



Introduction à WiMAX

Marceau Coupechoux

Philippe Godlewski

Philippe Martins

ENST, Département Informatique et Réseaux

Plan du cours

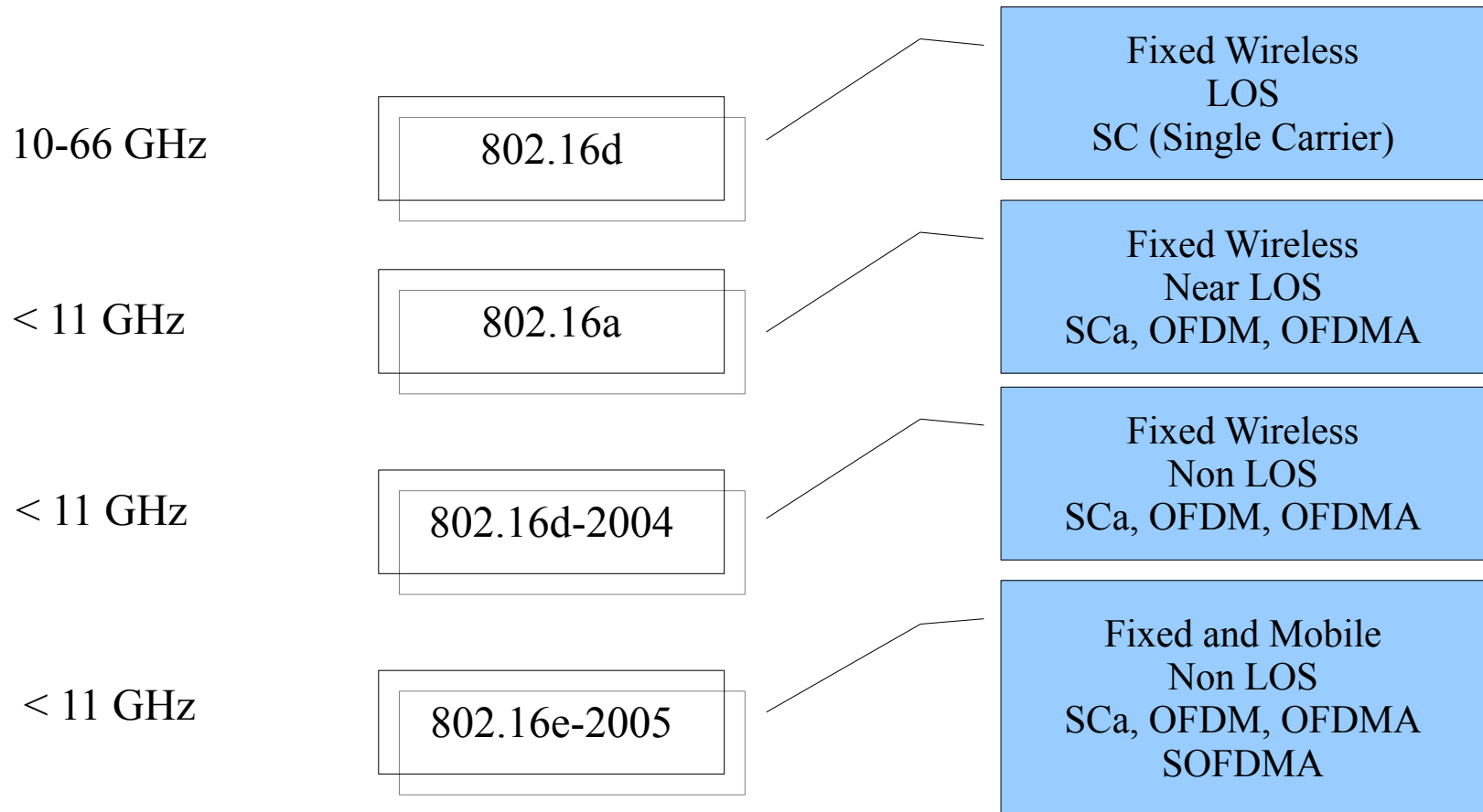
- Introduction
- Normes, spécifications et spectre
- Pile de protocoles
- Couche PHY
 - Transmission multi-porteuse
 - OFDMA/SOFDMA
 - Duplexage
 - Modulation et codage
 - Solutions antennaires avancées
- Couche MAC
 - Sous-couche de convergence
 - Structure de trame
 - Network entry
 - Connexions
 - Format des PDU MAC
 - Qualité de service
 - Contrôle de l'interface air : ARQ, Adaptation de lien
 - Hand-over

Introduction

- WiMAX = « [Worldwide Interoperability for Microwave Access](#) »
- Technologie radio WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) issue de la norme IEEE 802.16e
- [Applications et marchés](#) :
 - Accès large bande (*fixed wireless*) : boucle locale radio type DSL pour les zones avec de faibles infrastructures (rurales ou pays sous-développés).
 - Accès haut débit nomade/mobile : grandes villes des pays développés.
 - Réseau d'amenée (*backhauling*).
- [Principales caractéristiques techniques](#) :
 - Transmissions en non ligne de vue (NLOS),
 - OFDMA/SOFDMA,
 - Antennes intelligentes et MIMO,
 - Adaptation de lien,
 - HARQ,
 - Support de la qualité de service,
 - Natif IP.

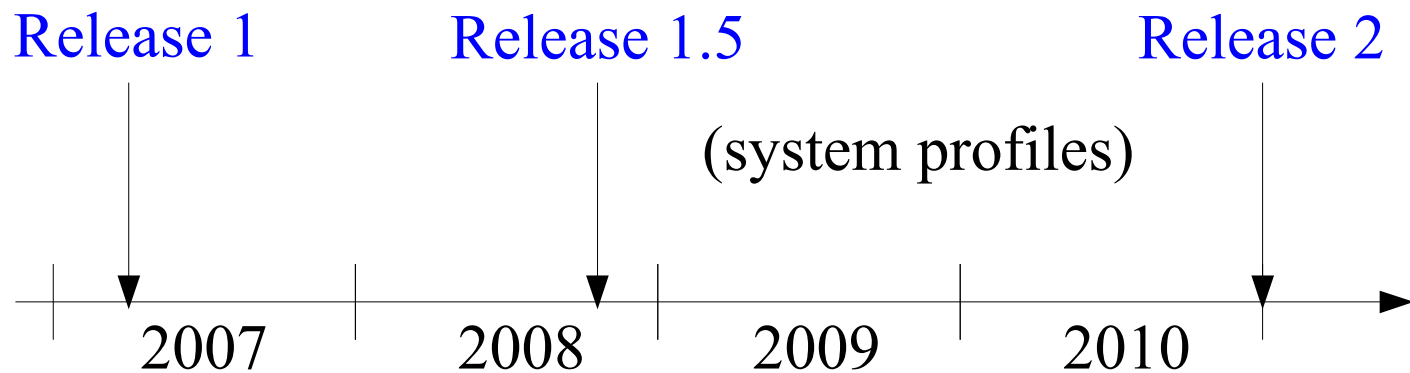
Normes, spécifications et spectre

- IEEE a normalisé une famille de normes 802.16 – Wireless MAN



Normes, spécifications et spectre

- IEEE n'a normalisé que les couches PHY et MAC avec une série d'options.
- Le **WiMAX Forum** est un consortium d'industriels chargé de définir :
 - Des profiles : choix spécifiques d'options dans la norme IEEE.
 - Une architecture de bout en bout : comment déployer WiMAX ?
 - Une certification : tests d'inter-opérabilité entre équipements de différents constructeurs (label).
- Le WiMAX Forum est organisé en groupes de travail, parmi lesquels :
 - Service Provider Working Group (SPWG) : définit les cahiers des charges.
 - Network Working Group (NWG) : définition de l'architecture réseau



[3]

Normes, spécifications et spectre

- Profils Radio des différentes releases (source : Nokia Siemens Networks) :
- **Release 1.0** :
 - Interface air : 802.16-2004 et 802.16e-2005
 - Réseau : NWG Release 1.0/1.5
 - Largeurs de bande : 8.75 (Corée), 5, 10 Mhz
 - Duplexage TDD
 - SIMO 1x2 (Wave 1) MIMO et beamforming (DL 2x2, UL 1x2 Wave 2)
- **Release 1.5** :
 - Interface air : 802.16REV2
 - Réseau : NWG Release 1.5
 - Nouvelles largeurs de bandes
 - Duplexage TDD/FDD
 - LBS, Relais multi-bonds
- **Release 2.0** :
 - Interface air : 802.16m
 - Réseau : NWG Release 2.0

Normes, spécifications et spectre

- Différences entre « < 11 GHz » et « 10-66 GHz » :
 -
 - 6GHz : borne supérieure ITU pour les communications mobiles.
 - 6-11GHz : bandes licenciées et non licenciées, propagation NLOS et multi-trajet, effet de masque (*shadowing*), PHY fondée sur OFDM.
 - 11-66GHz : bandes licenciées, propagation LOS et AWGN, PHY fondée sur Single Carrier (SC).



[4]

Normes, spécifications et spectre

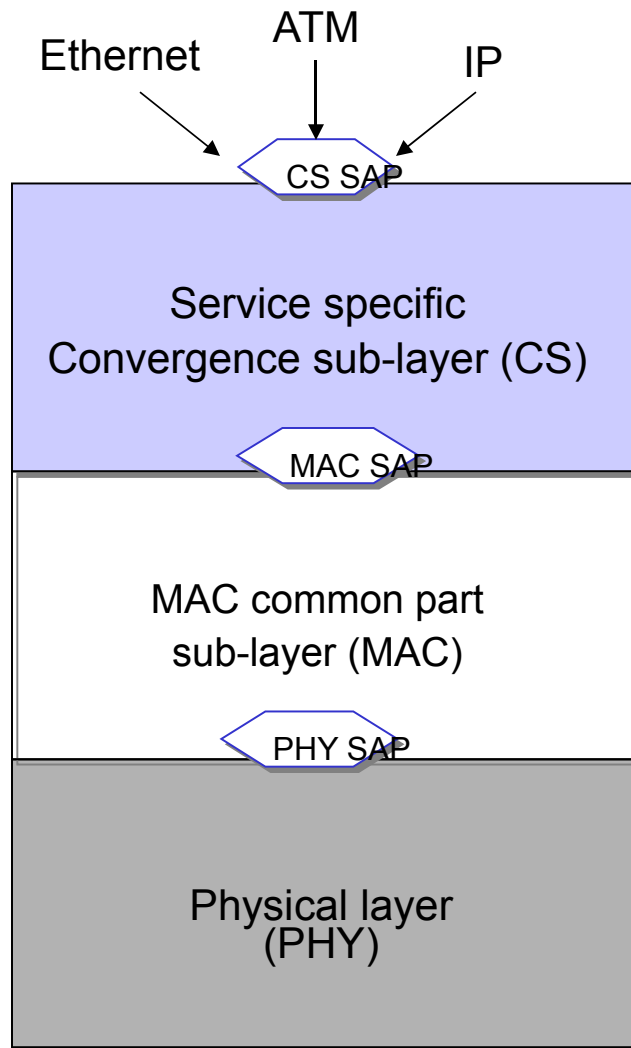
- Principales bandes disponibles pour WiMAX [4] :
- **2.3/2.5 GHz** : bandes licenciées, applications mobiles large bande.
- **3.5/3.7 GHz** : bandes licenciées, applications nomades, *Fixed Wireless (indoor)*.
- **5.8 GHz** : bandes non-licenciées, *Fixed Wireless (outdoor)*.

- Europe : 2.5, 3.5, 5.8 GHz,
- Canada : 2.3, 2.5, 3.5, 5.8 GHz,
- Etats-Unis : 2.3, 2.5, 3.7, 5.8 GHz,
- Amérique Latine : 2.5, 3.5, 5.8 GHz,
- Moyen Orient et Afrique : 3.5, 5.8 GHz,
- Russie : 2.3, 2.5, 3.5, 5.8 GHz,
- Asie : 2.3, 2.5, 3.3, 3.5, 5.8 GHz.

Normes, spécifications et spectre

- En juillet 2006, l'ARCEP a attribué 45 licences régionales WiMAX :
 - Spectre : 15 MHz à 3.5 GHZ (éventuellement des bandes à 3.7 plus tard),
 - Applications visées : couverture haut débit et nomadisme,
 - 1 autorisation nationale (AltiStream) + 2 autorisations par régions + DOM,
 - Possibilité d'un marché secondaire des fréquences,
 - Opérateurs BLR :
 - Conseils Régionaux,
 - MAXTEL (APRR et AltiStream maintenant séparés),
 - Bolloré Télécom (Bolloré et Aéroports de Paris),
 - HDRR (Haut Débit Réseau Régional – TDF),
 - SHD (la Société du Haut Débit – SFR et Neuf Cégétel),
 - France Telecom (Mayotte et Guyane),
 - Guyatel (Guyane),
 - Guétali Haut Débit et STOI Internet (Mayotte).

