35	1 850-1 910		TDD	n.a.	UMTS, reg 2
36	1 930-1 990		TDD	n.a.	UMTS
37	1 910-1 930		TDD	n.a.	UMTS, reg 2
38	2 570-2 620		TDD	n.a.	UMTS, reg 1
39	1 880-1 920		TDD	n.a.	
40	2 300-2 400		TDD	n.a.	

Tableau 2 – Principaux paramètres OFDM pour LTE

Bande spectrale occupée.....(en MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Largeur d'une sous-porteuse (Δf) (en kHz)	15					
Nombre de sous-porteuses utilisées ($en N_c$)	72 + 1	180 + 1	300 + 1	600 + 1	900 + 1	1 200 + 1
Nombre de blocs de ressources	6	15	25	50	100	200
Taille de la FFT ($en N$)	128	256	512	1 024	1 536	2 048
Fréquence d'échantillonnage (Nf)(en MHz)	3,84/2	3,84	2 × 3,84	4 × 3,84	6 × 3,84	8 × 3,84
Taille d'un symbole sans préfixe cyclique ($T_u = 1/f$)(en μs)	66,67					
Préfixe cyclique, cas normal	5,21 μs pour le premier symbole et 4,67 μs ensuite					
Préfixe cyclique étendu.....(en μs)	16,67					

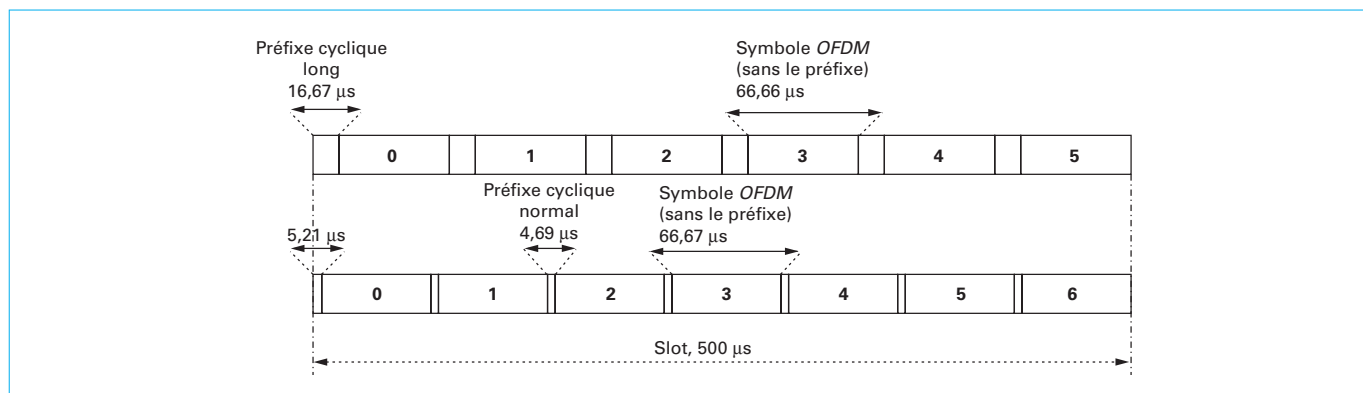


Figure 7 – Préfixe cyclique normal et préfixe cyclique long en LTE

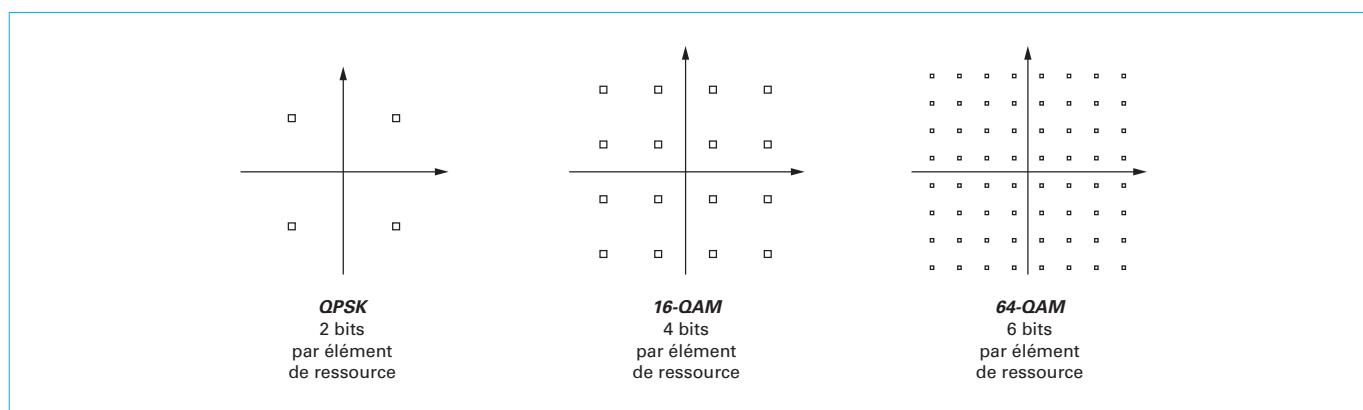


Figure 8 – Modulations utilisées dans LTE

supérieure à l'étalement (dans le temps) maximal des retards. Dans les milieux les plus courants (urbains, semi-urbains), les retards sont de quelques micro-secondes. En revanche, dans des milieux montagneux, on peut constater des retards supérieurs à 5 µs.

Les recommandations ont donc prévu deux configurations :

- le préfixe cyclique normal qui dure 5,21 µs pour le premier symbole d'un slot et 4,69 µs pour les symboles suivants ;
- le préfixe étendu qui dure 16,67 µs pour chaque symbole (figure 7).

Le préfixe du premier symbole est légèrement plus long, car il permet d'absorber de légers décalages de synchronisation sur la voie montante non compensés par le mécanisme d'avance en temps (§ 4.3).

■ Configuration

Les deux configurations de préfixe conduisent à des tailles de blocs de ressources différentes.

- **Avec le préfixe normal**, il est possible de transmettre 7 symboles dans un slot alors que le préfixe étendu réduit ce nombre à 6.
- **Le préfixe étendu** a surtout été conçu pour permettre la transmission simultanée par plusieurs stations de base d'un même signal (*simulcast*) pour le service MBMS (*Multimedia Broadcast Multicast System*). En effet, le récepteur est alors à des distances différentes de chaque émetteur, et le signal reçu est équivalent à celui émis par un même émetteur mais subissant des trajets multiples très étalés [TE 7 372].

3.3 Modulations

La modulation de base est la modulation de phase à 4 états (*QPSK*, *Quaternary Phase Shift Keying*) qui permet de transmettre 2 bits en un symbole. Si le rapport signal sur bruit au récepteur est suffisant, l'émetteur peut utiliser une modulation avec une constellation comportant plus de points : la 16-QAM (*Quaternary Amplitude Modulation*) qui permet de transmettre $\log_2(16) = 4$ bits en un symbole ou même de la 64-QAM dont un symbole contient $\log_2(64) = 6$ bits (figure 8). Un élément de ressource (figure 5) peut contenir donc de 2 à 6 bits (après application du codage correcteur d'erreur).

L'utilisation d'une modulation contenant de nombreux bits par symbole exige un rapport signal sur bruit important au récepteur. L'utilisation de la 16-QAM et de la 64-QAM est plutôt réservée à la transmission des données utilisateurs lorsque le terminal dispose d'un bon canal de transmission (c'est-à-dire, proche de la station de base). Pour la transmission du contrôle et de la signalisation, la modulation QPSK, plus robuste, est préférée.

3.4 Systèmes à antennes multiples

On peut voir le canal de transmission comme une boîte noire avec une entrée, utilisée par l'émetteur radio, et une sortie, utilisée par le récepteur. Suivant le nombre d'antennes en entrée et en sortie du canal de transmission, on obtient plusieurs configurations possibles.

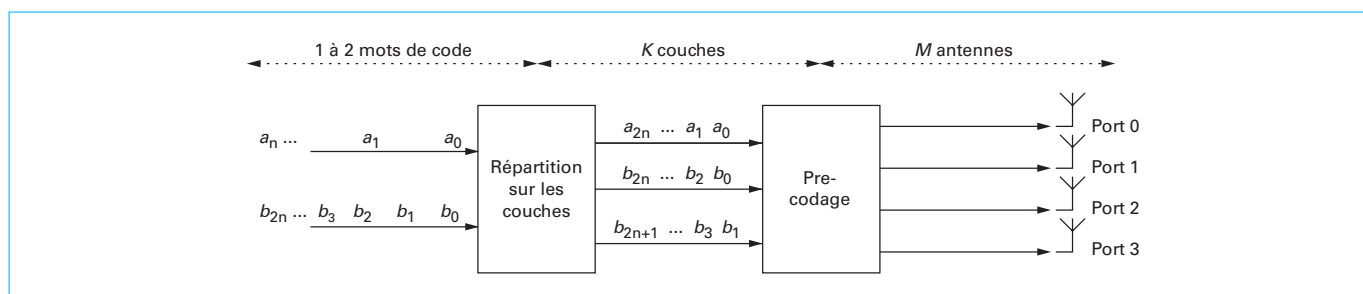


Figure 9 – Structuration du traitement d'antennes dans LTE

Tableau 3 – Différentes configurations pour les systèmes d'antennes à la station de base

Configuration	Technique Nom usuel	Nombre de blocs de transports	Nombre de couches	Nombre d'antennes
Diversité de transmission	<i>Space Frequency Block Coding</i>	1	2 4	2 4
Formation de faisceaux	<i>Codebook-based precoding</i>	1	1	2 4
Multiplexage spatial	<i>SU-MIMO precoding</i>	2	2 2,3 ou 4	2 4

■ Transmission SISO

La plus simple est la transmission *SISO* (*Single Input Single Output*) composée d'une antenne à l'émission et une à la réception.

■ Transmission MIMO

La plus complexe est la transmission *MIMO* (*Multiple Input Multiple Output*), les configurations intermédiaires (*MISO*, *SIMO*) étant possibles et intéressantes.

■ Configurations SIMO et MISO

- La configuration **SIMO** est utilisée depuis de nombreuses années car elle correspond à un système à diversité de réception.
- La configuration **MISO** peut correspondre, soit à une formation de faisceau (*beam forming*), soit à de la diversité de transmission. Dans chacun des deux cas précédents, les mêmes données sont transmises sur les différentes antennes, mais le signal HF produit est spécifique à chaque antenne (par exemple, un déphasage du signal judicieux pour la formation de faisceau).
- La technique **MIMO** peut être utilisée :
 - pour de la diversité ;
 - pour transmettre simultanément plusieurs données vers un même utilisateur ;
 - pour transmettre simultanément des données vers différents utilisateurs.

On parle alors, respectivement, de *SU-MIMO* (*Single User multiplexing MIMO*) et de *MU-MIMO* (*Multiple User multiplexing MIMO*).

■ Toutes configurations

L'ensemble des configurations est possible avec *LTE*. La norme définit une architecture de transmission permettant une présentation harmonisée de toutes les configurations possibles (figure 9) [12] avec, en particulier, une notion de couches (qui n'ont aucun rapport avec les couches *OSI*). Une configuration est définie par :

- le nombre de blocs de transports qu'on peut transmettre par unité de temps (1 le plus couramment, 2 en configuration *MIMO*, éventuellement 4 dans le futur) ;
- le nombre de couches spatiales, c'est-à-dire le nombre de symboles (du signal) différents qu'on peut transmettre simultanément ;
- le nombre d'antennes, appelées, dans ce contexte, ports.

