

5

Le GPRS et EDGE

Le GSM (Global System for Mobile communications) est conçu pour de la téléphonie mobile, autrement dit pour des communications en mode circuit à faible débit et, si possible, au moyen de terminaux à coûts réduits. Certains choix techniques du GSM sont faits en conséquence, notamment en matière d'architecture réseau et de mise en forme des ondes (modulation, codage, etc.). Ces choix se révèlent toutefois contraignants pour les services de données (transfert de fichier, vidéo, etc.)

Pour pallier ces limitations, le standard du GSM évolue sans cesse. Dans un premier temps, le GSM a standardisé des règles pour réaliser du transfert de données en utilisant les circuits de voix. Avec le HSCSD (High Speed Circuit Switched Data), on assiste à un premier développement du standard vers des débits supérieurs, mais toujours en mode circuit.

Pour améliorer encore l'efficacité du transfert de données, une évolution majeure du GSM est normalisée sous le nom de GPRS (General Packet Radio Service). Fondée sur l'interface radio du GSM, mais développant un partage de ressources dynamique adapté au trafic sporadique, le GPRS introduit une architecture réseau en mode paquet. Enfin, EDGE (Enhanced Data for GSM Evolution) propose des débits supérieurs par l'introduction d'une modulation plus efficace, applicable à la fois au HSCSD et au GPRS.

L'association du GPRS et d'EDGE est souvent considérée comme un système 2,5 G, intermédiaire entre les systèmes 2 G (GSM, etc.) et 3 G (UMTS, etc.). Ces systèmes de transition sont présentés en détail dans les sections de ce chapitre.

Le transfert de données en GSM

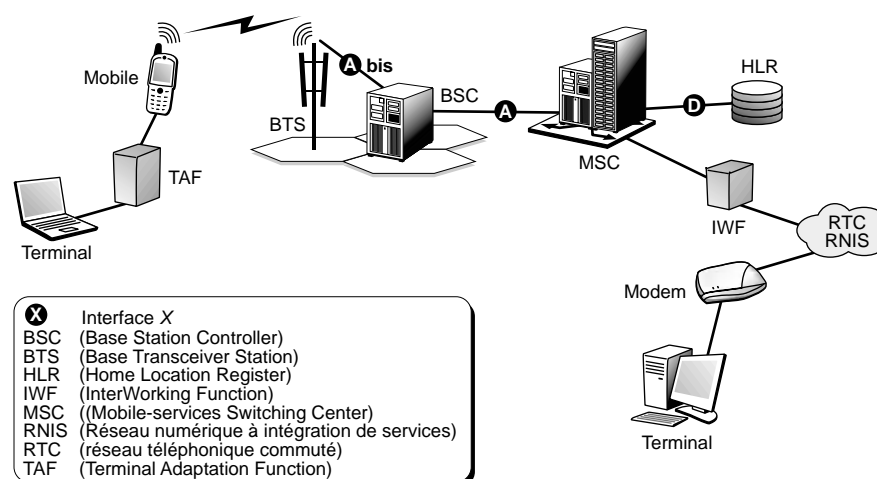
Le chapitre précédent a montré comment un circuit de communication était établi, maintenu puis relâché entre un utilisateur mobile et le réseau téléphonique commuté. Ce circuit est utilisé dans la majorité des cas pour transporter de la voix, mais rien ne s'oppose *a priori* à y faire transiter des données, c'est-à-dire n'importe quel type d'information numérique.

Le service de données du GSM

À l'instar des codecs qui transforment le signal de parole en un train de bits, le GSM a normalisé dès ses premières phases de développement des interfaces pour les données. Ces interfaces se présentent comme des sortes de modems permettant d'adapter le passage d'un flux de données dans le terminal et entre le réseau mobile et le réseau public. Cette fonction est réalisée côté mobile par un élément appelé TAF (Terminal Adaptation Function) et côté réseau par l'IWF (InterWorking Function).

Figure 5.1

Architecture type d'un transfert de données en GSM.



Pour fiabiliser la connexion, un protocole de reprise sur erreur, RLP (Radio Link Protocol) est mis en œuvre entre le TAF et l'IWF. Il existe toutefois un mode transparent, qui n'utilise pas ce protocole. Dans ce dernier cas, il revient aux couches supérieures de fiabiliser le lien, si nécessaire, au moyen de TCP, par exemple.

Pour protéger les données sur l'interface radio, l'entrelacement est plus profond que celui utilisé pour la parole et s'effectue sur 22 trames au lieu de 8. Les évanouissements du canal sont de la sorte statistiquement moyennés, et le codeur convolutif est plus performant. Comme le transfert de données en GSM s'utilise plutôt pour des applications sans contrainte de temps

réel, telles que le transfert de fichiers, par exemple, le délai induit par cet entrelacement plus profond n'est pas critique.

Tout comme un signal de parole, les données sont traitées par blocs de 20 ms. Pour la transmission des données à 9,6 Kbit/s, la taille du bloc est de 192 bits en mode transparent ($192 \text{ bits}/20 \text{ ms} = 9,6 \text{ Kbit/s}$). À ces bits, on ajoute 48 bits de signalisation, essentiellement pour gérer l'adaptation du débit dans le TAF et l'IWF. Le paquet est ensuite codé par le même code convolutif que celui utilisé pour la parole. Enfin, un poinçonnage léger est appliqué pour diminuer le nombre de bits en sortie du codeur de façon à l'adapter à la taille des trames. 32 bits sont ainsi retirés des 488 issus du codeur, et les 456 bits restants sont répartis dans 8 demi-bursts répartis sur 22 trames.

En mode non transparent, c'est-à-dire lorsque le protocole RLP est utilisé, le bloc élémentaire d'information contient 200 bits, auxquels sont ajoutés 40 bits de signalisation (16 bits d'en-tête, contenant le numéro et le type du paquet, ainsi que des informations sur les paquets à retransmettre, et 24 bits de CRC (Cyclic Redundancy Check) pour détecter les paquets erronés. S'il n'y avait aucune retransmission, le débit vu par l'utilisateur serait de 200 bits/20 ms, soit 10 Kbit/s. En réalité, les retransmissions font baisser ce débit. Le protocole RLP est fondé sur le principe du *selective repeat* ARQ (Automatic Repeat reQuest), présenté en détail à l'annexe technique A, et ne retransmet que les paquets erronés. Un débit utilisateur de 9,6 Kbit/s correspond à un taux d'erreur paquet moyen de 4/1 000.