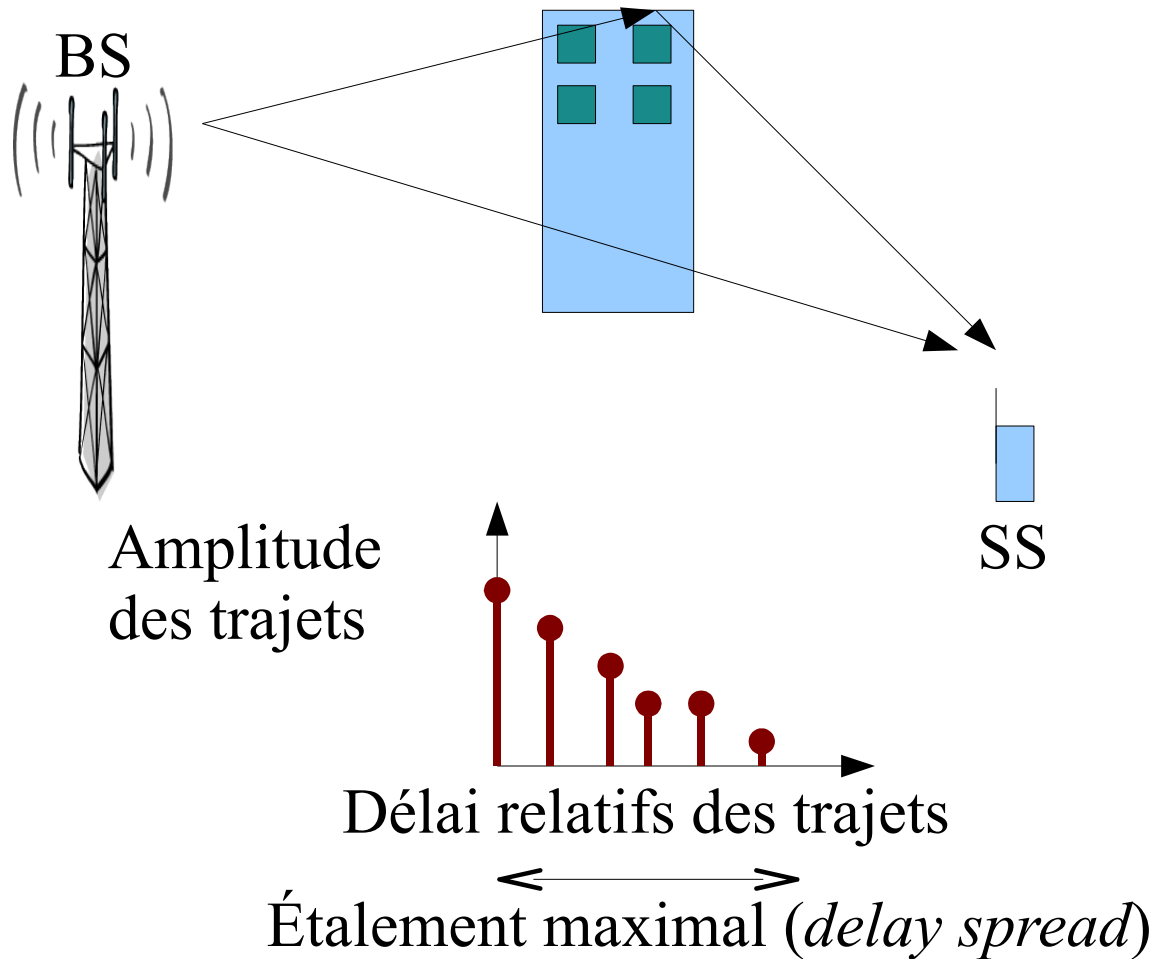
Pile de protocoles



- Convergence sub-layer :
 - Classification des PDU
 - Association avec un identifiant de connexion (CID)
 - ATM CS et Packet CS

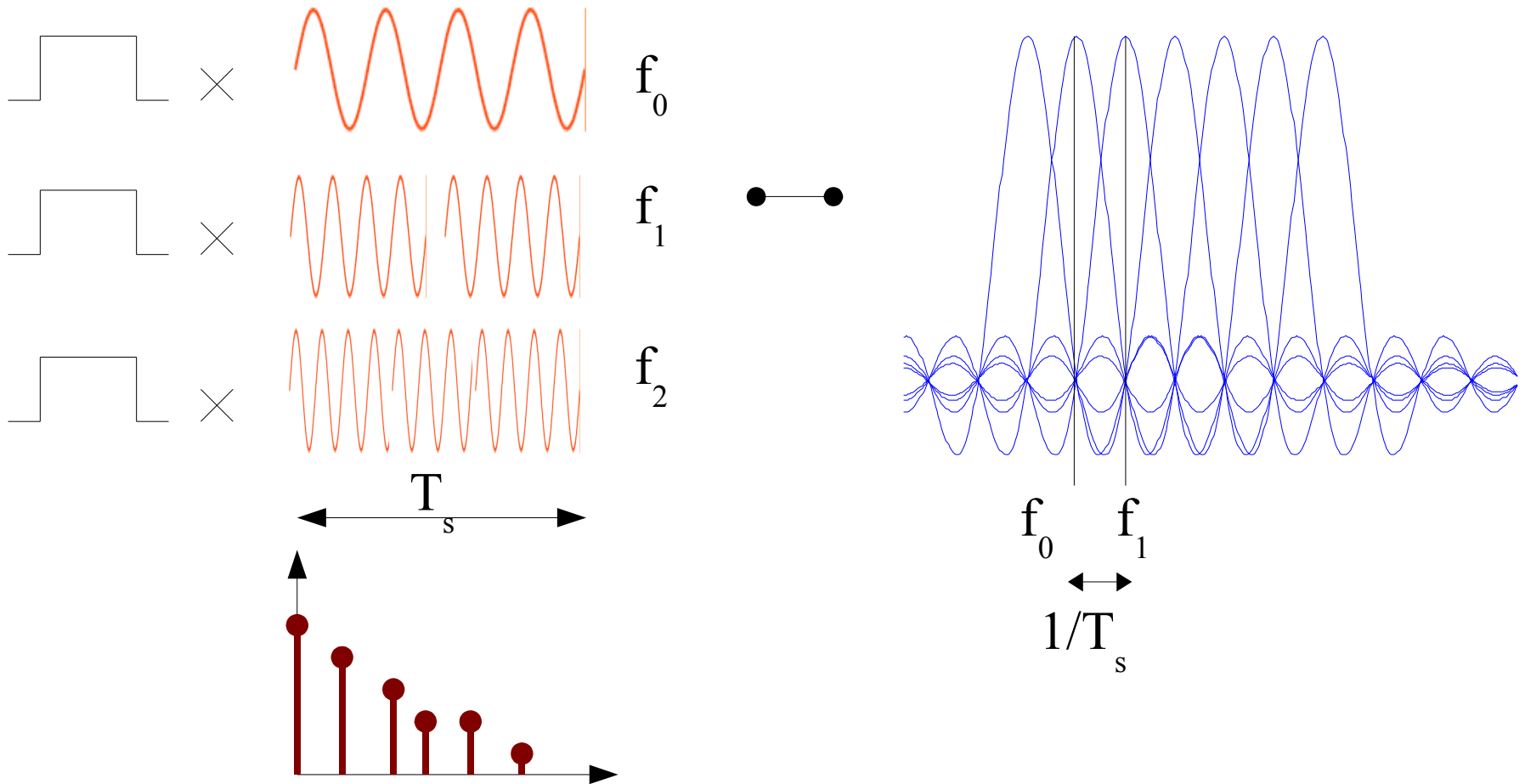
- MAC sub-layer :
 - Accès
 - Allocation de bande passante
 - Établissement de connexion
 - Maintien de la connexion
 - Ordonnancement

- **Propagation multi-trajets :**

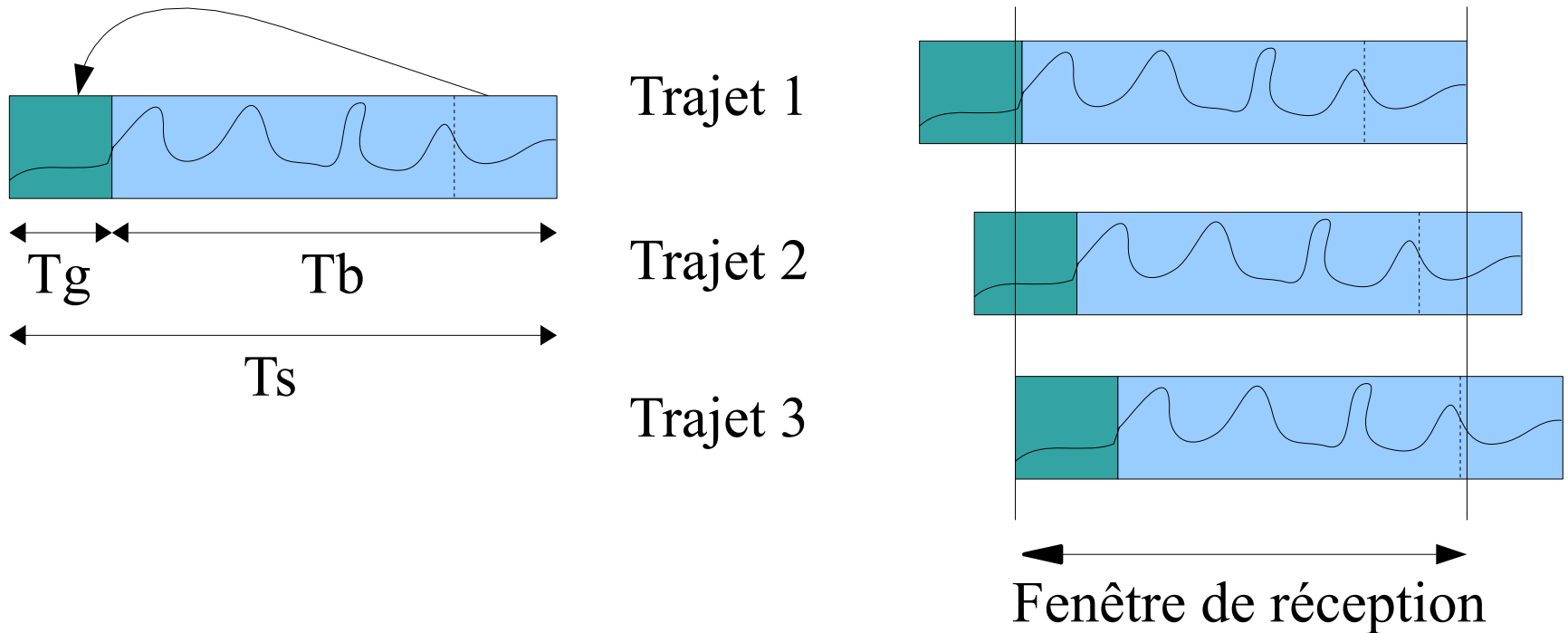


- Propagation multi-trajet > étalement temporel (*delay spread*)
- Bande de cohérence = $1/\text{delay spread}$
- **Canal à évanouissement plat** (*flat fading*) :
 - Bande du signal < Bande de cohérence
 - Temps symbole > Etalement temporel
 - Pas d'interférence entre symboles (simple atténuation et déphasage)
- **Canal sélectif en fréquence** (*frequency selective fading*) :
 - Bande du signal > Bande de cohérence
 - Temps symbole < Etalement temporel
 - L'interférence entre symboles nécessite une égalisation

- **Principe de l'OFDM** : diviser une bande large en sous bandes de largeur inférieure à la bande de cohérence.

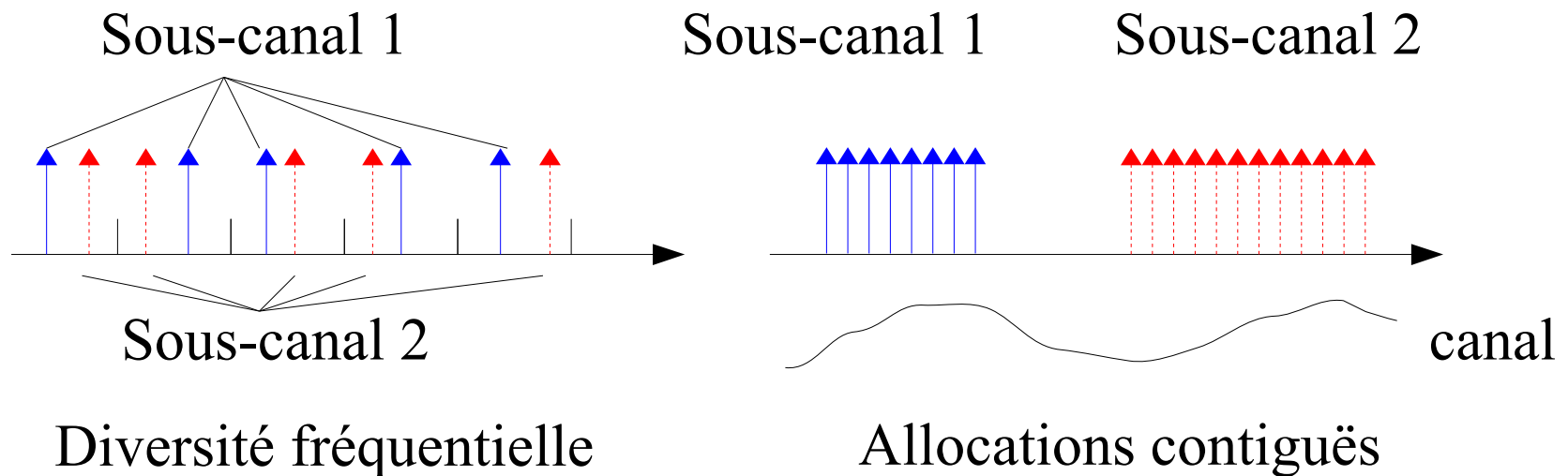


- Pour lutter contre l'interférence entre symboles résiduelle, un intervalle de garde est ajouté.



- Les avantages de la transmission multi-porteuse :
 - Robustesse aux canaux multi-trajets,
 - Le signal est transmis sur des sous-porteuses orthogonales bande étroite
 - Complexité faible du modulateur et du démodulateur (IFFT et FFT),
 - Allocation souple (grâce à l'OFDMA),
 - Efficacité spectrale (la modulation et le codage peuvent être adaptés par sous-porteuse),
 - Adaptation aisée à différentes bandes de fréquence (grâce au SOFDMA).

