
UMTS

Chapitre 4 : la couche physique de l'interface radio

<i>Principe du CDMA</i>	<i>1</i>
<i>Multiplexage sur voie radio</i>	<i>2</i>
<i>Utilisation des codes</i>	<i>3</i>
<i>Les codes utilisés dans l'UTRAN</i>	<i>4</i>
<i>Les codes de brouillage</i>	<i>5</i>
<i>Gain de traitement et puissance disponible</i>	<i>7</i>
<i>Contrôle de puissance</i>	<i>8</i>
<i>Contrôle de charge</i>	<i>9</i>
<i>« Respiration » des cellules</i>	<i>10</i>
<i>Structure des canaux physiques</i>	<i>11</i>
<i>Synchronisations slot et trame</i>	<i>12</i>
<i>Diffusion des informations système</i>	<i>14</i>
<i>Paging</i>	<i>15</i>
<i>Accès aléatoire des mobiles</i>	<i>16</i>
<i>Transport des données</i>	<i>17</i>
<i>Exemples de formats DPCH</i>	<i>20</i>
<i>Traitement de bout en bout par la couche physique : exemple du service de phonie</i>	<i>22</i>
<i>Traitement de bout en bout par la couche physique : cas général</i>	<i>23</i>
<i>Détails des traitements</i>	<i>24</i>
<i>Adaptation aux fluctuations de débit source</i>	<i>26</i>

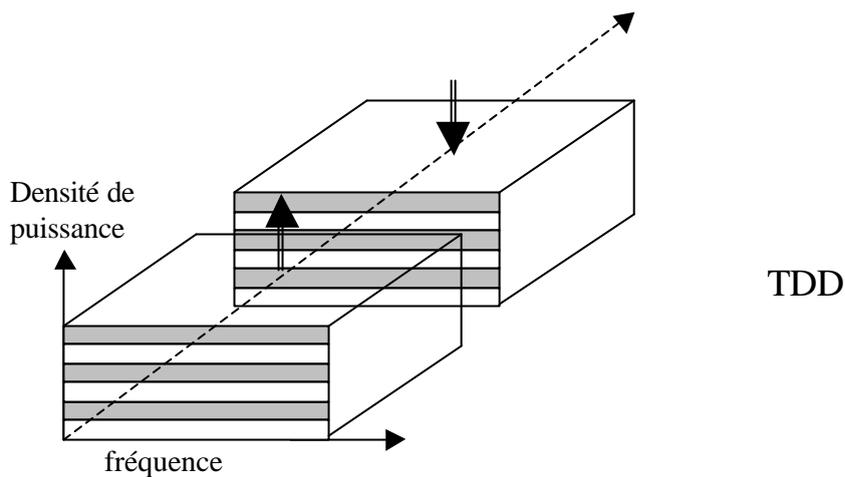
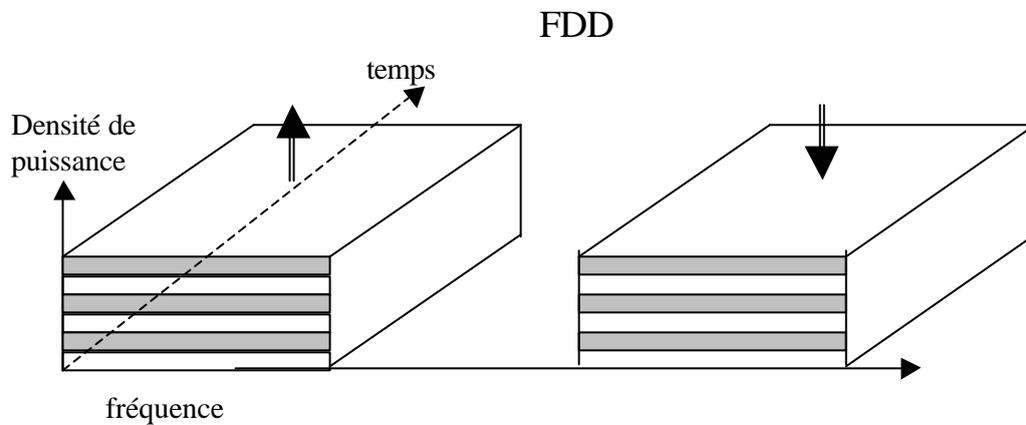
Principe du CDMA

Deux modes de duplexage

Mode FDD en W-CDMA pour les bandes appairées (2x 60 MHz)

Mode TDD en W-TDMA / CDMA pour les bandes non appairées (35 MHz)

1900	1920	1980	2010	2025	2110	2170	2200
TDD UL/DL	FDD UL	MSS UL	TDD UL/DL		FDD DL	MSS DL	



Multiplexage sur voie radio

TDD

Une seule fréquence utilisée alternativement dans chaque sens

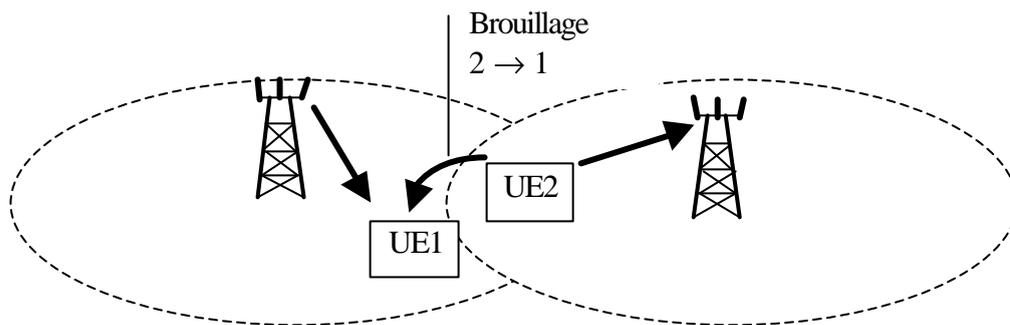
Avantages :

- *flexibilité dans l'allocation du spectre (pas de bande de garde)*
- *bien adapté aux débits asymétriques*

Inconvénients : synchronisation (plus complexe)

- *nécessité d'avoir le même point de basculement up/down dans tout le réseau*
- **P** *synchronisation des BS*
- **P** *même niveau d'asymétrie dans tout le réseau*

Cas d'un point de basculement différents entre deux cellules adjacentes :



FDD

Possibilité d'émission/réception simultanée

- *Bien adapté aux débits symétriques*
- *Allocation du spectre non optimisée (bande de garde)*
- *Etat de maturité plus avancé que le mode TDD*

NB : seul le mode FDD est étudié dans la suite du cours

Utilisation des codes

Étalement de spectre à séquence directe

Le signal d'information est directement multiplié par la séquence de code

UMTS

« Chip rate » fixe de 3.84 Mcps

(un chip \Leftrightarrow un élément de code représentant un bit)

Gain de traitement ou Spreading Factor « SF » variable selon le débit d'information

IS-95

Chip rate fixe de 1.288 Mcps

CDMA-2000

Chip rate variable multiple du chip rate utilisé dans IS-95 soit $N \times 1.288$ Mcps
 \Rightarrow plusieurs gains de traitement possibles pour le même débit d'information

$N \in \{1, 3, 6, 9, 12\}$

Exemple

	Débit binaire	N	SF	Débit chip	Largeur de bande (MHz)
UMTS	7.5 kbps		512	3.84 Mcps	5
UMTS	15.5 kbps		256	3.84 Mcps	5
CDMA-2000	9.6 kbps	1	128	1.288 Mcps	1.25
CDMA-2000	9.6 kbps	3	384	3.6864 Mcps	3.75