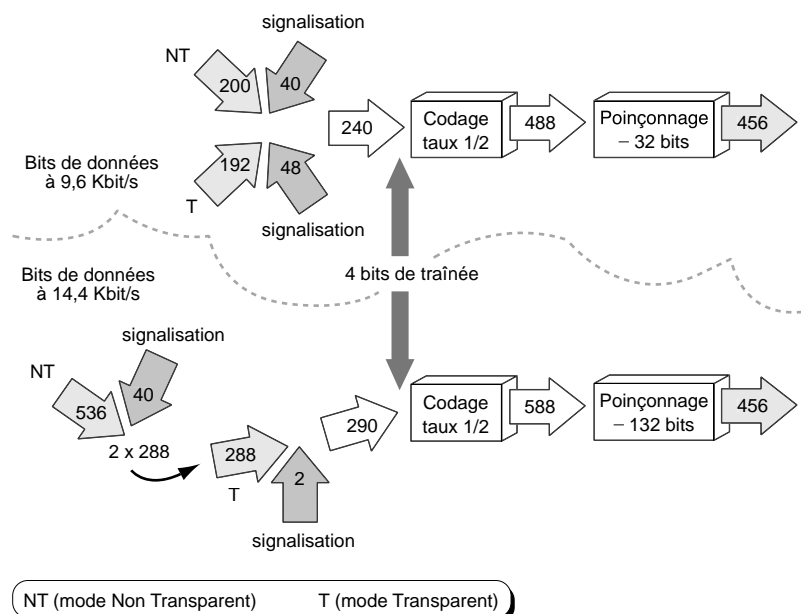
Lorsque le canal de propagation est favorable — bon rapport signal sur bruit et mobilité restreinte, par exemple —, le GSM peut offrir des débits supérieurs en poinçonnant la sortie du codeur convolutif. Sur les 588 bits en sortie du codeur, seuls 456 sont transmis. Sachant que le codeur traite des blocs de 290 bits, le taux de codage tenant compte du poinçonnage est de l'ordre de 0,64. En mode transparent, les 290 bits sont constitués de 2 bits de signalisation et de 288 bits d'information, et ce toutes les 20 ms, d'où un débit utilisateur de 14,4 Kbit/s.

En mode non transparent, le paquet RLP dure 40 ms. Il contient 536 bits, auxquels s'ajoutent les 40 bits de signalisation RLP, soit l'en-tête sur 16 bits et le CRC sur 24 bits. Ce paquet est alors transmis comme deux paquets du mode transparent.

La figure 5.2 illustre les différents modes de transmission de données en GSM circuit.

Figure 5.2

Les transmissions de données en GSM circuit.



Le HSCSD

Le service HSCSD est un service de données en mode circuit, à débit élevé, qui consiste uniquement à allouer non plus un canal physique par utilisateur et par trame TDMA mais plusieurs — jusqu'à 4, soit la moitié de la trame. Comme pour le service de données précédent, l'allocation des ressources se fait en mode circuit, par connexion et pour toute la durée de la connexion. Cette allocation peut être asymétrique, c'est-à-dire offrir plus de débit dans un sens que dans l'autre. À l'origine, les slots pouvaient être non consécutifs dans la trame, mais, pour des raisons de complexité d'implémentation dans les terminaux, les constructeurs de terminaux ont imposé une allocation contiguë.

Le débit maximal offert par le HSCSD est de 57,6 Kbit/s — pour 4 slots à 14,4 Kbit/s. Même si ce débit est comparable à ceux obtenus avec des modems téléphoniques pour une connexion filaire, le HSCSD souffre d'un manque de souplesse et d'efficacité dans l'allocation de ressources radio.

Finalement, les constructeurs et les opérateurs n'ont pas investi dans les évolutions logicielles et matérielles à apporter aux terminaux et aux stations de bases pour incorporer le service HSCSD dans les réseaux GSM, car, en parallèle, était standardisé le GPRS, beaucoup plus prometteur.

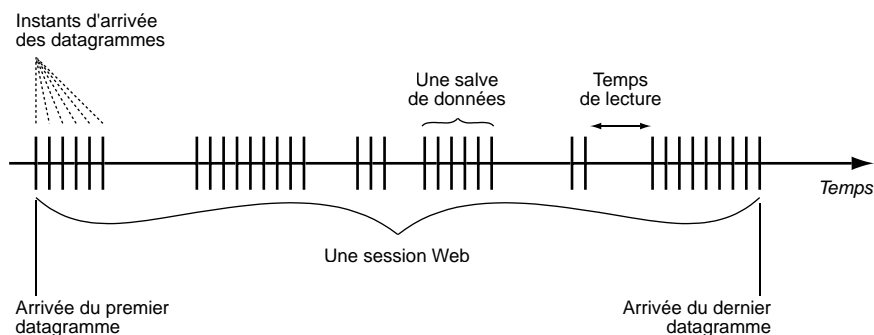
Le GPRS

Le GPRS (General Packet Radio Service) peut être considéré comme une évolution des réseaux GSM avant leur passage aux systèmes de troisième génération. En termes de services et de débits, il s'approche des spécifications de l'IMT 2000 (voir le chapitre 6). Toutefois, la transition du GSM au GPRS demande plus qu'une simple adaptation logicielle, à la différence du HSCSD, comme vous le verrez plus en détail dans la suite de ce chapitre.

Le GPRS s'inspire des usages devenus courants d'Internet : lors de la consultation de pages Web, une session peut durer plusieurs dizaines de minutes alors que les données ne sont réellement transmises que pendant quelques secondes, lors du téléchargement des pages. Le trafic de données ainsi engendré est donc très sporadique, contrairement à celui de la voix, par exemple.

La figure 5.3 illustre les caractéristiques d'une session Web.

Figure 5.3
*Caractéristiques
d'une session Web.*



Dans ce type d'utilisation, les problèmes suivants peuvent se poser dans un réseau à commutation de circuits tel que le GSM :

- **Monopolisation des ressources.** Un certain nombre de ressources sont monopolisées dans tout le réseau pour un seul utilisateur et pendant toute la durée de sa session, alors que ces ressources ne sont qu'épisodiquement réellement utilisées. Il y a donc gaspillage des ressources, notamment des ressources radio, rares et chères, non utilisées à cent pour cent de leur capacité.
- **Coût des communications.** Basée sur le temps de connexion de l'utilisateur, le coût des communications tend à s'alourdir sensiblement du fait à la fois du téléchargement des données à relativement faible débit et du temps de lecture des pages d'information.
- **Interconnexion lourde.** Avec les réseaux paquet externes et donc avec Internet, la transmission de données en mode circuit nécessite des éléments d'adaptation spécifiques à la frontière du réseau de l'opérateur.

Le GPRS résout ces problèmes en définissant une architecture de réseau à commutation de paquets, qui permet de n'allouer des ressources à un utilisateur qu'au coup par coup, lorsqu'il a réellement des données à émettre ou à recevoir, et non durant toute la durée de sa connexion, ainsi que de facturer les communications au volume de données échangées (en kilobit) et non à la durée de connexion. De plus, le GPRS introduit de la flexibilité dans le choix du type de protection des données, offrant ainsi une plus grande variété de débits.

Architecture générale

Le réseau GPRS et le réseau GSM fonctionnent en parallèle : le premier est utilisé pour le transport des données, et le second pour les services classiques de voix. Tous deux utilisent les mêmes équipements BSS, c'est-à-dire les stations de base BTS et leurs contrôleurs BSC. C'est ensuite qu'ils se distinguent. Le réseau cœur (Core Network) du GPRS est un réseau paquet interconnecté, pouvant être relié à divers types de réseaux de données fixes — IP (Internet Protocol), CLNP (ConnectionLess Network Protocol), X.25 ou CONP (Connection Oriented Network Protocol) — ou encore à d'autres réseaux GPRS, exploités par d'autres opérateurs. De son côté, le réseau cœur du GSM est relié au RTC (réseau téléphonique commuté), national ou international, ou à un autre réseau GSM, exploité par un autre opérateur.

De nouveaux éléments de réseau doivent donc être ajoutés au GSM pour offrir le GPRS. Ces éléments sont le SGSN (Serving GPRS Support Node) et le GGSN (Gateway GPRS Support Node), des routeurs paquet dotés de fonctionnalités dédiées à la gestion d'un réseau mobile. Ces derniers sont détaillés à la section « Le réseau cœur (Core Network) et les protocoles », ultérieurement dans ce chapitre. La figure 5.4 illustre l'architecture générale d'un réseau GPRS-GSM.