Les configurations possibles sont présentées dans le tableau 3.

3.5 Utilisation des séquences de Zadoff-Chu

Une des contraintes fixées au départ pour la spécification de l'interface radio *LTE* était qu'il devait être possible de planifier un réseau avec un motif à 1. Au contraire de *GSM* [13] où un terminal distingue facilement deux émissions de stations de base proches mais différentes, car elles sont faites sur des fréquences distinctes, un terminal *LTE* sépare, comme en *UMTS*, deux émissions différentes par une corrélation [11].

Il convient donc de disposer de séquences possédant de bonnes propriétés de corrélation et d'inter-corrélation. Pour les signaux de référence sur la voie descendante (§ 3.6), *LTE* repose sur les séquences de Gold. Pour les fonctions de synchronisation, de détection d'accès initiale et les signaux de référence sur la voie montante, le système utilise des séquences de Zadoff-Chu dont les propriétés sont très voisines de celles des séquences de Gold (§ 10).

Une séquence de Zadoff-Chu particulière est affectée à chaque cellule (deux cellules voisines utilisent des séquences de Zadoff-Chu engendrées à partir de valeurs différentes) afin de séparer, en réception, les émissions de stations de bases voisines ou de terminaux attachés à des stations de bases différentes, mais voisines. Au sein d'une même station de base, on utilise des décalages cycliques de la même séquence qui sont orthogonales (orthogonalité conservée même en cas de léger décalage à la réception) afin de séparer des transmissions faites par différents terminaux au même moment sur la même fréquence.

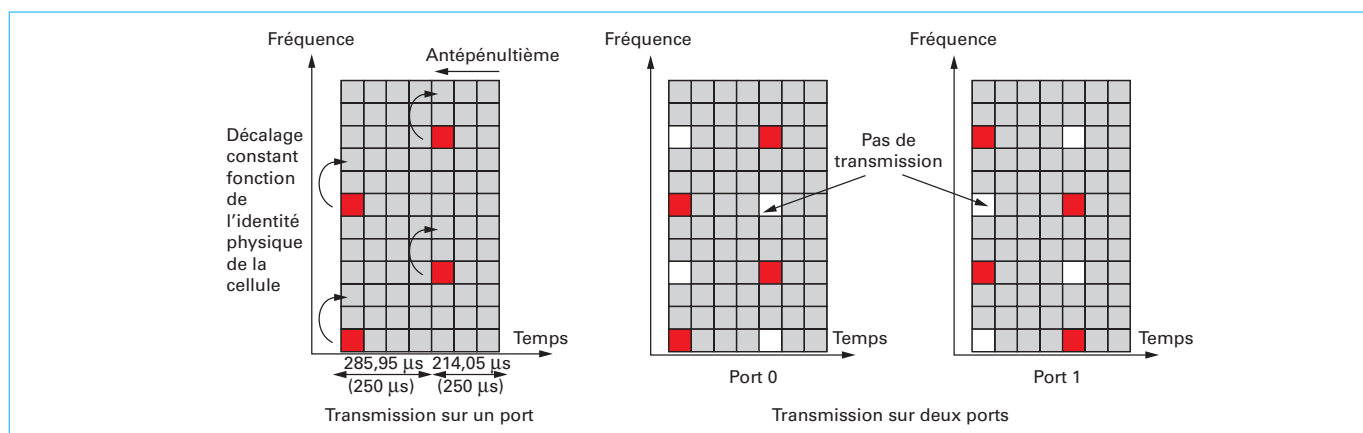


Figure 10 – Exemple de disposition des signaux de référence dans le bloc de ressources sur la voie descendante

3.6 Signaux de référence

Les techniques *MIMO* requièrent que le récepteur soit capable d'estimer le comportement du canal (principalement déterminer sur une sous-porteuse le déphasage et l'affaiblissement qu'apporte le canal de transmission).

Cette estimation ne peut se faire que par l'émission de séquences connues par la station de base, appelées « signaux de référence » (*RS, Reference Signals*).

3.6.1 Signaux de référence sur la voie descendante

Comme le canal de propagation diffère peu sur deux sous-porteuses proches et varie peu d'un symbole *OFDM* à l'autre, il n'est pas nécessaire de transmettre des signaux de référence sur chaque sous-porteuse et en permanence. Les signaux de référence sont ainsi disséminés, sur la voie descendante, sur un bloc de ressources, comme on le constate sur la figure 10.

■ Davantage de puissance

De façon à améliorer l'estimation, il est intéressant de transmettre les signaux de référence à plus forte puissance que les autres symboles. Cependant, si on considère deux stations de base synchronisées qui transmettent les signaux de référence au même instant sur les mêmes sous-porteuses, accroître la puissance des signaux de référence conduit à augmenter l'interférence et n'apporte donc aucun gain en rapport signal sur bruit.

Il est donc possible, de définir un décalage de 1 à 6 sous-porteuses, afin de faire en sorte que les signaux de référence de cellules voisines ne rentrent pas en collision avec ceux de la cellule considérée. Ce décalage est calculé à partir de l'identité physique de la cellule *PCI*.

■ Éviter les perturbations

De manière similaire, si on utilise plus d'une antenne de transmission, il faut que le symbole de référence émis par un port d'antenne ne soit pas perturbé par les émissions des autres ports. Ainsi, lorsqu'un symbole de référence est émis sur un port, l'ensemble des autres ports ne transmet pas (voir la partie droite de la figure 10).

3.6.2 Signaux de référence sur la voie montante

Sur la voie montante, le terminal doit également transmettre des signaux de référence. Ceux-ci sont nécessaires pour permettre une démodulation correcte du signal. Sur la voie montante, les symboles (fréquentiels) transmis sont issus d'une transformée de

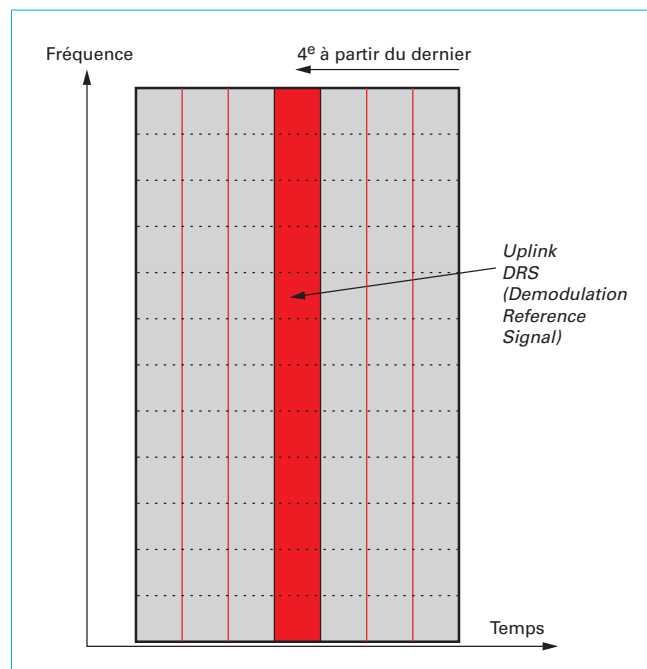


Figure 11 – Disposition des signaux de référence dans le bloc de ressources sur la voie montante pour la démodulation

Fourier. En conséquence, les symboles sur sous-porteuses différentes ne sont pas indépendants comme sur la voie descendante. Les signaux de références sont donc transmis sur toutes les sous-porteuses utilisées par le terminal pendant un symbole *OFDM* donné, comme on le voit sur la figure 11.

3.6.3 Autres signaux de référence

D'autres signaux de référence, non détaillés ici sont définis dans les spécifications. Si on utilise la formation de faisceau (*beam forming*) sur la voie descendante, il est nécessaire de transmettre des signaux de référence spécifiques à la transmission (*User Specific Reference Symbols*) dans le bloc de ressources utilisé pour cette transmission. Dans le cas où le réseau veut allouer préférentiellement les blocs de

ressources non affectés par un évanouissement, il faut qu'il puisse déterminer desquels il s'agit. Le terminal doit alors transmettre sur l'ensemble de la bande des signaux de référence avec une périodicité fixée par le réseau. Un symbole *OFDM* est réservé régulièrement par le réseau à cet effet et il y a absence de transmission de données par les autres terminaux. La station de base peut déterminer alors les « bonnes » et les « mauvaises » sous-porteuses.

4. Multiplexage temporel

4.1 Trames et sous-trames

Le cadencement de base en *LTE* est d'une milliseconde (figure 6). Cependant, certaines informations doivent être transmises régulièrement, mais pas à chaque milliseconde. Des structures plus longues sont définies pour permettre d'organiser des séquençements réguliers :

- la trame ou *frame*, composée de 10 sous-trames, dure par conséquent 10 ms [5] ;
- la multitrame ou *multi-frame*, composée de 1 024 trames, dure 10,24 secondes.

Une trame est identifiée par un compteur *SFN* pour *System Frame Number* dans la multitrame. Certaines transmissions sont faites uniquement pour certaines valeurs de *SFN*.

Exemple

Les informations systèmes ne sont transmises que dans la sous-trame 0 des trames vérifiant $SFN \bmod 4 = 0$; le terminal peut se contenter de décoder seulement 4 sous-trames sur une période de 40 sous-trames, et se mettre en mode économie d'énergie le reste du temps s'il n'est intéressé que par les informations systèmes.

4.2 Duplexage

L'interface radio *LTE* permet deux types de duplexage :

- avec le *FDD* (*Frequency Division Duplex*), une porteuse est utilisée pour la voie descendante et une autre pour la voie montante (figure 12). Pendant une sous-trame, on a donc simultanément deux transmissions ;
- avec le *TDD* (*Time Division Duplex*), la même porteuse est utilisée, mais une sous-trame est réservée à un sens de transmission (figure 13).

Afin de permettre la transmission des informations de synchronisation et des signaux de référence, des sous-trames dites « spéciales » comportent une partie dédiée à la transmission descendante, un intervalle de garde sans transmission et une partie

dédiée à la transmission montante. Les sous-trames spéciales se placent entre une sous-trame descendante et une sous-trame montante. Il n'y a pas d'intervalle de garde entre une sous-trame montante et une sous-trame descendante du fait que les terminaux anticipent leur transmission de façon à ce que la sous-trame montante soit correctement synchronisée à la station de base (§ 4.3).

L'avantage du *TDD* est de permettre une répartition flexible de la bande entre la voie montante et la voie descendante comme le montrent les différentes configurations du tableau 4. La majorité des sous-trames peut être utilisée pour la voie montante (60 % de la capacité en voie montante et 20 % en voie descendante) avec la configuration 0 ou pour la voie descendante (10 % contre 80 %).

Remarque : le total ne fait pas 100 %, car il y a, au minimum, une sous-trame qui est spéciale sur les 10.

4.3 Synchronisation et avance en temps

Des séquences particulières sont régulièrement émises par la station de base. Elles permettent au terminal de se synchroniser en réception sur la structure de trame (§ 5.1.1). Cependant, du fait du délai de propagation des ondes, le terminal perçoit le début de trame (et par conséquent de la sous-trame) avec un retard d'autant plus grand qu'il est loin de la station de base. Il faut que les blocs émis par différents terminaux dans la même sous-trame soient reçus au même instant, de façon à ce qu'il n'y ait pas d'interférence avec les blocs émis dans la sous-trame suivante. Cela nécessite un mécanisme d'anticipation, appelé « avance en temps » ou *TA* (*Timing Advance*), spécifique à chaque terminal (figure 14).

