Long Term Evolution : PHY, MAC et RLC

Marceau Coupechoux

Telecom ParisTech
Département INFRES/RMS

Décembre 2014

Plan du cours I

1. Introduction
2. Comment améliorer la réactivité du réseau ?
3. Comment augmenter les débits ?
   - Caractéristiques générales de la couche PHY
   - Transmissions multiporteuses
   - Réseau isofréquence
   - Techniques multi-antennaires
   - Organisation des ressources radio
4. Comment se synchroniser avec le réseau ?
   - Objectifs
   - Canaux voie descendante
   - Recherche de cellule
5. Comment accéder au réseau ?
   - Objectifs
   - Canaux voie montante

Plan du cours II

- Accès aléatoire
- Avance en temps

6. Comment envoyer et recevoir des données ?
   - Objectifs
   - Allocation de ressources
   - Ordonnancement
   - Contrôle des erreurs
   - Remontée des mesures

7. Catégories de terminaux

8. Synthèse sur les canaux

9. Conclusion

Section 1

Introduction

Introduction

- Finalisation d'une nouvelle norme 3GPP en déc. 2008 : LTE
- De nombreux concepts sont issus des normes précédentes
- Un vrai changement toutefois :
  - Transmission multiporteuse
  - Architecture simplifiée
- Pas encore la 4G : c'est LTE-Advanced qui répondra aux exigences de l'IMT-Advanced
- La normalisation se développe parallèlement aux évolutions de HSPA+ (*releases* R7 et R8)

Évolution des normes 3GPP

Release	Date de gel des fonctionnalités	Principales évolutions
R99	Mars 2000	Interface radio WCDMA Réseau d'accès UTRAN Réseau de transport ATM
R4	Mars 2001	IP dans le réseau de transport de l'UTRAN SIGTRAN et MEGACO dans le domaine circuit
R5	Juin 2002	HSDPA sur la voie descendante IMS phase 1 Interface I_u-Flex
R6	Mars 2005	HSUPA sur la voie montante IMS phase 2 GAN
R7	Décembre 2007	HSPA+ et techniques MIMO Convergence IMS et TISPAN
R8	Décembre 2008	Évolutions de HSPA+ Définition du LTE
R9	Décembre 2009	SON MBMS pour LTE
R10	Mars 2011	Définition du LTE-Advanced

Table : Historique des *releases* 3GPP (source : `http:www.3gpp.org/specs/releases.htm`).

Objectifs de la normalisation LTE

- Débits crêtes : 100 Mbps (DL), 50 Mbps (UL) sur 20 MHz
- En pratique : 150 Mbps (DL), 75 Mbps (UL) sur 20 MHz
- Débits moyens : HSPA $\times$ 3
- Délais RAN : $<$ 5 ms pour un petit paquet IP entre le RAN et l'UE à faible charge
- Délais RRC : $<$ 100 ms pour passer de Idle à actif
- Mobilité : les performances maximales sont assurées pour une faible mobilité mais le service doit être assuré à 350 Km/h
- Couverture : performances maximales jusqu'à 5 Km de rayon
- Coexistence : mesures et handovers vers la 2G, la 3G et des technologies non 3GPP comme WiMAX et cdma2000

Section 2

Comment améliorer la réactivité du réseau ?

Architecture de l'E-UTRAN I

- Réponse : architecture plus plate, BS plus intelligente et allocations de ressources plus fréquentes (TTI = 1 ms vs 20 ms en UMTS et 2 ms en HSPA)
- Le réseau d'accès s'appelle l'Evolved-UTRAN
- E-UTRAN = eNodes-B interconnectés par l'interface X2
- L'E-UTRAN est connecté à l'Evolved Packet Core (EPC) via l'interface S1

Architecture de l'E-UTRAN II

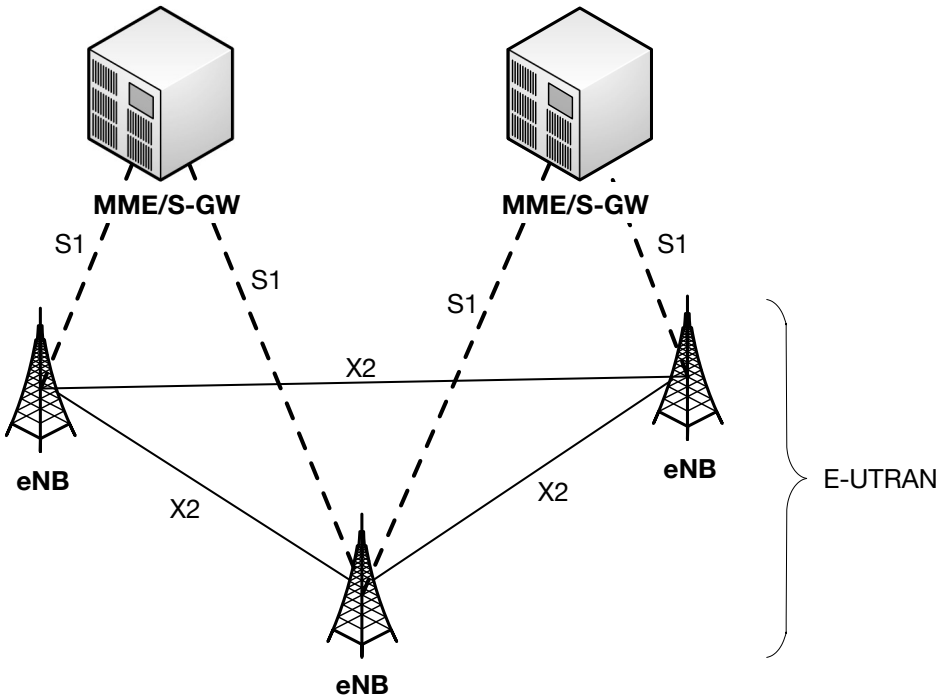

Figure : Architecture de l'E-UTRAN (d'après [3]).

Architecture de l'E-UTRAN III

- La MME = plan contrôle
- La S-GW = plan utilisateur
- Le RNC disparaît au profit d'un eNB aux fonctions augmentées :
  - Couches PHY (classique depuis GSM) et MAC
  - Ordonnancement rapide et HARQ comme en HSPA
  - Nouveau : RLC, PDCP, RRC
- Conséquence : les décisions d'ordonnancement, de retransmissions, d'adaptation de lien (i.e. du débit en fonction des conditions radio) et de reconfigurations sont prises au plus près du lien radio

Architecture protocolaire I

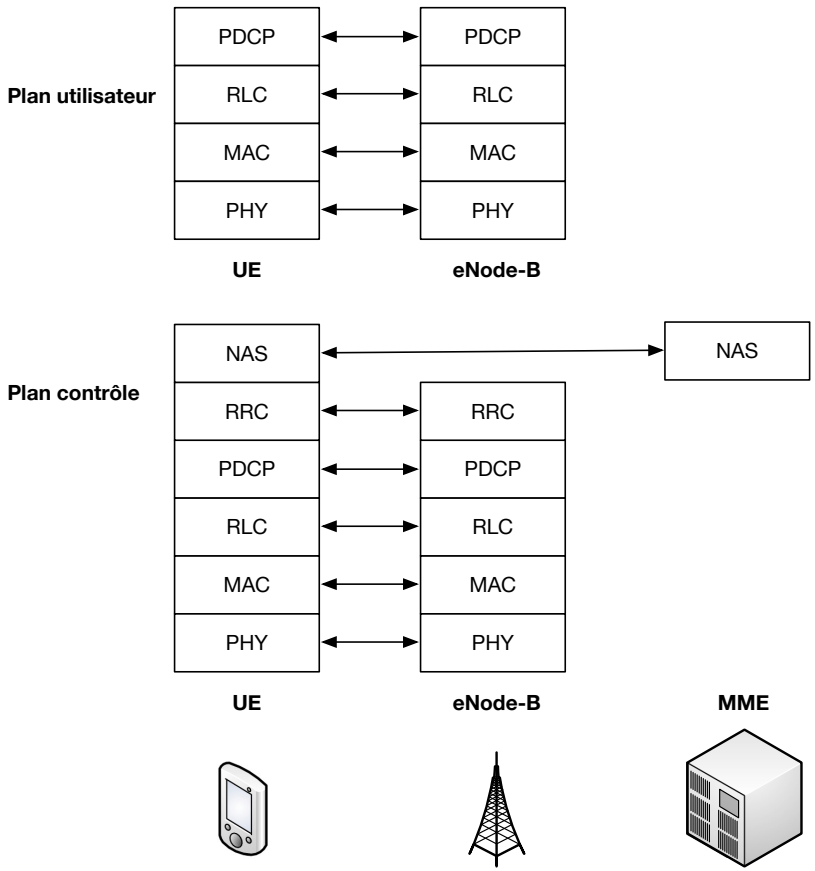

Figure : Positionnement des couches protocolaires des plans utilisateur et contrôle dans l'E-UTRAN (d'après [3]).

Architecture protocolaire II

- PHY :
  - Traitements RF
  - Détection, correction d'erreurs
  - Techniques de transmission (multi-porteuse, modulation, MIMO)
  - Synchronisation (temps, fréquence)
  - Mesures
- MAC :
  - Association des canaux logiques aux canaux de transport
  - Multiplexage, démultiplexage sur les canaux de transport
  - Ordonnancement rapide toutes les 1 ms
  - Retransmissions HARQ
  - Accès aléatoire
  - Avance en temps
  - Choix des formats de transport
  - Gestion des priorités entre canaux logiques

Architecture protocolaire III

- RLC :
  - Retransmissions ARQ (mode AM)
  - Concaténation, segmentation, réassemblage de SDU RLC
  - Resegmentation de PDU RLC en cas de retransmission
  - Livraison en séquence des PDU des couches supérieures
  - Détection des PDU RLC dupliqués
- PDCP :
  - Compression, décompression des en-têtes IP (ROHC)
  - Livraison en séquence (RLC AM)
  - Détection des duplicatas
  - Retransmission des PDU PDCP en cas de handover (RLC AM)
  - Cryptage, décryptage des données
- RRC :
  - Gestion des ressources radio
  - Gestion de la mobilité
  - Remontées des mesures
  - Contrôle des *radio bearers*

A retenir

Réactivité du réseau : à retenir

- Architecture plate, disparition du RNC
- E-UTRAN = eNB, EPC = MME et SGW, interfaces X2 et S1
- Couche PHY, ordonnancement rapide, retransmissions dans l'eNB
- TTI = 1 ms

Section 3

Comment augmenter les débits ?

Problématique

- Rappel de la formule de Shannon : $C \approx n_{ant} W \log_2(1 + SINR)$
- En pratique, cependant :
  - Cette fonction n'est pas tout-à-fait atteinte
  - Cette fonction est bornée (par C_{max}) car on utilise une modulation finie
  - La capacité doit être partagée entre tous les utilisateurs de la cellule
  - Il faut dédier des ressources à la signalisation
- Pour augmenter les débits :
  - Augmenter W... mais problèmes d'interférence entre symboles
  - Diminuer l'interférence avec de la réutilisation spatiale des fréquences... mais moins de bande dans chaque cellule
  - Augmenter C_{max} en densifiant la modulation... mais le signal est plus sensible au bruit
  - Augmenter n_{ant}... mais complexité des algorithmes et problèmes de place pour les antennes
  - Densifier le réseau pour réduire le nombre d'utilisateurs par cellule... mais plus d'antennes = plus d'investissements

Caractéristiques générales I

- L'étalement de spectre est abandonné
- Transmission multi-porteuse $\Rightarrow$ nouvelle organisation des ressources radio
- OFDMA (DL), SC-FDMA (UL)
- Bandes spectrales possibles : 1,4, 3, 5, 10, 15 et 20 MHz (rappel : 5 MHz en UMTS, 2×5 MHz en HSPA+ avec la double porteuse)
- Modulations : BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM (rappel : QPSK en UMTS, 16-QAM en HSPA)
- 64-QAM obligatoire sur le DL mais seuls les terminaux de cat. 5 peuvent l'utiliser sur l'UL
- Codage convolutionnel et le codage turbo convolutionnel
- Duplexage : TDD et FDD

Caractéristiques générales II

- MIMO : 2 ou 4 Tx, 2 ou 4 Rx, jusqu'à 4 flux parallèles peuvent être utilisés, MU-MIMO en DL et UL (rappel : pas de MIMO en UMTS, 2×2 en HSPA+)
- MBMS : la couche physique est prête, les couches supérieures seront normalisées dans les prochaines *releases*
- Bandes de fréquences FDD : autour des fréquences 700, 800, 1400, 1700, 1900, 2100 et 2600 MHz

OFDM/OFDMA I

- OFDM = technique de transmission
- Avantages : permet de lutter contre la propagation multi-trajet, grande efficacité spectrale, simple d'implémentation

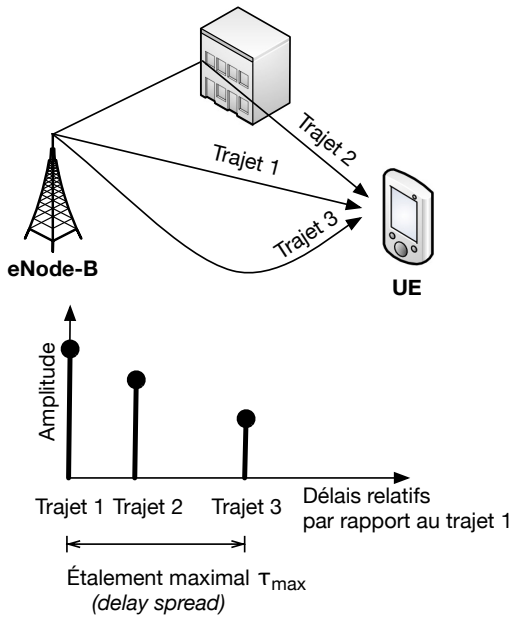

Figure : Propagation multi-trajet et étalement maximal.