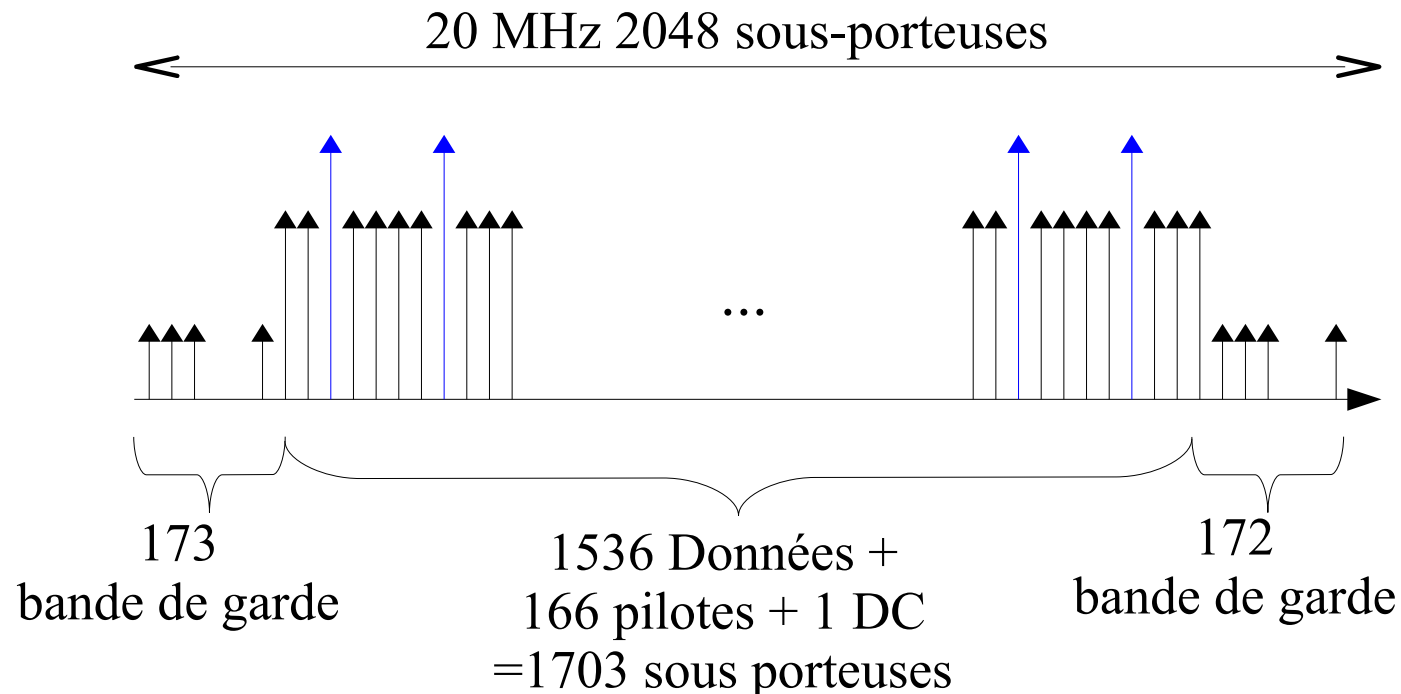
- **OFDMA** : Orthogonal Frequency Division Multiple Access
- On attribue à des **utilisateurs différents** des groupes de sous-porteuses.
- Sens descendant :
 - Allocations permettant de la diversité (cf. permutations PUSC/FUSC),
 - Allocations contiguës de sous-porteuses (cf. AMC).
- Sens montant :
 - Sous canalisation voie montante (*UL sub-channeling PUSC et AMC*).



Couche PHY

OFDMA/SOFDMA

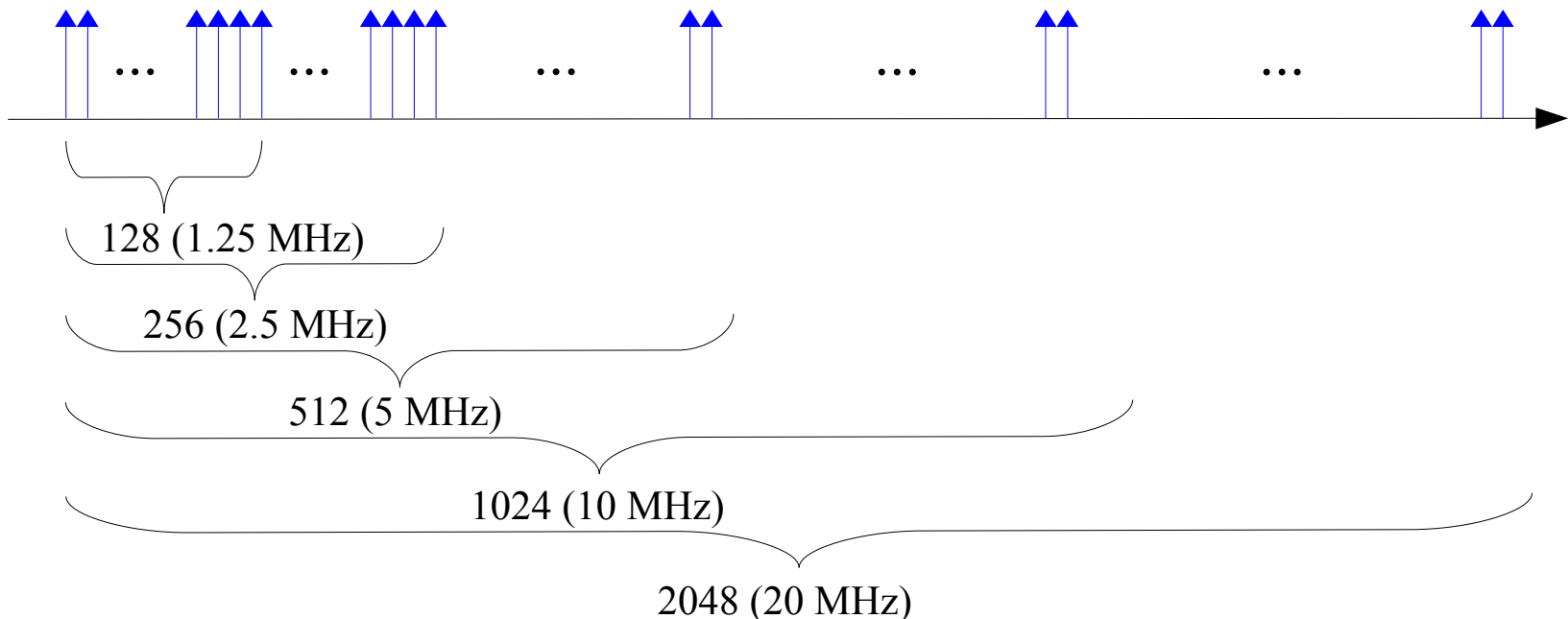
- L'estimation du canal nécessite la présence de **sous-porteuses pilotes** :
 - Plus il y a de pilotes, meilleure est l'estimation du canal mais plus faible est le nombre de sous-porteuses dédiées aux données.
- De part et d'autre de la bande, une bande de garde doit être incluse.
- Exemple : NFFT=2048 sous-porteuses (FUSC DL).



Couche PHY

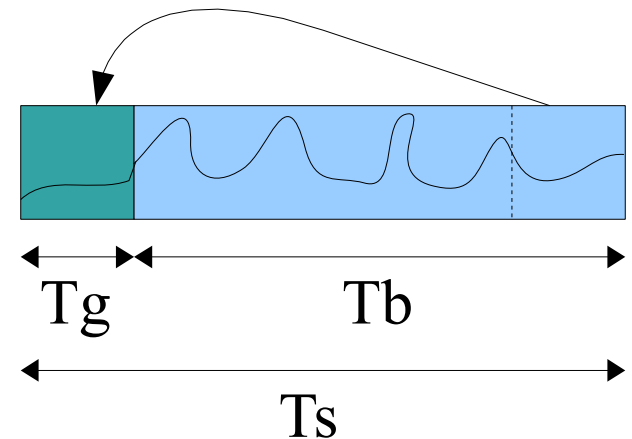
OFDMA/SOFDMA

- **SOFDMA** : Scalable OFDMA
- Permet de s'adapter facilement aux
 - règles du régulateur (bande attribuée à WiMAX par région),
 - ressources des opérateurs.
- L'espacement entre sous-porteuses est constant quelque soit la bande utilisée.
- Le CDMA au contraire est adapté à une bande donnée (e.g. 1.25, 5MHz).



- **Paramètres principaux :**

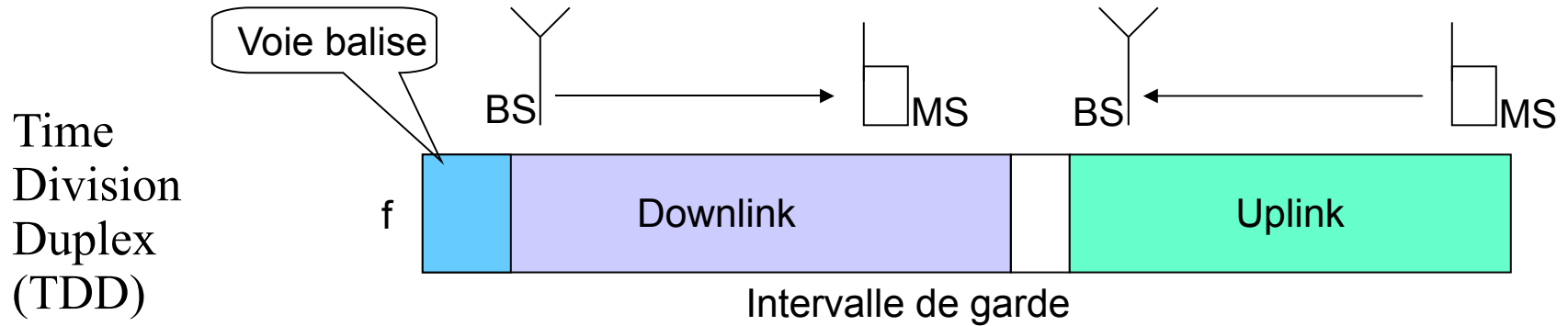
- Bande du canal : $BW = \{1.25...20 \text{ Mhz}\}$
- Nombre de points FFT : $N_{\text{FFT}} = \{128...2048\}$
- Fréquence d'échantillonnage : $F_s = n \cdot BW$ ($n = 8/7$ ou $28/25$)
- Espacement des sous-porteuses : $\Delta f = F_s / N_{\text{FFT}}$
 - Exemple : $BW=5 \text{ MHz}$, $N_{\text{FFT}} = 512$, $n=28/25$, $\Delta f = 11 \text{ KHz}$
- Temps utile du symbole : $T_b = 1/\Delta f$
 - Exemple (5 MHz) : $T_b = 91,4 \mu\text{s}$
- Temps de garde : $T_G = G T_b$ ($G = 1/8$)
 - Exemple (5 MHz) : $T_G = 11,4 \mu\text{s}$
- Temps symbole : $T_s = (1+G)T_b$
 - Exemple (5 MHz) : $T_s = 102,9 \mu\text{s}$
- Pour une trame de 5 ms : 47 symboles OFDM



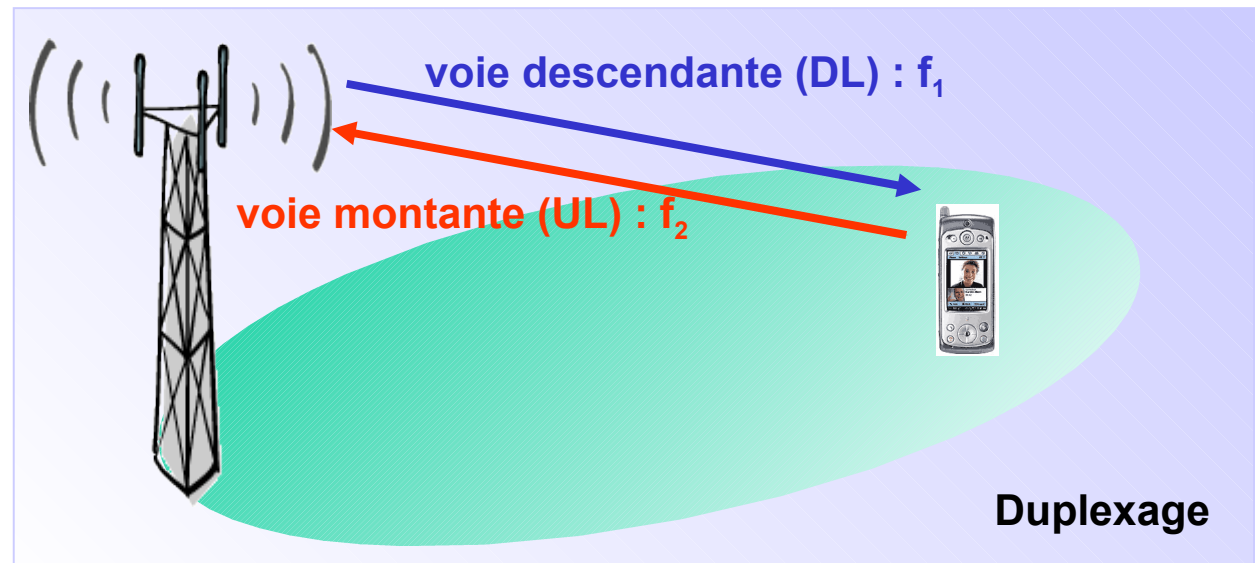
Couche PHY

Duplexage

- En WiMAX, le duplexage est en temps (TDD).



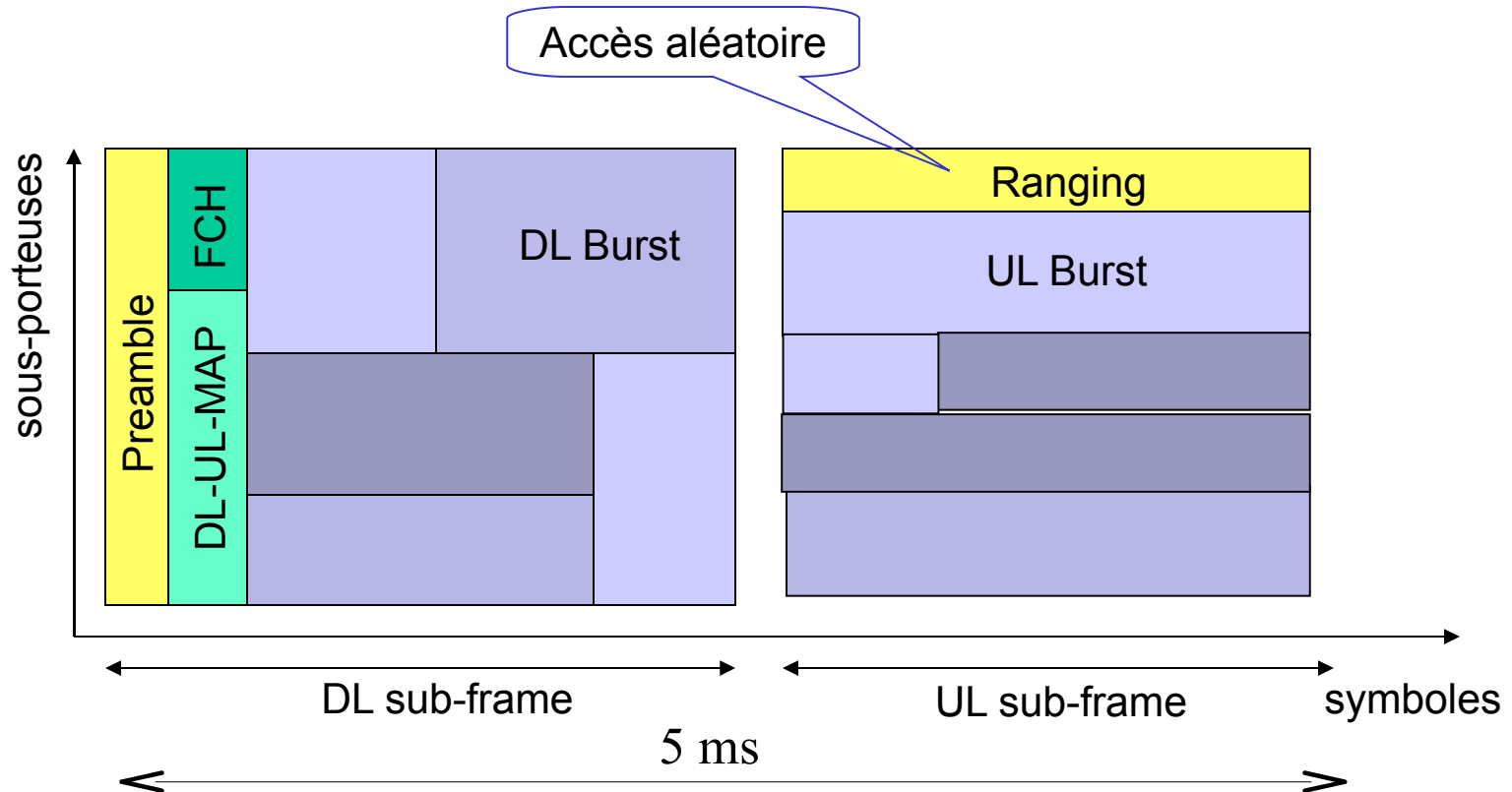
Frequency Division Duplex (FDD)