Les classes de mobiles en GPRS

Puisque le GSM et le GPRS se partagent une même interface radio, un mobile peut donc être uniquement GSM, tels les anciens terminaux mobiles, et d'autres être capables de faire simultanément du GSM et du GPRS. De ce fait, le GPRS a défini trois classes de mobiles :

- **Mobile de classe A.** Peut communiquer simultanément dans les deux modes.
- **Mobile de classe B.** Peut écouter simultanément le réseau GSM et le réseau GPRS et donc répondre à un appel entrant dans le mode adéquat.
- **Mobile de classe C.** Ne peut avoir simultanément une connexion circuit et une connexion paquet. L'utilisateur doit positionner son terminal dans le mode souhaité.

Les mobiles de classe A sont évidemment plus complexes, et donc plus chers, que les mobiles de classe C. Un autre élément de complexité est engendré par la capacité du mobile à communiquer sur plusieurs timeslots (voir la section « L'interface radio », ci-après). Pour distinguer ces derniers, le GPRS a introduit des classes multislots.

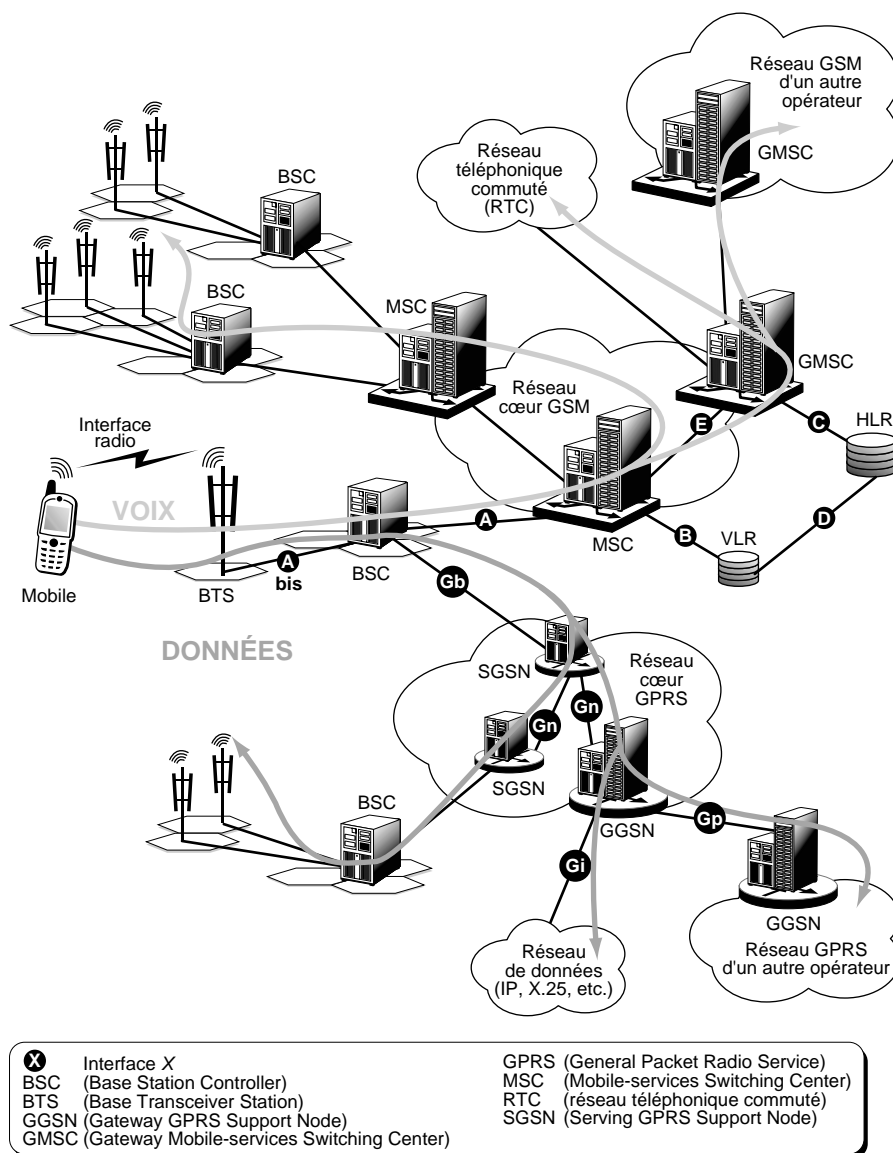


Figure. 5.4

Architecture d'un réseau GPRS-GSM.

Il est important de noter que, dans cette architecture, le réseau GPRS se greffe sur le réseau GSM existant, notamment pour la partie ressources de l'interface radio. Les deux réseaux utilisant les mêmes bandes de fréquences, les ressources que l'opérateur GSM planifiait auparavant uniquement pour le trafic de voix, déjà dense à certains endroits, doivent dorénavant être partagées entre le trafic de voix (GSM) et celui des données (GPRS).

En terme de service, le GPRS offre la possibilité de faire du point à point en mode avec connexion comme en mode sans connexion et du point à multipoint. Ce dernier peut être de type broadcast — le service est distribué aux utilisateurs d'une même zone de couverture — ou multicast — semblable au multicast des réseaux IP, pour lequel le service est distribué aux utilisateurs d'un groupe, quelle que soit leur position géographique.

Les sections qui suivent présentent l'interface radio et le réseau fixe du GPRS.

L'interface radio

L'interface radio du GPRS s'appuie sur celle du GSM. Elle utilise les mêmes bandes de fréquences, la même modulation, le GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying), et les mêmes canaux physiques. En revanche, sa structure de multitrame est légèrement différente. De plus, le GPRS introduit de nouveaux canaux logiques, avec davantage de souplesse dans le codage protecteur d'erreur, une couche MAC (Medium Access Control), pour partager dynamiquement les ressources radio entre plusieurs utilisateurs, et un protocole de fiabilisation du lien radio, le RLC (Radio Link Protocol).

La couche physique

Comme le GSM, le GPRS utilise un accès radio en FD-TDMA (Frequency Division-Time Division Multiple Access), un mode hybride entre TDMA et FDMA, présenté au chapitre 1. Un canal occupe une bande de 200 kHz. La trame TDMA dure 4,615 ms et est constituée de 8 slots de 577 μ s. La modulation est une GMSK offrant un débit brut d'environ 270 Kbit/s par slot.

Un canal physique est défini par un timeslot sur une fréquence particulière. Le canal physique associé fait référence au même slot temporel mais dans le sens de transmission opposé. Pour distinguer les canaux physiques GSM des canaux physiques GPRS, ces derniers portent le nom de PDCH (Packet Data CHannel). Enfin, à l'instar de ce qui se passe en HSCSD, un utilisateur GPRS peut se voir allouer plusieurs slots d'une même trame. Cette allocation multislot peut de surcroît différer entre la voie montante et la voie descendante, permettant ainsi de traiter efficacement les transmissions asymétriques.

Il existe 29 classes de mobiles multislots. Les mobiles des classes 1 à 12 et 19 à 29 sont dits de type 1, ou half-duplex, alors que les mobiles de classes 13 à 18 sont de type 2, ou full-duplex, c'est-à-dire qu'ils sont capable d'émettre et de recevoir simultanément. Pour les mobiles de type 1, les PDCH de transmission ne doivent pas se situer, au sein d'une trame TDMA, entre deux PDCH de réception.