Exemple

Soit τ le délai de propagation entre le terminal et la station de base. L'avance en temps doit être égal à 2τ . Un terminal en veille, ou n'ayant pas eu d'échange depuis plusieurs dizaines de secondes avec le réseau, transmet une requête en accès aléatoire qui comporte une durée de garde suffisante pour absorber le décalage de synchronisation (§ 5.3). La station de base mesure le délai de propagation puis, à l'occasion de transmissions vers le terminal, transmet la valeur de *TA* à prendre en compte.

Au cours des échanges, la valeur est actualisée pour prendre en compte les déplacements du terminal. La durée du premier préfixe cyclique dans un bloc de ressources est supérieure de $5,21 - 4,69 = 0,52 \mu\text{s}$. Cela permet d'absorber les légers décalages dus à la latence du processus et à la granularité de la valeur de *TA* (pas de $0,52 \mu\text{s}$). La valeur de *TA* est codée sur 11 bits et la valeur maximale autorisée est de 1 282, soit $1\,282 \times 0,52 = 666,66 \mu\text{s}$. Cette valeur correspond à une distance 200 km, soit un rayon maximal pour une cellule *LTE* de 100 km.

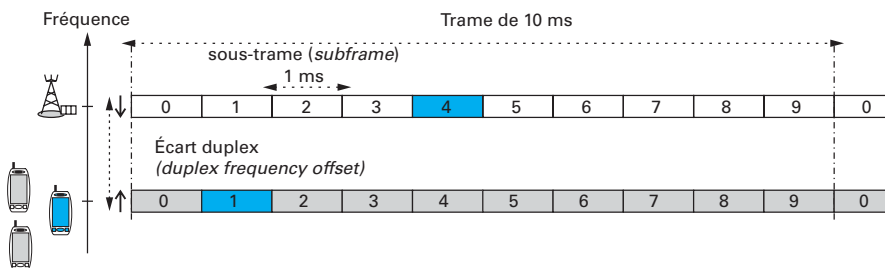


Figure 12 – Principe du *FDD*

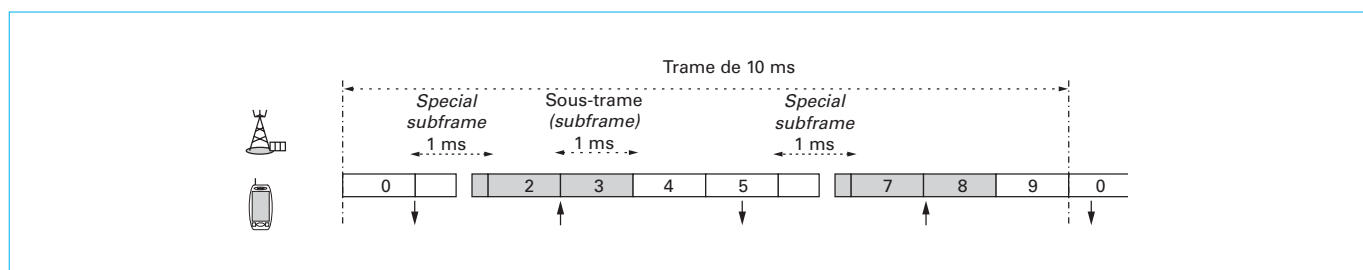


Figure 13 – Principe du TDD

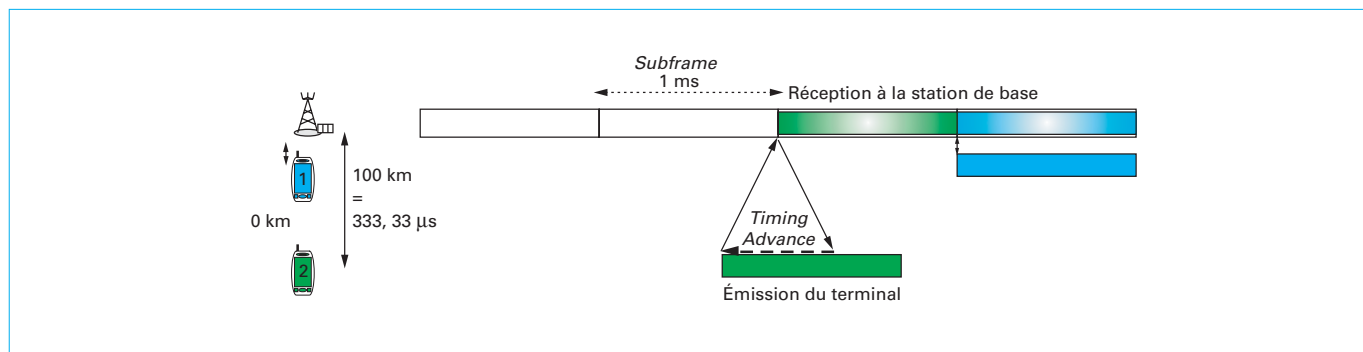


Figure 14 – Gestion de l'avance en temps

Tableau 4 – Répartition de la capacité entre voie montante et descendante en TDD
(D = Downlink, U = uplink)

Configuration	Périodicité du retournement (ms)	Organisation de la sous-trame										Part descendante (%)	Part montante (%)
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
0	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U	20	60
1	5	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D	40	40
2	5	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D	60	20
3	10	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D	60	30
4	10	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D	70	20
5	10	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D	80	10
6	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D	30	50

5. Canaux physiques LTE

Les canaux physiques et leurs caractéristiques sont indiqués dans le tableau 5. Nous les présentons dans la suite en insistant sur la façon dont ils sont utilisés.

5.1 Voie balise

Comme pour tout système radiomobile, une station de base LTE diffuse régulièrement un ensemble de signaux et d'informations permettant au terminal de découvrir et d'identifier le réseau et également de déterminer la configuration de la station de base sous la portée de laquelle il se trouve.

5.1.1 Séquences de synchronisation

Chaque station de base émet 2 fois toutes les 10 ms une séquence de Zadoff-Chu. Il y a trois séquences possibles. Pour vérifier qu'il est sous la couverture d'un réseau LTE, un terminal fait trois corrélations en parallèle (une avec chaque séquence possible). La présence d'un pic (obtenu normalement en typiquement 5 ms) permet de confirmer qu'il reçoit bien une station de base LTE et il peut identifier laquelle des trois séquences est utilisée. Cette séquence est appelée PSS (Primary Synchronisation Sequence).

Chaque station de base émet avec la même fréquence une séquence appelée SSS (Secondary Synchronisation Sequence). Il y a 168 séquences possibles construites à partir de m-séquences. Ces dernières possèdent également de bonnes propriétés de corrélation et d'inter-corrélation. Un terminal peut donc identifier la séquence

Tableau 5 – Synthèse des canaux physiques

Sigle	Sens	Nom complet	Contenu	Situation dans la sous-trame	Fonction
CS-RS	↓	<i>Cell-specific Reference Signals</i>	Séquence de Gold de longueur 31	Disséminé sur les RB	Permet l'estimation du canal sur la bande du système
UE-RS	↓	<i>UE-specific Reference Signals</i>	Séquence de Gold de longueur 31	Disséminé sur les RB destinés au terminal et subissant le même traitement d'antenne	Permet l'estimation du canal spécifique à un terminal
DRS	↑	<i>Demodulation Reference Signals</i>	Séquence de Zadoff-Chu	Sur le 4 ^e symbole DFTS-OFDM d'un RB montant en partant de la fin (sur toutes les sous-porteuses allouées)	Permet la démodulation cohérente par la station de base
SMRS	↑	<i>Sounding Reference Signals</i>	Séquence de Zadoff-Chu	Sur le dernier symbole DFTS-OFDM d'une sous-trame sur plusieurs sous-porteuses de la bande utilisée par la cellule à des intervalles réguliers	Permet à la station de base de déterminer pour un terminal donné les bonnes et les mauvaises sous-porteuses
PSS	↓	<i>Primary Synchronisation Sequences</i>	Une séquence parmi 3 séquences de Zadoff Chu de longueur 63	Sous-trame 0 (1 en TDD) et sous-trame 5 (6 en TDD)	Permet de détecter un système LTE de se synchroniser au niveau symbole OFDM
SSS	↓	<i>Secondary Synchronisation Sequences</i>	Une séquence parmi 168 m-séquences de longueur 31	Sous-trame 0 et sous-trame 5	Permet d'acquérir la synchronisation au niveau symbole/slot/trame, d'identifier le duplexage (FDD/TDD)
PBCH	↓	<i>Physical Broadcast Channel</i>	24 bits très fortement protégés transmis en QPSK	Dans la sous-trame 0 pour les 4 premières trames de chaque période de 40 % ms	Indique la largeur de la porteuse permet d'acquérir la synchronisation au niveau multi-trame
PCFICH	↓	<i>Physical control Format Indicator Channel</i>	2 bits très fortement protégés en QPSK et	Sur le premier symbole OFDM de chaque sous-trame et réparti sur la bande utilisée	Indique le nombre de symboles OFDM utilisés pour le contrôle (de 1 à 3) dans la sous-trame courante
PDCCH	↓	<i>Physical downlink Control Channel</i>	Typ. 10 à 30 d'octets avec taux de codage 1/3 et modulation QPSK	Premier au 3 ^e symbole de chaque sous-trame	Indique l'allocation DCI (Downlink Control Information) sur la voie montante et descendante
PHICH	↓	<i>Physical Hybrid ARQ Indicator Channel</i>	1 bit par terminal (plusieurs bits groupés) avec forte protection	Premier symbole OFDM de chaque sous-trame	Porte l'acquittement descendant des données montantes
PDSCH	↓	<i>Physical downlink Shared Channel</i>	De 16 à 75 536 bits avec taux de codage 1/3 à 1 et modulation QPSK à 64-QAM	Sur tous les symboles des paires de blocs de ressources allouées	Contient les données descendantes
PMCH	↓	<i>Physical Multicast Channel</i>	De 32 à 43 816 bits (seulement 4 formats de transport)	Sur toute la bande d'une sous-trame avec périodicité fixée	Contient les données descendantes diffusées (MBMS)
PRACH	↑	<i>Physical Random Access Channel</i>	1 préambule parmi 64	6 blocs de ressources	Accès (demande de ressource ou accès lors d'un handover)
PUCCH	↑	<i>Physical Uplink Control Channel</i>	De 0 à 22 bits	Quelques blocs de ressources aux extrémités de la bande	Acquittement ou contrôle Acquittement ou contrôle
PUSCH	↑	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>	De 16 à 30 536 bits	Blocs de ressources disponibles	Contient les données montantes

TE 7 374 – 15

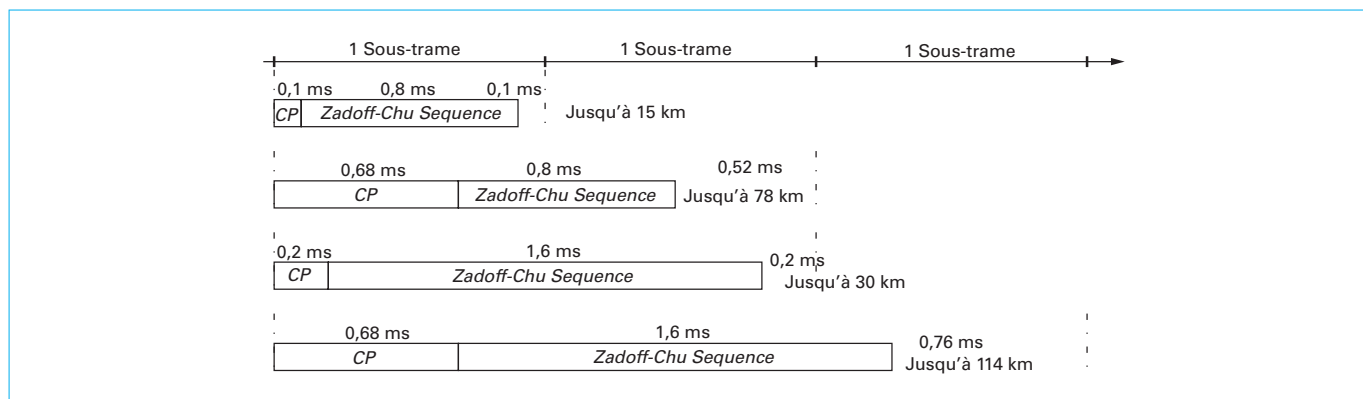


Figure 16 – Formats de préambule pour l'accès aléatoire

car deux séquences différentes transmises en même temps sont discernables par la station de base. Le *RACH* utilise toujours 6 paires de blocs de ressources, mais la fréquence en est configurable : de 1 fois toutes les 20 ms à chaque ms.