Couche PHY

Duplexage

- En OFDMA, l'allocation des ressources se fait en temps-fréquence :



- Les modulations utilisées sont : BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM (seulement en DL dans la release 1.0).
- Les types de codages sont : convolutionnal coding et turbo coding.
- Les taux de codage sont : $1/2$, $3/4$ et $2/3$.
- Les débits théoriques au niveau de la couche physique varient entre 3 et 27 Mbps (802.16e) pour une bande passante de 10MHz.
- Les rayons de cellule sont de 1-3 Km en NLOS et peuvent atteindre 30 Km en LOS.

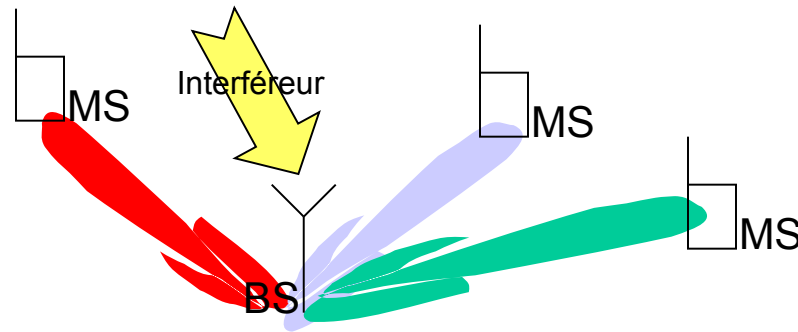
Couche PHY

Modulation et codage

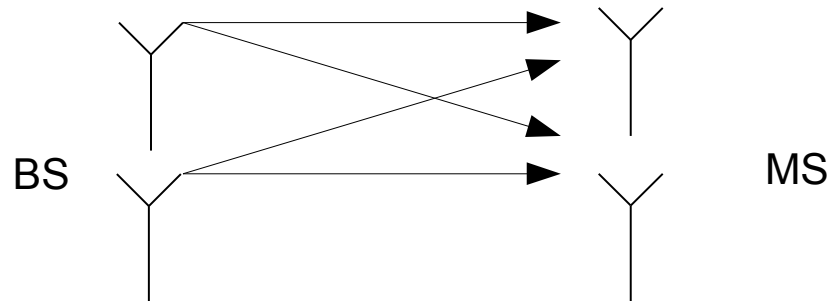
- Exemples de calcul de débits au dessus de la couche PHY (AMC) :

Bande	5 Mhz	10 Mhz	20 Mhz
Modulation	64 QAM	64 QAM	64 QAM
Bits/symbole	6	6	6
Taille FFT	512	1024	2048
Sous-porteuses données	384	768	1536
Symboles/trame	47	47	47
Taux de codage	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$
Durée de la trame	5 ms	5 ms	5 ms
Débit PHY	16,6 Mbps	32,5 Mbps	65 Mbps

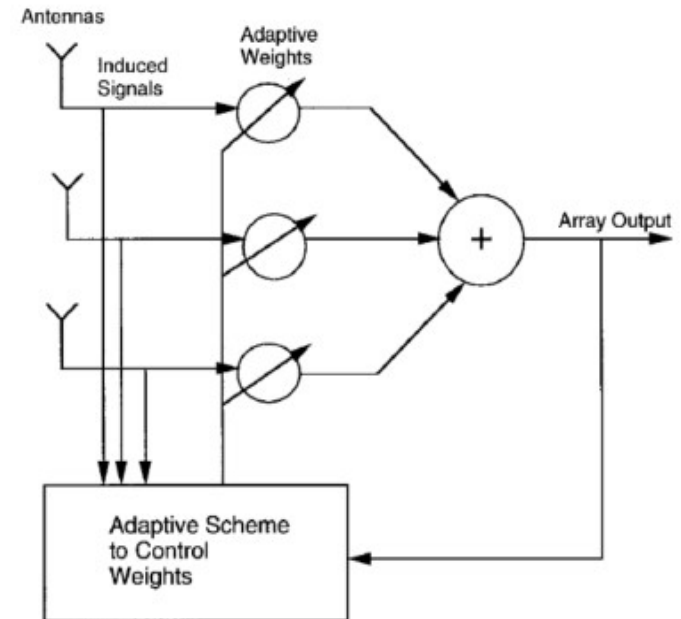
- **Adaptive Antenna System (AAS) :**
 - Améliorer la couverture,
 - Réduire l'interférence dans un environnement cellulaire,
 - Augmenter la capacité.



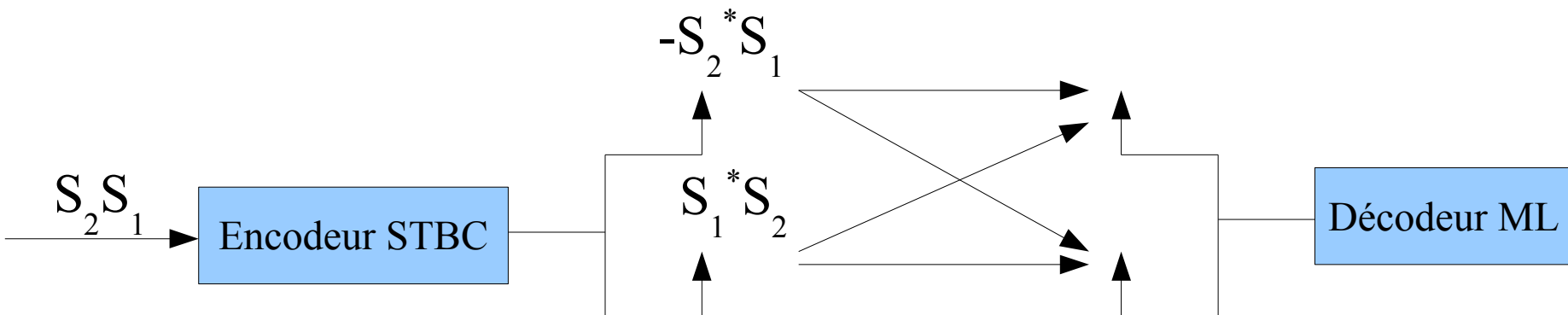
- **Multiple Input Multiple Output (MIMO) :**



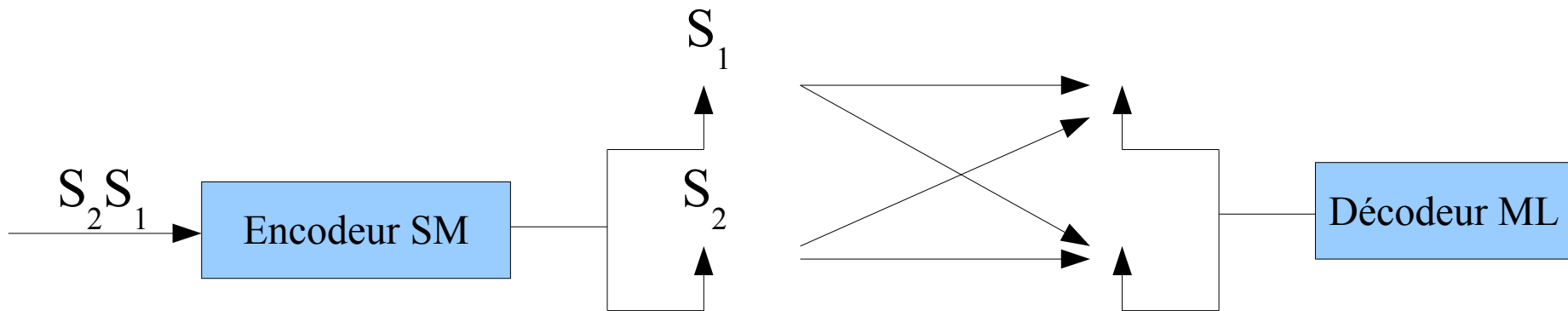
- **Adaptive Antenna System (DL/UL) :**
 - Réseau d'antennes espacées de $\lambda/2$
 - Les signaux sont cohérents
 - Des poids complexes sont assignés à chaque branche
 - Le diagramme d'antenne est dynamique et varie en fonction des poids appliqués
- Améliorer le gain dans la direction du mobile (*beam steering*)
- Diminuer l'interférence (*null steering*)
- Impact limité sur le mobile



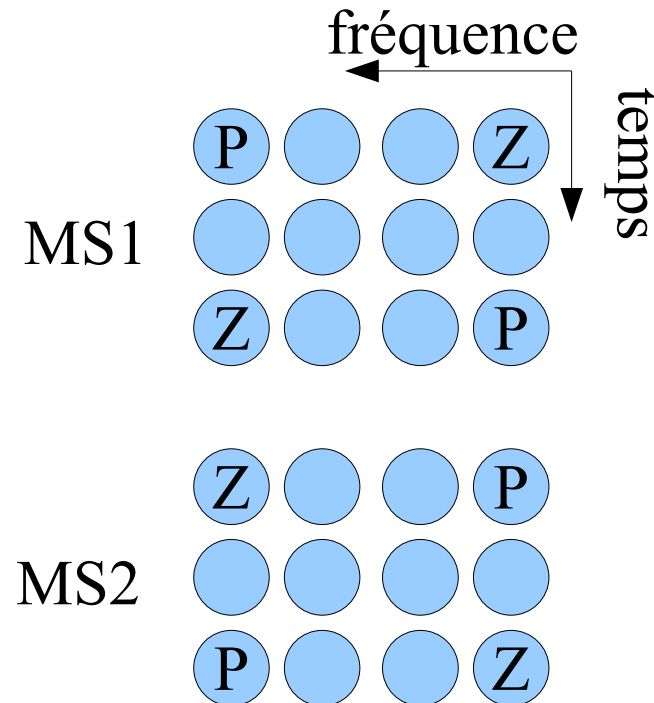
- **MIMO-STBC Space-Time Block Codes (DL) :**
 - Antennes espacées d'environ 10λ pour assurer la diversité
 - Les symboles sont encodés sur une même sous-porteuse et sur deux symboles OFDM successifs
 - Encodeur et décodeur relativement simples
 - Nombre d'antennes à la transmission : 2
- Permet d'obtenir un gain en diversité : meilleure couverture
- La corrélation entre antennes diminue les gains
- Pas d'augmentation des débits, meilleurs SINR en sortie de décodeur



- **MIMO-SM Spatial Multiplexing (DL) :**
 - Deux flux indépendants sont transmis sur la même sous-porteuse par chaque antenne
 - Nombre d'antenne à la transmission : 2, à la réception : 2
- Augmentation de la capacité (dans de bonnes conditions radio)
- La corrélation entre antennes réduit les gains en capacité
- Décodeur complexe



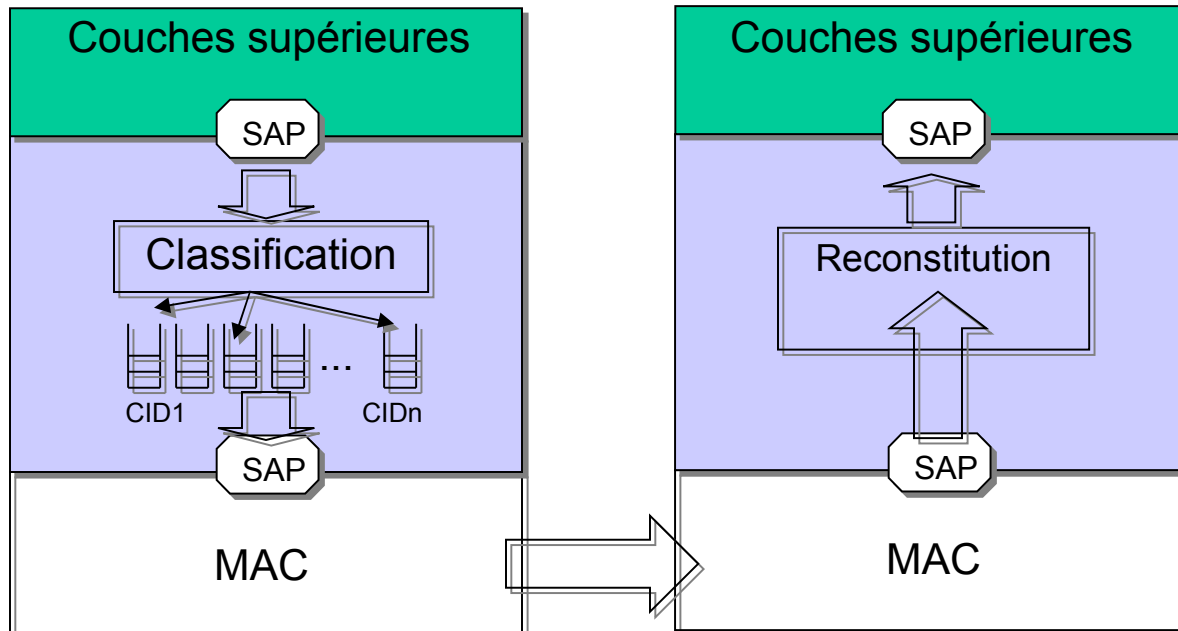
- Uplink MIMO (Two user collaborative SM) :
 - Deux utilisateurs UL transmettent sur les mêmes sous-porteuse simultanément
 - Une antenne de transmission par utilisateur
- Augmentation du débit UL
- Indépendance des flux montants
- Détection SM
- Allocation orthogonal des pilotes