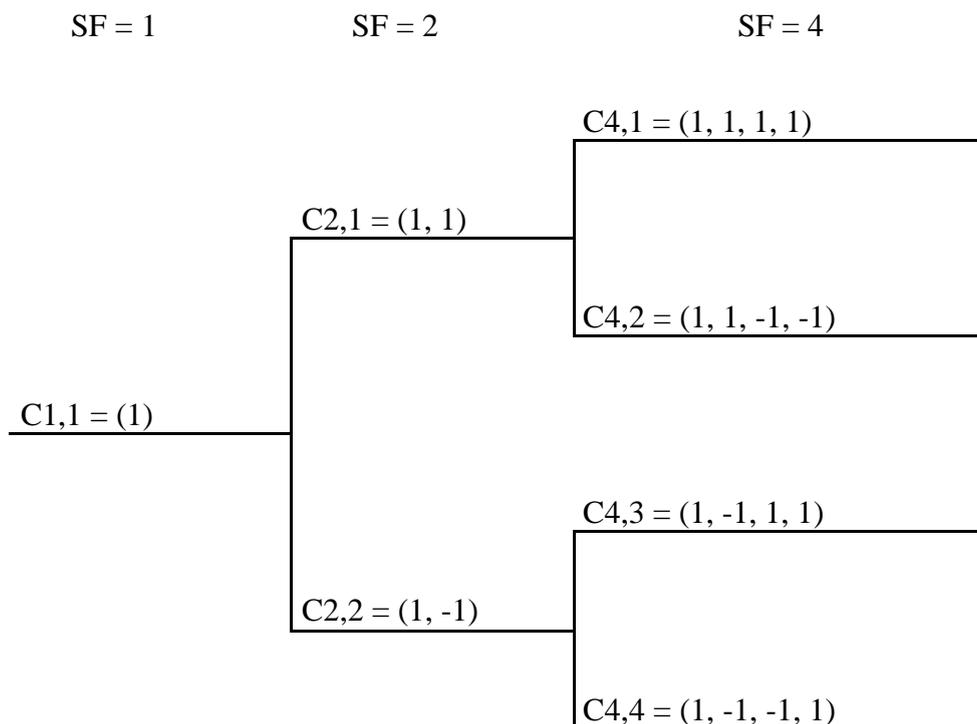
Les codes utilisés dans l'UTRAN

Deux types de codes :

- codes de channelisation OVSF
- codes de brouillage

OVSF « orthogonal variable spreading factor »

Type Walsh-Hadamard



2 séquences situées sur le même niveau hiérarchique sont orthogonales

2 codes situés sur la même branche sont non-orthogonaux

- ⇒ limite importante dans l'allocation des codes
- ⇒ ex : si $C_{2,1}$ utilisé, on ne peut plus utiliser $C_{1,1}$, $C_{4,1}$, $C_{4,2}$ et tous les descendants
- ⇒ débit utilisateur élevé ⇔ SF faible ⇔ on bloque une partie importante de l'arbre

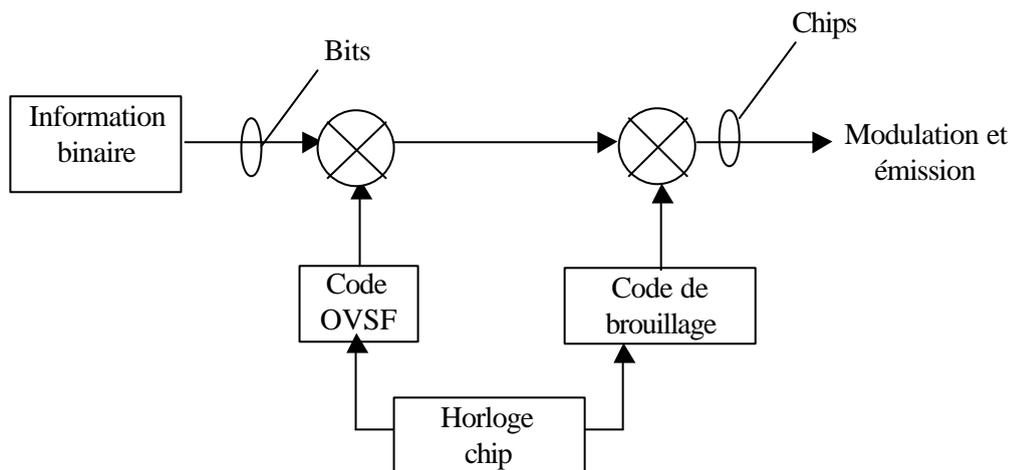
SF admis par l'UTRAN :

- 4 à 256 pour les canaux montants
- 4 à 512 pour les canaux descendants

Les codes de brouillage (1)

Limites des codes OVSF :

- ne constituent pas des séquences pseudo-aléatoires \Rightarrow pas forcément d'étalement de spectre (ex : $C_{256,1} = 256$ eb à 1)
- orthogonalité seulement pour des séquences alignées \Rightarrow difficulté liée à la non-synchronisation des mobiles dans le sens montant
- \Rightarrow nécessité d'un $2^{\text{ème}}$ traitement par des codes dits « de brouillage »



Principe d'allocation :

Sens descendant :

- *un code de channelisation par canal physique*
- *la cellule dispose de la totalité de l'arbre OVSF*
- *un code de brouillage par cellule*
- **P** *les codes de brouillage distinguent les cellules entre elles*
- *512 codes disponibles*
- **P** *contrainte sur la planification du réseau (cellules proches **P** codes ¹)*

Les codes de brouillage (2)

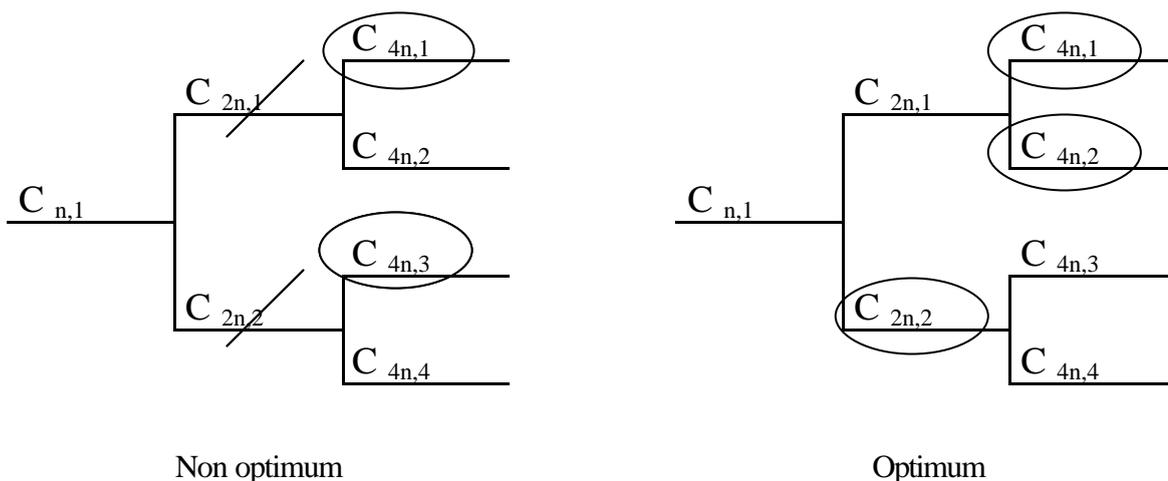
Sens montant :

- un code de channelisation par canal physique
- le mobile dispose de la totalité de l'arbre OVSF
- un code de brouillage par mobile
- \mathcal{P} les codes de brouillage distinguent les mobiles entre eux
- 2^{24} codes disponibles
- \mathcal{P} pas de contrainte sur la planification entre les mobiles (aléatoire)

Exemple d'allocation

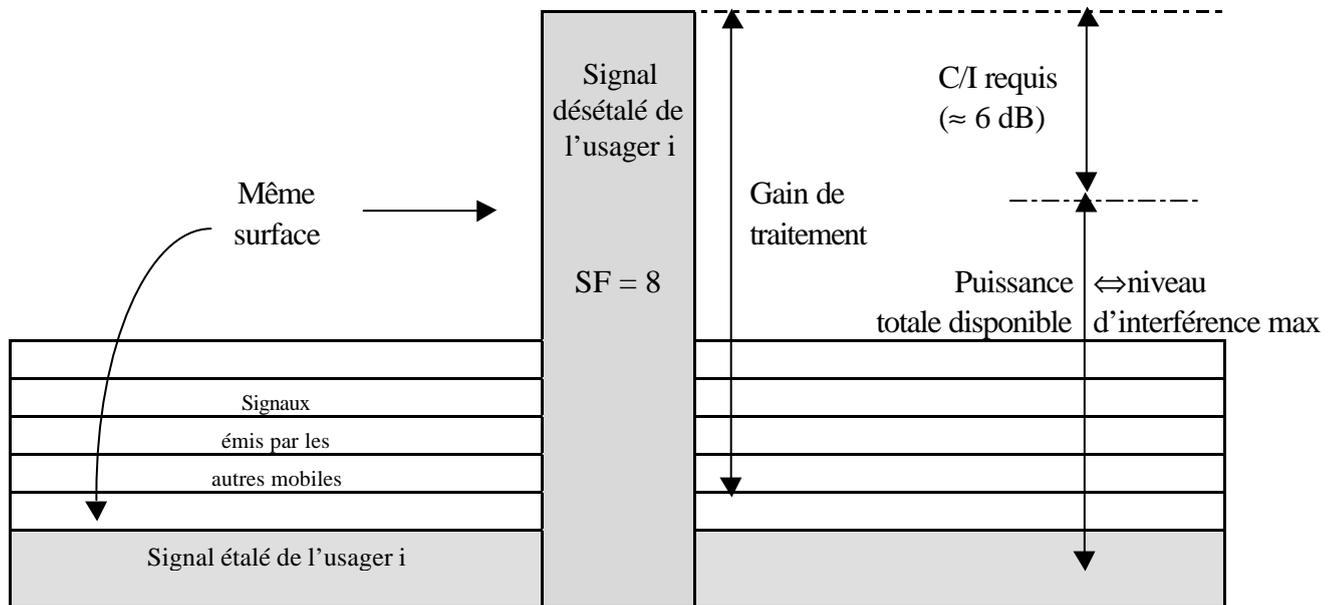
		Sens montant		Sens descendant	
		Code de brouillage	Code OVSF	Code de brouillage	Code OVSF
Cellule 1	Mobile 1	C_{S_1}	$C_{8,1}$ $C_{8,2}$	$C_{S_1'}$	$C_{4,1}$
	Mobile 2	C_{S_2}	$C_{8,1}$	$C_{S_1'}$	$C_{4,2}$
Cellule 2	Mobile 3	C_{S_3}	$C_{8,1}$	$C_{S_2'}$	$C_{4,1}$
	Mobile 4	C_{S_4}	$C_{8,1}$	$C_{S_2'}$	$C_{4,3}$