■ Principe de transmission

Un terminal utilise le canal d'accès lorsqu'il veut transmettre au réseau une demande ou une donnée et que la valeur d'avance en temps est non connue (changement de cellule) ou trop vieille pour être utilisée. La durée de garde doit être capable de compenser le délai de propagation aller-retour. Pour une cellule de 100 km de rayon, la durée de garde nécessaire est plus longue qu'un *slot* ! Comme un tel rayon est peu courant dans la pratique, les spécifications définissent plusieurs formats en figure 16.

Le format le plus courant convient à des cellules jusqu'à 15 km de rayon et ne consomme qu'une sous-trame. Pour des rayons supérieurs, il faut allouer plusieurs sous-trames successives à l'accès aléatoire. On note qu'il y a possibilité d'utiliser une séquence de Zadoff-Chu plus longue. Cela permet de détecter des signaux plus faibles, car le pic de corrélation est d'autant plus important que la séquence est longue.

■ Fonction du préambule

Lorsqu'un terminal transmet sur le *RACH*, il choisit un préambule et le transmet. Notons que le réseau, à la réception de ce préambule, ne connaît pas l'identité du terminal émetteur. Il peut arriver que deux terminaux, faisant un accès au même moment dans une même cellule, choisissent le même préambule, mais que l'un soit plus proche de la station de base que l'autre. Seul le plus proche est reçu mais, comme le message d'allocation renvoyé par la station de base fait référence au préambule utilisé pour l'accès, les deux terminaux vont interpréter ce message d'allocation comme leur étant destiné. La collision n'est pas résolue. Il est nécessaire alors de procéder à un second échange pour lever les ambiguïtés : la première transmission d'un terminal contient systématiquement la transmission d'une identité qui lui est propre. Le réseau renvoie en écho l'identité. Si un terminal ne reçoit pas un écho correct, il en déduit qu'il y a une collision et exécute à nouveau une procédure d'accès.

Il faut également noter qu'un terminal n'a pas nécessairement un *RNTI* lorsqu'il accède au réseau.

Or, l'adressage des transmissions sur la voie radio est exclusivement basé sur une valeur de *RNTI*. Un algorithme simple permet de calculer, à partir du numéro de trame utilisé pour transmettre le préambule, un *RNTI* appelé *RA-RNTI* (*Random Access RNTI*). Ce *RA-RNTI* est utilisé pour permettre au réseau de transmettre la réponse au terminal qui a effectué l'accès aléatoire sans connaître son *RNTI*. La figure 17 présente un exemple d'accès lorsque le terminal a déjà un *RNTI* alloué. Une séquence d'échange légèrement

différente est définie pour permettre l'accès et l'allocation d'un *RNTI* à un terminal n'en disposant pas.

5.4 Transmission de données descendante sur *PDSCH*

La transmission de données utilisateur se fait (comme indiqué § 2.3 et 6) sur *PDSCH* (*Physical Downlink Shared Channel*), lequel correspond tout simplement à l'ensemble des blocs de transport transmis sur la voie descendante à chaque sous-trame.

■ Principe

Lorsque le bloc est diffusé, il n'est bien évidemment acquitté par aucun terminal. En revanche, tout bloc destiné à un seul terminal est systématiquement acquitté au niveau *MAC* quelle que soit la qualité de service demandée. Un canal spécifique est prévu pour cette transmission : le *PUCCH* (*Physical Uplink Control Channel*).

Pour une transmission de données descendante, le flux montant est faible car il ne contient que les acquittements. Mettre en œuvre un mécanisme d'adaptation de lien pour le flux montant, consistant à utiliser un fort taux de codage si le terminal est proche de la station de base pour économiser de la ressource radio, n'est pas rentable. En effet, cela engendrerait des échanges de contrôle bien supérieurs au gain obtenu. Les acquittements sont donc transmis systématiquement avec un fort niveau de protection (faible taux de codage). Afin d'obtenir un bon effet de diversité, la transmission se fait sur l'extrémité de la bande : on utilise pour le *PUCCH* seulement les blocs de ressources aux extrémités (ce sont les blocs grisés dans la figure 6).

■ Utilisation des séquences

Étant donné que des cellules voisines peuvent utiliser la même fréquence, il faut que l'émission d'un terminal dans une cellule soit décodée seulement par la station de base à laquelle il est rattaché. On utilise pour cela des séquences (au nombre de 30) dont les propriétés sont les mêmes que celles de Zadoff-Chu (§ 3.5 et 10) : deux séquences différentes sont faiblement corrélées et on affecte à deux cellules voisines des séquences différentes (figure 18).

De plus, on définit des séquences de saut de façon à ce qu'un terminal d'une cellule ne soit pas interféré toujours par le même terminal de la cellule voisine. Afin de permettre plusieurs transmissions simultanées dans la même cellule, on génère plusieurs séquences à partir de la même séquence par des décalages cycliques. Un terminal qui transmet sur le *PUCCH* utilise une séquence de Zadoff-Chu qui lui est propre et on peut dire en ce sens que la transmission utilise le principe du CDMA (le code étant la séquence de Zadoff-Chu choisie).

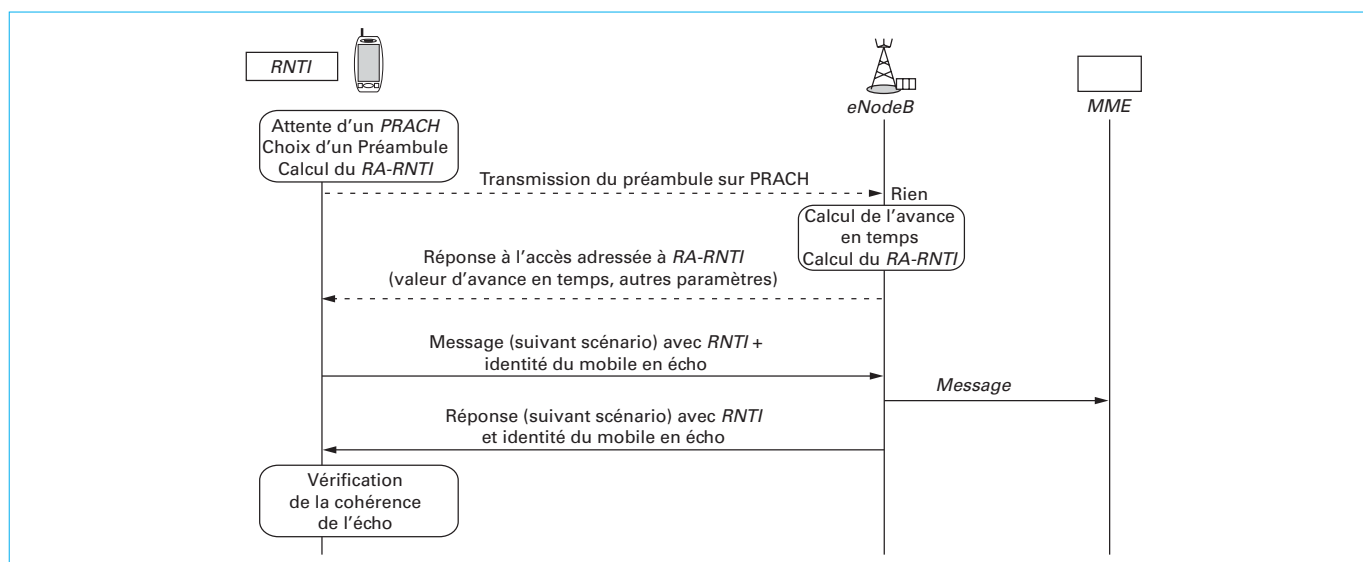


Figure 17 – Scénario d'accès aléatoire (pour un terminal ayant un RNTI)

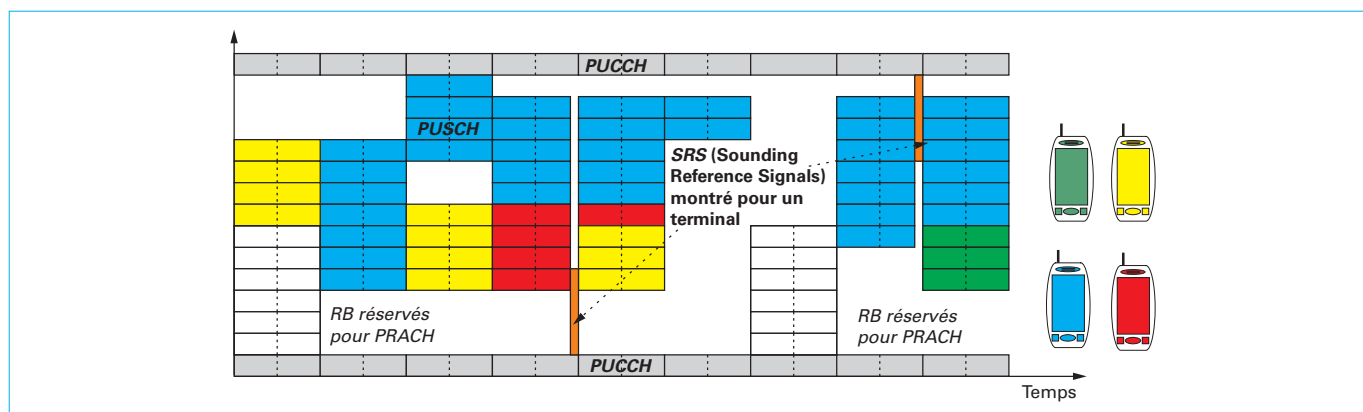


Figure 18 – Exemple de répartition des principaux canaux physiques montants dans la trame temporelle

■ Autres fonctions

Le **PUCCH** peut être utilisé pour d'autres fonctions que l'acquiescement :

- demande de ressource sur la voie montante ;
- indication sur la qualité du canal descendant ;
- contrôle du **MIMO**.