Chaque classe de mobile est caractérisée par plusieurs paramètres :

- **Rx.** Nombre maximal de PDCH allouables dans le sens descendant (*downlink*) ;
- **Tx.** Nombre de PDCH allouables dans le sens montant (*uplink*) ;
- **Sum.** Nombre total maximal de PDCH allouables (*downlink* + *uplink*).

Entre chaque émission-réception de données sur un PDCH, des temps de garde permettent au mobile d'effectuer des mesures, ou tout simplement de changer de fréquence et de se préparer à la prochaine émission-réception de données :

- **Tta.** Temps nécessaire au mobile pour effectuer des mesures sur les cellules voisines avant l'émission de prochaines données sur un PDCH (*uplink*) ;
- **Ttb.** Temps nécessaire au mobile avant l'émission de prochaines données sur un PDCH (*uplink*), sans mesures sur les cellules voisines ;
- **Tra.** Temps nécessaire au mobile pour effectuer des mesures sur les cellules voisines avant la réception de prochaines données sur un PDCH (*downlink*) ;
- **Trb.** Temps nécessaire au mobile avant réception d'un prochain paquet sur un PDCH (*downlink*), sans mesures sur les cellules voisines.

Tous ces paramètres doivent être respectés par l'opérateur dans sa stratégie d'allocation de ressources. On dit alors que l'on a « respecté les capacités multislots » du mobile.

Les canaux logiques

La multitrame de base du GPRS est définie par l'occurrence d'un même canal physique dans 52 trames successives, et non 26 ou 51 comme dans le GSM. La multitrame est organisée comme suit :

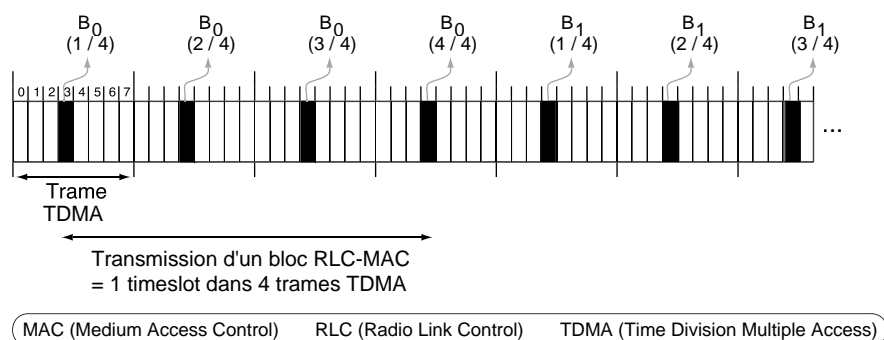
- $12 \times 4 = 48$ timeslots radio pour le transport des données et de la signalisation ;
- 2 timeslots de contrôle de l'avance en temps PTCCH ;
- 2 timeslots *idle*.

Les 48 timeslots radio sont divisés en 12 blocs radio. Chaque bloc contient 4 timeslots, qui sont pris dans 4 trames successives. Contrairement au GSM, l'unité élémentaire allouée en GPRS est un bloc, soit 4 slots GSM. Cette unité correspond à la taille des blocs RLC-MAC. Un bloc RLC-MAC se transmet donc exactement dans un bloc de la multitrame GPRS, soit 4 PDCH sur 4 trames successives. Ce fonctionnement est illustré à la figure 5.5.

Un bloc radio peut transporter un bloc RLC-MAC de données ou de signalisation, indépendamment du bloc RLC-MAC transporté par le bloc précédent. Les messages RLC-MAC de contrôle de l'avance en temps, ou PTCCH, subissent un traitement particulier. Ils sont transmis dans 4 slots répartis sur deux multitrames (slots des trames 12 et 38, pour une numérotation des trames de 0 à 51).

Figure 5.5

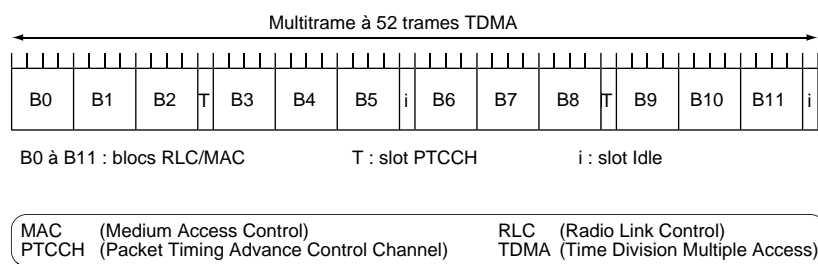
Transmission d'un
bloc de données
RLC-MAC.



La structure temporelle de la multiframe GPRS est illustrée à la figure 5.6.

Figure 5.6

Structure
de la multiframe
GPRS.



Au-dessus des canaux physiques, se trouvent les canaux logiques. Ces derniers permettent de séparer les différents types d'information transmise : signalisation, données, synchronisation, message de diffusion, etc. Ils sont sensiblement identiques à ceux du GSM, comme vous pouvez le constater au tableau 5.1. Pour passer du canal logique GSM au canal logique équivalent en GPRS, il suffit d'ajouter un P à l'acronyme.

Du fait que le GSM et le GPRS se partagent la même interface physique, les canaux logiques du GSM permettant les synchronisations fréquentielle et temporelle ne sont pas dupliqués en GPRS. De même, pour économiser des ressources, une cellule offrant à la fois des services GSM et GPRS peut mutualiser ses canaux de broadcast. Le PBCCH regroupe dans ce cas à la fois les informations concernant le GSM et celles dédiées au GPRS. Il en va de même pour les canaux de contrôle commun (PRACH-RACH, PAGCH-AGCH, PPCH-PCH).

Notez que le service de communication point à multipoint, qui permet de joindre un groupe d'utilisateurs, a nécessité l'apparition d'un canal logique spécifique du GPRS, le PNCH.

Tableau 5.1 – Canaux logiques comparés du GPRS et du GSM.

Catégorie	Nom	GSM	Sens	Rôle
Trafic	PDTCH (Packet Data Traffic CHannel)	TCH	Bidirectionnel	Transmission de données
Diffusion (commun)	PBCCH (Packet Broadcast Control CHannel)	BCCH	Descendant	Diffusion d'information système propre à la cellule
Contrôle (commun)	PRACH (Packet Random Access CHannel)	RACH	Montant	Accès initial du mobile
	PAGCH (Packet Access Grant CHannel)	AGCH	Descendant	Réponse du réseau à l'accès initial
	PPCH (Packet Paging CHannel)	PCH	Descendant	Appel du mobile
	PNCH (Packet Notification CHannel)		Descendant	Appel du mobile pour les communications de groupe
Contrôle (dédié)	PACCH (Packet Associated Control CHannel)	~FACCH	Bidirectionnel	Contrôle associé à un PDTCH
	PTCCH (Packet Timing Advance Control CHannel)	~SACCH	Bidirectionnel	Contrôle du Timing Advance

La couche MAC

Bien que le standard GPRS regroupe les couches MAC et RLC, ces deux « sous-couches » comportent des fonctions différentes. En particulier, la couche MAC est à l'origine du partage dynamique des canaux physiques entre les utilisateurs en fonction de leur trafic, lequel, comme expliqué précédemment, peut être sporadique.

Le GPRS associe à chaque salve de données (voir figure 5.3) un TBF (Temporary Block Flow), qui représente un flux de données unidirectionnel entre une station mobile et le réseau. Dans le cas d'une transmission du mobile vers le réseau, on parle de TBF *uplink*. Pour une liaison réseau vers mobile, il s'agit d'un TBF *downlink*. Une transmission bidirectionnelle utilise donc deux TBF, un dans chaque sens. Un TBF est refermé lorsque l'émetteur n'a plus de données en mémoire à transmettre.