Problème de pénurie de code et de remplissage de l'arbre OVSF



Gain de traitement et puissance disponible

Exemple d'un SF ≈ 8

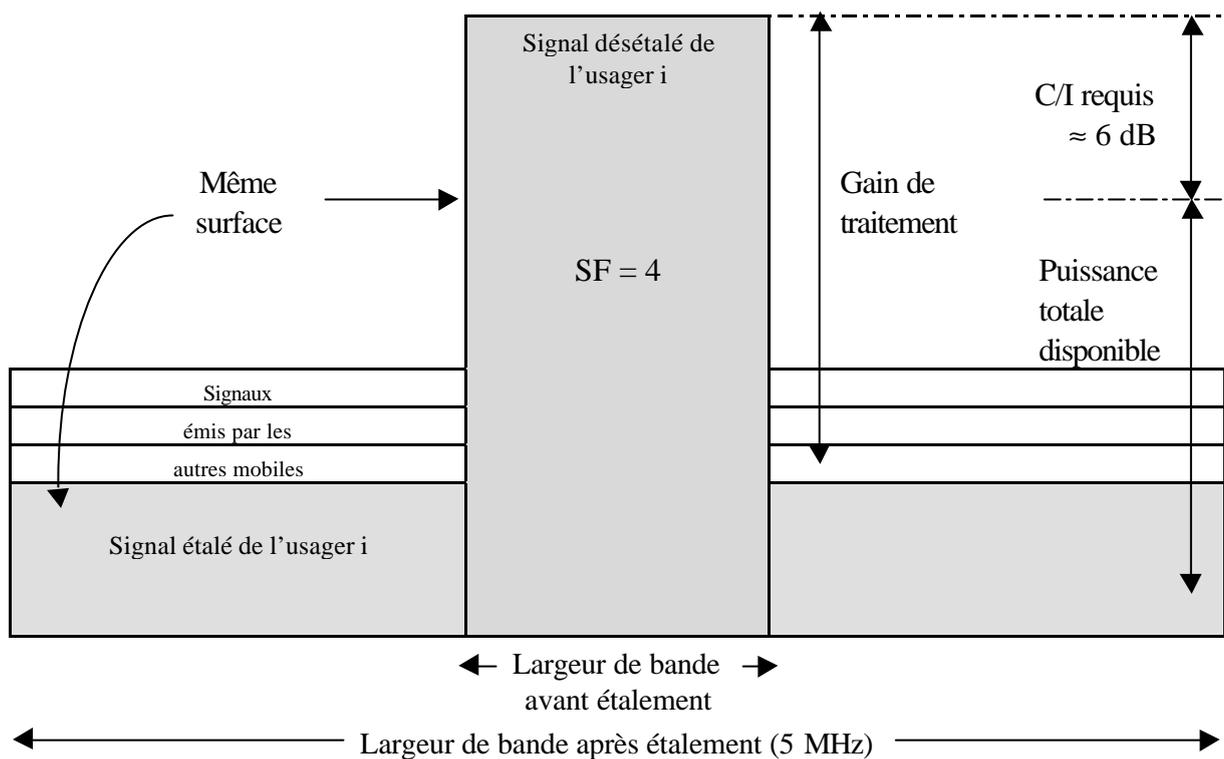


Signal usager à débit + élevé

⇒ gain de traitement + faible

⇒ puissance d'émission + élevée

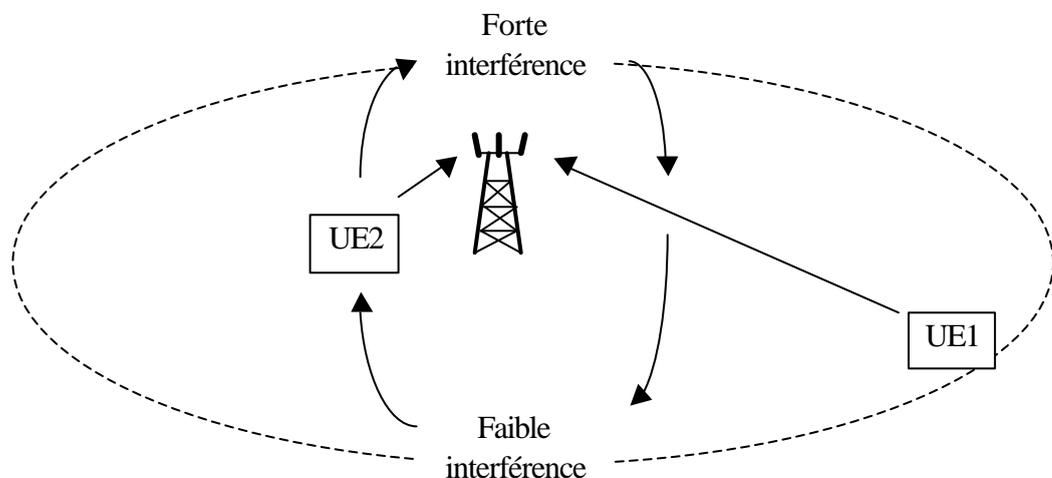
Exemple d'un SF ≈ 4



Contrôle de puissance

Système CDMA :

- chaque usager du réseau est une source d'interférence pour les autres
- ressource partagée : puissance d'émission
- dans le sens montant, contrôle de puissance indispensable pour éviter les effets proche-lointain
- nécessaire aussi dans le sens descendant pour limiter l'interférence entre cellule



Mécanisme de régulation continu

Node B → mobile

Transmission de bits TPC « transmit power control »

Canal dédié DPCH « dedicated physical control channel »

Sens montant

1/ Boucle fermée rapide (« inner loop » 0.66 ms) pour réguler le C/I avec une dynamique de variation de 80 dB (permet de contrer l'atténuation due au fading)

2/ Boucle fermée lente (« outer loop » pour mettre à jour le C/I cible en fonction de la qualité mesurée sur la liaison (BER, ...)