Couche MAC

Sous-couche de convergence

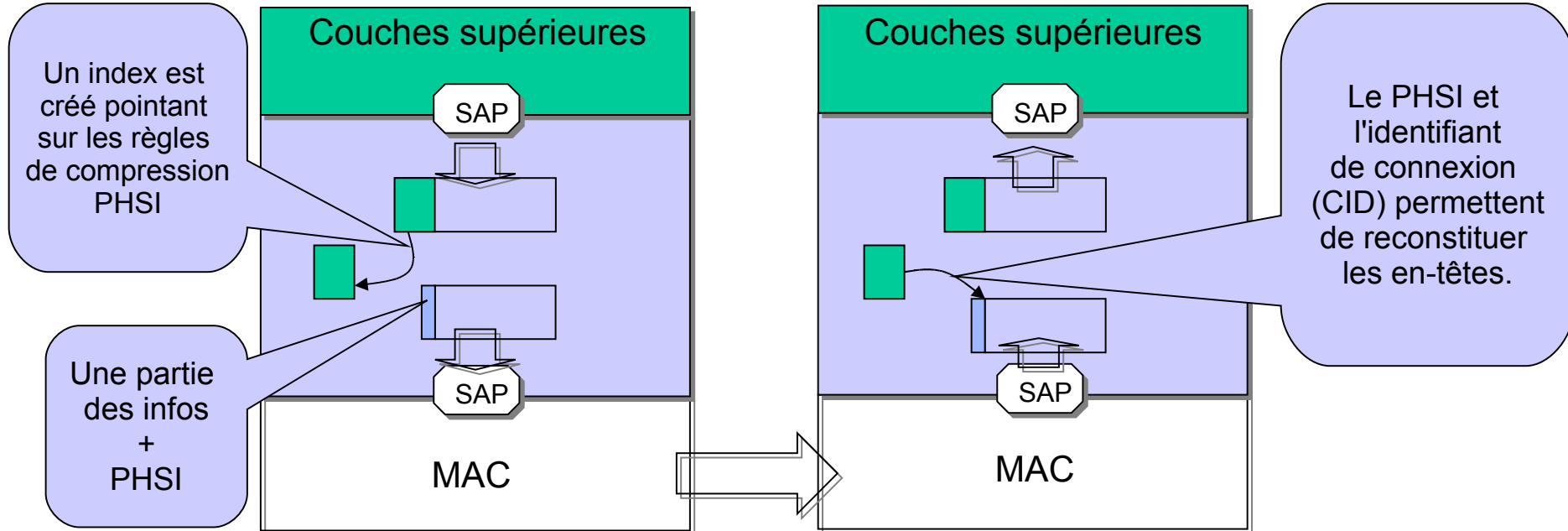
- La sous-couche de convergence (Packet CS) est utilisée pour IP, PPP, Ethernet,...
- Les fonctions de la sous-couche :
 - Classification des PDU et association des PDUs aux connexions
 - Suppression du Payload Header Information (optionnel)
 - Délivrance du CS PDU au MAC SAP correspondant au flux de service
 - Réception des CS PDU à partir des MAC SAP
 - Reconstruction de l'information supprimée (optionnel)



Couche MAC

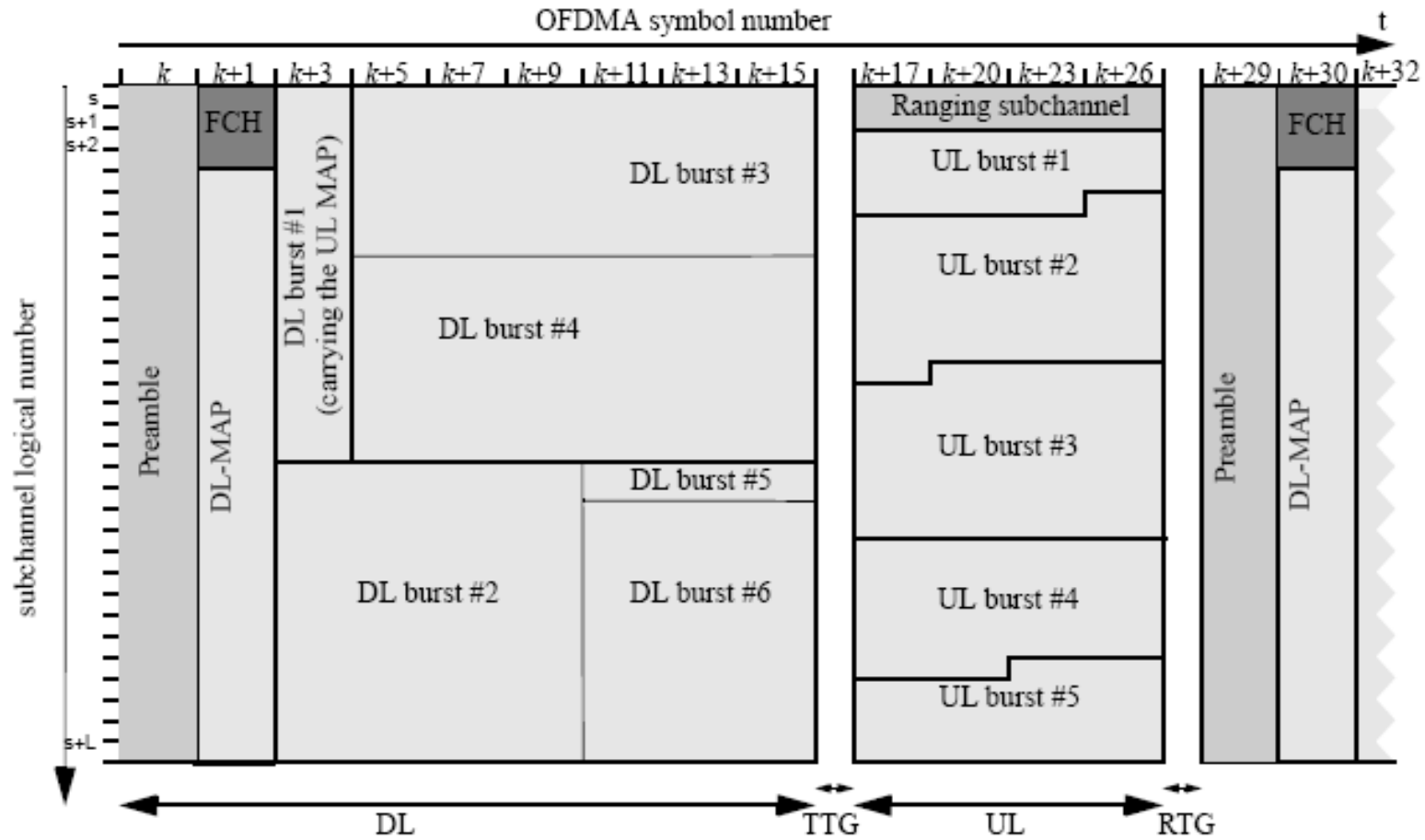
Sous-couche de convergence

- La suppression d'informations des en-têtes des couches supérieures (PHS pour Packet Header Suppression) est optionnelle.
- Les règles de compression (PHS Rule) sont négociées au moment de la création de flux.



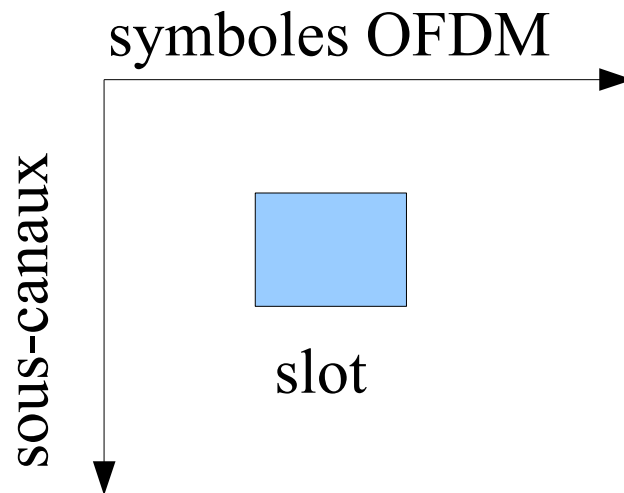
Couche MAC

Structure de frame



[2]

- Quelques définitions :
- Trame TDD : partie temporelle située entre deux préambules ; une trame contient une sous-trame DL et une sous-trame UL séparées par des intervalles de garde.
- Sous-canal : unité fréquentielle élémentaire d'allocation des ressources.
- Slot : unité temps-fréquence élémentaire d'allocation des ressources.

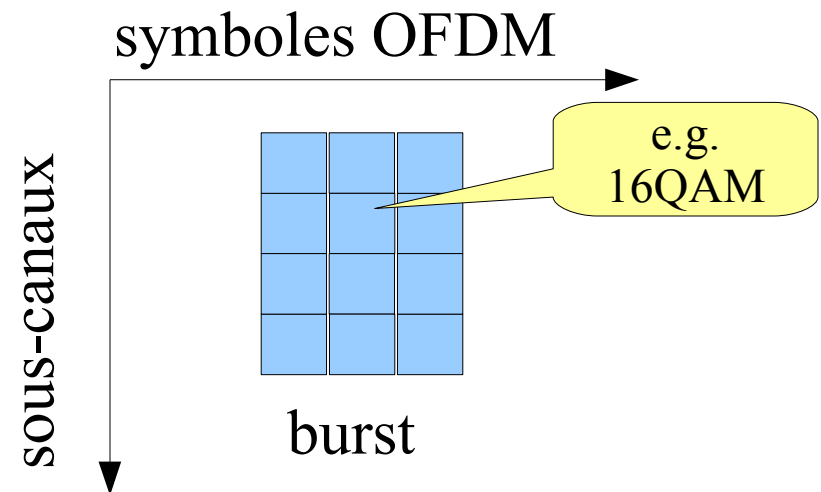
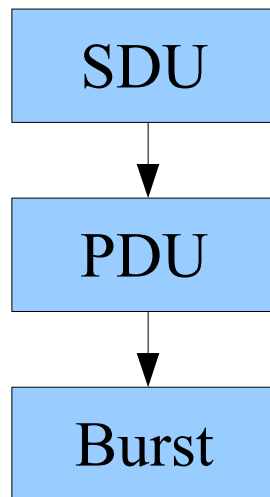


1 slot =
1sc x 1symb (FUSC)
1sc x 2symb (DL PUSC)
1sc x 3symb (UL PUSC)
1sc x 1symb (AMC)

Couche MAC

Structure de trame

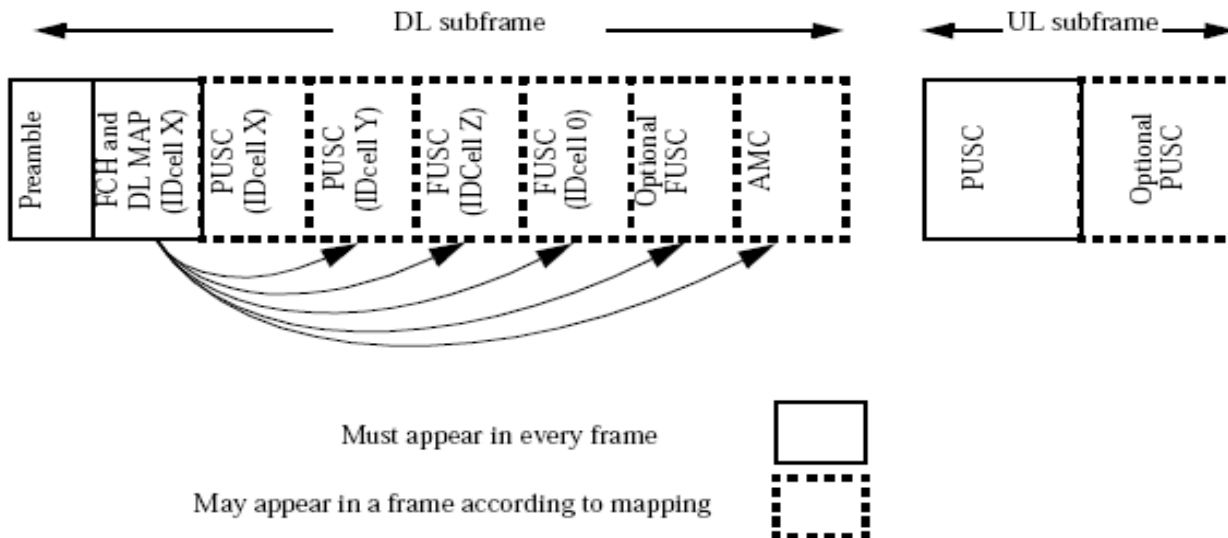
- Burst : ensemble de slots destinés à un utilisateur (SS) ou à un ensemble d'utilisateurs (multicast, broadcast) ; un burst est caractérisé par un schéma de modulation et de codage.



Couche MAC

Structure de trame

- Permutation : méthode de création des sous-canaux fréquentiels.
 - Utilisation partielle de la bande : PUSC (Partial Use of Sub-Carriers)
 - Utilisation complète de la bande : FUSC (Full Use of Sub-Carriers)
 - Utilisation contiguë de sous-porteuses : AMC (Adaptive Modulation and Coding)
- Les schémas de permutations peuvent alterner dans la sous-trame DL.