OFDM/OFDMA II

- Si $\tau_{max} > T_{symb} \Rightarrow$ Interférence entre symboles (IES)
- $1/\tau_{max} \approx$ bande de cohérence du canal
- $1/T_{symb} \approx$ bande du signal
- Plus la bande du signal est grande plus il y a d'IES
- L'OFDM divise la bande totale du signal en sous-bandes fréquentielles ou sous-porteuses, d'une largeur spectrale $\Delta f \ll 1/\tau_{max}$
- L'IES est presque intégralement supprimée

OFDM/OFDMA III

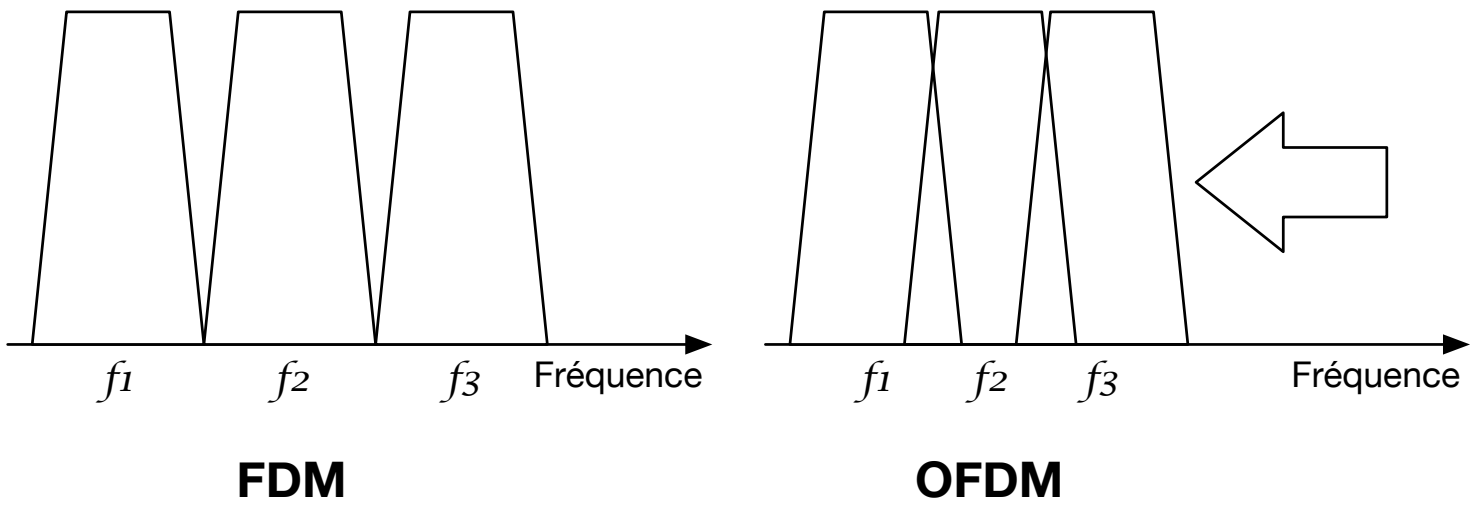

Figure : Comparaison entre OFDM et FDM en termes d'efficacité spectrale.

- Plus grande efficacité spectrale que FDM
- Recouvrement partiel des canaux grâce à l'orthogonalité entre sous-porteuses

OFDM/OFDMA IV

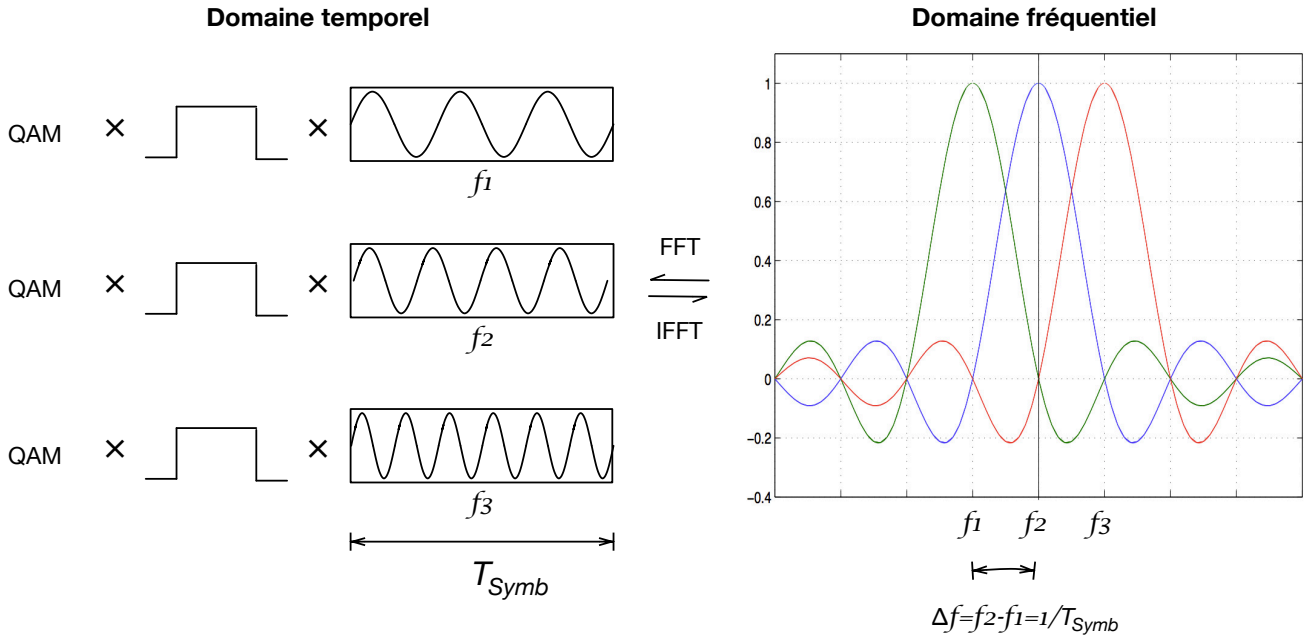

Figure : Signal OFDM dans les domaines temporel et fréquentiel.

- Orthogonalité : lorsque le signal de la sous-porteuse n est maximal, le signal des autres sous-porteuses est nul
- Orthogonalité quand $\Delta f = 1/T_{Symb}$
- Domaine temporel : le symbole OFDM est la somme de porteuses modulées et multipliées par une fonction porte

OFDM/OFDMA V

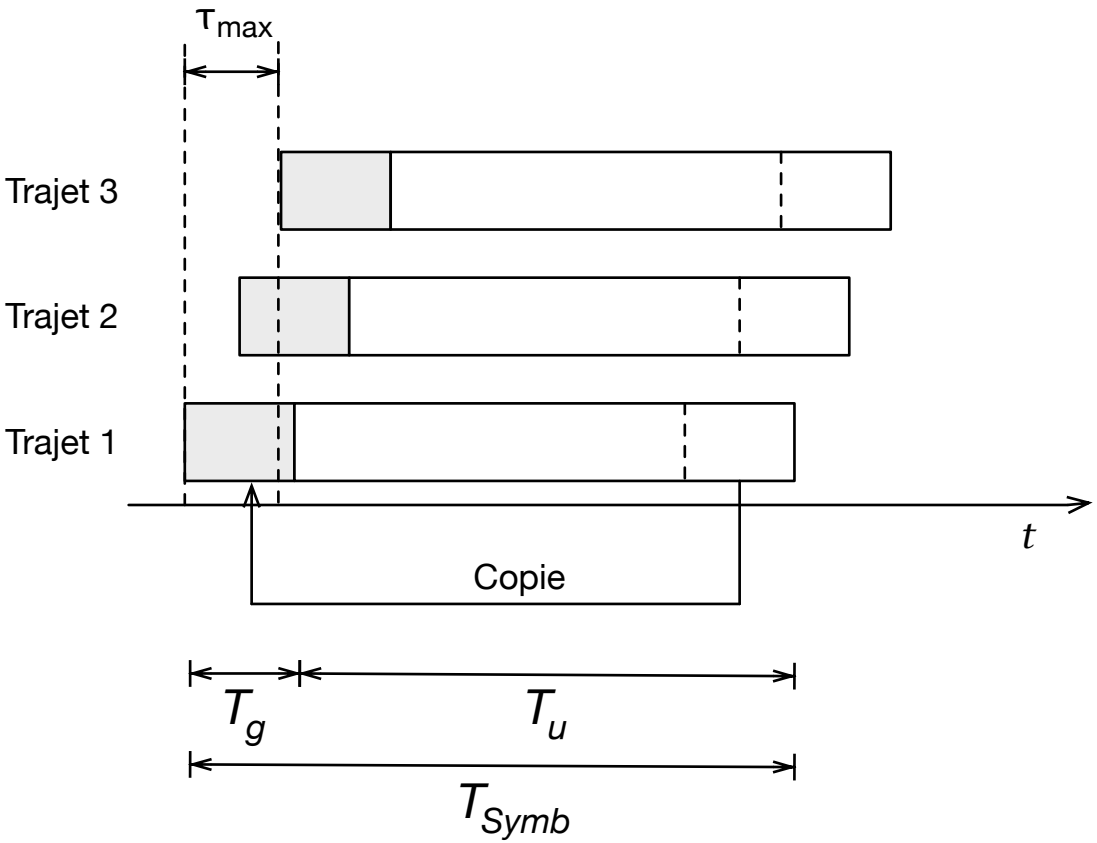

Figure : Intervalle de garde du symbole OFDM.

OFDM/OFDMA VI

- Pour supprimer l'IES résiduelle, on ajoute un préfixe cyclique

OFDM/OFDMA VII

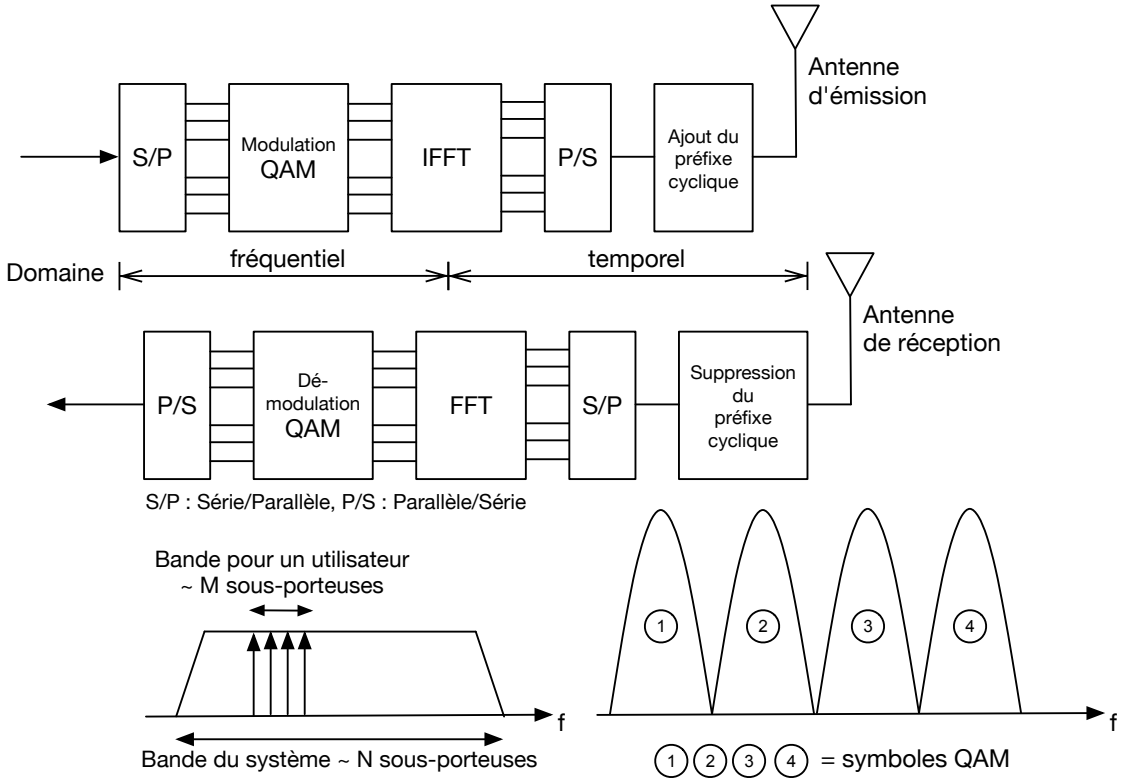

Figure : Chaînes de transmission et de réception OFDM/OFDMA.