Plusieurs formats et variantes sur le mécanisme de transmission sont définis suivant la quantité de données transmises.

5.5 Transmission de données montante sur **PUSCH**

Les données sont transmises par un terminal dans les blocs de ressources allouées sur la voie montante par la station de base. Cette transmission forme le **PUSCH** (**Physical Uplink Shared Channel**). L'acquiescement est alors transmis dans le premier symbole **OFDM** d'une sous-trame. Seul un bit est transmis (acquiescement positif ou négatif). Ce bit est fortement protégé, car des pertes trop fréquentes d'acquiescement positif conduisent à des

retransmissions inutiles par le terminal et, par conséquent, une réduction de son autonomie.

5.6 Canal en diffusion **PMCH**

Le système permet, en *Release 9*, une transmission synchronisée du même signal par plusieurs stations de base en utilisant un canal multi-diffusion appelé **PMCH** (**Physical Multicast Control Channel**). Du fait de la grande durée des symboles (caractéristique de l'**OFDM**), les signaux émis par chaque station de base s'additionnent harmonieusement à la réception et permettent d'améliorer la couverture. Cela nécessite que la durée du préfixe cyclique soit importante.

Comme on le constate sur la figure 19, les premiers symboles de la sous-trame sont transmis en utilisant le préfixe choisi pour la cellule mais les symboles formant véritablement le **PMCH** possèdent toujours un préfixe long. Lorsqu'une sous-trame est utilisée pour le **PMCH**, cela concerne l'ensemble des sous-porteuses disponibles et la même sous-trame pour l'ensemble des stations de base d'une zone géographique donnée.

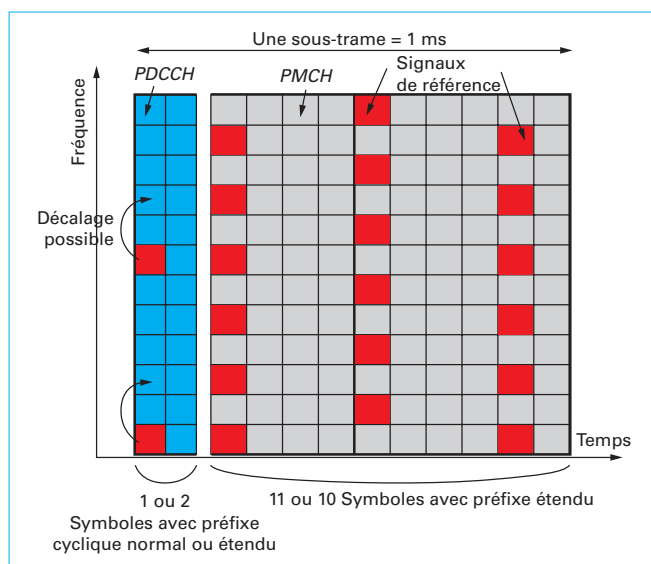


Figure 19 – Canal physique de diffusion et signaux de référence

6. Chaîne de transmission

Nous présentons dans ce chapitre la chaîne de transmission, c'est-à-dire l'ensemble des opérations effectuées sur un bloc de données sans aborder les mécanismes protocolaires qui permettent de gérer cette transmission.

Un bloc de données à l'entrée est appelé *bloc de transport*. On lui applique un code détecteur d'erreur, un code correcteur de type turbo et on décide d'une modulation particulière (figure 22).

6.1 Canaux de transport

En fonction de la qualité de la liaison radio, la station de base décide d'un *format de transport*, c'est-à-dire du type de modulation

(QPSK, 16-QAM ou 64-QAM) et du taux de codage. Le processus de contrôle de la ressource radio décide du nombre de *RB* à allouer pour le flux considéré en fonction, non seulement des données de ce flux à transmettre, mais également de l'ensemble des demandes de la cellule, voire des cellules voisines. Le choix d'un format de transport et d'un nombre de *RB* détermine grossièrement la taille du bloc à transmettre. Il est possible que le bloc de transport soit très gros (jusqu'à 9 422 octets). Dans ce cas, il est segmenté en blocs faisant au plus 6 144 bits.

Le traitement lié à l'ensemble de la chaîne de transmission est intégré dans la couche physique. Cette dernière offre un service de transmission à travers des canaux de transport (figure 20). Cependant, la sélection du format de transport dépend des ressources disponibles. Elle est donc sous le contrôle de l'ordonnanceur MAC (figure 3).

Dans la suite, nous présentons la chaîne de transmission pour les données qui est l'élément central de l'interface radio : c'est-à-dire les canaux de transport :

– DL-SCH (DownLink Shared Channel) utilisant le canal physique PDSCH ;

– UL-SCH (UpLink Shared Channel) utilisant le canal physique PUSCH.

Le canal physique PDSCH est également utilisé par le PCH (Paging Channel). Le transport est spécifique, car des mécanismes d'économie d'énergie sont mis en œuvre qui permettent à un terminal d'activer sa réception seulement aux instants où il est susceptible de recevoir un appel (*paging*).

Canaux de transport particuliers

- Pour les données en diffusion, un canal de transport particulier MCH (Multicast Channel) est défini car il n'y a pas de voie de retour.
- De même, les informations systèmes majeures sont transportées sur un canal de transport particulier comportant une forte redondance : le BCH (Broadcast Channel).
- Enfin, un canal de transport RACH (Random Access Channel) est défini pour l'accès aléatoire : il ne contient en réalité aucune information, mais seulement le numéro de préambule choisi (§ 5.3).

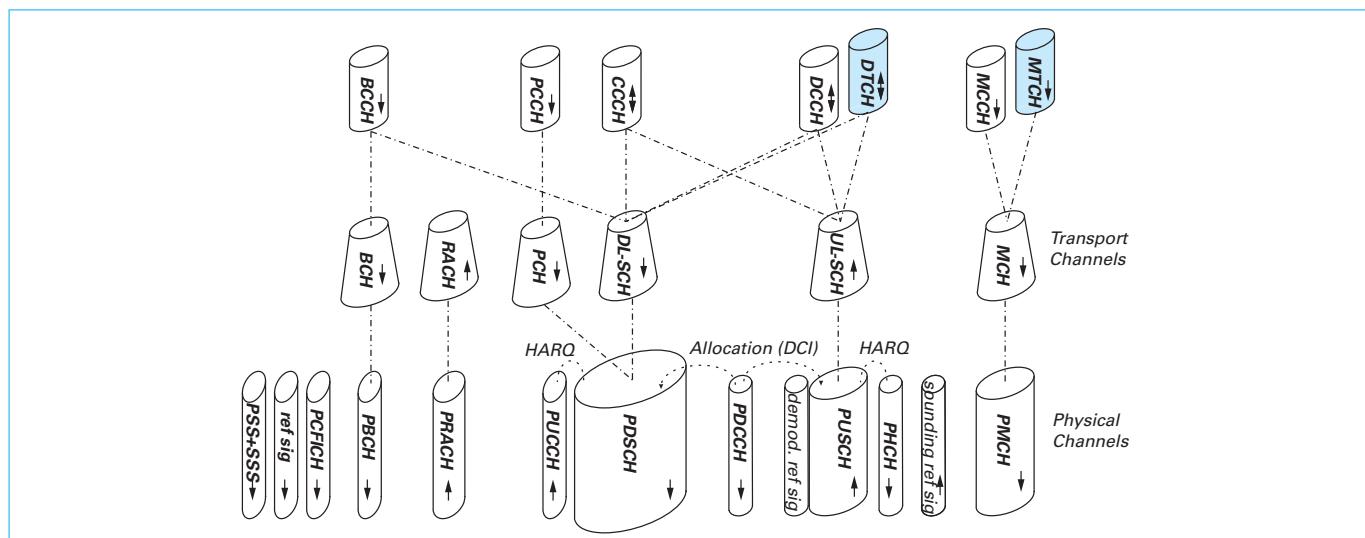


Figure 20 – Ensemble des canaux physiques, de transport et logiques de l'interface radio LTE