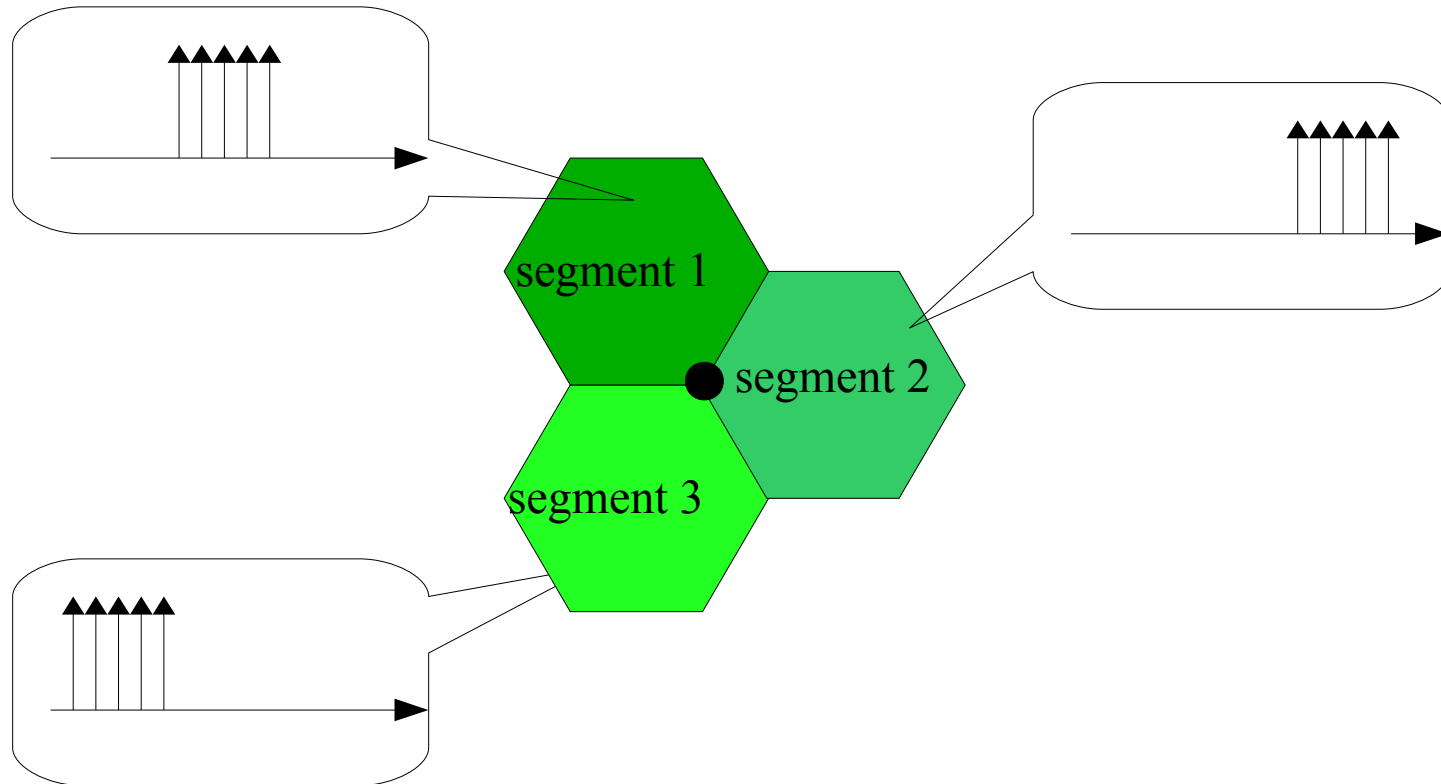


[2]

Couche MAC

Structure de trame

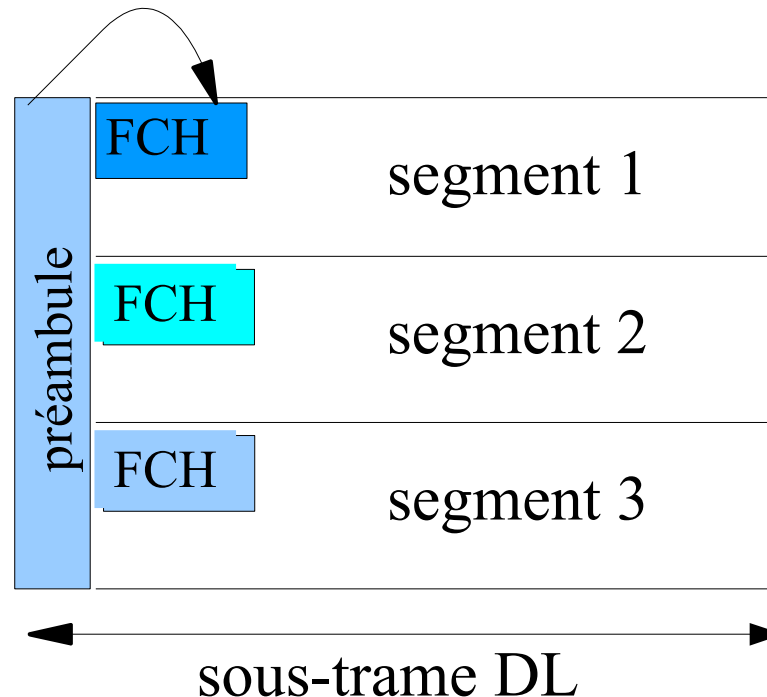
- Segment : sous-division de l'ensemble des sous-canaux, où s'instancie une unique couche MAC (=secteur).



Couche MAC

Structure de trame

- Préambule : occupe le premier symbole OFDMA et l'ensemble des sous-canaux; il est modulé en BPSK ; il a pour buts :
 - La synchronisation temporelle et fréquentielle,
 - L'estimation du canal,
 - La détermination du numéro de segment et la position du FCH,
 - La détermination de l'identifiant de cellule (IDCell).



Couche MAC

Structure de trame

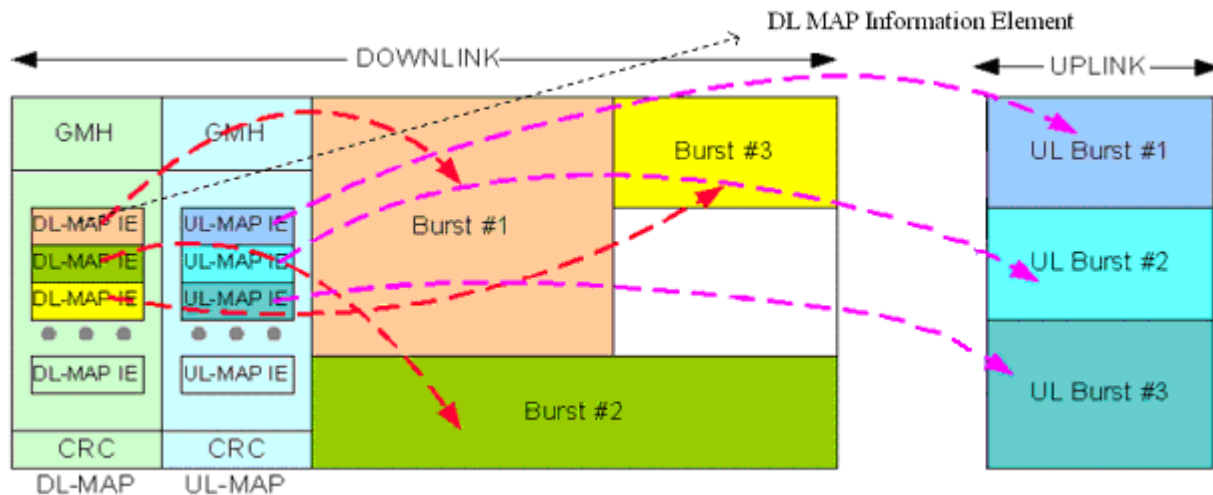


- La voie balise se compose de FCH, DL-MAP et UL-MAP, DCD (Downlink Channel Descriptor) et UCD (Uplink Channel Descriptor).
- FCH (Frame Control Header) : fournit les informations nécessaires au décodage des MAP.
 - Position dans la trame fixe (spécifiée en fonction du segment par le préambule),
 - Modulation et codage fixe (QPSK $\frac{1}{2}$ 4 répétitions),
 - Il donne l'ensemble des sous-canaux utilisés par le segment,
 - Il donne le codage et la longueur des MAP.

Couche MAC

Structure de trame

- DL-MAP et UL-MAP : ce sont les cartes d'allocation des ressources dans le sens descendant et montant. Elles fournissent :
 - Le profile du burst (modulation et codage),
 - La liste des identifiants de connexion (CID),
 - La position et la taille du burst
 - Offset fréquentiel,
 - Offset temporel,
 - Nombre de symboles OFDM et nombre de sous-canaux.

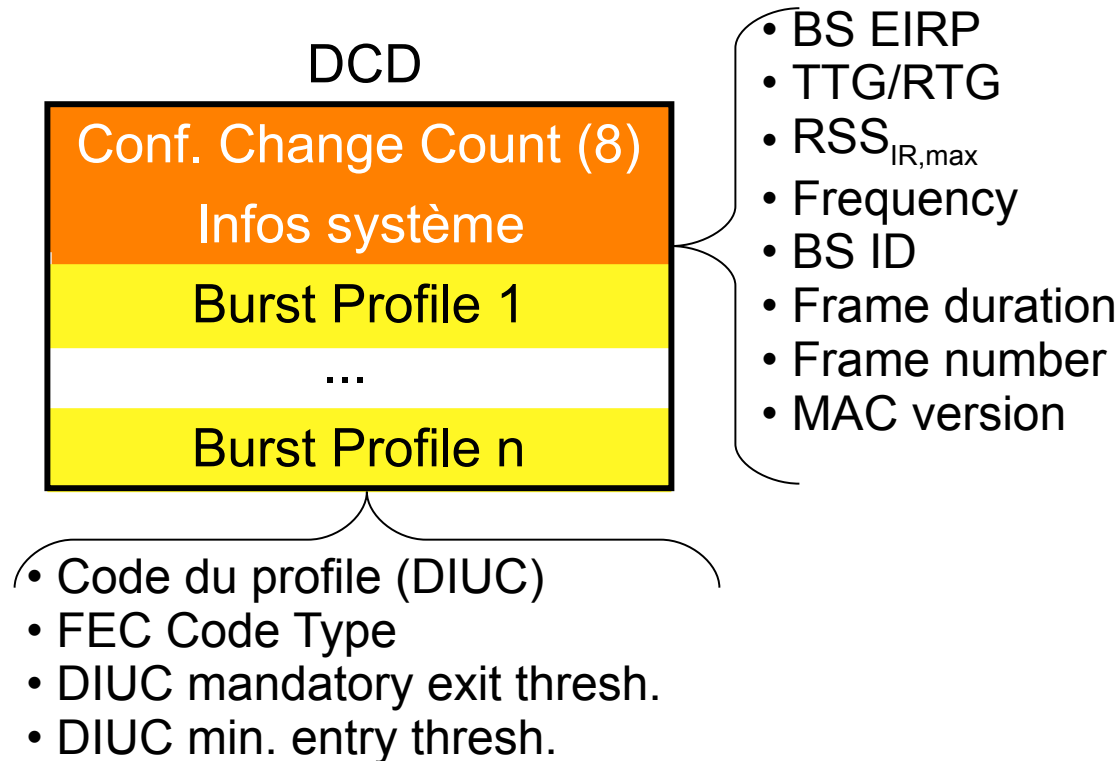


[5]

Couche MAC

Structure de trame

- DCD (Downlink Channel Descriptor) : diffuse les informations système et associe aux codes DIUC les paramètres PHY de transmission.
- La version en cours du DCD est précisée dans le FCH (Configuration Change Count) et utilisée dans DL-MAP (DCD Count).