- Le signal OFDM est simple à moduler et démoduler

OFDM/OFDMA VIII

- L'OFDM a deux inconvénients : (1) l'interférences entres sous-porteuses (synchronisation imparfaite ou for effet Doppler) et (2) le Peak to Average Ratio (PAPR) élevé

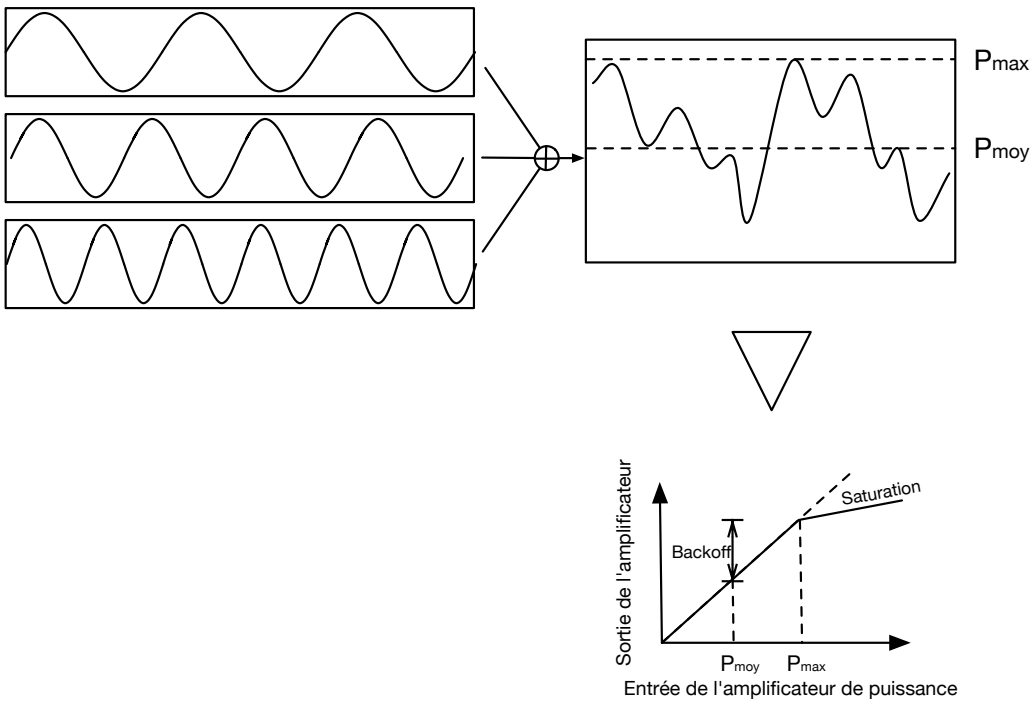

Figure : Rapport pic sur moyenne de la puissance du signal OFDM.

OFDM/OFDMA IX

- OFDM = technique de transmission
- OFDMA = méthode d'accès multiple fondé sur l'OFDM
- Des groupes de sous-porteuses peuvent être attribués à des utilisateurs différents
- $\Rightarrow$ pas d'interférence intra-cellulaire ($\neq$ CDMA)
- Allocation des ressources radio dans le plan temps/fréquence

SC-FDMA I

- PAPR élevé $\Rightarrow$ problématique sur l'UL
- SC-FDMA = technique de transmission à faible PAPR pour l'UL

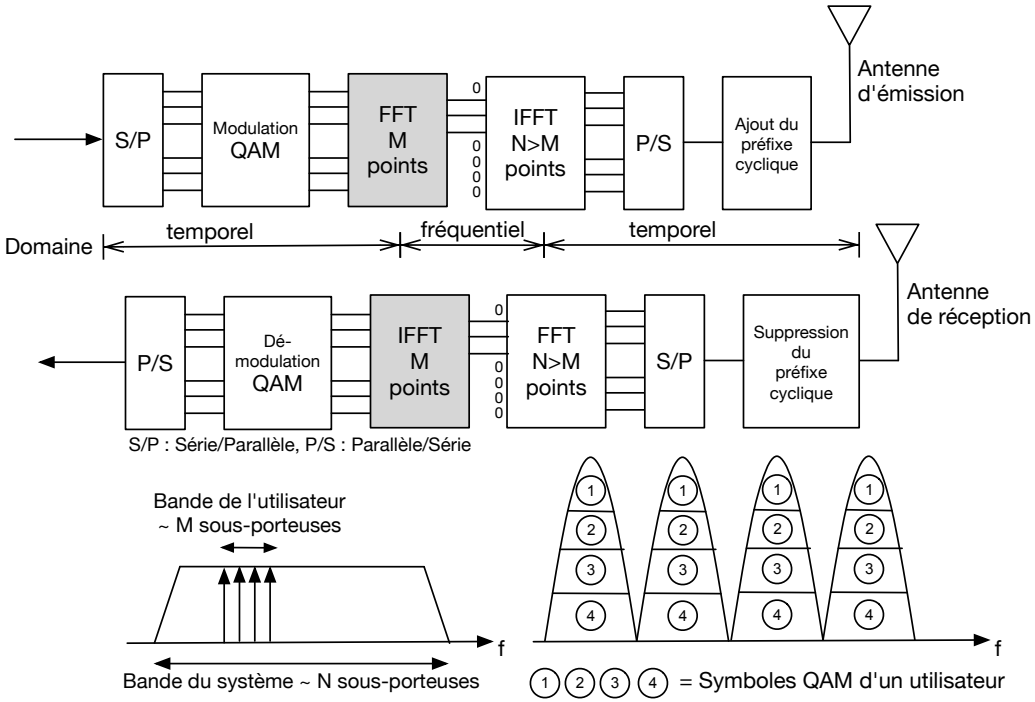

Figure : Chaîne de transmission et de réception SC-FDMA.

SC-FDMA II

- La FFT étale chaque symbole QAM sur M sous-porteuses
- Chaque sous-porteuse transporte des informations relatives à tous les symboles QAM
- À un instant donné, un unique symbole QAM est émis
- Le PAPR est donc identique à celui de la modulation QAM
- Les $N - M$ sous-porteuses disponibles peuvent être attribuées à d'autres utilisateurs

Configurations LTE I

Configuration	Δf (kHz)	Préfixe cyclique (μs)	T_u (μs)
Préfixe normal	15	5,2 (premier symbole) 4,7 (autres symboles)	66,6
Préfixe étendu	15	16,7	66,6

Table : Paramètres OFDM sur la voie descendante de LTE.

- Configuration normale : 7 symboles OFDM par slot, durée du préfixe faible $\Rightarrow$ cellules relativement petites (<2 Km de rayon)
- Configuration étendue : durée de préfixe plus élevé, 6 symboles OFDM par slot $\Rightarrow$ cellules plus grande (jusqu'à 10 Km) et réseaux isofréquences (MBSFN)

Configurations LTE II

Techniques de transmission : à retenir

- Avantages OFDM : lutte contre les multi-trajets, grande efficacité spectrale, simplicité d'implémentation
- Inconvénients OFDM : interférence entre sous-porteuses, PAPR
- OFDMA/SC-FDMA : méthodes d'accès multiple
- Avantage SC-FDMA : solution pour le UL à faible PAPR
- Inconvénient SC-FDMA : on ne peut allouer que des porteuses contiguës
- Espacement entre sous-porteuses constant égal à 15 KHz quelque soit la bande du signal

Réseau isofréquence

- Single Frequency Network = toutes les cellules ont la même fréquence porteuse (=CDMA, $\neq$ GSM)
- Réutilisation fréquentielle ($K > 1$) ou SFN ($K = 1$) ?
  - $K > 1$: moins d'interférence mais capacité cellulaire divisée par K
  - $K = 1$: capacité cellulaire maximale mais beaucoup d'interférence en bord de cellule $\Rightarrow$ *outage*

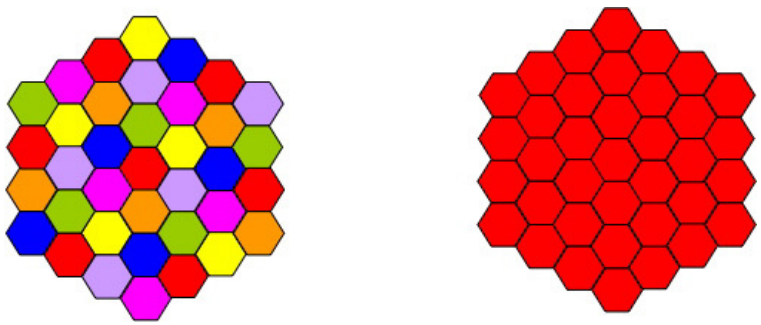

Figure : Réutilisation fréquentielle $K = 7$ et SFN ($K = 1$).

Les gains du MIMO

- Gain de diversité : plusieurs copies du signal arrivent au récepteur, améliore la robustesse du signal
- Gain de réseau d'antenne : l'énergie est concentrée dans une ou plusieurs directions *(beamforming)*, améliore le SNR, réduit les interférences
- Gain de multiplexage : plusieurs flux parallèles sont transmis, la capacité d'un canal SISO est multipliée par $\min(M, N)$, où M et N sont les nombres d'antennes de transmission et de réception resp.
- Configurations les plus communes : 2×2 et 4×2, plus tard : 4×4

Diversité en transmission (TM2)

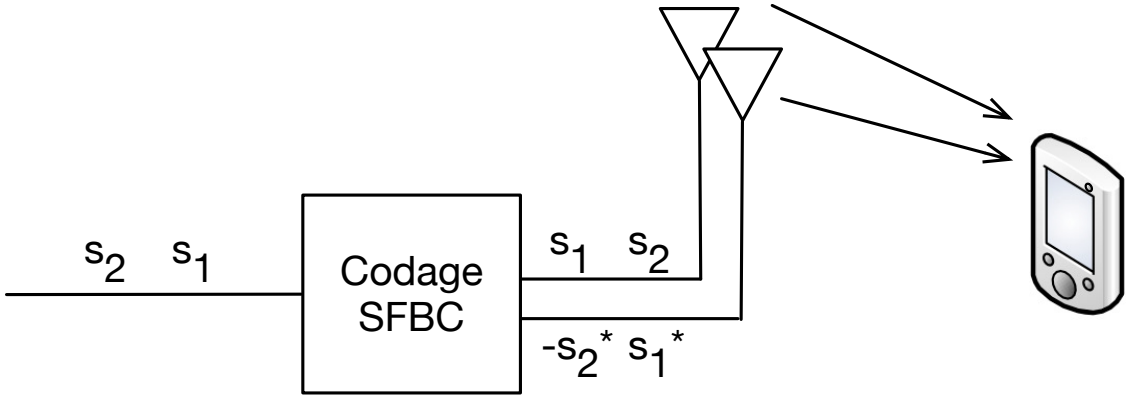

Figure : Diversité en transmission.