Une transmission de données se fait donc en trois temps :

1. Établissement d'un TBF.
2. Transfert de données.
3. Fermeture du TBF.

Dans la version initiale du GPRS, l'établissement de TBF n'est pas immédiat. Pour une session Web telle que celle illustrée à la figure 5.3, il serait plus judicieux de maintenir un TBF ouvert entre deux salves. C'est actuellement l'un des axes d'amélioration du standard.

Pour identifier les TBF, le réseau leur associe des TFI (Temporary Flow Identity). Un TFI est codé sur 5 bits, mais il convient de distinguer les TFI *uplink* et les TFI *downlink*, une même valeur de TFI pouvant identifier deux TBF, l'un montant et l'autre descendant. Le TFI peut être considéré comme un identifiant temporaire d'un mobile, même s'il est possible d'avoir plusieurs TFI par mobile puisque ce dernier peut avoir plusieurs TBF ouverts simultanément.

En GPRS, la clé de l'allocation dynamique des ressources réside dans les USF (Uplink Status Flag), qui permettent de partager un même canal physique montant entre plusieurs utilisateurs — au maximum 7, puisque l'USF est sur 3 bits, une valeur étant réservée au canal PRACH.

Chaque bloc RLC-MAC descendant contient un USF désignant l'utilisateur autorisé à transmettre dans le prochain bloc radio montant associé. En fait, lors de l'ouverture d'un TBF montant, le réseau alloue au mobile une liste de PDCH, ainsi qu'un numéro USF. Le mobile scrute alors les PDCH associés descendants qui contiennent les USF et attend sa valeur. Lorsque l'USF pointe sur sa valeur, le mobile sait que le prochain PDCH montant associé lui est dédié.

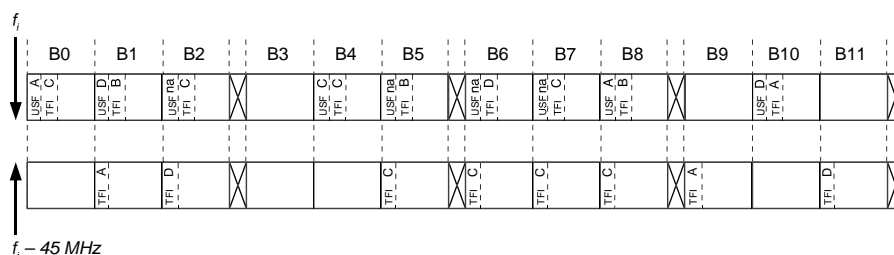
L'intérêt d'une telle allocation dynamique réside principalement dans l'optimisation de l'utilisation de la ressource radio du fait du multiplexage statistique des besoins des différents utilisateurs. Une grande flexibilité est ainsi offerte à l'opérateur, qui peut tenir compte de différents niveaux de priorité. L'allocation des blocs montants peut s'effectuer avec plus ou moins de finesse, par blocs radio ou par groupes de quatre blocs. Il existe néanmoins en GPRS une allocation statique, pour laquelle le réseau indique au mobile, lors de l'établissement du TBF, la liste exhaustive des PDCH à utiliser.

Pour identifier le destinataire des blocs transmis, l'en-tête RLC-MAC de chaque bloc contient le TFI du destinataire. Cette information est indispensable sur la voie descendante puisque tous les mobiles guettent des paquets qui leur seraient destinés sur tous les PDCH qui leur ont été assignés. En revanche, comme l'allocation des PDCH sur la voie montante est connue du réseau — c'est lui qui décide de l'allocation — le TFI est redondant. Il permet néanmoins de vérifier qu'un mobile ne spolie pas la ressource d'un autre. La figure 5.7 illustre le fonctionnement de l'allocation dynamique des ressources.

Avant d'être émis par la couche physique, les blocs RLC-MAC sont protégés par codage contre les erreurs de transmission. Il existe pour cela quatre schémas de codage, appelés CS-1, CS-2, CS-3 et CS-4 — CS (Coding Scheme). Ces schémas offrent des protections plus ou moins efficaces, au prix toutefois d'une diminution du débit utilisateur plus ou moins importante. Ils consistent à ajouter un code détecteur d'erreur, ou CRC (Cyclic Redundancy Check), au bloc RLC-MAC, sachant que les USF sont précodés de manière spécifique. Ensuite, le tout est protégé par un code convolutif, identique à celui utilisé dans le GSM.

Un poinçonnage permet d'obtenir les 456 bits contenus dans un bloc GPRS (4 bursts normaux GSM). Le tableau 5.2 recense les différents types de codages appliqués aux blocs RLC-MAC. De même que dans la voie montante, il n'y a pas d'USF, ces derniers étant remplacés dans le processus de codage par les premiers bits du paquet RLC-MAC. Les messages RLC-MAC de contrôle sont systématiquement protégés par le code le plus robuste, le CS-1.

Figure 5.7
Exemple
d'allocation
dynamique
des ressources
en GPRS.



Quatre mobiles se partagent les ressources, A, B, C et D. B n'a pas de TBF montant ouvert ; C possède une granularité d'allocation de quatre blocs, tandis que A et D disposent d'une allocation bloc par bloc.

1. **Le bloc descendant B0** est destiné à l'utilisateur C (TFI = C). En revanche l'USF indique que le prochain bloc montant est pour l'utilisateur A. Le prochain bloc montant utilisable par A sera le bloc B9, indiqué par l'USF du bloc descendant B8.
2. **Le bloc descendant B1** est destiné à l'utilisateur B et autorise D à transmettre sur la voie montante au bloc suivant.
3. **Le bloc descendant B2** est destiné à C et n'attribue pas de bloc montant.
4. **Le bloc descendant B4** est destiné à C et lui attribue les quatre blocs montants suivants, puisque les allocations pour C se font par groupes de quatre blocs. Pour éviter les collisions, les USF descendants suivants ne sont pas attribués.

TBF (Temporary Block Flow) TFI (Temporary Flow Identity) USF (Uplink Status Flag) na : non attribué

Tableau 5.2 – Codages du GPRS.

Schéma	Taux de codage	USF	USF précodé	Bloc sans USF ni CRC	CRC	Bit de traînée	Bit codé	Bit poinçonné	Débit résultant (Kbit/s)
CS-1	1/2	3	3	181	40	4	456	0	9,05
CS-2	≈ 2/3	3	6	268	16	4	588	132	13,4
CS-3	≈ 3/4	3	6	312	16	4	676	220	15,6
CS-4	1	3	12	428	16	–	456	–	21,4

Les débits résultants indiqués au tableau 5.2 sont issus du calcul suivant. Un bloc RLC-MAC est transmis dans un bloc radio GPRS, c'est-à-dire 4 timeslots GSM, d'une durée de $4 \times 4,615 = 18,5$ ms. Or, la structure de multitrame du GPRS, avec les 4 slots Idle et PTCCH, implique un allongement de la trame perçue par un utilisateur. En effet, celui-ci ne s'intéresse qu'à ses données et peut considérer les slots Idle et le slot PTCCH comme des facteurs limitant son débit. Un bloc RLC-MAC est donc transmis sur $4 \times 4,615 \times 52/48$, soit 20 ms.

La couche RLC

La couche RLC permet essentiellement de fiabiliser le lien radio entre le mobile et la station de base. Il existe néanmoins un mode non acquitté, dans lequel l'intégrité des données n'est pas garantie et où seule l'opération de segmentation-réassemblage est effectuée par la couche RLC.