$BER = f(C/I, \text{vitesse du mobile, profil trajet multiple, ...})$

3/ Boucle ouverte à partir de paramètres diffusés par le réseau, moins précis, uniquement pour les initialisations de puissance (PRACH, PDCH)

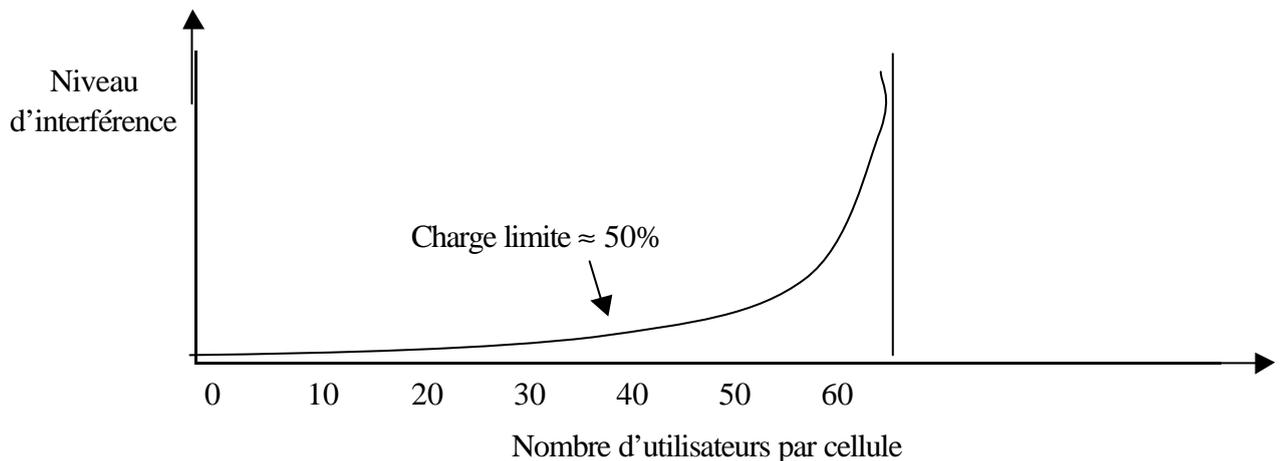
Contrôle de charge

Contrôle de puissance : sens descendant

Moins critique : tous les signaux reçus par le mobile proviennent de la même source (pas d'effet proche lointain)

Boucle fermée rapide (0.66 ms) pour réguler le C/I avec une dynamique de variation de 30 dB

Boucle fermée lente pour mettre à jour le C/I cible en fonction de la qualité mesurée sur la liaison



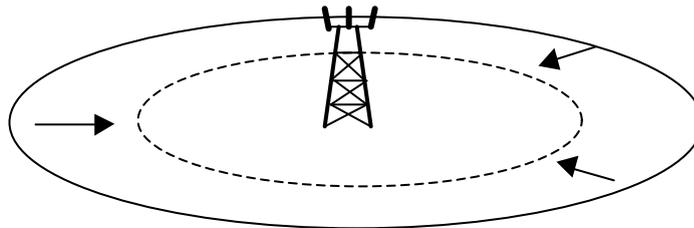
Pour de hauts niveaux de charge, la régulation de puissance décrite précédemment peut devenir instable :

- admission nouvel utilisateur
- ⇒ augmentation du niveau d'interférence
- ⇒ augmentation de la puissance d'émission sur chaque liaison
- ⇒ augmentation du niveau global d'interférence
- ⇒

« Respiration » des cellules

Lorsque le nombre d'utilisateurs dans la cellule augmente :

- le niveau moyen d'interférence dans la cellule augmente ;
- à puissance signal constante sur chaque liaison :
 - C/I diminue
 - Pour certains mobiles C/I devient inférieur au seuil de fonctionnement
 - les mobiles situés en limite de cellule sont pénalisés en premier
- on peut combattre le phénomène par le contrôle de puissance mais la puissance d'émission est bornée (cf page précédente),
- **P** le rayon effectif de la cellule diminue lorsque la charge dans la cellule augmente : phénomène de « cell breathing »



Couverture et capacité sont donc étroitement liées en CDMA

- Charge $\uparrow \Rightarrow$ couverture \downarrow

Rappel : en GSM

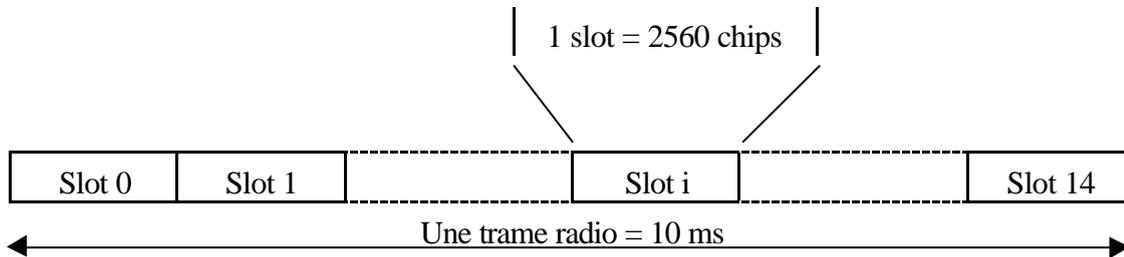
- sans saut de fréquence couverture = f{taille des cellules}
- avec saut de fréquence couverture = f{taille des cellules + charge}

NB : le saut de fréquence peut être vu comme une forme d'étalement de spectre

Pour éviter l'instabilité du contrôle de puissance et des trous de couverture dus à de hauts niveaux de trafic, le niveau d'interférence reçu par une station de base doit être contrôlé à l'aide d'algorithmes d'admission et de charge

Structure des canaux physiques

La trame radio UTRAN



La découpe en trame ne correspond pas à une répartition des ressources entre utilisateurs (\neq TDMA), mais plutôt à une structuration des données émises par un même usager

Permet notamment l'ajout de bits de contrôle

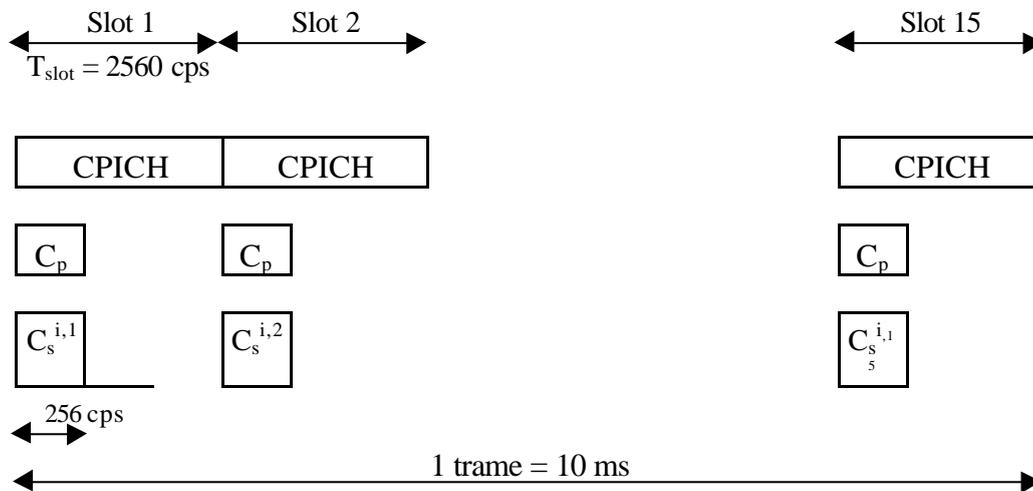
Canaux physiques mis en jeu lors de la recherche de la cellule initiale

Procédure exécutée par le mobile lors de la mise sous tension pour tenter de s'inscrire sur le réseau (IMSI attach)

Décodage successif de 3 canaux physiques

- *P-SCH primary synchronisation channel*
- *S-SCH secondary synchronisation channel*
- *CPICH common pilot channel*

Synchronisations slot et trame



1^{ère} phase : synchronisation slot – décodage du P-SCH

P-SCH \Leftrightarrow C_p code de synchronisation primaire = suite de 256 chips

- répétée à chaque occurrence de slot
- transmise à l'identique dans toutes les cellules de tous les réseaux UTRAN
- ❶ balayage par le mobile de toute la bande FDD
- ❷ corrélation entre le signal reçu et le code C_p synchronisation slot avec la station de base la plus proche
- NB : le P-SCH ne supporte pas de canal de transport

2^{ème} phase : synchronisation trame – décodage du S-SCH

S-SCH \Leftrightarrow C_s^i code de synchronisation secondaire = suite de 15 séquences de 256 chips

$0 \leq i \leq 63 \Rightarrow 64$ suites distinctes

- émis en synchronisme avec le P-SCH
- identifie la cellule de manière unique dans une zone géographique donnée (planification)
- permet la synchronisation trame du mobile
- le S-SCH ne supporte pas de canal de transport

3^{ème} phase : – recherche du code primaire de brouillage \Leftrightarrow décodage du CPICH