- 2 ou 4 antennes de transmission
- SFBC : code d'Alamouti [5] dans le domaine fréquentiel
- Renforce la robustesse du signal sans augmenter le débit
- Boucle ouverte
- Solution de repli des autres modes

Multiplexage spatial (boucles ouverte TM3 et fermée TM4)

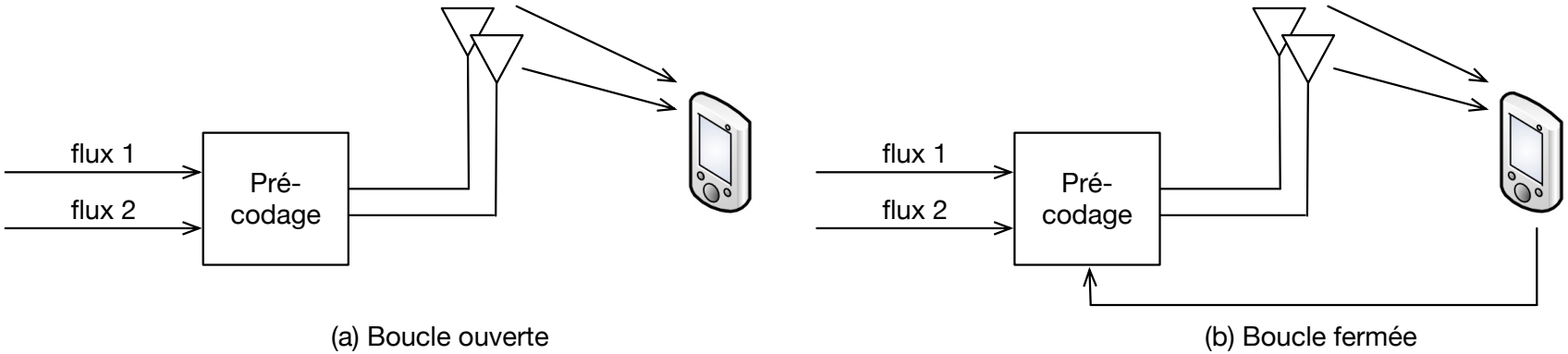

Figure : Multiplexage spatial.

- Plusieurs flux sont transmis simultanément (2 ou 4 antennes)
- Boucle ouverte : les matrices de précodage sont connues du récepteur et alternent de manière cyclique
- Boucle fermée : l'UE remonte sa matrice de précodage préférée, adapté aux situations de faible mobilité

MIMO multi-utilisateur TM5

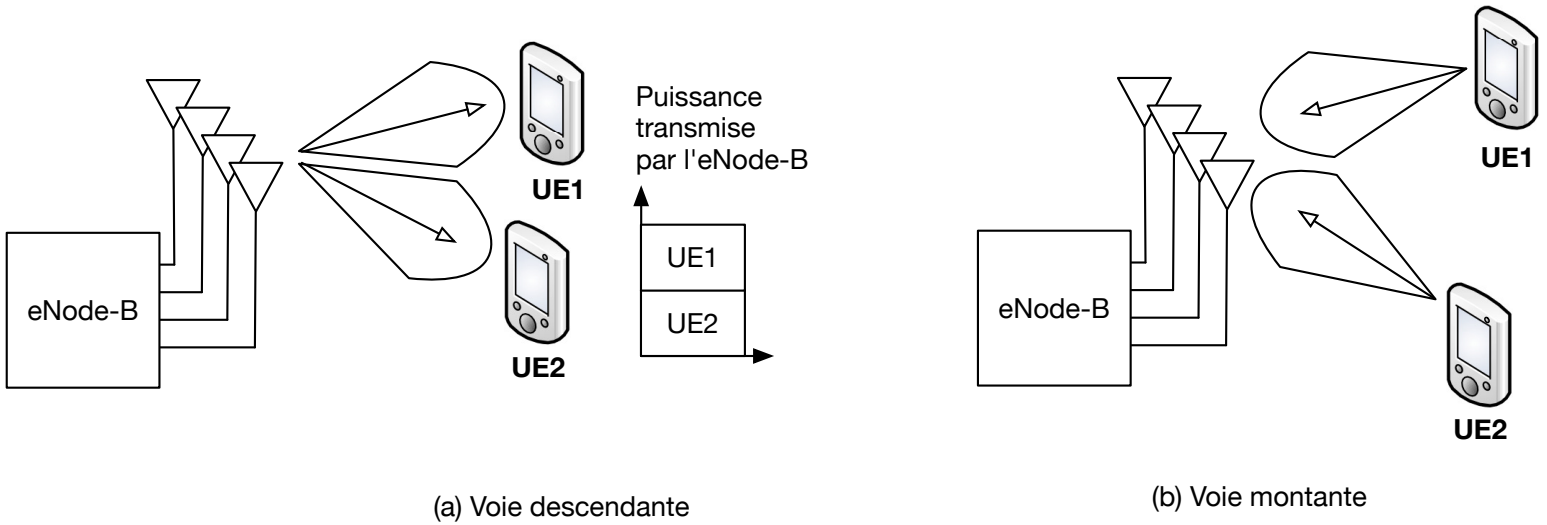

Figure : Transmission MIMO multi-utilisateur (a) sur la voie descendante et (b) la voie montante.

- Deux flux simultanés sur une même ressource radio temps/fréquence
- Technique similaire au multiplexage spatial avec boucle fermée

Formation de faisceaux TM6 et TM7

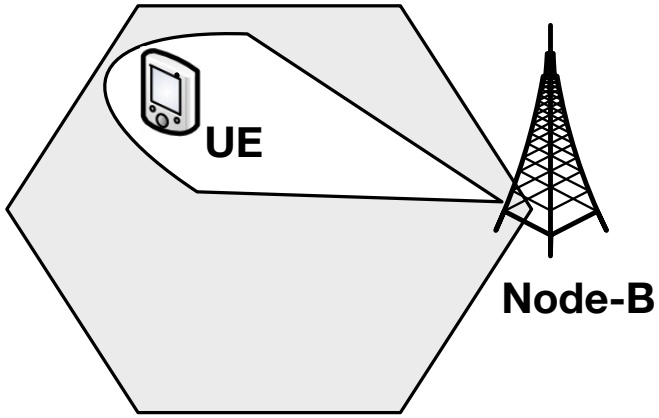

Figure : Formation de faisceaux *(beamforming)*.

- Les antennes multiples créent un lobe d'antenne dans la direction de l'UE $\Rightarrow$ augmentation de la puissance du signal utile
- Technique qui nécessite des pilotes spécifiques à l'UE

A retenir

MIMO : à retenir

- Diversité en transmission : améliorer la robustesse du signal
- Multiplexage spatial : augmenter les débits dans de bonnes conditions radio
- Formation de faisceaux : augmenter la puissance du signal utile
- Boucle ouverte : pas de retour des UEs (pour UEs rapides)
- Boucle fermée : retour des UEs (plus efficace, pour UEs lents)

Structure de Trame (type 1 pour FDD)

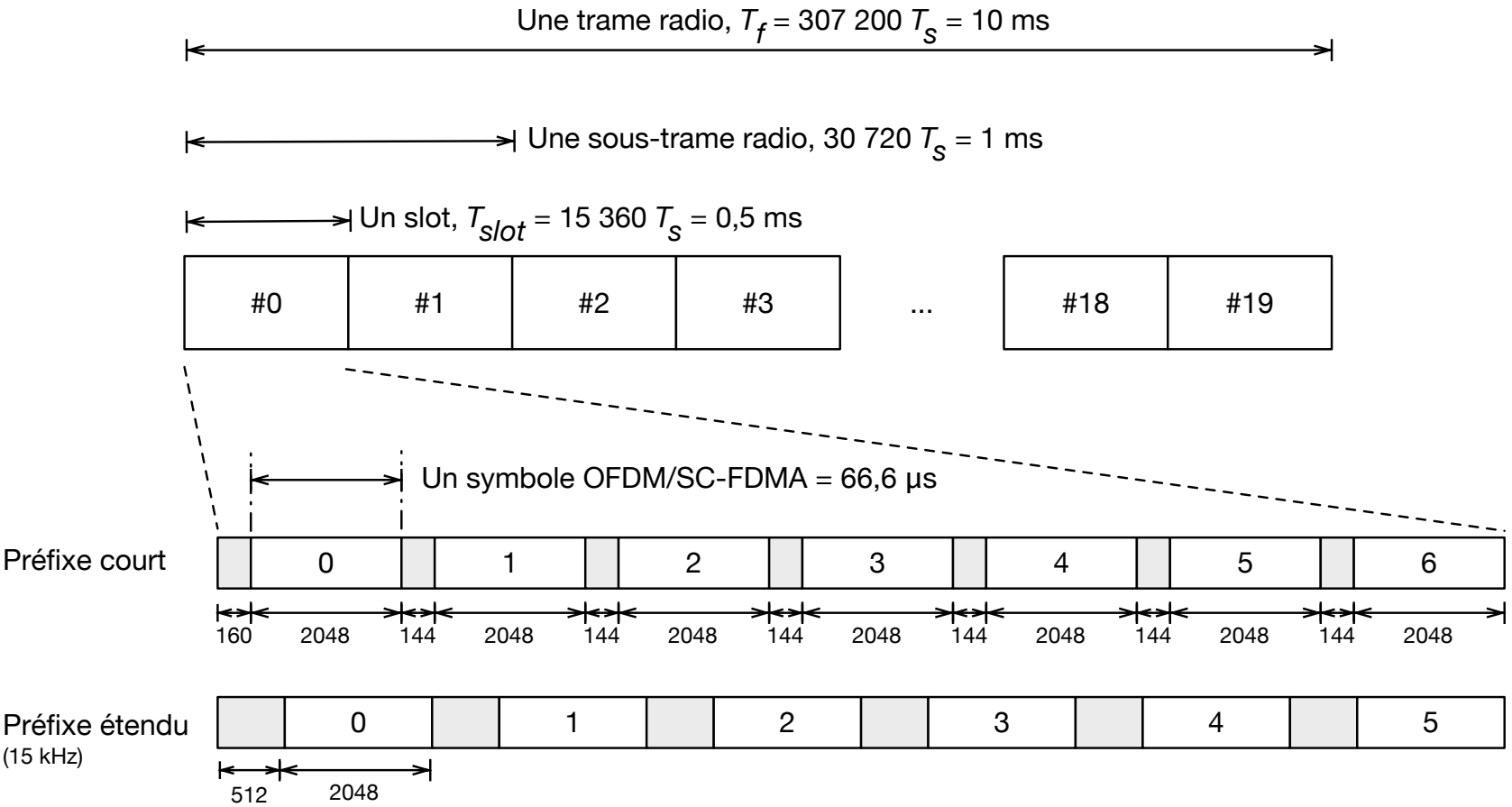

Figure : Structure de trame type 1 en LTE FDD pour une bande de 20 MHz (d'après [1]).

Signaux de référence

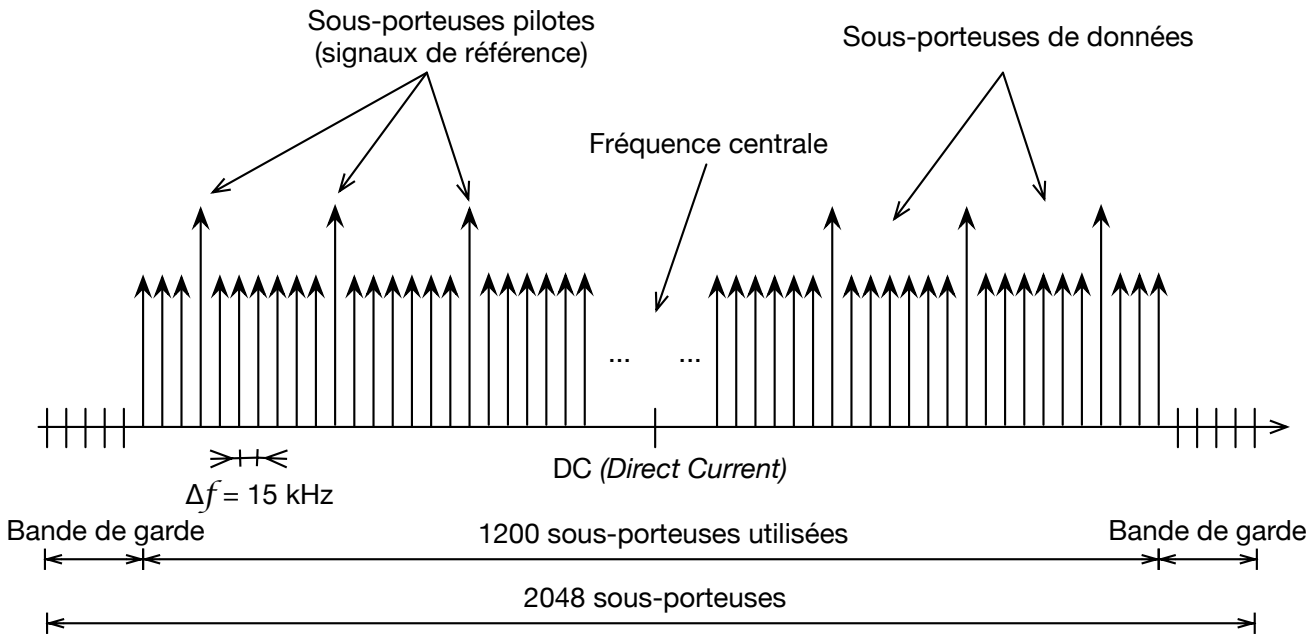

Figure : Sous-porteuses de données, pilotes (signaux de référence) et nulles (bande de garde et fréquence centrale) sur la voie descendante de LTE.