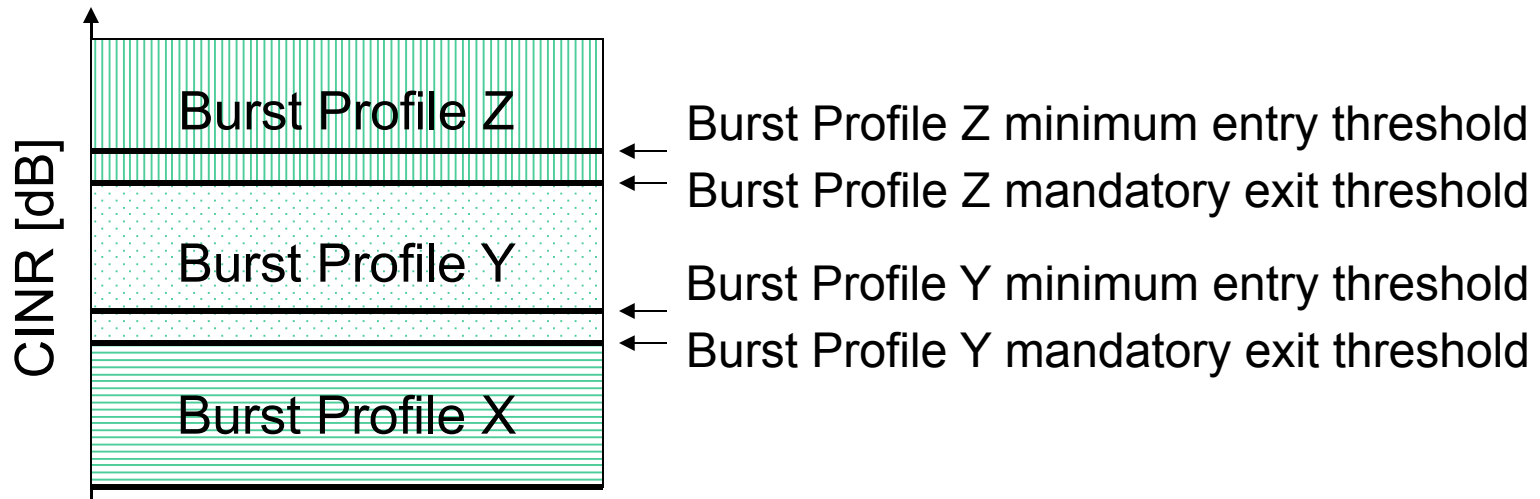


DIUC = Downlink Interval Usage Code

Couche MAC

Structure de trame

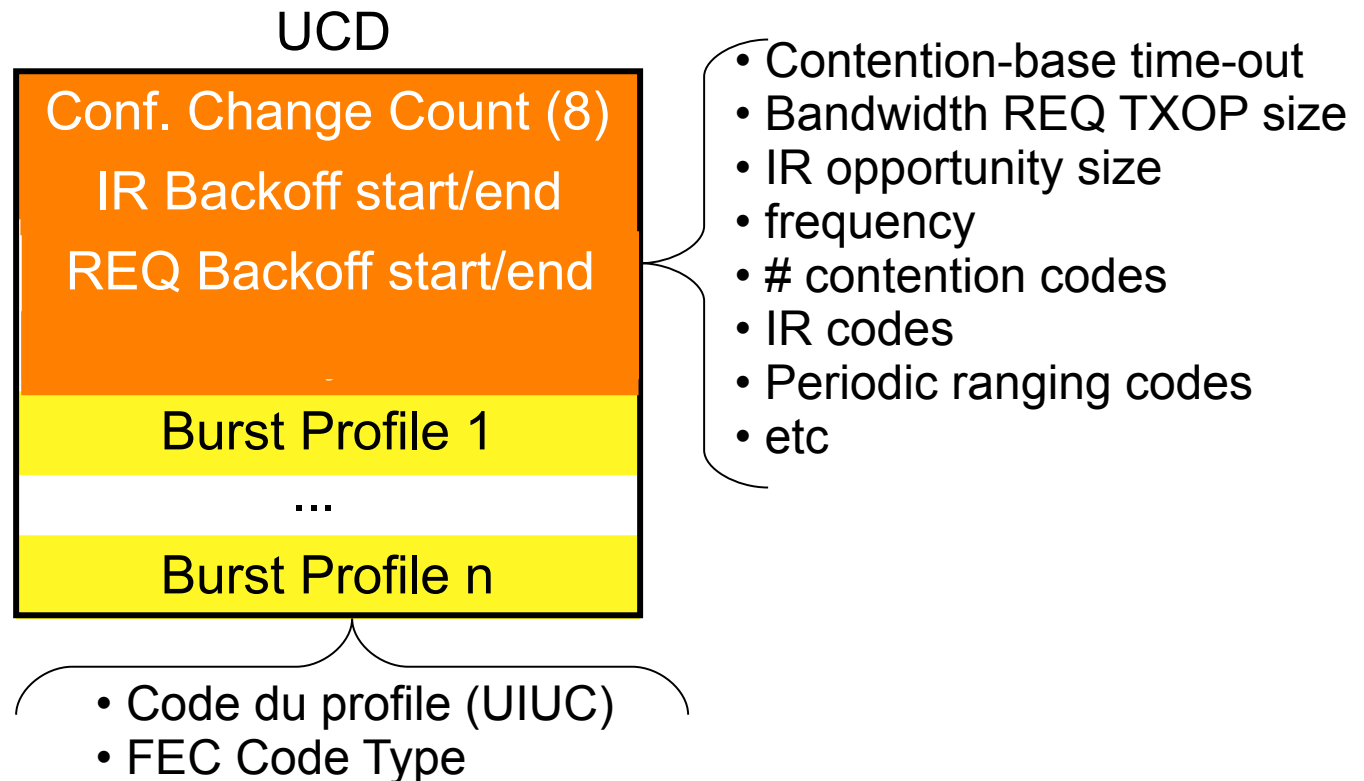
- Modulation, schéma de codage et adaptation de lien :
- Principaux types de codage : Codes Convolutionnels (CC), Turbo Codes Convolutionnels (CTC).
- Schémas de codage :
 - QPSK 1/2, $\frac{3}{4}$
 - 16QAM 1/2, $\frac{3}{4}$
 - 64QAM 1/2, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$



Couche MAC

Structure de trame

- UCD (Uplink Channel Descriptor) : diffuse les informations système et associe aux codes UIUC les paramètres PHY de transmission.
- La version en cours de l'UCD est utilisée dans UL-MAP (UCD Count).



DIUC = Uplink Interval Usage Code

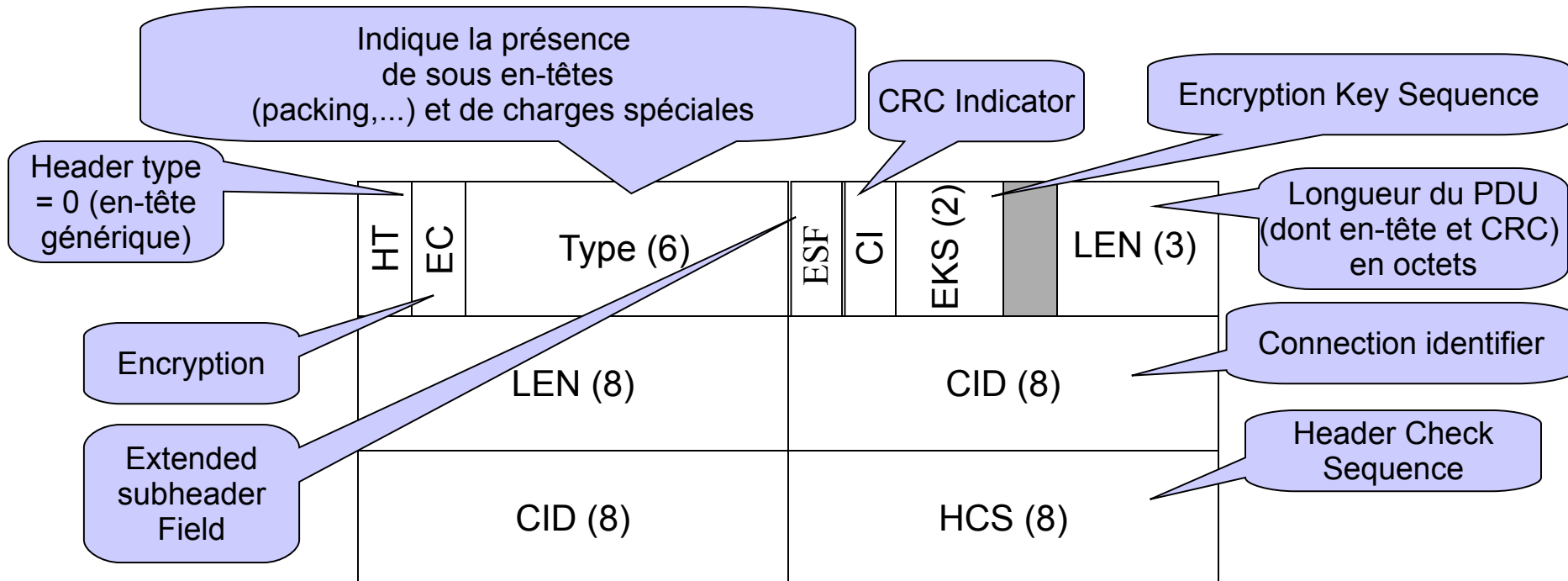
- Entrée dans le réseau :
 - Synchronisation et écoute des canaux DL (DL_MAP et DCD)
 - Obtention des paramètres de transmission UL (UCD)
 - Ranging : ajustement de la puissance et alignement temporel
 - Le MS informe la BS de ses capacités
 - Autorisation et échange de clefs
 - Enregistrement
 - Connectivité IP (par exemple DHCP)
 - Ouverture des connexions

- Le MAC est orienté connexion, c-a-d que tout échange de données est sujet aux phases suivantes :
 - Ouverture de la connexion et attribution d'un identifiant (CID) 16-bits,
 - Transfert de données,
 - Libération de la connexion.
- Il y a quatre types de connexions :
 - **Basic Connexion** : transfert de signalisation MAC (avec contraintes de délai, e.g. allocation de bande passante, accès),
 - **Primary Management Connexion** : transfert de signalisation MAC (sans contraintes de délai, e.g. authentification),
 - **Secondary Management Connexion** : transfert de signalisation standard (e.g. DHCP, TFTP, etc).
 - **Transport Connexion** : transfert de données uni-directionnel.

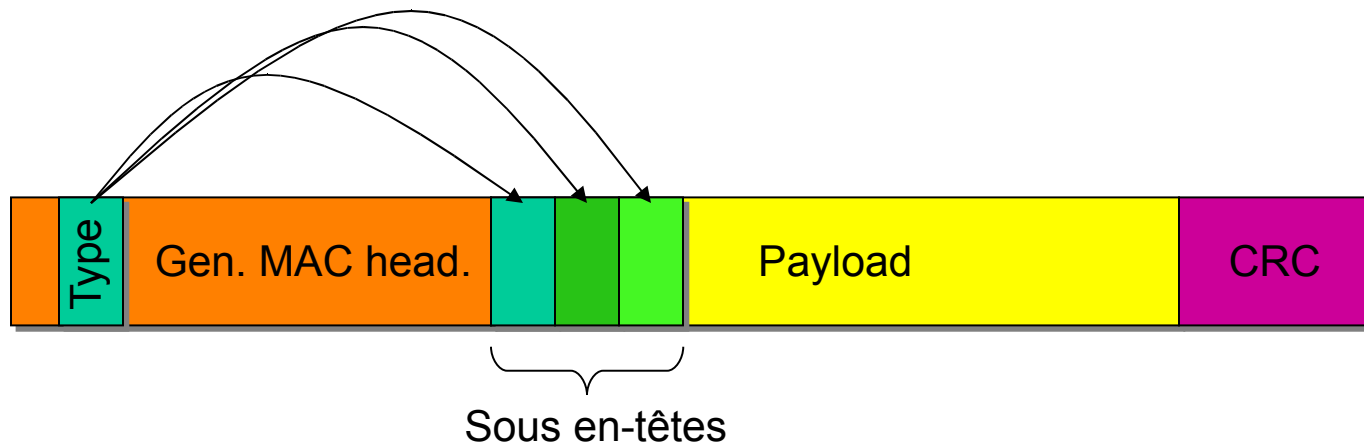
Couche MAC

Format des MAC PDU

- Un MAC PDU est formé d'un en-tête générique, de la charge, d'un champ CRC et d'éventuels sous-en-têtes optionnels.



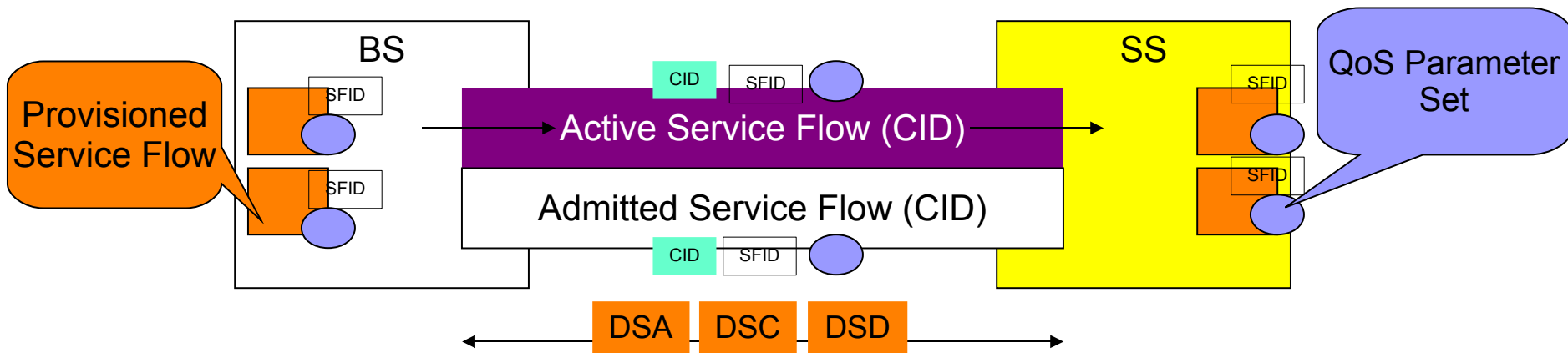
- **Principaux sous-en-têtes** optionnels possibles. Ils suivent l'en-tête générique MAC. Ces sous en-têtes sont par PDU sauf le sous en-tête Packing qui est par SDU.
 - Fragmentation/packing : informations pour la fragmentation et la concaténation des PDU.
 - FAST_FEEDBACK_Allocation : demande de mesures de la BS.
 - Grant_Management : permet à la SS de demander de la bande à la BS.
 - ARQ : informations ARQ (par exemple *Block Sequence Number*).



- **Service Flow** : service de transport MAC unidirectionnel de paquets associé à une qualité de service donnée
- Un Flux est caractérisé par son QoS Parameter Set
- Flux provisionné : flux défini par la gestion de réseau (connus de la BS et de la SS).
- Flux admis : flux dont les ressources sont réservées mais pas utilisées.
- Flux actif : flux transportant des paquets.

- Un flux de service est identifié par un **SFID** (32 bits)
- Un flux admis ou actif a en outre un **CID** (16 bits)

- **QoS Parameter Set** : ensemble des paramètres associés à une qualité de service. Exemple : délai, gigue, débit.



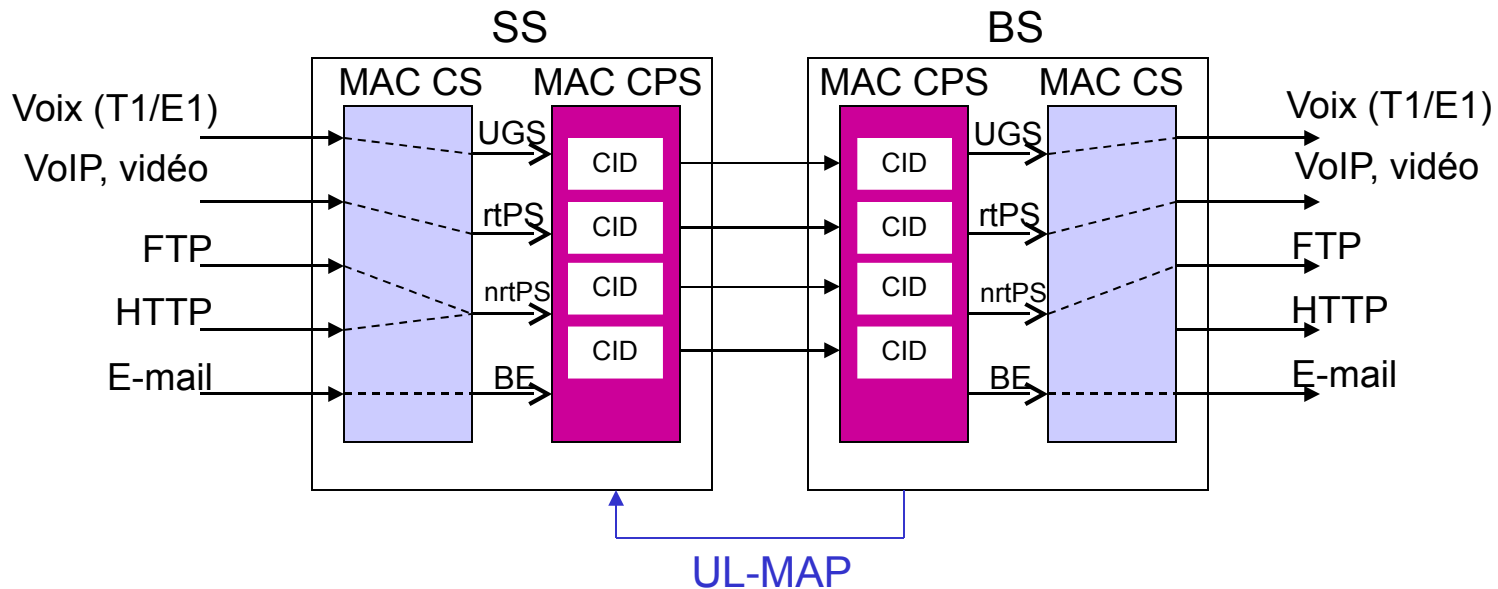
DSA = Dynamic Service Addition
DSC = Dynamic Service Change
DSD = Dynamic Service Deletion

- **Ordonnancement** :
- Chaque flux de service est associé à un service d'ordonnancement.
- Il y a cinq services d'ordonnancement :
 - Unsolicited Grant Service (UGS)
 - Real-time Polling Service (rtPS)
 - Extended Real-Time Polling Service (ertPS)
 - Non-real-time Polling Service (nrtPS)
 - Best Effort (BE)
- Pour chaque service d'ordonnancement, il y a des paramètres de QoS obligatoires pour la définition du flux de service.
- Les valeurs de ces paramètres sont négociées grâce aux dialogues DSA/DSC.