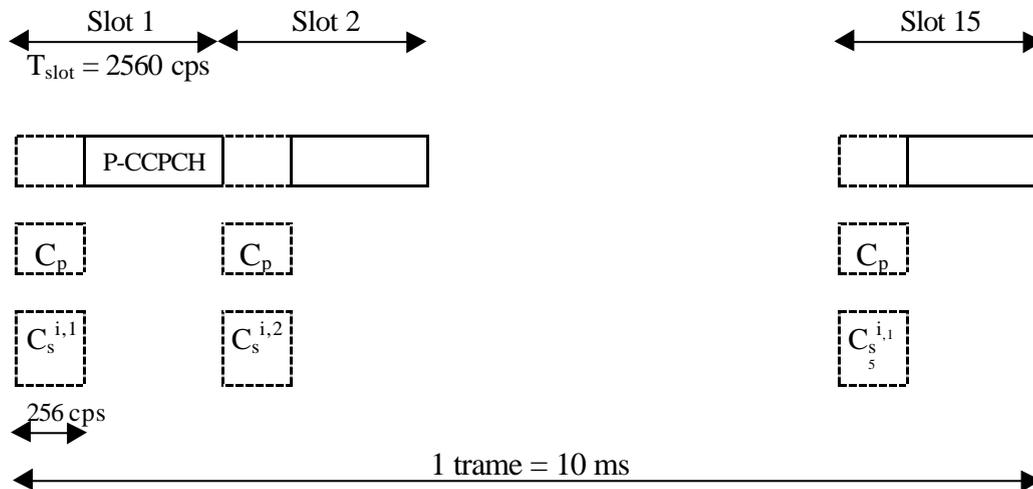
CPICH : suite de 10 symboles pilotes prédéfinis (SF = 256)

- émise dans chaque cellule UTRAN ;
- embrouillée à l'aide du code primaire de brouillage de la cellule
- 512 codes de brouillage primaire \Leftrightarrow 64 groupes de 8 codes
- un groupe \Leftrightarrow une séquence C_s^i (limitation de la durée de recherche)

- le CPICH ne supporte pas de canal de transport

Diffusion des informations système

Canal P-CCPCH « primary common control physical channel »



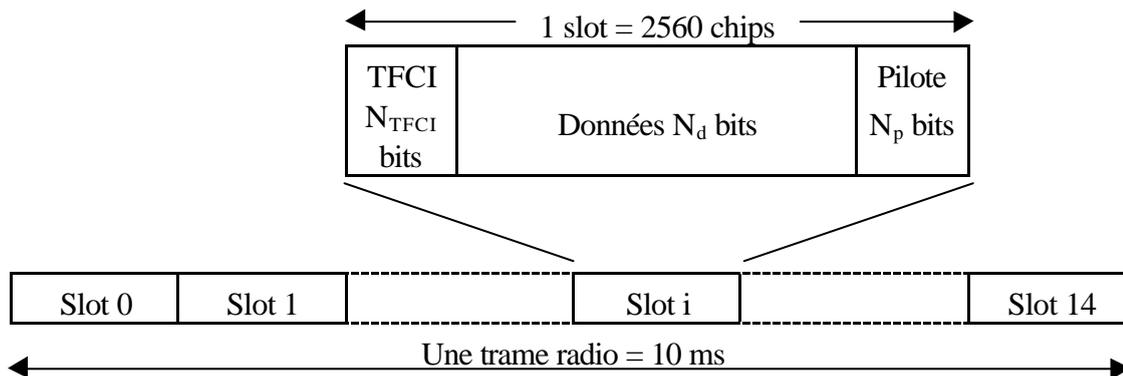
- supporte le canal de transport BCH (\Leftrightarrow canal balise BCCH en GSM)
- contient les informations système essentielles
 - identité du réseau
 - informations sur la cellule courante (niveau de puissance max, structure des canaux communs)
 - informations sur les cellules voisines (fréquence, code primaire, ...)
 - informations sur les cellules voisines d'autres technologies (CDMA, GSM, ...)
- paramètres de codage et d'étalement invariants
 - doit être reçu par tous les terminaux de la cellule
 - pas de contrôle de puissance
 - facteur d'étalement 256 (code OVSF = (256, 1))
 - multiplexé en temps avec SCH
 - débit utile $\frac{(2560 - 256) \times 2 \times 15}{256 \times 10 \times 2} = 13.5 \text{ kbps}$ (codage convolutif de rendement $\frac{1}{2}$)
 - capacité très supérieure au GSM (780 bit/s)

Paging

Canal S-CCPCH

« secondary common control physical channel »

Supporte les canaux de transport FACH (Forward Access Channel) et PCH (Paging Channel) ⇒ canal descendant



Contient 3 types d'informations

- des bits de données (messages de signalisation issus des couches hautes)
- des informations de contrôle de la couche physique
 - rôle des bits pilotes : permettre une estimation de la réponse impulsionnelle du canal (connus de l'émetteur et du récepteur)
 - rôle des bits TFCI (transport format combination indicator) : code le(s) format(s) de transport utilisé(s) pour le(s) canal(aux) de transport contenu(s) dans la trame courante
 - TFCI erroné ⇒ trame perdue ⇒ protection particulière
 - TFCI et bits pilotes répétés à chaque slot de la trame
 - 18 formats possibles pour le S-CCPCH selon SF, codage canal, nombre de bits pilotes et TFCI.

NB : FACH et PCH peuvent être :

- multiplexés sur un même S-CCPCH
- utiliser chacun un canal physique dédié

Accès aléatoire des mobiles

PRACH « physical random access channel »

Canal Montant

Permet l'accès aléatoire des mobiles (supporte le canal RACH) :

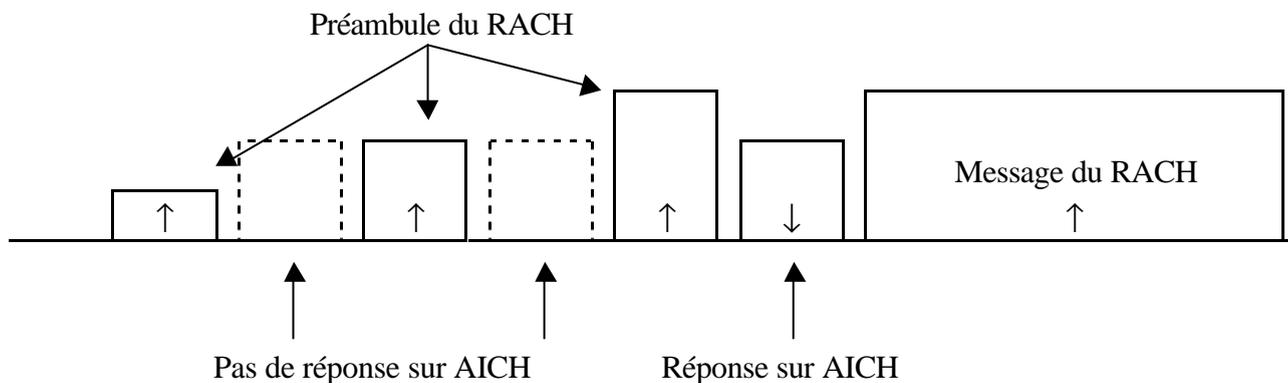
- pour l'inscription après la mise sous tension du mobile
- pour la mise à jour de localisation
- pour établir une connexion à l'initiative du mobile
- en réponse à un message de paging

Peut éventuellement transporter des données utilisateurs

- transmission par paquet à faible débit

Pas de contrôle de puissance par le réseau :

- transmission d'un préambule spécifique (4096 chips, $SF = 256 \Leftrightarrow$ « signature » de 16 symboles)
- émis d'abord à puissance minimale puis de + en + fort jusqu'à acquittement du réseau (sur un canal spécifique dit AICH)
- émission des données (durée 10 ou 20 ms, $SF = 32$ à 256, soit 150 à 1200 bits avec un codage convolutif de taux $1/2$)



Accès aléatoire \Rightarrow canal collisionné

Les mobiles sont répartis :

- en temps (15 fenêtres d'émission toutes les 20 ms) – mode slotted-aloha
- en code (le mobile choisit aléatoirement une des signatures disponibles et son code de channelisation associé)
- les signatures utilisables dans la cellule sont diffusées sur le BCCH
- P permet de minimiser la probabilité de collision

Transport des données (1)

DPCH « dedicated physical data channel »

Ressource dédiée à un usager offrant un délai de transmission et un débit constant

2 sous-canaux physiques :