- Le décodage des données nécessite la présence de signaux de référence (RS) qui aident à estimer le canal radio

Élément (RE) et bloc (RB) de ressource I

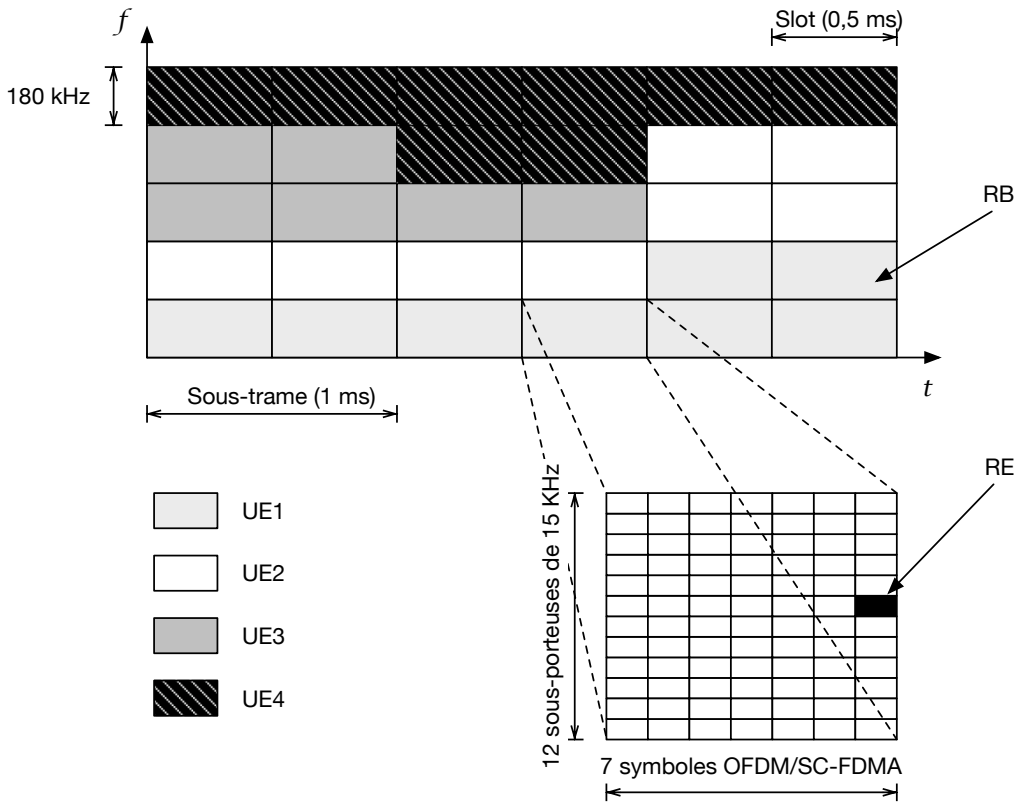

Figure : Éléments de ressource (RE) et blocs de ressources (RB) LTE en configuration normale.

Élément (RE) et bloc (RB) de ressource II

- 1 RE = 1 sous-porteuse $\times$ 1 symbole OFDM/SC-FDMA
- 1 RB = 12 sous-porteuses $\times$ 7 symboles OFDM/SC-FDMA
- Ressource minimale allouée à un UE : 2 RB successifs

Paramètre	**Bande passante (MHz)**					
	1,4	**3**	**5**	**10**	**15**	**20**
Taille FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Sous-porteuses utilisées	72	180	300	600	900	1200
RB	6	15	25	50	75	100

Table : Ressources radio disponibles en fonction de la bande passante (d'après [4]).

A retenir

Organisation des ressources radio : à retenir

- Les ressources sont organisées dans le plan temps-fréquence (ou slot-sous-porteuse)
- 1 trame radio (10 ms) = 10 sous-trames (1 ms) = 20 slots (0,5 ms)
- 1 RE = 1 sous-porteuse $\times$ 1 symbole
- 1 RB = 12 sous-porteuses $\times$ 7 symboles
- Allocation minimale : 2 RB successifs (toutes les 1 ms)
- 20 MHz $\triangleq$ 100 RB

Section 4

Comment se synchroniser avec le réseau ?

Objectifs

- **Objectifs** : synchronisation en temps, fréquence, acquisition du PCI (Physical Cell Identifier) et des informations système
- PCI : 504 identités classées en 168 groupes de 3
- Informations système : identité du réseau, configuration des canaux communs, paramètres de resélection et de handover, informations sur les cellules voisines. Elles sont organisées en un MIB (Master Information Block) et plusieurs SIB (System Information Block)

Canaux physiques voie descendante

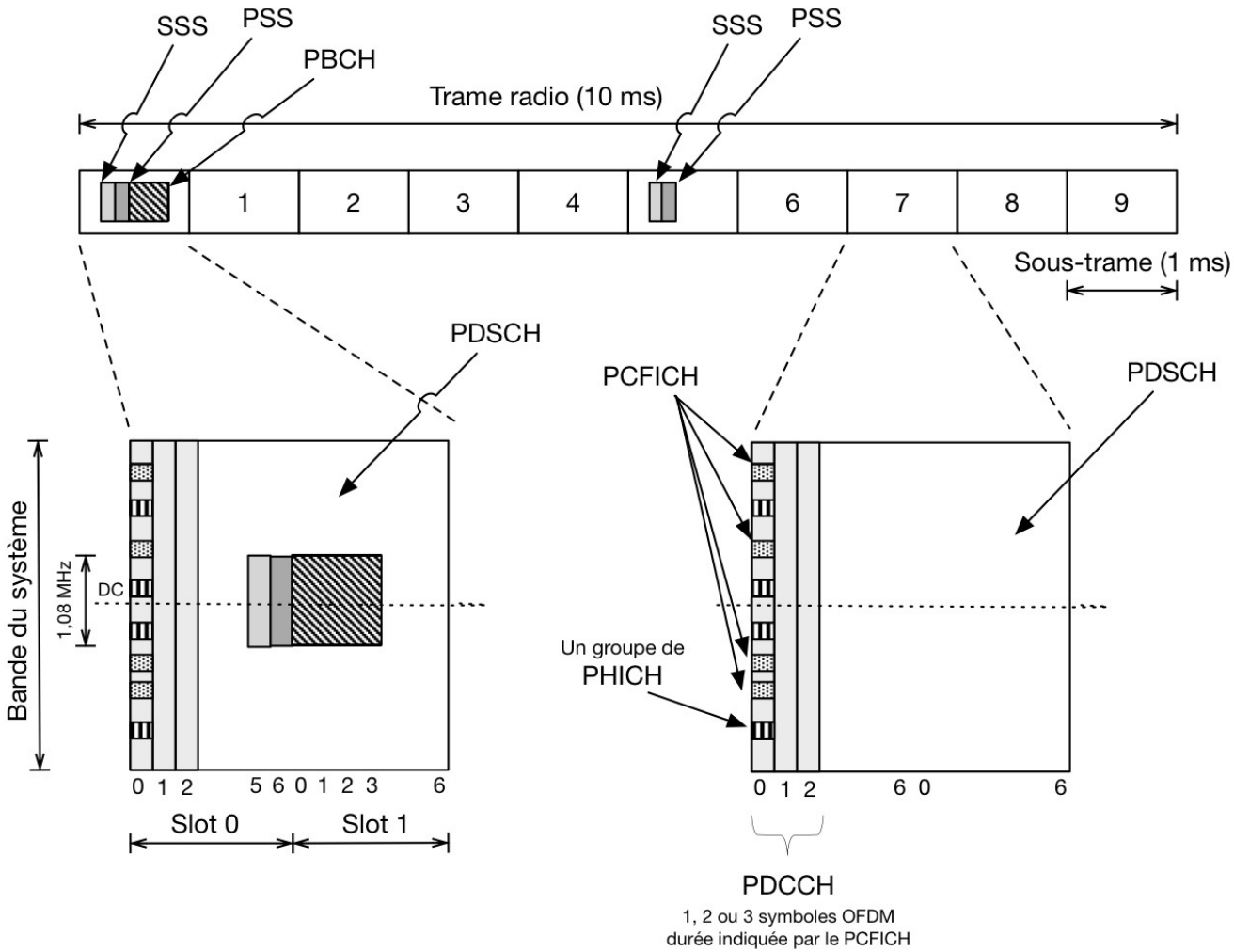

Figure : Positions des canaux et signaux physiques.

Canaux de transport et logiques

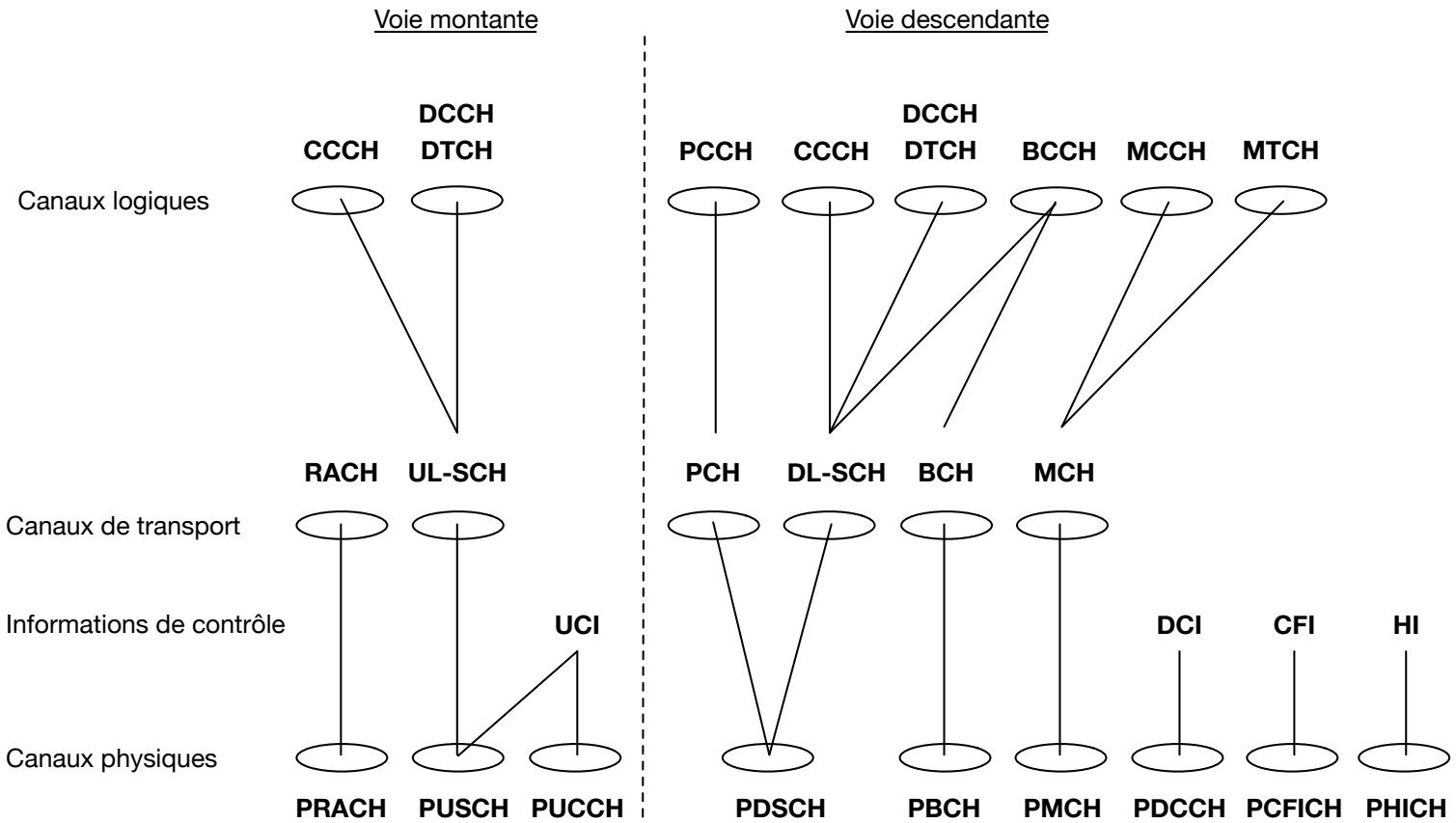

Figure : Mise en correspondance des canaux.