Couche MAC

Qualité de Service

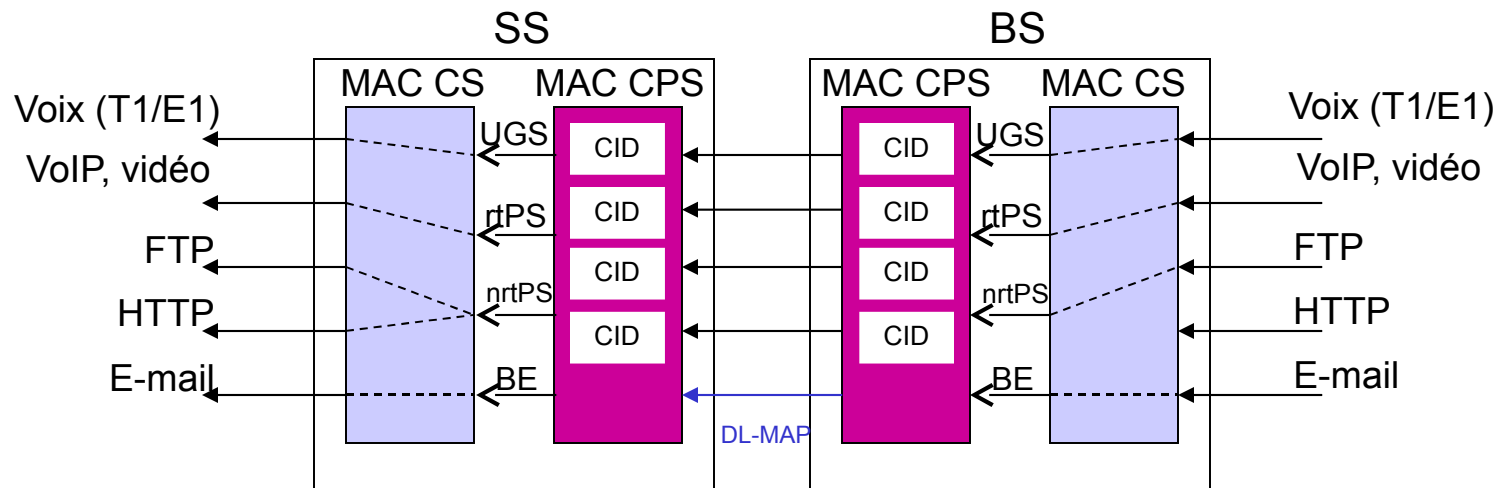
- C'est la sous-couche MAC qui associe les flux applicatifs aux services d'ordonnancement.
- La sous-couche MAC est chargée d'établir les connexions et de les maintenir.
- Voie montante :



Couche MAC

Qualité de Service

- Voie descendante :



- Allocation de ressources sur la voie descendante :
 - via la DL-MAP
- Allocation de ressources sur la voie montante : quatre méthodes
 - de manière **non sollicitée** : la BS attribue de manière périodique de la bande sans soucier du trafic réellement généré,
 - par **polling** : la BS interroge la SS sur la trafic montant ; la SS envoie une requête indiquant la bande nécessaire ; la BS alloue la bande,
 - par **contention** : la SS utilise un canal montant à contention pour réclamer de la bande (*bandwidth request*),
 - par **paggbacking** : utilisation du sous-en-tête PiggyBack Grant Management

- **Unsolicited Grant Service**
- Applications visées :
 - Flux « temps réel » de paquets de taille fixe émis à intervalles réguliers
 - Voix sur T1/E1
 - Voix sur IP sans suppression de silences
- Paramètres de QoS :
 - Tolerated jitter : gigue maximale
 - Minimum Reserved Traffic Rate : débit du service
 - Maximum Latency : délai maximal (dans le *buffer*)
- Allocation de ressource sur la voie montante :
 - non sollicitée : la BS alloue de la bande de manière périodique.

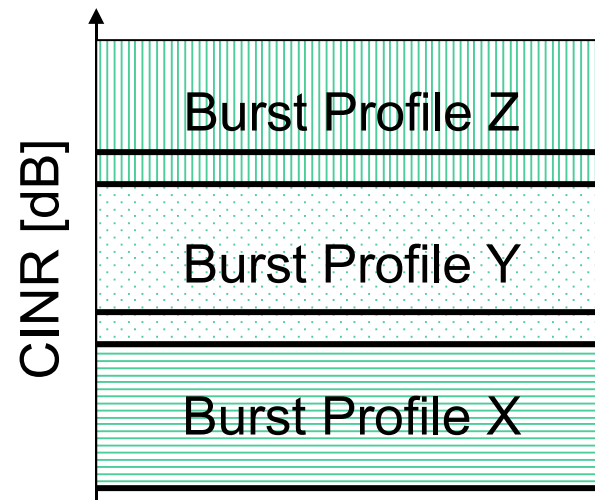
- **Real-time Polling Service**
- Applications visées :
 - Flux « temps réel » de paquets de taille variable émis à intervalles réguliers
 - *Streaming*, Vidéo MPEG
- Paramètres de QoS :
 - Minimum Reserved Traffic Rate : débit minimal pour le service
 - Maximum Sustained Traffic Rate : pic de débit
 - Maximum Latency
 - Traffic Priority
- Allocation de ressource sur la voie montante :
 - polling : la SS peut périodiquement envoyer des requêtes de bande.

- **Extended Real-time Polling Service**
- Applications visées :
 - Flux temps-réel générant des paquets de taille variable de manière régulière,
 - VoIP avec détection et suppression des silences.
- Paramètres QoS :
 - Maximum Sustained trafic Rate
 - Minimum Reserved trafic Rate
 - Maximum Latency
- Allocation de ressource sur la voie montante :
 - mixte de rtPS et d'UGS.

- **Non-real-time Polling Service**
- Applications visées :
 - Flux de paquets de taille variable pour lequel un débit minimum est requis.
 - Transfert de fichier (FTP)
- Paramètres de QoS obligatoires
 - Minimum Reserved Traffic Rate
 - Maximum Sustained Traffic Rate
 - Traffic Priority
- Allocation de ressource sur la voie montante :
 - polling

- **Best Effort**
- Applications visées :
 - Flux de paquets sans réelle exigence de débit minimum.
 - Exemple : Mel
- Paramètres de QoS obligatoires
 - Maximum Sustained Traffic Rate
 - Traffic Priority
- Allocation de ressource sur la voie montante :
 - contention : les requêtes de la SS sont envoyées sur un canal commun en contention.

- Adaptation de lien :
- La BS choisit les profils DL en fonction de la qualité du canal.
- La SS mesure le CINR et compare la valeur moyenne aux seuils diffusés dans le DCD.
- Si le CINR sort de l'intervalle associé à un profile, la SS demande un nouveau profile de burst DL.



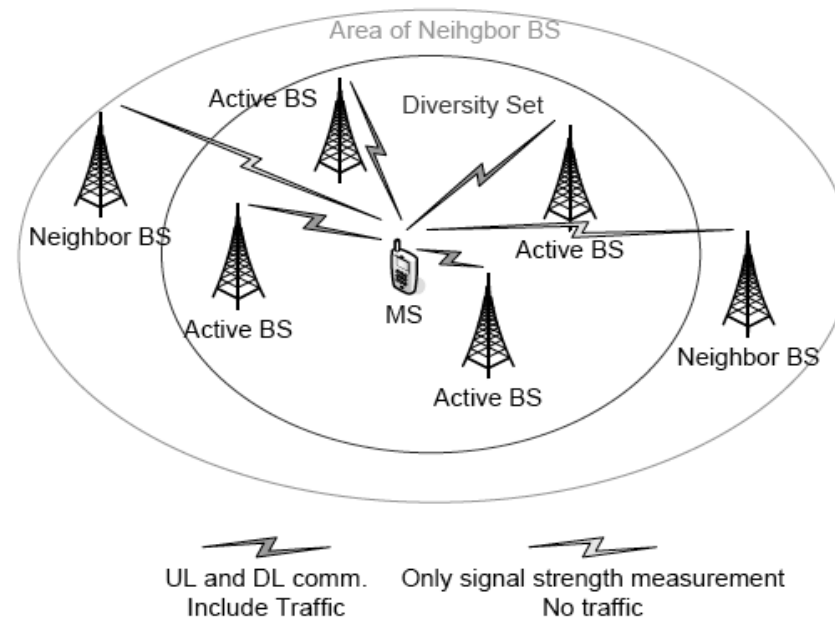
- L'ARQ et l'HARQ sont optionnelles.
- Les mécanismes d'ARQ peuvent être implémentés par connexion ou par SS.

- Mécanismes ARQ :
- **Selective ACK** : le récepteur donne le numéro de séquence des blocs ARQ correctement reçus ou erronés.
- **Cumulative ACK** : le récepteur acquitte l'ensemble des blocs ARQ jusqu'à un numéro de séquence.
- **Cumulative with selective ACK** : combinaison des deux précédentes techniques.
- **Cumulative ACK with Block Sequence Ack** : le récepteur peut acquitter des ensembles de blocs ARQ de numéros de séquence contigus.

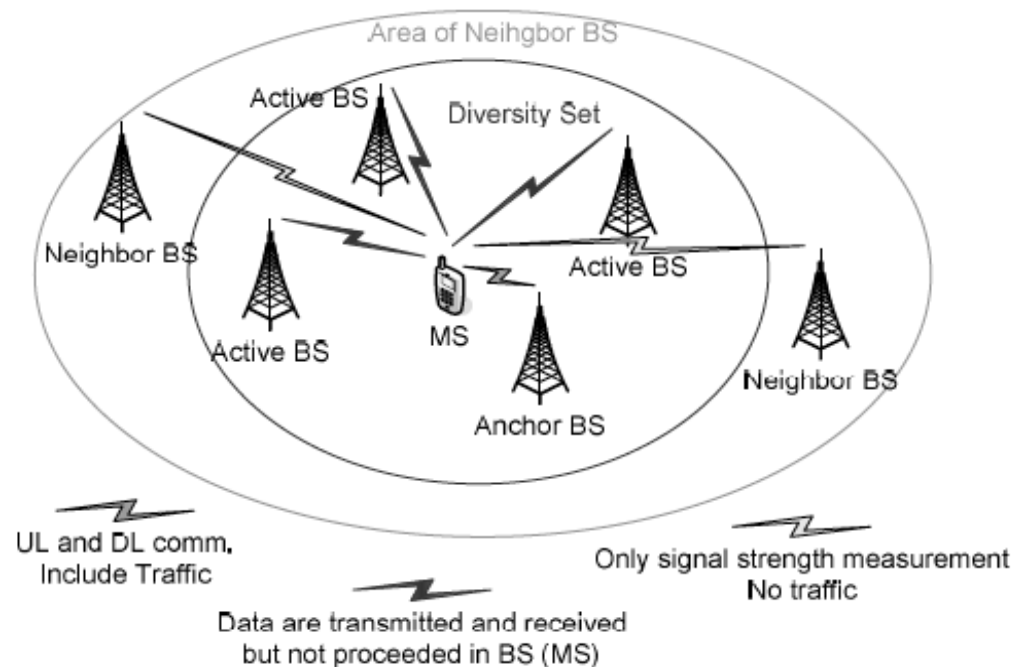
- Mécanismes d'HARQ :
 - Chase Combining
 - Incremental redundancy

- **Le processus de hand over** (*make before break Hard HO*):
- Acquisition du voisinage : la serving BS diffuse le DCD et l'UCD des BS voisines,
- Scanning : la serving BS alloue des intervalles de scanning pendant lesquels la MS scrute les cellules voisines ; le rapport de mesure peut déclencher un hand over,
- Association :
 - Level 0 : sans coordination (association pendant l'intervalle de scan),
 - Level 1 : avec coordination (la BS cible et la MS s'accordent sur un rendez-vous),
 - Level 2 : assisté par le réseau (la réponse à l'association est envoyée par la BS serveuse).
- Fermeture des connexions auprès de la serving BS.

- **Processus optionnels de hand over :**
La MS construit un *diversity set* = ensemble des BS potentiellement impliquées dans le hand over.
- **Macro diversity hand over (MDHO) :**
La MS envoie et reçoit de l'ensemble des BS du diversity set,
La MS bénéficie de la macro-diversité.



- Fast BS swtiching (FBSS) :
La MS ne communique qu'avec la BS serveuse (anchor BS).
La commutation d'une BS anchor à une autre est réalisée avec une procédure simplifiée.



- [1] Norme IEEE 802.16d
- [2] Norme IEEE 802.16e
- [3] M. Shakouri, « WiMAX, Ready for Global Deployment », WiMAX Forum Conf., 2006.
- [4] H. Mellein, « Séminaire Rhode & Schwartz WiMAX, General Introduction », 2006.
- [5] Introduction to mobile Wimax Radio Access Technology: PHY and MAC architecture. Dr Sassan Ahmadi. Wireless Standards and Technology Intel Corporation.