La couche RLC s'appuie sur une technique de retransmission sélective, dite SR-ARQ (Selective Repeat-Automatic Repeat reQuest). Elle a un rôle similaire au protocole RLP du GSM ou à la couche LLC (Logical Link Control), présentée ci-après dans ce chapitre. Les retransmissions étant locales à l'interface radio, elles sont traitées ici plus rapidement et sont moins coûteuses. Ces retransmissions nécessitent tout de même de maintenir un jeu de paramètres pour gérer l'évolution des fenêtres d'émission et de réception permettant de connaître à chaque instant quels sont les blocs correctement reçus et les blocs à retransmettre, etc.

La couche RLC effectue de plus la segmentation des paquets qui lui sont transmis par la couche supérieure, la couche LLC, ainsi que leur réassemblage en réception. L'en-tête RLC contient des numéros de séquence pour les retransmissions ainsi que des indicateurs délimitant les début et fin des trames LLC découpées et mises bout à bout dans les paquets RLC.

Les couches RLC de l'émetteur et du récepteur peuvent s'échanger des messages de contrôle pour gérer les retransmissions ou l'allocation des ressources. Les messages de contrôle des couches MAC et RLC sont ainsi confondus. En particulier, tous les messages relatifs à l'établissement d'un TBF et à sa fermeture sont des messages RLC-MAC.

Les sections qui suivent illustrent le fonctionnement de l'ensemble RLC-MAC par des exemples de procédures.

Transfert de données montant

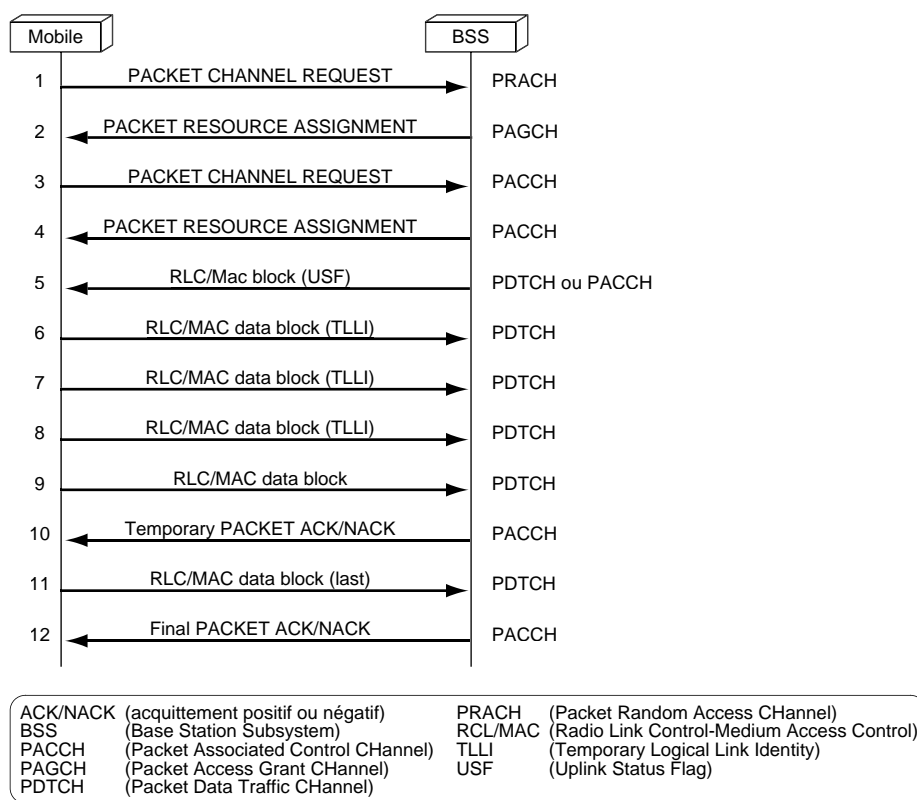
Le transfert de données montant est illustré à la figure 5.8. L'accès initial du mobile au réseau se fait sur le canal logique PRACH (1). Le réseau répond sur le canal PAGCH (2). Deux modes d'accès sont définis en GPRS, l'accès en une phase et l'accès en deux phases. Dans l'accès en une phase, le réseau alloue directement les ressources radio au mobile demandeur, alors que, dans l'accès en deux phases, le réseau alloue un premier bloc montant (2) dans lequel le mobile peut détailler ses besoins (3). Ainsi, le réseau peut allouer plus précisément les ressources radio (4).

Le message d'allocation contient, en plus de l'USF et du TFI, des numéros de timeslots à scruter et des informations sur le contrôle de puissance et la compensation temporelle que doit appliquer le mobile. Tous les messages de contrôle dédiés à l'utilisateur sont effectués *via* le canal logique PACCH. Le mobile scrute les paquets descendants et attend que l'USF descendant pointe sur le numéro qui lui a été alloué (5). Il transmet alors son premier bloc de données sur un canal dédié PDTCH (6).

La granularité d'allocation est ici de quatre blocs, un USF permettant d'allouer quatre blocs successifs. Le mobile les utilise pour transmettre ses données (7, 8, 9). Après un certain nombre de blocs reçus, l'entité RLC réceptrice les acquitte et indique si nécessaire ceux à retransmettre (10). Lorsque le mobile n'a plus de données à transmettre, il en informe le réseau (11), lequel sollicite les dernières retransmissions puis acquitte tous les paquets transmis (12). Le TBF peut être relâché, et le réseau peut réallouer le TFI correspondant.

Figure 5.8

*Exemple
de transfert
de données
montant.*



Pour aider l'allocation des ressources, le mobile peut indiquer, avant la fin de sa transmission au réseau, le nombre de blocs qu'il lui reste à transmettre.

Transfert de données descendant

Le transfert de données descendant est illustré à la figure 5.9. Le réseau appelle le mobile *via* le canal logique de paging PPCH (1). Le mobile peut être identifié soit par ses IMSI (International Mobile Subscriber Identity) ou TMSI (Temporary Mobile Subscriber Identity), soit par une identité propre au GPRS, le TLLI (Temporary Logical Link Identity). En fonction de l'identité utilisée, un paquet de paging peut appeler simultanément de un à quatre mobiles.