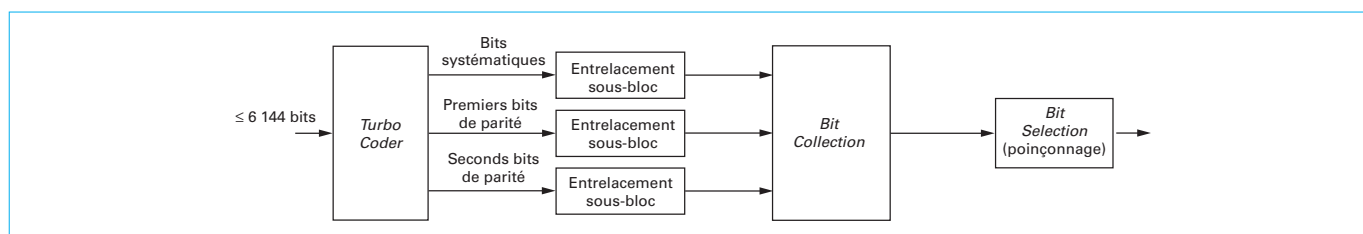


Figure 21 – Principe de la chaîne de codage LTE

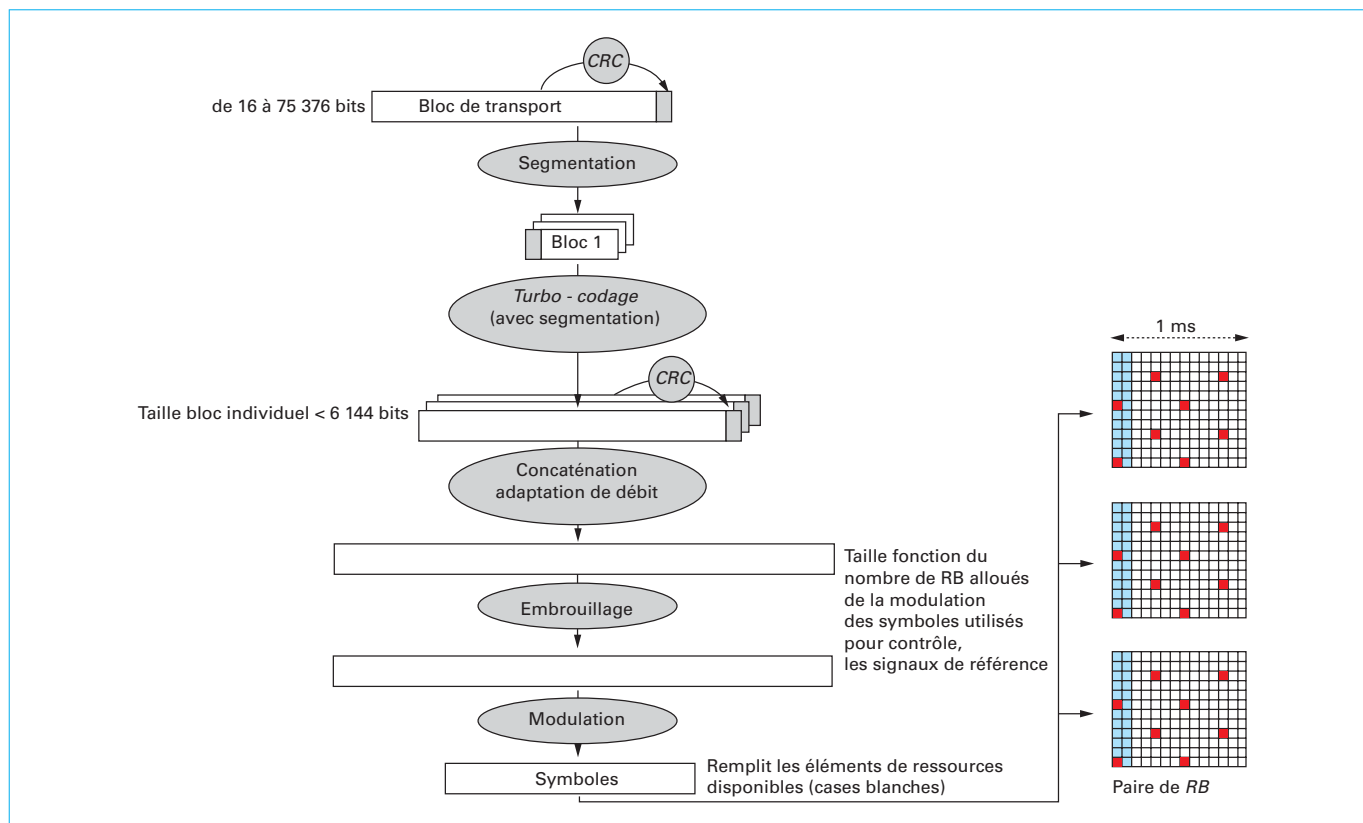


Figure 22 – Principe de la chaîne de transmission LTE

6.2 Code correcteur et code détecteur

À tout bloc de données, on rajoute un *CRC* (*Cyclic Redundancy Check*) de 24 bits (figure 22). Ce dernier est une redondance qui permet de détecter les blocs qui contiennent encore des erreurs après application des algorithmes de correction d'erreur. La probabilité de non détection, c'est-à-dire la probabilité qu'un bloc soit considéré comme correct alors qu'il contient une erreur, vaut en première approximation $2^{-\ell}$ où ℓ est la longueur du code détecteur. Comme $2^{-24} \simeq 10^{-7}$, on constate que cette probabilité est très faible.

Le système *LTE* réutilise le même turbo-code [TE 5 260] que celui spécifié dans l'*UMTS*, qui impose une taille du bloc à coder entre 40 et 6 144 bits. Si le bloc de transport (avec le *CRC*) a une taille supérieure à 6 144 bits, le bloc est segmenté en plusieurs sous-blocs.

■ Le code correcteur possède un taux de codage égal à 1/3, c'est-à-dire que pour 1 bit à l'entrée du codeur, on obtient 3 bits en sortie (le bit de donnée à l'identique, appelé bit systématique, et

2 bits calculés). Les bits sont ensuite entrelacés puis remis ensemble. On procède enfin au poinçonnage, qui consiste à ne garder qu'une partie des bits en sortie du codage (figure 21). Cela permet d'avoir un taux de codage qui varie entre 1/3 et près de 1. En effet, si le rapport signal sur bruit est important, il peut suffire de quelques bits de redondance.

- Si le bloc de transport est segmenté, le codage correcteur est appliqué à chaque segment et un *CRC* sur 24 bits est ajouté à chaque segment encodé (même principe et mêmes performances que pour le bloc de départ non segmenté). Les différents sous-blocs encodés sont concaténés (voir la figure 22). Le bloc ainsi constitué a une taille qui correspond au nombre de bits disponibles, qui sont fonction de la modulation et du nombre de *RB* alloué. Cependant, dans un *RB* tous les symboles ne sont pas utilisables pour la transmission de données, car certains sont utilisés comme symbole de référence ou pour du contrôle.

Tableau 6 – Exemple de tailles de blocs transport en fonction du format de transport et du nombre de ressources alloué

Numéro	Nombre de paires de blocs de ressources alloués											
	1	2	3	4	5	6	...	25	...	50	...	100
0	16	32	56	88	120	152	...	680	...	1 384	...	2 792
1	24	56	88	144	176	208		904		1 800		3 624
2	32	72	144	176	208	256		1 096		2 216		4 584
3	40	104	176	208	256	328		1 416		2 856		5 736
4	56	120	208	256	328	408		1 800		3 624		7 224
5	72	144	224	328	424	504		2 216		4 392		8 760
6	328	176	256	392	504	600		2 600		5 160		10 296
7	104	224	328	472	584	712		3 112		6 200		12 216
8	120	256	392	536	680	808		3 496		6 968		14 112
...												
15	280	600	904	1 224	1 544	1 800		7 736		15 264		30 576
...												
21	488	1 000	1 480	1 992	2 472	2 984		12 576		25 456		51 024
22	520	1 064	1 608	2 152	2 664	3 240		13 536		27 376		55 056
23	552	1 128	1 736	2 280	2 856	3 496		14 112		28 336		57 336
24	584	1 192	1 800	2 408	2 984	3 624		15 264		30 576		61 664
25	616	1 256	1 864	2 536	3 112	3 752		15 840		31 704		63 776
26	712	1 480	2 216	2 984	3 752	4 392		18 336		36 696		75 376

• Le nombre exact de symboles disponibles varie dynamiquement. **On procède alors à l'adaptation de débit (*rate matching*)** qui consiste à retirer (éventuellement ajouter) quelques bits pour que la taille obtenue corresponde exactement à ce que l'émetteur est en mesure de transmettre.

■ La dernière étape consiste à appliquer une **séquence d'embrouillage (*scrambling code*)** obtenue grâce à un générateur pseudo-aléatoire. Cette opération permet de s'assurer que le bloc apparaît comme du bruit par rapport aux éventuelles autres transmissions faites sur les mêmes sous-porteuses dans des cellules voisines. On utilise, par conséquent, un code d'embrouillage spécifique à chaque cellule sur la voie descendante, et spécifique à chaque terminal sur la voie montante. Les bits obtenus après embrouillage sont convertis ensuite en symboles, suivant la modulation utilisée, et chaque symbole remplit un élément de ressource non utilisé par ailleurs de façon à « remplir » l'ensemble des *RB* alloué pour la transmission [3].

6.3 Gestion des formats de transport

La taille d'un bloc de transport dépend du nombre de blocs de ressources alloué (de 1 à 100 avec 20 MHz de bande), de la modulation utilisée (3 possibilités) et du taux de codage (environ 10). En théorie, tous les arrangements des différents choix sont possibles. La norme restreint à 27 possibilités le choix conjoint de la modulation et du codage appelé *MCS (Modulation and Coding Scheme)*, mais laisse la possibilité d'utiliser un nombre quelconque de blocs de ressource.

ces. Cela donne 27 combinaisons dont quelques unes sont indiquées dans le tableau 6. On constate que différentes combinaisons correspondent à la même taille de bloc de transport. Cela permet une plus grande souplesse dans les mécanismes de transmission.

Exemple : supposons qu'un bloc de 2 984 bits a été transmis sur 4 blocs de ressources en *MCS 26*. S'il n'est pas correctement reçu, il peut être retransmis en *MCS 24*, plus résistant, en utilisant 5 blocs ou bien en *MCS 21* avec 6 blocs. L'adaptation dynamique des formats de transport aux conditions radios est donc grandement simplifiée.

Notons que le tableau 6 permet de retrouver les débits maximaux annoncés pour le *LTE*.

Exemple : en allouant 100 blocs de ressources et en utilisant le *MCS 26* (qui correspond à une modulation 64-QAM et un taux de codage proche de 1), on peut transmettre 75 376 bits dans un bloc soit 75 376 bit/ms (soit 75 Mbit/s). L'utilisation d'un *MIMO 4 × 4* permet de transmettre 2 blocs de transport simultanément et d'obtenir un débit de 150 Mbit/s.

Pour atteindre 300 Mbit/s, il faut un *MIMO 4 × 4*. Ce débit n'est possible que sur la voie descendante. Sur la voie montante, on ne transmet qu'un seul bloc à la fois et on ne peut utiliser (en *Release 8*) que la modulation 16-QAM *MCS 15*. Le débit est alors de 30 576 bit/ms soit 30 Mbit/s.

7. Couche MAC et protocole HARQ

7.1 Canaux logiques

La couche MAC (*Medium Access Control*) [2] fournit la possibilité de multiplexer différents flux sans garantie de qualité de service, mais avec un taux de perte de trames susceptible de convenir aux services les moins exigeants (de l'ordre de 1 % de trames perdues). Pour ce faire, un protocole de retransmission sélective est mis en œuvre.

■ Bloc de transport

Un bloc de transport peut contenir n'importe quel type de données :

- de la signalisation ;
- des données utilisateurs supportant un taux d'erreur moyen ;
- des données utilisateurs requérant un très faible taux d'erreur (la qualité de service étant gérée par la couche RLC).

Le format d'un bloc MAC (appelé également *MAC-PDU*) est indiqué à la figure 23. Il contient principalement des blocs de données appelés *MAC-SDU* (*MAC Service Data Unit*), mais peut contenir également des informations de contrôle utiles pour le bon fonctionnement de l'interface radio : état des buffers, valeur de l'avance en temps (§ 4.3), information sur la puissance, etc.

■ Liste des canaux logiques

Chaque flux correspond à un canal logique particulier. Un canal logique, ou *logical channel*, est donc défini par le type d'information qu'il transporte et la qualité de service lorsqu'il s'agit de données usagers.

Exemple

Le canal logique *DCCH* (*Dedicated Control Channel*) contient seulement la signalisation (par exemple, les messages *RRC*) alors que le canal logique *DTCH* (*Dedicated Traffic Channel*) est utilisé pour les données utilisateurs. Ces deux canaux logiques utilisent le canal de transport *DL-SCH* sur la voie descendante et *UL-SCH* sur la voie montante (figure 20).

Concrètement, l'en-tête de chaque *MAC-SDU* contient un identificateur *LCID* (*Logical Control Identification*) codé sur 5 bits. La valeur 0 indique que le *MAC-SDU* est un message *RRC* urgent. La valeur 1, que c'est un message de signalisation autre que *RRC*. Des valeurs plus grandes que 2, qu'il s'agit de données utilisateurs (on affecte une valeur par qualité de service spécifique, c'est-à-dire par instance *RLC*).

Les canaux *MTCH* (*Multicast Traffic Channel*) et *MCCH* (*Multicast Control Channel*) sont similaires respectivement aux *DCCH* et *DTCH*, mais comme ils sont diffusés, ils utilisent par conséquent le canal de transport *MCH*.

- Le canal logique *BCCH* (*Broadcast Control Channel*) contient les informations systèmes. Les informations systèmes devant être acquises très rapidement sont transportées par le canal de transport *BCH* (*Broadcast Channel*) qui utilise le canal physique *PBCH*. Les informations systèmes moins vitales pour un fonctionnement correct de la couche physique du terminal sont transmises sur un canal de transport *DL-SCH* utilisant un *PDSCH*. Le *RNTI* utilisé est alors spécifique (*FFFF*) (soit 65 535 comme indiqué à la figure 6) et il n'y a bien sûr aucun acquittement, puisque les données sont diffusées aux terminaux de la cellule.