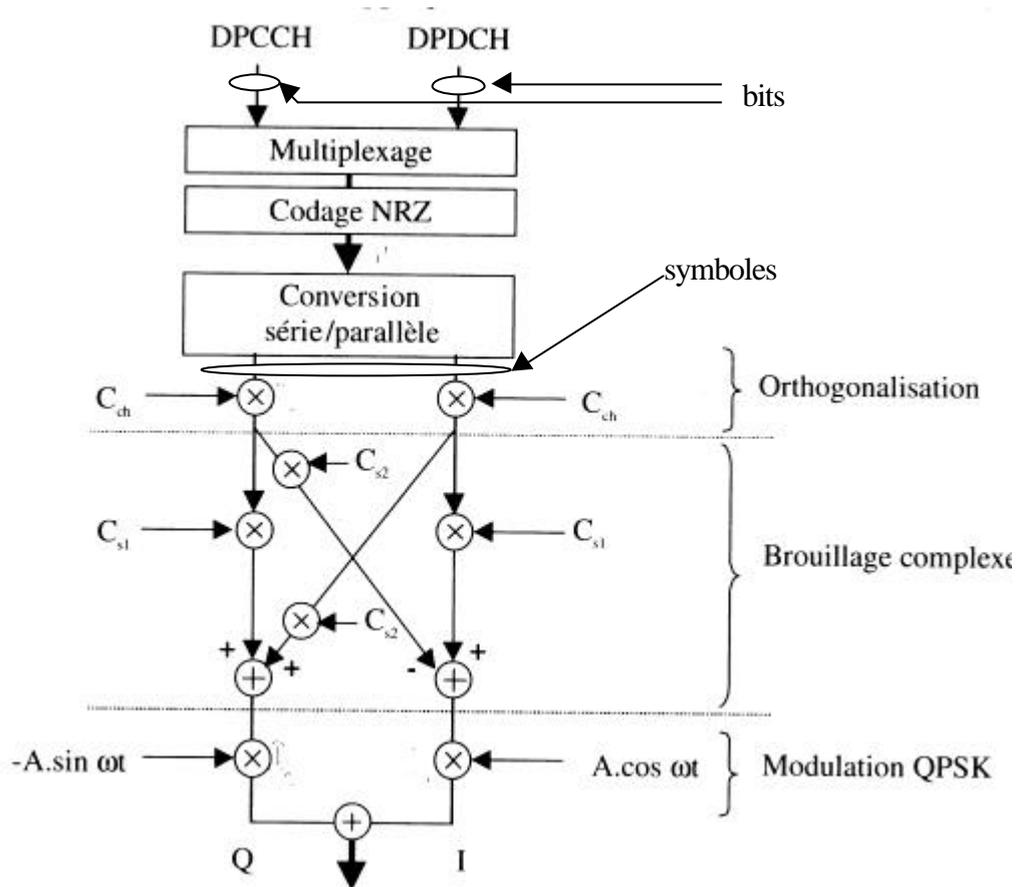
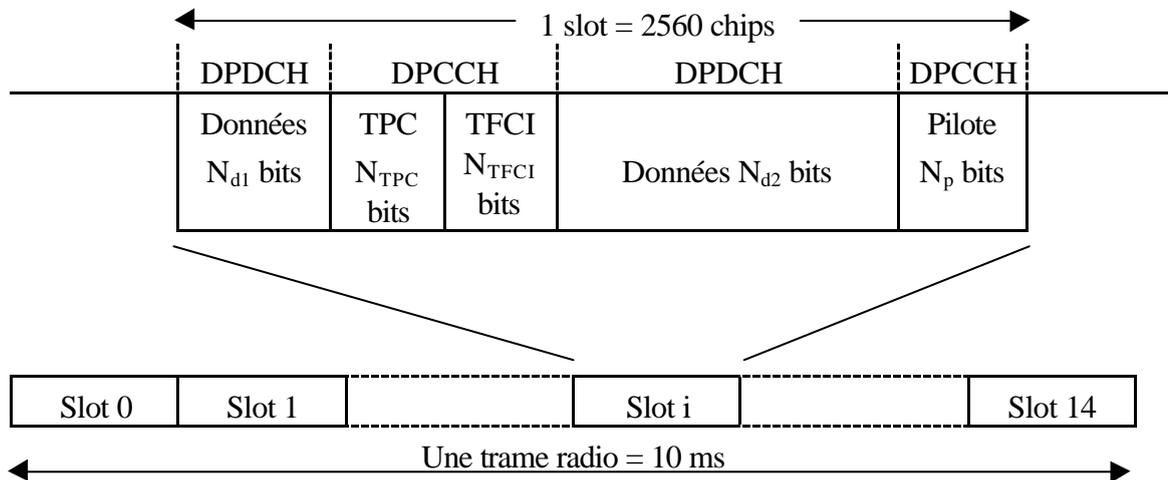
- le DPDCH « Dedicated Physical Data Channel »
 - *transmet les données du plan usager (voix, messages)*
 - *transmet les données de signalisation issues des couches supérieures*

- Le DPCCH « Dedicated Physical Control Channel »
 - *transmet les données de contrôle spécifiques à la couche physique*
 - *bits pilotes (estimation de la réponse impulsionnelle du canal, profil de trajets multiples)*
 - *bits TPC « transmit power control »*
 - *bits TFCI « transport format combination indicator »*
 - *bits FBI « feedback information » uniquement dans le sens montant*

Transport des données (2)

Cas du canal DPCH descendant

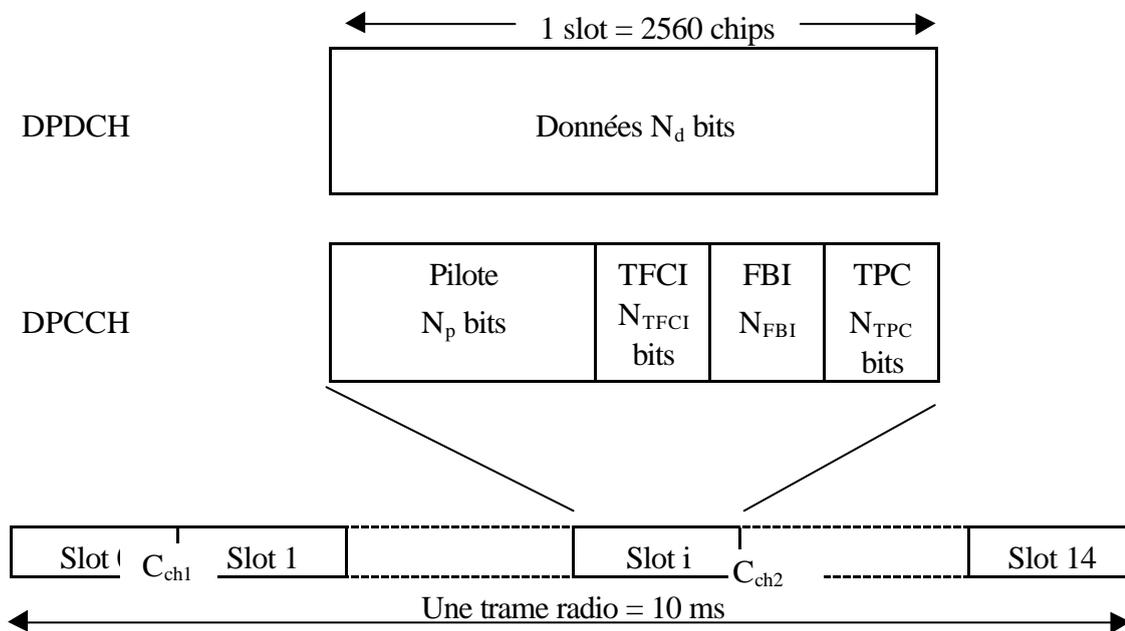
Les canaux de contrôle et de données sont multiplexés en temps



Cette méthode minimise la consommation en code OVFSF (important dans le sens descendant : un arbre OVFSF pour une cellule)

Transport des données (3)