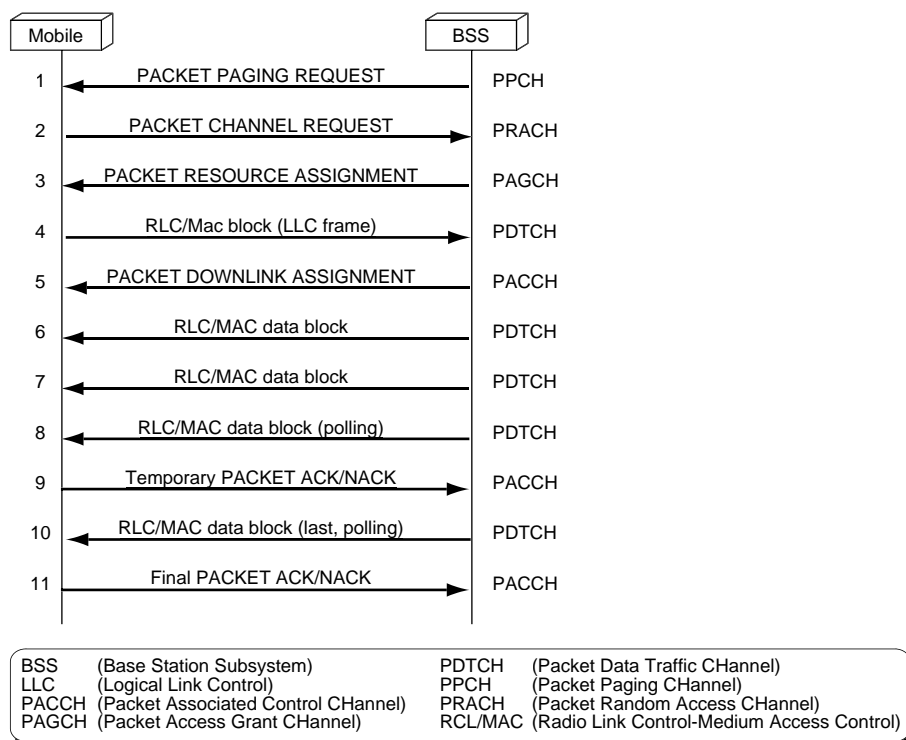
La réponse du mobile se fait par le biais du PRACH dans lequel le mobile demande l'établissement d'un TBF montant (2) en invoquant le motif d'une réponse à paging. Le réseau lui alloue alors de la ressource (3). Contrairement à l'exemple précédent, il s'agit d'un accès en une phase. Lorsque le mobile n'a pas par ailleurs de connexion active, il informe le réseau de sa localisation précise (4) de façon que les paquets descendants lui

soient routés directement. Le réseau indique au mobile les PDCH à scruter, dans lesquels seront transmis les paquets qui lui sont destinés (5). Les paquets descendants sont transmis (6, 7), et, de temps en temps, le réseau demande au mobile de les acquitter (8). Le mobile les acquitte et sollicite des retransmissions si nécessaire (9). En fin de transmission, le dernier bloc est explicitement signalé, simultanément avec une demande d'acquiescement final (10). Une fois que le mobile a reçu correctement tous les blocs transmis et les a acquittés (11), le TBF peut être clos.

Ces deux exemples montrent l'enchaînement des messages des couches RLC-MAC qui peuvent contrôler de façon autonome l'interface radio ou être utilisés par les couches supérieures, notamment en cas de transmission de données ou de mise à jour de localisation.

Figure 5.9

Exemple de transfert de données descendant à l'initiative du réseau.



Le réseau cœur (Core Network) et les protocoles

Si le GPRS réutilise les éléments du GSM pour le sous-ensemble radio, son réseau cœur, ou Core Network, diffère radicalement en introduisant de nouveaux éléments et en utilisant des protocoles spécifiques.

Les éléments du réseau cœur GPRS

Pour acheminer efficacement les paquets des mobiles vers les réseaux paquet publics, tels que X.25 ou IP, le GPRS met en place un réseau fixe à commutation de paquets constitué de routeurs. Aux frontières de ce réseau paquet, on distingue deux types de routeurs, dotés de fonctions particulières : le SGSN (Serving GPRS Support Node), côté sous-système radio, et le GGSN (Gateway GPRS support Node), côté réseau de données public. En même temps que ces nouveaux éléments fonctionnels, sont apparues de nouvelles interfaces, telles l'interface Gb, entre le BSS, et plus précisément les BSC, et le SGSN, et les interfaces Gr et Gc, respectivement entre le HLR et un SGSN ou un GGSN.

Entre le GGSN et le SGSN, les données utilisateur sont simplement encapsulées par le protocole GTP (GPRS Tunnelling Protocol). Le réseau de transport est un simple réseau IP. On peut se trouver ainsi dans la situation paradoxale où, entre le mobile et son correspondant, des paquets IP se retrouvent encapsulés dans des paquets IP du réseau cœur GPRS entre le GGSN et le SGSN. Le fait d'acheminer des paquets dans des tunnels entre le GGSN et le SGSN dans lequel se situe le mobile n'est pas différent du fonctionnement d'IP Mobile (voir le chapitre 15). Le GGSN joue le rôle d'agent local, ou HA (Home Agent), tandis que le SGSN représente l'agent étranger, ou FA (Foreign Agent). Toutefois, les protocoles issus du monde IP, et donc de l'IETF (Internet Engineering Task Force), ne peuvent s'appliquer directement au GPRS car ce dernier doit pouvoir s'interconnecter avec des réseaux paquets non-IP.

Le SGSN est responsable de l'acheminement des paquets entre le réseau fixe et le mobile. Il gère en conséquence les contextes de mobilité et de sécurité du mobile, ainsi qu'un contexte caractéristique du réseau de données avec lequel le mobile est connecté, le contexte PDP (Packet Data Protocol).

Gestion de la mobilité

Pour se faire connaître du SGSN et donc avant toute transmission de données, un mobile doit s'attacher au réseau. Cette procédure consiste à établir un lien logique entre le mobile et le SGSN. Du fait que les réseaux cœur GSM et GPRS sont séparés, il existe trois types d'attachements au réseau :

- L'attachement GSM classique utilise l'IMSI, qui permet de doter le mobile d'une identité temporaire, le TMSI.
- L'équivalent GPRS consiste à associer au mobile une identité temporaire au sein du SGSN, qui peut être le PTMSI (Packet Temporary Mobile Subscriber Identity) ou le TLLI (Tempo-

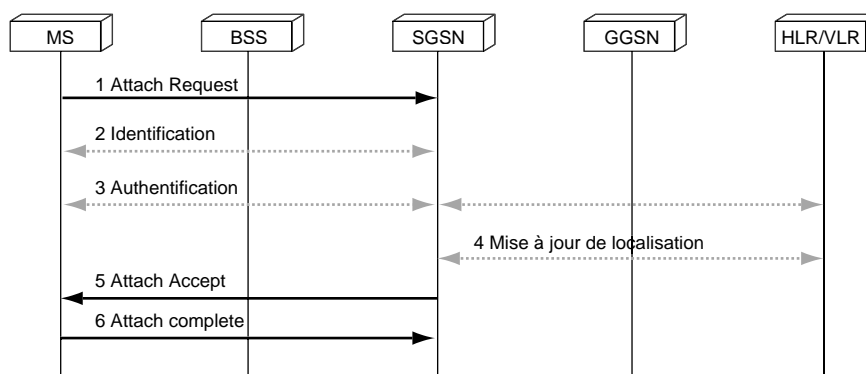
rary Link Layer Identity), qui permet de distinguer différents mobiles avant qu'ils soient dotés de PTMSI.

- L'attachement commun au GSM et au GPRS consiste, pour le mobile, à se manifester simultanément auprès des réseaux GSM et GPRS. Ce dernier type n'est pas accessible aux mobiles de classe C.

La figure 5.10 illustre la procédure d'attachement. L'opération inverse, le détachement, est effectuée lorsque le mobile ne souhaite plus utiliser les services GPRS.

Figure 5.10

La procédure
d'attachement
au réseau GPRS.



1. **Le mobile ouvre un canal** dédié par l'utilisation du canal d'accès aléatoire PRACH. Il transmet son identité (IMSI ou TLLI) et sa précédente zone de routage.
2. **Si le mobile a changé de zone** de routage, le SGSN ne reconnaît pas son TLLI. Il envoie à l'ancien SGSN une demande d'identification. Si l'identification échoue à nouveau, SGSN et mobile entament une procédure d'identification classique par l'utilisation de l'IMSI.
3. **Échange de messages** pour authentifier l'utilisateur (peut-il accéder aux services GPRS ?). Cette procédure peut impliquer le HLR dans lequel sont stockés les renseignements relatifs à l'utilisateur.
4. **Le SGSN met à jour** la localisation du mobile.
5. **Le SGSN accepte** finalement la demande d'attachement.
6. **Le mobile acquitte.** Le canal dédié peut alors être fermé.