- Le canal logique *PCCH* (*Paging Control Channel*) s'appuie de façon naturelle sur le canal de transport *PCH*. Le canal *CCCH* (*Common Control Channel*) est utilisé pour l'échange de signalisation avec les terminaux ne disposant pas de *RNTI* ou seulement d'un *RNTI* provisoire (§ 5.3). Il utilise le *DL-SCH* et le *UL-SCH*.

7.2 Protocole HARQ

■ Plusieurs familles de protocoles *ARQ* (*Automatic Repeat reQuest*) existent : le plus simple est le mécanisme *Send-And-Wait*. Il consiste à transmettre un bloc de données, appelé *MAC-PDU* (*Medium Access Control – Protocol Data Unit*), puis à attendre l'acquittement avant de transmettre le suivant.

Un protocole Send-And-Wait présente l'inconvénient d'avoir un faible débit, du fait du temps perdu à l'attente de l'acquittement.

Plutôt que de mettre en œuvre des protocoles à fenêtre d'anticipation complexes à implémenter, on préfère dans les systèmes modernes utiliser plusieurs mécanismes *Send-And-Wait* en parallèle.

Le développement en est plus simple et les performances identiques. L'acquittement d'un bloc montant est envoyé par la station de base (sur le *PHICH*) avec un délai de 4 sous-trames et l'allocation indiquée sur le *PDCCH* comporte également un délai de 4 sous-trames (figure 24). Une trame ne peut être répétée par conséquent que 8 trames plus tard (en *FDD*). Afin de garder une efficacité maximale, il est par conséquent nécessaire de mettre en œuvre 8 processus en parallèle.

■ Le protocole *ARQ* est dit « hybride » (*ARQ, Hybrid Automatic Repeat reQuest*), car il combine harmonieusement la correction par redondance (*FEC, Forward Error Correction*) et par retransmission. En utilisant des schémas de poinçonnage différents à chaque retransmission (voir § 6), une retransmission permet d'augmenter la redondance dans tous les cas de figure. Il est alors possible de combiner à la réception les différents exemplaires d'un même bloc et de le décoder correctement (alors qu'un exemplaire pris individuellement n'est pas correctement décodé). Les protocoles *HARQ* résistent mieux à des variations du canal de transmission et sont nettement plus performants que les protocoles *ARQ* simples.

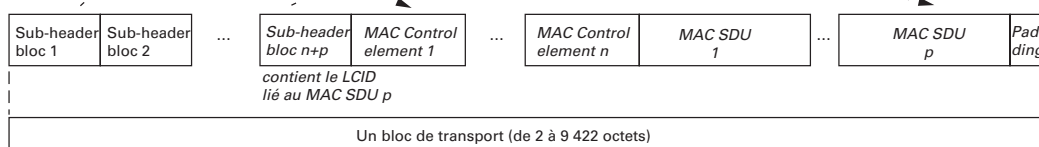


Figure 23 – Format d'un bloc de transport (*MAC-PDU*)



(mode *AM*) peut se faire au cours d'une communication vocale (mode *UM*). Cependant, il n'y a qu'une seule instance par support radio (*radio bearer*), donc une seule par canal logique.

À la réception, la rupture de séquençement (par exemple, la réception du bloc 15 suivi immédiatement du bloc 17) ne signifie pas qu'il y a nécessairement perte de bloc (le bloc 16 peut être juste retardé). Elle provoque le lancement d'une temporisation d'attente des blocs manquants tant en mode *UM* qu'*AM*. Ce n'est qu'à l'issue de la temporisation que le bloc est déclaré comme définitivement perdu. En mode *AM*, le récepteur demande la retransmission du ou des blocs manquants.

- **Le protocole RLC manipule des blocs de données et des blocs de contrôles.** Les blocs de contrôles sont les acquittements (positifs ou négatifs) ou les messages de demande d'état (un émetteur interroge le récepteur pour s'informer des blocs correctement reçus). Quels que soient leur type, les blocs RLC sont transportés comme des données au niveau MAC. Leur transmission nécessite donc la réservation de ressource, ce qui peut entraîner un délai. Tout bloc de données émis doit être conservé par l'entité RLC de l'émetteur tant que l'acquittement de ce bloc n'a pas été reçu. De la même façon, tout bloc de données reçu doit être conservé tant que les blocs précédents n'ont pas été reçus.

Plusieurs catégories de terminaux avec les capacités mémoires correspondantes sont spécifiées. On constate sur le tableau 7 [7] que le débit de 150 Mbit/s n'est disponible que si le buffer total est de 3.5 Moctets.

Tableau 7 – Différentes catégories de terminaux et capacité mémoire

Catégorie	Voie descendante				Voie montante		
	Nombre max de bits par TTI	Nombre max de bits par bloc de transport	Taille du buffer en HARQ	Couches de multiplexage spatial (antennes)	Nombre max de bits par bloc de transport	Gestion de modulation 64-QAM	Taille totale du buffer de couche 2
1	10 296	10 296	250 368	1	5 160	Non	150 000
2	51 024	51 024	1 237 248	2	25 456	Non	700 000
3	102 048	75 376	1 237 248	2	51 024	Non	1 400 000
4	150 752	75 376	1 827 072	2	51 024	Non	1 900 000
5	299 552	149 776	3 667 200	4	75 376	Oui	3 500 000

9. Couche PDCP

La couche *PDCP* (*Packet Data Convergence Protocol*) est utilisée tant pour le transfert de données utilisateurs que pour la transmission de la signalisation [4]. Elle intègre le mécanisme *ROHC* (*RObust Header Compression*) qui permet la compression et la décompression d'en-tête. En effet, des applications telles que la voix sur IP mettent en œuvre une pile de protocoles importants : un bloc de voix, qui contient typiquement 30 octets, est placé dans un bloc *RTP* (*Real Time Protocol*) ajoutant un en-tête de typiquement 12 octets ; le bloc *RTP* est transporté dans un segment *UDP* d'en-tête 8 octets, lui-même placé dans un paquet IP d'en-tête 40 octets (en IPv6). La taille totale des en-têtes est de 60 octets pour une charge utile de 30 octets.

Or, pour un flux donné, de nombreux champs ne varient pas et il n'est pas nécessaire de les transmettre systématiquement. Le mécanisme *ROHC* contient une définition d'automates qui suppriment les champs à l'émission (ou les comprime) et les régénèrent à la réception de façon à ce que la compression soit totalement invisible des couches supérieures (pour plus de détails, se reporter au [TE 7 560]).

La couche *PDCP* intègre également les procédures de chiffrement et de déchiffrement (lorsque celui-ci est activé) ainsi que, dans le plan contrôle, la vérification de l'intégrité. Ce dernier consiste à rajouter une redondance calculée à partir d'une clé secrète et à vérifier la cohérence de la redondance à la réception. Le récepteur peut ainsi vérifier qu'aucun élément intermédiaire n'a modifié le message de signalisation.

Le protocole *RLC* assure la livraison des données avec un séquençement correct. Cependant, lorsqu'une liaison radio est coupée puis ré-établie (par exemple, suite à un changement de cellule), le protocole *RLC* est réinitialisé et il ne peut pas détecter les pertes de paquets ou les séquençements incorrects. Un mécanisme de numérotation des *PDU*s *PDCP* est défini pour détecter les pertes de paquets, les déséquençements ou les duplications. Il y a autant d'instances *PDCP* que d'instances *RLC* (figure 3) ; les différentes instances fonctionnent en parallèle.

10. Exemple de transmission multi-services

Les segmentations et réassemblages faits par les différentes couches sont représentés de façon synthétique dans la figure 25. Nous supposons un utilisateur en train de télécharger un fichier (par exemple, une page web), de recevoir une communication en voix sur IP et dont le terminal reçoit un message *RRC*. Le téléchargement se fait sur un support qui garantit une faible perte de

paquet (*bearer* 1) et fait appel à *RLC* en mode acquitté. Le protocole *RRC* fait de même.

En revanche, la voix sur IP utilise *RLC* en mode non acquitté. On constate, sur la figure 25, que l'ensemble est transporté en un seul bloc transport (nous supposons que la station de base dispose de suffisamment de capacité). Le bloc de transport est transmis sur le *PDSCH* sur plusieurs blocs de ressources désignés par le *DCI* associé à un *RNTI*, lui-même transmis sur le *PDCCH* (figure 6). Le bloc de transport est acquitté par le terminal, sur le *PUCCH*. Si le bloc n'est pas correctement reçu par le terminal, ou si l'acquiescement n'est pas correctement reçu par la station de base (*a priori*, ce dernier cas est beaucoup plus rare que le premier), il est retransmis à l'identique, mais éventuellement avec un format de transport différent.

Lorsque le bloc de transport est bien reçu par le terminal, il est décodé et les blocs sont reconstitués par les différentes entités protocolaires. Le terminal doit acquiescer les données au niveau *RLC* pour les *bearers* 1 et de signalisation. Les acquiescements *RLC* sont perçus comme des blocs de données par la couche *MAC*. Le terminal doit donc demander de la ressource sur la voie montante. Il profite de l'acquiescement transmis au niveau *MAC* sur le *PUCCH* pour demander cette ressource. Si le terminal n'a pas de données utilisateur à transmettre, le bloc de transport sera court, comme on peut le constater sur la figure 26.

11. Annexe – Construction des séquences de Zadoff-Chu

Soit N un nombre impair. Soit M un nombre entier entre 1 et N et premier avec N . La séquence de Zadoff-Chu $\{z_k\}$ de longueur N ($k=0\dots N-1$) est une suite de symboles complexes z_k définis comme suit

$$z_k = \exp(j\pi k(k+1)M/N) \quad (1)$$

avec j nombre complexe tel que $j^2 = -1$.

L'inter-corrélation x de 2 séquences périodiques z et y de symboles complexes z_k et y_k (de module unité) est définie, de manière générale, comme :

$$x_0 = \sum_{k=0}^{N-1} z_k y_k^*$$

$$x_i = \sum_{k=0}^{N-1-i} z_k y_{k+i}^* + \sum_{k=N-i}^{N-1} z_k y_{k+i-N}^* \quad \text{pour } i > 0$$

avec y^* conjuguée complexe de y .