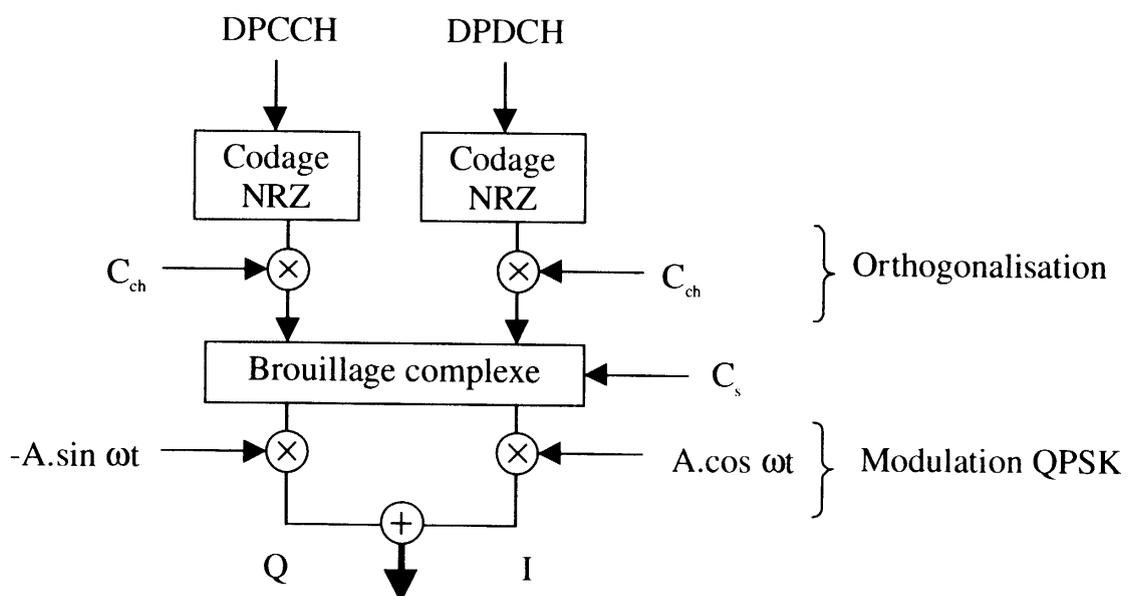
Cas du canal DPCH montant



Les canaux de contrôle et de données sont séparés sur les voies I et Q de la chaîne d'émission

$$\text{Débit}_{DPCCH} + \text{Débit}_{DPDCH} \leq C_{ch1} + C_{ch2}$$

$P_{DPCCH} + P_{DPDCH}$, le brouillage complexe permet une égalisation des puissances sur les voies I et Q



Cette méthode de multiplexage optimise la consommation énergétique des terminaux (rendement des amplificateurs de puissance)

Exemples de formats DPCH

DPCH descendant

↔ multiplexage DPDCH et DPCCH

N° de format	SF	Débit en symbole Ks/s	Débit DPCH Kb/s	Bits/slot	DPDCH (bits/slots)		DPCCH (bits/slot)		
					N _{D1}	N _{D2}	N _{TPC}	N _{TFCI}	N _{pilot}
0	512	7.5	15	10	0	4	2	0	4
1	512	7.5	15	10	0	2	2	2	4
4	256	15	30	20	2	12	2	0	4
5	256	15	30	20	2	10	2	2	4
10	128	30	60	40	6	24	2	0	8
15	8	480	960	640	120	488	8	8	16
16	4	960	1920	1280	248	1000	8	8	16

Transmission multi-code

- Il existe un format utilisant 3 canaux physiques avec un SF de 4
- **P** permet d'atteindre le débit utilisateur max (mythique !) de 2.8 Mb/s

NB : Si les bits TFCI sont absents, les positions des bits DPDCH sont fixés à une position par défaut

DPCH montant

DPDCH sur voie I

N° de format	SF	Débit en symbole Ks/s	Débit du canal Kb/s	Bits/trames	Bits/slot
0	256	15	15	150	10
1	128	30	30	300	20
4	64	60	60	600	40
5	32	120	120	1200	80
10	16	240	240	2400	160
15	8	480	480	4800	320
16	4	960	960	9600	640

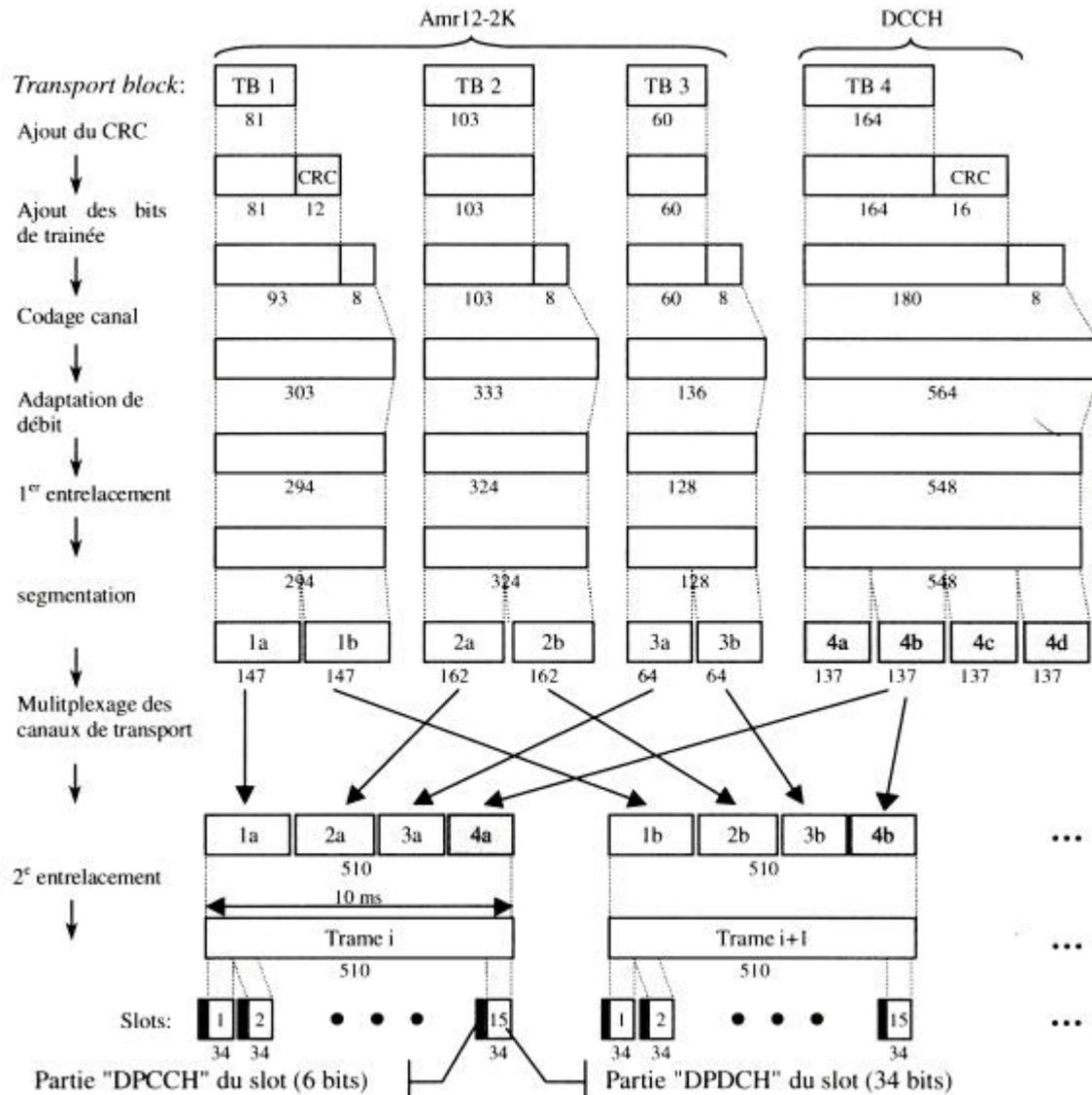
DPDCH sur voie Q

SF	Bits/trame	Bits/slot	Pilotes/slot	TPC/slot	TFCI/slot	FBI/slot
256	150	10	6	2	2	0
			5	2	2	1

			6	2	0	2
--	--	--	---	---	---	---

Traitement de bout en bout par la couche physique : exemple du service de phonie

Cas d'un flux descendant (cf chapitre 3 page 6)