Recherche de cellule I

1. **Recherche de la porteuse** la plus puissante dans le spectre de l'opérateur
2. **Décodage du PSS** (62 sous-porteuses au centre de la bande quelque soit sa largeur) $\Rightarrow$ le PSS diffuse une séquence parmi 3
3. **Décodage du SSS** $\Rightarrow$ le SSS diffuse 2 séquences pseudo-aléatoires de 62 bits pour les slots 0 et 10, il y a 168 paires possibles
4. **Evaluation de la qualité radio** sur les RS $\Rightarrow$ l'UE est synchronisé si la qualité est suffisante : la séquence utilisée et la position des RS dépendent du PCI, les RS des 6 cellules voisines n'interfèrent pas
5. **Décodage du PBCH** $\Rightarrow$ MIB (Master Information Block), configuration antennaire : la position du PBCH ne dépend pas de la largeur de bande, le PBCH est ebrouillé par une séquence qui dépend du PCI

Recherche de cellule II

Le MIB contient :

- la largeur de bande (# de RB)
- le paramétrage du PHICH
- le numéro de la trame

6. **Décodage du PCFICH** $\Rightarrow$ nombre de symboles OFDM dédiés aux PDCCH
7. **Décodage du PDCCH** $\Rightarrow$ message DCI (SI-RNTI) indiquant la position du SIB1 sur le PDSCH
8. **Décodage du SIB1** $\Rightarrow$ ordonnancement des autres SIB
9. Les SIB (System Information Block) sont reçus sur le PDSCH

Recherche de cellule III

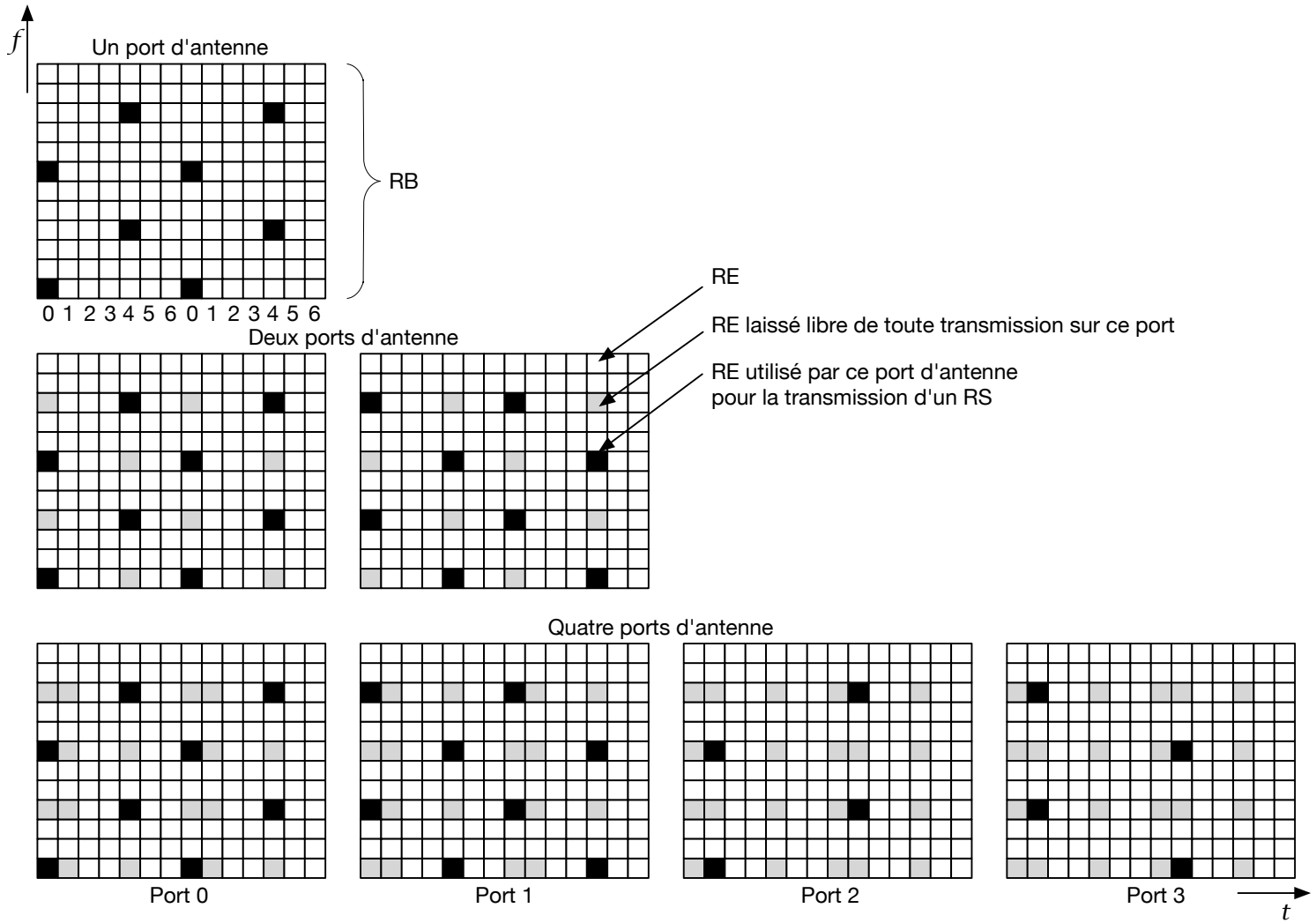

Figure : Signaux de référence (d'après [1]).

Section 5

Comment accéder au réseau ?

Objectifs

- Objectifs :
  - Établissement ou rétablissement de connexion RRC
  - handover intra-système
  - lors de l'arrivée de données DL et UL alors que l'UE a perdu la synchronisation avec le réseau
- 2 types d'accès aléatoire : en compétition / sans conflit
  - Accès en compétition : peut être utilisé dans tous les cas
  - Accès sans conflit : handover ou arrivée de données DL
- Transmission PRACH sur la voie montante pour l'accès puis transmission d'un message CCCH indiquant la raison de l'accès

Canaux physiques voie montante I

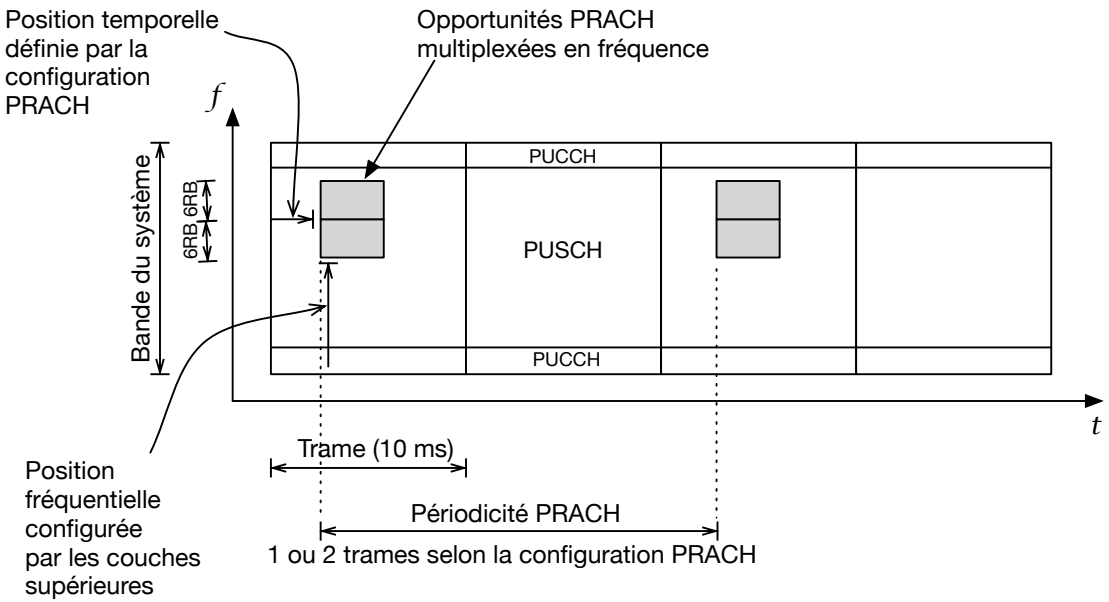

Figure : Position du PRACH, du PUSCH et du PUCCH dans la sous-trame LTE.

Canaux physiques voie montante II

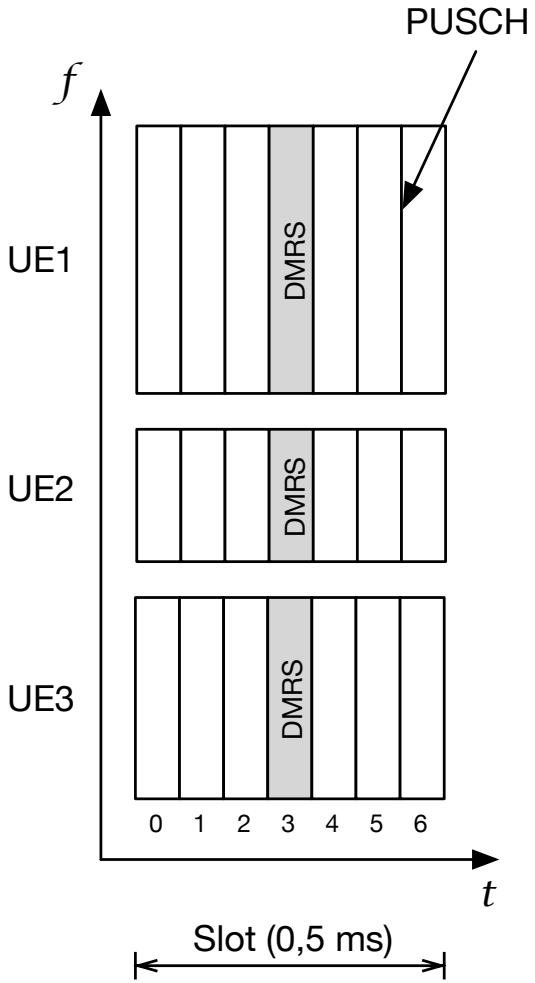

Figure : DMRS lors d'une transmission PUSCH (d'après [1]).