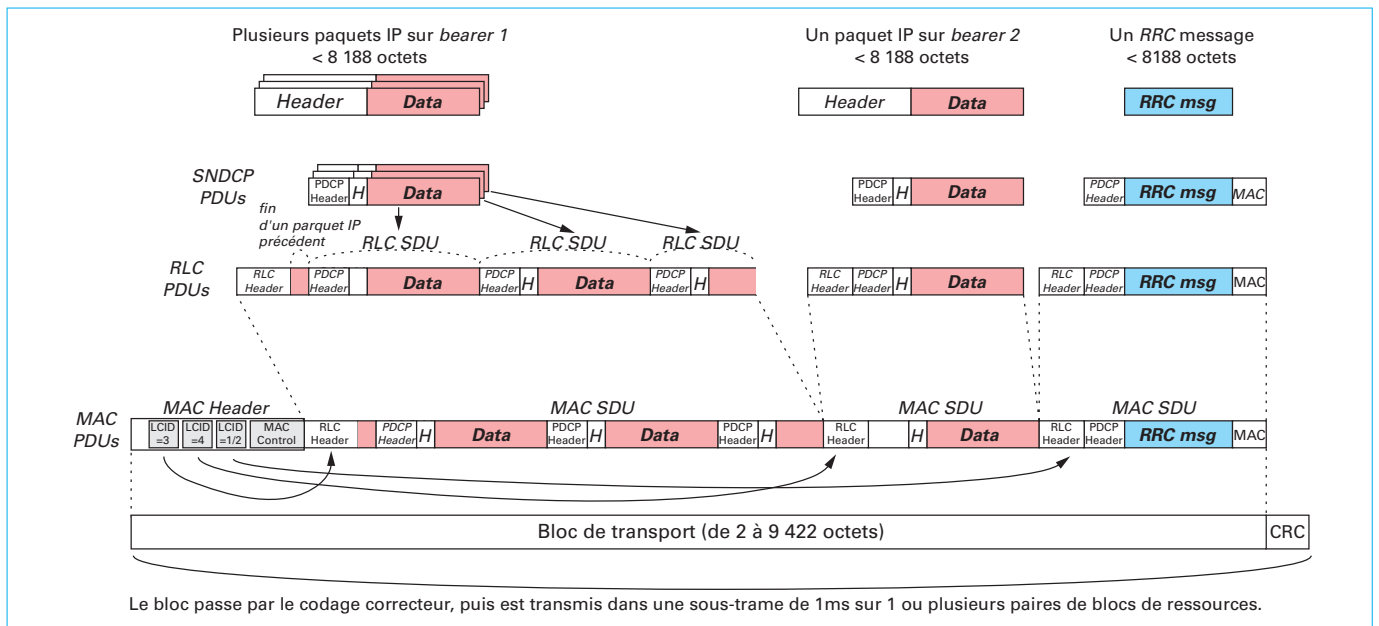


Figure 25 – Segmentation et réassemblage aux différentes couches de l'interface radio

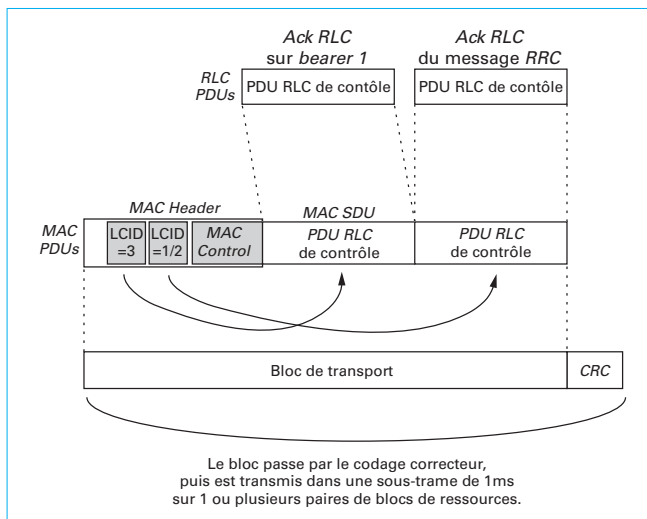


Figure 26 – Envoi d'acquittements au niveau RLC

Exemple

Si $N = 7$ et $M = 2$, les phases des 7 symboles composant la séquence sont successivement $0, 4\pi/7, -2\pi/7, -4\pi/7, -2\pi/7, 4\pi/7, 0$.

La corrélation d'une séquence avec elle-même s'appelle l'« auto-corrélation » et se calcule par conséquent comme :

$$x_i = \sum_{k=0}^{N-i-1} z_k z_{k+i}^* + \sum_{k=N-i}^N z_k z_{k+i-N}^* \text{ pour } i > 0$$

avec $x_0 = \sum_{k=0}^{N-1} z_k z_k^* = 1$.

En utilisant la formule précédente et la définition de la séquence de Zadoff-Chu, on mène le calcul de l'auto-corrélation facilement et on obtient $x_i = 0$ pour $0 < i < N$.

Il est possible de montrer que l'inter-corrélation de deux séquences ayant la même valeur N , mais des valeurs de M différentes est bornée :

$$|x_i| < \frac{1}{\sqrt{N}} \text{ pour tout } i$$

Supposons qu'on engendre, à partir de la même valeur de N , plusieurs séquences de Zadoff-Chu et qu'on les affecte aux stations de base. Si chaque station de base émet régulièrement sa séquence de Zadoff-Chu sur une fréquence radio commune à toutes les stations, un récepteur peut vérifier qu'il reçoit, ou non, une station de base particulière en faisant la corrélation entre sa séquence de Zadoff-Chu (on suppose qu'il la connaît) et le signal reçu : il lui suffit d'examiner la présence ou non d'un pic en sortie du corrélateur. La grandeur de ce pic par rapport au niveau moyen lui indique le rapport signal sur interférence. Notons que l'inter-corrélation étant bornée en tout point, la propriété reste vraie quelle que soit les synchronisations respectives des transmissions. De plus, des valeurs différentes de délai de propagation entre le terminal et les stations de base ne modifient pas non plus cette propriété. Ce principe, déjà utilisé pour l'UMTS, est repris pour LTE.

La séquence de Zadoff-Chu est particulièrement intéressante en transmission OFDM, car la séquence et sa transformée de Fourier ont une enveloppe constante. Cela signifie que, si on considère la séquence de Zadoff-Chu dans le domaine fréquentiel, la suite de symboles temporels est à enveloppe constante et ne souffre pas des problèmes de PAPR traditionnels dans l'OFDM (voir [TE 7 372]).

Il est possible de définir des séquences de Zadoff-Chu à partir d'une valeur paire, mais cela a peu d'intérêt. En effet, si on choisit N impair, il est plus facile de trouver des valeurs M de premières avec N . Une idée naturelle est de choisir M premier pour maximiser le nombre de séquences obtenu.

Si on considère une séquence de Zadoff-Chu que nous appelons Z_1 et qu'on lui fait subir une rotation circulaire de quelques symboles, cela revient à la décaler temporellement. On peut considérer la

séquence obtenue Z_2 comme différente. Si les deux séquences sont émises en même temps, on peut identifier chacune d'elle en réception, car Z_1 et Z_2 sont orthogonales du fait que le produit scalaire d'une séquence de Zadoff-Chu avec sa version décalée donne 0. L'orthogonalité des séquences reste vraie même si les séquences sont affectées d'un léger retard, à condition que la différence de retard soit inférieure au décalage appliqué. Il est donc possible d'obtenir à partir d'une séquence de Zadoff-Chu plusieurs séquences qui ont de bonnes propriétés d'inter-corrélation sur une plage limitée. Ce mécanisme est utilisé pour séparer des émissions effectuées par des terminaux différents situés dans la même cellule. En effet, les terminaux asservissant leur synchronisation à celle de la station de base, il est possible d'avoir en réception des retards variant sur une plage réduite.

Lexique des acronymes	
Sigle	Définition
AM	Acknowledged Mode
ARQ	Automatic Repeat reQuest
AS	Access Stratum
BCCH	Broadcast Control Channel (canal logique)
BCH	Broadcast Channel (canal de transport)
CDMA	Code Division Access
CRC	Cyclic Redundancy Check
DCCH	Dedicated Control Channel (canal logique)
DCI	Downlink Control Information
DL-SCH	DownLink Shared Channel (canal de transport)
DTCH	Dedicated Traffic Channel (canal logique)
EMM	Enhanced Mobility Management
eNB	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
ESM	Enhanced Session Management
FDD	Frequency Division Duplex
FEC	Forward Error Correction
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest
HSS	Home Subscriber Server
LCID	Logical Control Identification
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast System
MCCH	Multicast Control Channel (canal logique)
MCH	Multicast Channel
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
MME	Mobility Management Entity
MTCH	Multicast Traffic Channel (canal logique)
MU-MIMO	Multiple User multiplexing MIMO
NAS	Non Access Stratum
OFDM	Orthogonal Frequency Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Multiple Access

Lexique des acronymes (suite)	
Sigle	Définition
OSI	Open Systems Interconnection
PCCH	Paging Control Channel (canal logique)
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PCH	Paging Channel (canal de transport)
PCI	Physical-layer Cell Identity
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN-GW ou PGW	Packet Data Network Gateway
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PDU	Protocol Data Unit
PGW	Packet Data Network Gateway
PMCH	Physical Multicast Control Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
PSS	Primary Synchronisation Sequence
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quaternary Amplitude Modulation
QPSK	Quaternary Phase Shift Keying
RACH	Random Access Channel (canal de transport)
RA-RNTI	Random Access RNTI
RB	Resource Block
RLC	Radio Link Control
RNTI	Radio Network Temporary Identity
ROHC	Robust Header Compression
RRC	Radio Resource Controller
RS	Reference Signals
RTP	Real Time Protocol
SC-FDMA	Single Carrier – Frequency Division Multiplex Access
SDU	Service Data Unit
SFN	System Frame Number
SGW	Serving Gateway
SIMO	Single Input Multiple Output
SISO	Single Input Single Output
SSS	Secondary Synchronisation Sequence
SU-MIMO	Single User multiplexing MIMO
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TM	Transparent Mode
TTI	Time Transmission Interval
UE	User Equipment
UL-SCH	UpLink Shared Channel (canal de transport)
UM	Unacknowledged Mode
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System

Principes de fonctionnement de l'interface radio *LTE*

par **Xavier LAGRANGE**

Professeur Télécom Bretagne, Institut Mines-Télécom, Cesson-Sévigné, France

Sources bibliographiques

- [1] 3GPP. – *Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and evolved universal terrestrial radio access (E-UTRAN) – Overall description. Stage 2.* TS 36.300, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), sept. 2008.
- [2] 3GPP. – *Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) – Medium access control (MAC) protocol specification.* TS 36.321, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), sept. 2008.
- [3] 3GPP. – *Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) – Multiplexing and channel coding.* TS 36.212, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), sept. 2008.
- [4] 3GPP. – *Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) – Packet data convergence protocol (PDCP) specification.* TS 36.323, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), sept. 2008.
- [5] 3GPP. – *Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) – Physical channels and modulation.* TS 36.211, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), sept. 2008.
- [6] 3GPP. – *Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) – Radio link control (RLC) protocol specification.* TS 36.322, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), sept. 2008.
- [7] 3GPP. – *Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) – User equipment (UE) radio access capabilities.* TS 36.306, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), juin 2008.
- [8] 3GPP. – *Network architecture.* TS 23.002, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), sept. 2008.
- [9] CELLMER (J.). – *Réseaux cellulaires – Système UMTS.* [TE 7 368], mai 2002.
- [10] LAGRANGE (X.) (coordinateur). – *Réseaux radiomobiles.* Hermès Science (2000).
- [11] LAGRANGE (X.) (coordinateur). – *Principes et évolutions de l'UMTS.* Hermès Science (2005).
- [12] DAHLMAN (E.), PARKVALL (S.), SKÖLD (J.) et BEMING (P.). – *3G evolution : HSPA and LTE for mobile broadband.* Elsevier, 2nd édition (2008).
- [13] LAGRANGE (X.), GODLEWSKI (P.) et TABBANE (S.). – *Réseaux GSM.* Hermès Science, 5nd édition (2000).

À lire également dans nos bases

LAGRANGE (X.). – *Principe de la transmission OFDM – Utilisation dans les systèmes cellulaires.* [TE 7 372] (2012).

PONS (J.). – *Réseaux cellulaires – Évolution du système UMTS vers le système EPS.* [TE 7 371] (2011).

SAOUTER (Y.). – *Turbocodes : réalisations et perspectives.* [TE 5 260] (2010).

MINABURO (A.). – *Mécanismes de compression d'en-têtes.* [TE 7 560] (2004).