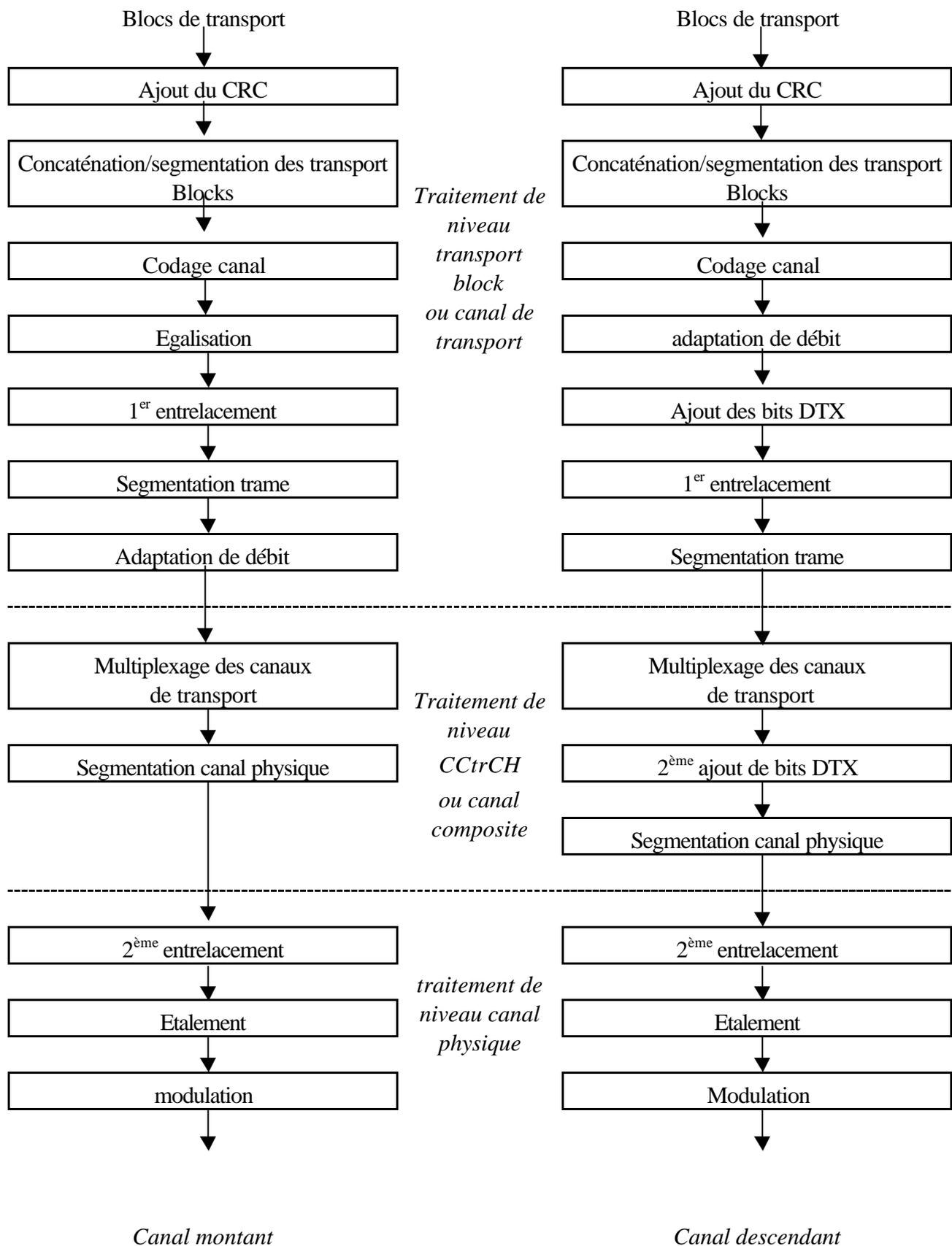


Ici SF=128 soit $\frac{3.84 \cdot 10^6 \times 2 \times 10^{-3}}{128 \times 15} = 40$ bits d'informations par slot (codage conv. taux 1/2)

Soit 40 = 34 bits utilisables par DCH multiplexés + 4 bits réservés signal pilote + 2 bits contrôle de puissance

TTI DPDCH = 20 ms ; TTI DPCCH = 40 ms

Traitement de bout en bout par la couche physique : cas général



Détails des traitements (1)

Codage canal

Selon la qualité requise :

- Convolutif (rendement $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{3}$, longueur de contrainte 9) – appliqué aux faibles débits (voix, ...)

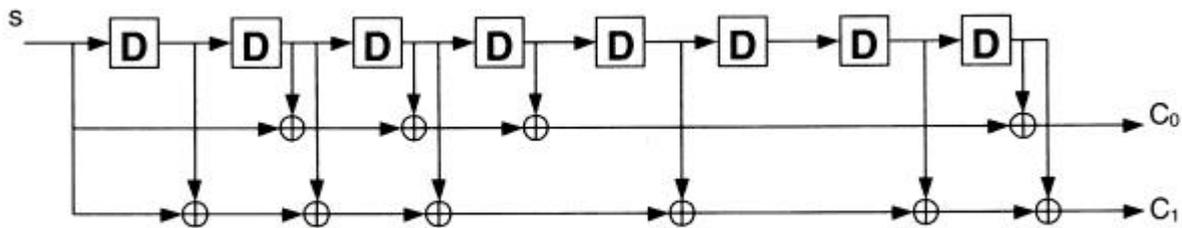
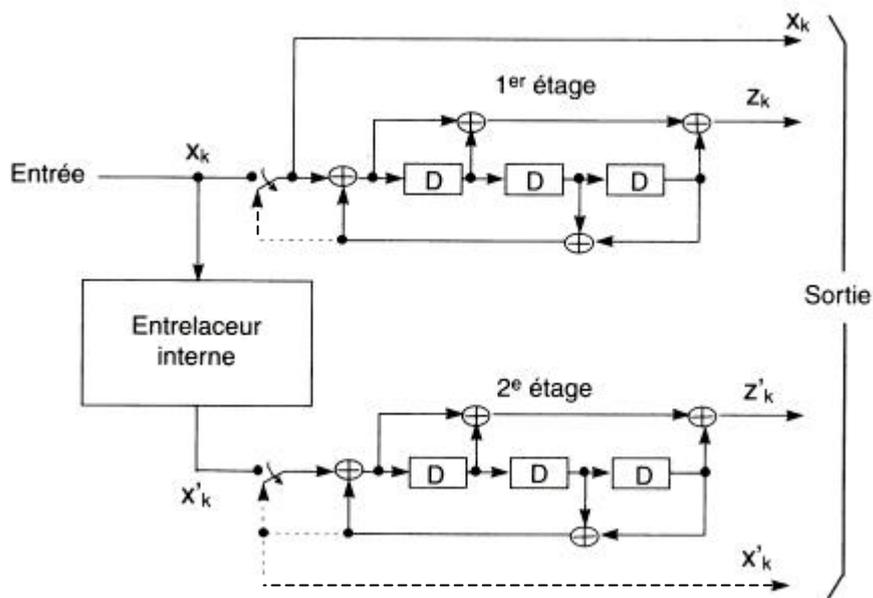


Schéma du codeur de taux 1/2

- Turbo-code – gain si codage sur un nombre important de bits => débits élevés



La fonction de concaténation/segmentation placée en amont du codage permet d'adapter la taille des blocs à coder aux contraintes du codeur :

- bloc de 504 bits pour le codeur convolutif
- bloc de 5114 bits pour le codeur turbo
- ajout de bits de traînée pour purger les registres du codeur

CRC :

- détection des erreurs résiduelles
- demande de répétition de trames erronées par la couche RLC

Détails des traitements (2)

Egalisation et adaptation de débit

Permet d'adapter la taille des blocs codés aux dimensions des canaux physiques de l'interface radio

Canaux de transport \Leftrightarrow débit usager

Le réseau choisit un SF permettant un débit le plus proche possible du débit demandé (en sortie du codage canal)

- Si débit supérieur : répétition de certains bits
- Si débit inférieur : poinçonnage de certains bits

Entrelacement \mathcal{P} optimisation des mécanismes de correction d'erreur

Méthode d'entrelacement :

- ❶ rangement des bits par ligne dans une matrice
- ❷ permutation des colonnes
- ❸ lecture de bits par colonne

Deux niveaux :

- canal de transport (*inter-trame*)

Effectué pour un bloc de transport avant la segmentation \Rightarrow si une trame est entachée d'erreurs, après désentrelacement celles-ci sont réparties sur l'ensemble du transport block

Importance du TTI : TTI élevé \Rightarrow transport block réparti sur plusieurs trames \Rightarrow entrelacement plus efficace

Ex : TTI = 80 ms \Rightarrow 1 transport block = 8 trames radio

- canal physique (*intra-trame*)

Effectué sur chaque trame avant le découpage en slot : si un slot est entaché d'erreur, celles-ci sont ensuite réparties sur l'ensemble de la trame

Adaptation aux fluctuations de débit source

3 niveaux possibles d'adaptation :

- au niveau canal logique – canal de transport
 - *si baisse de débit possibilité de basculer le canal logique de trafic DTCH d'un canal de transport dédié DCH vers un canal partagé DSCH*
 - *Géré par la couche RRC (côté réseau)*

- au niveau canal de transport
 - *A chaque TTI, choix du TF le plus adapté parmi le TFS*
 - *Exemple : en cas de baisse de débit, diminution de la taille de transport block*

- au niveau canal physique
 - *flux montant : le SF du DPDCH peut varier d'une trame à l'autre*
 - *le SF est indiqué dans le TFCI transmis sur le DPDCH associé (dont le SF est constant)*
 - *flux descendant : le SF reste constant, interruption temporaire de la transmission par insertion de bits « DTX »*

NB : cette méthode n'est pas utilisée sur la voie montante pour des aspects CEM