Canaux de transport et logiques

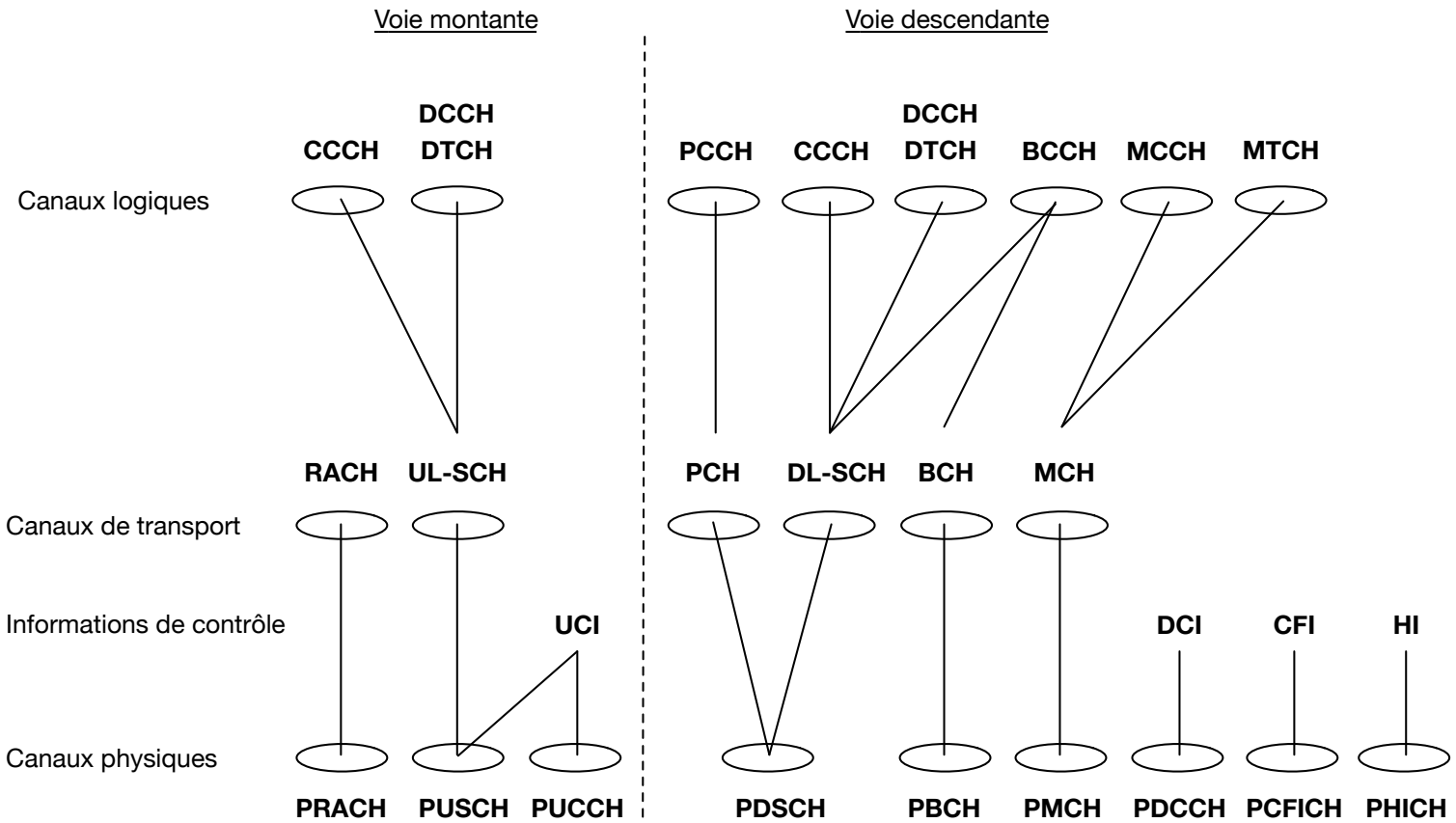

Figure : Mise en correspondance des canaux.

Accès en compétition I

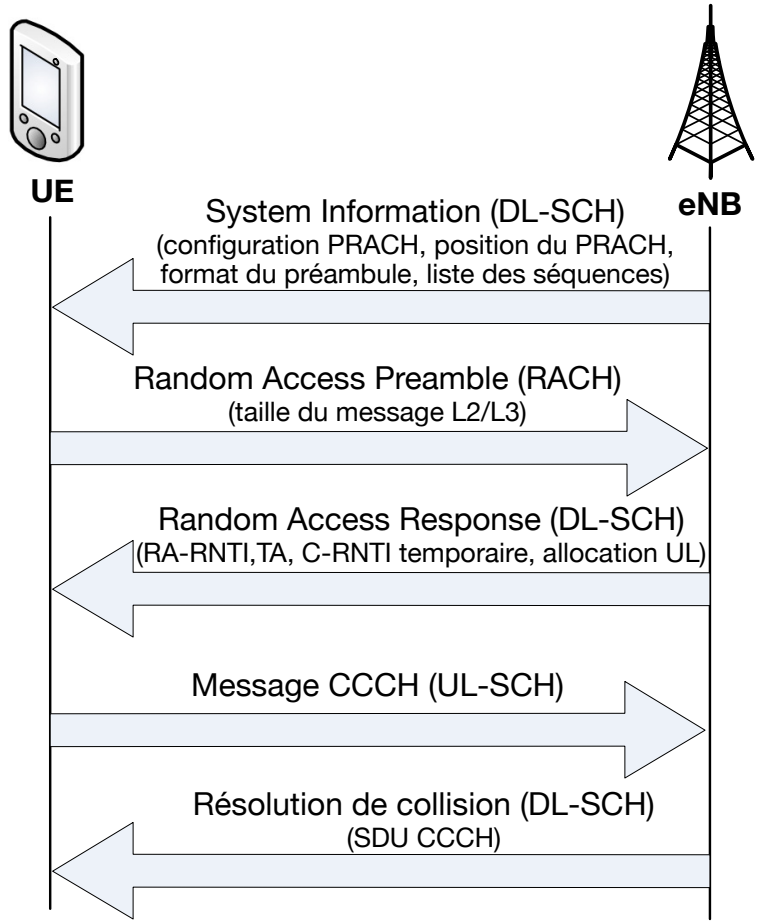

Figure : Accès aléatoire en compétition en LTE.

Accès en compétition II

1) l'UE obtient des SIB la configuration PRACH, la position fréquentielle du PRACH, le format du préambule, la puissance de réception cible et la liste des séquences à utiliser (64 séquences de Zadoff-Chu en tout, dont une partie est réservée à l'accès sans conflit)
3) l'UE choisit de manière aléatoire une séquences parmi celles disponibles
4) Envoi du préambule sur le PRACH avec contrôle de puissance en boucle ouverte : l'UE tente de compenser l'affaiblissement de parcours en se fondant sur les mesures faites sur les RS DL $\Rightarrow$ faciliter la détection des séquences
   - *Collision* : plusieurs UE ont utilisé la même séquence en même temps
   - *Capture* : l'eNB parvient à décoder un des messages en collision

Accès en compétition III

5) En cas de non réponse : *power ramping* (comme en CDMA), c-a-d on augmente progressivement la puissance
6) Le RAR sur PDCCH identifie le préambule décodé + donne l'avance en temps (TA) + une allocation UL + une identité temporaire (C-RNTI temporaire)
7) Message CCCH sur PUSCH = (par exemple) demande de connexion RRC + C-RNTI temporaire
8) Résolution de collision : recopie du message CCCH sur le DL. L'UE qui reconnaît son message adopte comme C-RNTI le C-RNTI temporaire, les autres se retirent

Accès sans conflit

- L'UE possède une identité (C-RNTI) valide
- L'eNB envoie sur le PDCCH un message (DCI) la séquence de Zadoff-Chu à utiliser
- Pas de collision possible, pas de phase de résolution de collision

Avance en temps I

- **Objectif** : synchroniser la réception des signaux UL, maintenir l'orthogonalité entre UE d'une même cellule

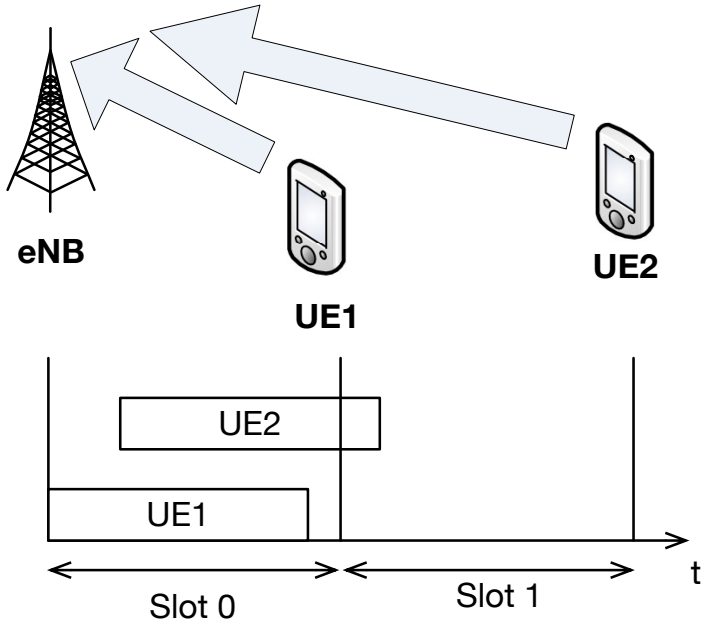

Figure : Problématique de l'avance en temps.

Avance en temps II

- Première mesure à l'accès :
  - L'eNB estime l'avance en temps grâce au préambule PRACH
  - Il envoie une commande (absolue) de 11 bits dans le RAR (Random Access Response)
  - Ajustement dans une fourchette de 0 à $0,67$ ms
  - La valeur maximale correspond à une distance de 100 Km
- Mises à jour régulières (mobilité, handover, période d'inactivité)
  - L'eNB estime l'avance en temps grâce aux SRS ou remontées CQI
  - L'eNB envoie des commandes sur le PDSCH 1 ou 2 fois par s
  - Si un UE n'a rien reçu après un certain délai, il est considéré comme désynchronisé et doit faire un accès aléatoire

Section 6

Comment envoyer et recevoir des données ?

Objectifs

- **Objectifs** :
  - Allouer des ressources : indiquer à l'UE les ressources radio sur lesquelles il va recevoir des données sur le DL-SCH ou sur lesquelles il va pouvoir envoyer des données sur UL-SCH
  - Ordonnancer les UEs : attribuer les ressources (RBs) aux UEs en fonction de leurs demandes et de leurs conditions radio
  - Contrôler les erreurs : permettre des retransmissions grâce à l'HARQ et à l'ARQ
  - Remontée des mesures : l'UE indique au réseau la qualité du canal radio sur la voie descendante ou sa matrice de précodage MIMO préférée

Allocation des ressources I

- La localisation des ressources dans la sous-trame ainsi que la modulation et le codage sont décrits dans les messages DCI transmis dans les PDCCH.

Format	Description
0	Allocation de ressource sur le PUSCH
1	Allocation de ressource PDSCH en modes TM1, TM2, TM7
1A	Allocation PDSCH compacte et signature PRACH
1B	Allocation de ressource PDSCH en mode TM6
1C	Allocation PDSCH très compacte
1D	Allocation PDSCH compacte en mode TM5
2	Allocation PDSCH compacte en mode TM4
2A	Allocation PDSCH compacte en mode TM3
3	Contrôle de puissance sur PUCCH/PUSCH (2 bits)
3A	Contrôle de puissance sur PUCCH/PUSCH (1 bit)

Table : Formats des messages DCI.

Allocation des ressources II

- DCI 0 = allocation des ressources sur le PUSCH
- DCI 1 à 2A = allocation des ressources sur le PDSCH
- TM1 (SIMO), TM2 (TxDiv) et TM7 (formation de faisceaux) ne nécessitent pas d'information spécifique à la transmission $\Rightarrow$ DCI 1
- $\neq$ TM6 (précodage de rang 1, 1B), TM5 (MU-MIMO, 1D), TM3 et TM4 (multiplexage spatial, 2 et 2A)
- DCI 1A = allocation + séquence PRACH pour accès sans conflit
- DCI 1C = allocation compacte (pas de MIMO, pas d'info. HARQ, modulation QPSK) $\Rightarrow$ réponse à accès aléatoire, diffusion de SIB ou paging
- DCI 3 et 3A = commande de contrôle de puissance sur l'UL

Allocation des ressources III

- Exemple DCI 0 :
  - Un drapeau permettant de différencier 1 et 1A
  - Un drapeau indiquant un saut de fréquence sur le PUSCH
  - Allocation des blocs de ressources
  - Schéma de modulation et de codage, version de redondance
  - Indication HARQ de nouvelle transmission
  - Une commande de contrôle de puissance UL
  - Décalage cyclique à appliquer à la séquence de ZC pour les DMRS
  - Une demande d'envoi de CQI
- Chaque DCI est associé à un CRC embrouillé avec une adresse RNTI :
  - C-RNTI = s'adresser à un unique UE
  - P-RNTI = message de paging
  - SI-RNTI = SIB
  - RA-RNTI = réponse à un accès aléatoire

Ordonnancement I

- L'ordonnancement est rapide (toutes les 1 ms) et adaptatif (la modulation et le codage sont adaptés aux conditions radio)
- DL : les choix sont fondés sur les remontée de qualité radio (CQI), l'état des mémoires et les priorités entre canaux logiques
- UL : l'UE doit remonter l'état de ses mémoires et ses besoins en ressource soit en utilisant le PUCCH (requête de scheduling) ou l'UL-SCH (messages de contrôle MAC)

Ordonnancement II

- Algorithme : LTE offre une liberté supplémentaire par rapport à HSPA, la possibilité d'ordonnancer sur des sous-porteuses différentes

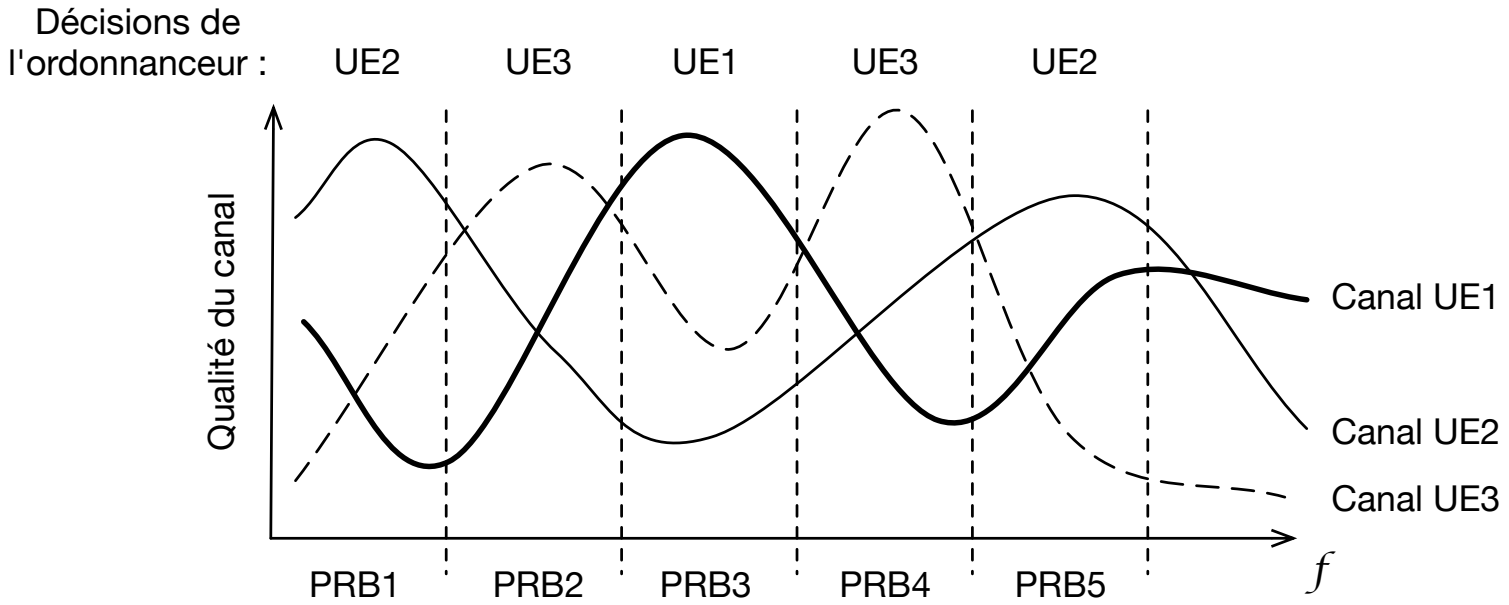

Figure : Ordonnancement paquet dans le domaine fréquentiel (FDPS) en LTE.

Ordonnancement III

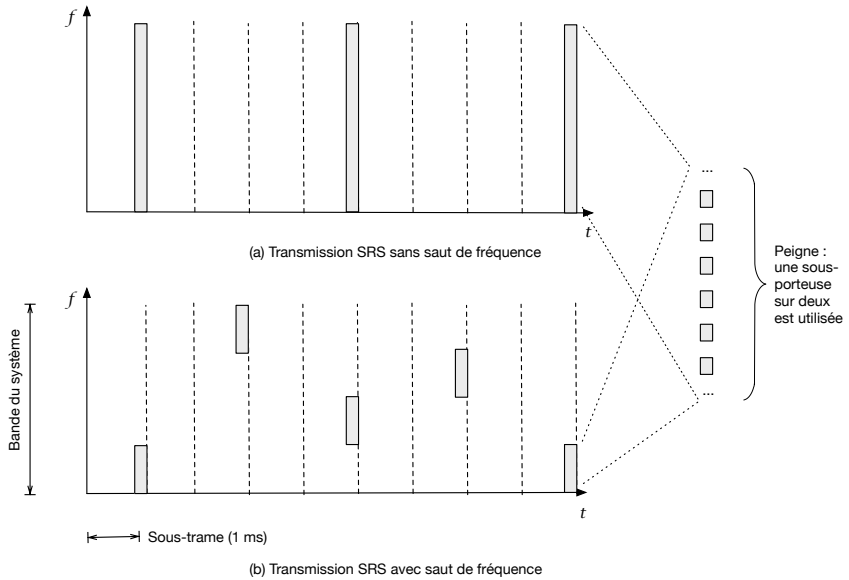

Figure : Transmissions de signaux de référence de sonde (SRS).

- L'eNB estime la qualité du canal sur la voie montante grâce aux SRS
- Le SRS est émis sur une bande de fréquence supérieure à celle allouée à l'UE
- Les SRS de différents UE sont multiplexés en utilisant la périodicité, la largeur de bande, le codage des séquences transmises, les sous-porteuses paires ou impaires

ARQ et HARQ

- Comme en HSPA, HARQ au niveau MAC et ARQ au niveau RLC
- HARQ DL : le numéro de séquence dans le PDCCH, les ACK/NACK dans le PUSCH (avec des données) ou le PUCCH
- HARQ UL : ACK/NACK sur le PHICH
- ARQ : modes transparent TM (pas d'en tête, pas de segmentation ou de concaténation), non-acquitté UM (en-tête avec numéro de séquence), acquitté AM (ARQ)

Remontée des mesures

- Mesures de qualité radio :
  - **CQI** (Channel Quality Indicator) : modulation (QPSK, 16-QAM ou 64-QAM) et taille maximale du bloc de transport que l'UE peut recevoir avec BLER<10%
  - **RI** (Rank Indicator) : rang de la transmission DL = nombre de couches spatiales indépendantes pouvant être utilisées
  - **PMI** (Precoding Matrix Indicator) : matrice de précodage W préférrée de l'UE pour les modes utilisant la boucle fermée
- Canaux physiques :
  - PUSCH : pour les remontées apériodiques et avec des données
  - PUCCH : pour les remontées périodiques
- Périodicité :
  - **Remontées apériodiques** : la mesure est demandée par le réseau
  - **Remontées périodiques** : la période est configurée par les couches supérieures

Section 7

Catégories de terminaux

Catégories de terminaux

Caractéristiques	Cat. 1	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Cat. 5
Nombre max. de bits par TTI (DL)	10296	51024	102048	150752	299552
Nombre max. de bits par TTI (UL)	5160	25456	51024	51024	75376
Débit max. (DL)	10 Mbps	50 Mbps	100 Mbps	150 Mbps	300 Mbps
Débit max. (UL)	5 Mbps	25 Mbps	50 Mbps	50 Mbps	75 Mbps
64 QAM (UL)	Non	Non	Non	Non	Oui
MIMO (DL)	Option.	2×2	2×2	2×2	4×4

Table : Catégories de terminaux LTE.

- La Cat. 5 n'est pas susceptible d'apparaître de si tôt (affichage)

Section 8

Synthèse sur les canaux

Canaux physiques : voie descendante I

- **PDSCH** (Physical Downlink Shared Ch.) : canal physique partagé de données
- **RS** (Reference Signals) : pilotes servant à faire des mesures de qualité radio et à estimer le signal sur la voie descendante
- **SS** (Synchronization Signals) = PSS (Primary)+SSS (Secondary) : permettent la synchronisation fréquentielle et temporelle des UE
- **PBCH** (Physical Broadcast Ch.) : voie balise
- **PCFICH** (Physical Control Format Indicator Ch.) : indique aux UE le nombre de symboles OFDM utilisés pour le contrôle (CFI)
- **PDCCH** (Physical Downlink Control Ch.) : informations de contrôle (DCI : allocation de ressource, identité des UE, informations HARQ, MIMO, etc)
- **PHICH** (Physical Hybrid ARQ Indicator Ch.) : réponses ACK/NACK aux transmissions HARQ d'un UE (HI)

Canaux physiques : voie montante I

- En voie montante, l'UE ne peut pas multiplexer dans le domaine fréquentiel différents canaux physique à cause de la transmission sur porteuse unique $\Rightarrow$ canaux physiques et signaux de référence sont multiplexés en temps
- **DMRS** (Demodulation Reference Signal) : estimation du canal et mesures de qualité radio sur le spectre du signal émis par l'UE. Les DMRS sont associés au PUCCH ou au PUSCH
- **SRS** (Sounding Reference Signal) : utilisés par l'ordonnanceur pour l'estimation de la qualité radio sur un large spectre
- **PUCCH** (Physical Uplink Control Ch.) : informations de contrôle UCI (Uplink Control Info.) relatives à la qualité du signal (CQI), aux MIMO (boucle fermée) ou à l'HARQ (ACK/NACK)
- **PUSCH** (Physical Uplink Shared Ch.) : canal partagé de données et de contrôle
- Si un UE a des données à transmettre, il utilise le PUSCH pour ses données et le contrôle. Sinon, il utilise le PUCCH pour le contrôle

Canaux de transport : voie descendante

- **DL-SCH** (DL Shared Ch.) : canal partagé de données associé au PDSCH
- **PCH** (Paging Ch.) : diffusion des messages de paging sur le PDSCH
- **BCH** (Broadcast Ch.) : diffusion des information système associé au PBCH pour informer les UE de l'ordonnancement des SIB (System Info. Blocks). Les SIB sont diffusés sur le DL-SCH
- **DCI** (DL Control Indicator) : informations de contrôle véhiculées sur le PDCCH (formats de transport, allocations de ressources, informations HARQ et MIMO, commandes de contrôle de puissance)
- **CFI** (Control Format Indicator) : nombre de symboles OFDM (1, 2 ou 3) utilisés par les canaux PDCCH au début de chaque sous-trame, associé au PCFICH
- **HI** (HARQ Indicator) : ACK ou NACK après une transmission sur le UL-SCH, associé au PHICH

Canaux de transport : voie montante

- **RACH** (Random Access Ch.) : accès aléatoire
- **UL-SCH** (UL Share Ch.) : canal partagé de données et de contrôle associé au PUSCH. Données utilisateur et informations du plan contrôle sont multiplexés
- **UCI** (UL Control Indicator) : contrôle véhiculé sur le PUCCH (qualité du canal CQI, informations MIMO boucle fermée PMI/RI, ACK/NACK de l'HARQ, requêtes de scheduling)

Canaux logiques

Canal logique	Type	Description	Voie
BCCH	Contrôle	Informations système	DL
PCCH	Contrôle	*Paging*	DL
CCCH	Contrôle	Signalisation sans conn. RRC	UL/DL
DCCH	Contrôle	Signalisation dédiée	UL/DL
DTCH	Trafic	Plan utilisateur	UL/DL

Table : Canaux logiques en LTE sur la voie descendante (DL) et la voie montante (UL).

- **BCCH** (Broadcast COntrol Ch.) : informations système, associé au BCH pour le MIB et au DL-SCH pour les SIB
- **PCCH** (Paging Control Ch.) : paging, associé au PCH
- **CCCH** (Common Control Ch.) : messages de signalisation entre le réseau et les UE **sans** connexion RRC, associé aux DL-SCH et UL-SCH
- **DCCH** (Dedicated Control Ch.) : messages de signalisation entre le réseau et les UE **avec** connexion RRC, associé aux DL-SCH et UL-SCH

Section 9

Conclusion

Conclusion

LTE :

- Une norme toute nouvelle
- Une certaine simplicité qui fait penser au GSM
- Des similitudes avec la 3G (canaux, HARQ, MAC, RLC, etc)
- Des nouveautés (MIMO, MU-MIMO, transmission multiporteuses)

La suite, LTE-A :

- R10, R11 sont définies, R12 est en discussion
- Débit crête de l'ordre de 1Gbps
- Agrégation de porteuse, allocation de bande discontinue sur l'UL, MIMO 8×8, relais, réseaux hétérogènes, CoMP, Self-Organized Networks, MBMS, etc

References I

3GPP.
Technical Specification 36.211, Physical channels and modulation, Dec. 2009.

3GPP.
Technical Specification 36.323, Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification, Jun. 2009.

3GPP.
Technical Specification 36.300, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) ; Overall description, Apr. 2010.

3GPP.
Technical Specification 36.104, Base Station (BS) radio transmission and reception, Jun. 2011.

References II

S. M. Alamouti.
A simple transmit diversity technique for wireless communications.
IEEE J. on Selected Areas in Communications, 16(8) :1451–1458, Oct. 1998.