BSS	(Base Station Subsystem)	MS	(Mobile Station)
GGSN	(Gateway GPRS Support Node)	SGSN	(Serving GPRS Support Node)
HLR	(Home Location Register)	TLLI	(Temporary Logical Link Identity)
IMSI	(International Mobile Subscriber Identity)	VLR	(Visitor Location Register)

La procédure d'attachement est fortement liée à la gestion de la mobilité. Un mobile attaché est connu du réseau et peut donc être joignable. Pour le réseau GPRS, un mobile détaché est comme un mobile éteint.

Le mobile peut être dans l'un des quatre états suivants :

- **Éteint.** Il n'est pas connu du réseau. Cet état n'apparaît pas dans le standard.
- **Idle.** Le mobile est allumé mais détaché du réseau GPRS. En pratique, cela correspond à un mobile éteint : les appels entrants sont reroutés sur un répondeur. Le mobile effectue uniquement les mesures permettant la sélection de cellule ou de PLMN.

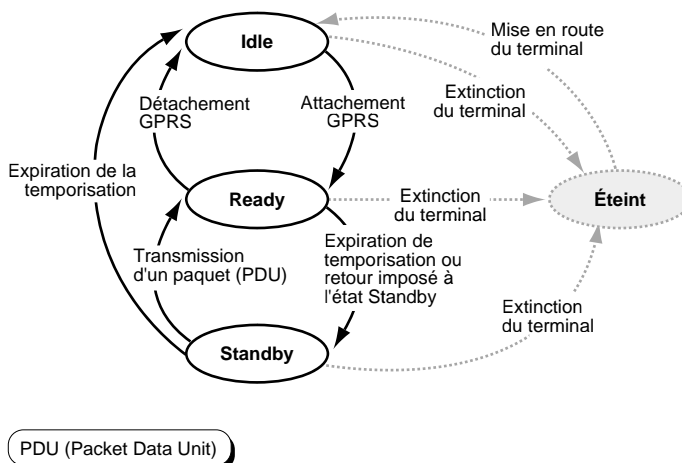
- **Standby.** Le mobile est attaché au réseau GPRS et peut recevoir des appels entrants par paging. Il est localisé, à la zone de routage près, par le réseau GPRS. Le mobile effectue des mises à jour de localisation lorsqu'il change de zone de routage.
- **Ready.** Le mobile est en cours de communication et a au moins un TBF ouvert. Le réseau le localise à la cellule près.

La couche de gestion de la mobilité, MM (Mobility Management) en GSM et GMM (GPRS Mobility Management) en GPRS, maintient dans le mobile et dans le SGSN l'état de mobilité en cours. Alors que le GSM définit des zones de localisation, le GPRS utilise la notion de zone de routage, un ensemble de cellules dépendant du même SGSN. Une zone de routage est toujours incluse dans une zone de localisation. Notez que le GPRS et le GSM gèrent séparément la mobilité d'un même utilisateur. Néanmoins, l'interface Gs entre un SGSN et un MSC-VLR permet à un opérateur soucieux d'efficacité de coordonner la gestion de la mobilité des deux réseaux.

La figure 5.11 illustre les états de mobilité du GPRS ainsi que les transitions associées.

Figure 5.11

Les états de mobilité en GPRS.



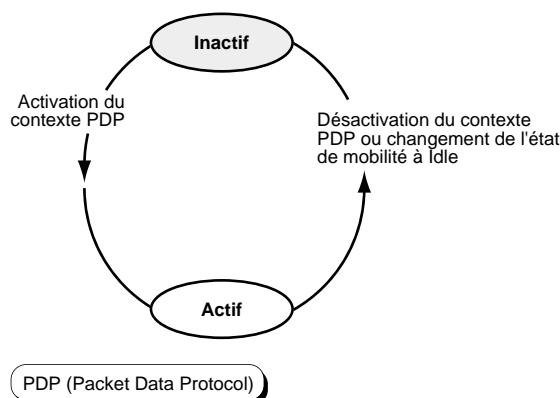
Par comparaison avec le GSM, le GPRS introduit un état supplémentaire, Standby, lorsque le mobile est connu du réseau. En GSM, un mobile connu est forcément en transmission. En GPRS, un mobile connu peut ne pas transmettre. Ce nouvel état s'explique par le caractère souvent sporadique du trafic de données pour lequel le GPRS est construit. Entre deux salves (voir figure 5.3), le mobile reste identifié par le réseau, ce qui permet d'établir plus rapidement un nouveau TBF, en évitant, par exemple, une nouvelle procédure d'authentification, au sein de la même session.

Contexte PDP et qualité de service

Une session est établie après attachement au réseau par l'activation d'un contexte PDP (Packet Data Protocol). Ce contexte permet de rendre le mobile visible à l'extérieur du réseau de l'opérateur mobile, en lui associant, par exemple, une adresse reconnue du réseau extérieur : adresse IP, X.121, etc. Par ailleurs, le contexte contient toutes les informations de qualité de service, ou QoS, requise par l'utilisateur pour cette session. Quel que soit le réseau de données auquel se connecte l'utilisateur, le contexte PDP permet de caractériser cette connexion. Un utilisateur peut d'ailleurs avoir plusieurs contextes PDP en parallèle, s'il veut ouvrir plusieurs sessions avec des réseaux différents ou avec des QoS différentes.

Comme illustré à la figure 5.12, deux états relatifs aux contextes PDP sont définis : l'état actif et l'état inactif. Dans l'état inactif, le réseau ne dispose pas des informations du contexte PDP et ne peut donc pas router correctement des paquets vers le mobile, qui, en fait, n'a pas d'adresse active. Un mobile dans l'état de mobilité Idle n'a donc aucun contexte PDP actif.

Figure 5.12
*Les états du contexte
PDP en GPRS.*

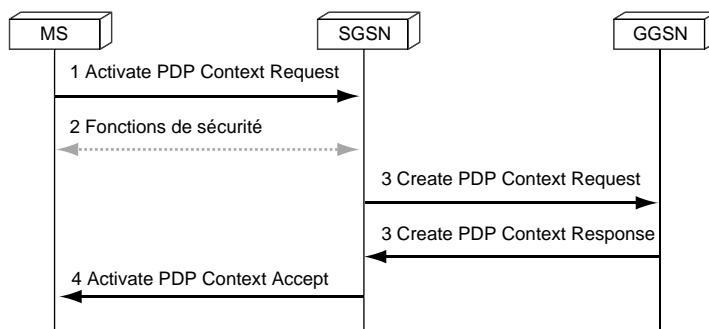


L'activation du contexte PDP peut se faire soit à l'initiative du mobile (voir figure 5.13), soit à celle du réseau (voir figure 5.14).

Il existe deux modes d'allocation des adresses PDP. Le premier, statique, consiste à associer de façon permanente une ou plusieurs adresses PDP au mobile. Ces adresses peuvent être stockées dans la carte SIM du mobile avec les autres informations relatives à l'abonnement souscrit par l'utilisateur. Le deuxième mode d'allocation d'adresse est dynamique : le réseau mobile alloue des adresses PDP à chaque demande d'activation de contexte PDP.

Dans le cadre de l'accès à Internet, l'attribution d'une adresse IP au mobile peut se faire directement par le fournisseur d'accès, c'est-à-dire à l'extérieur du réseau de l'opérateur mobile. Cette dernière possibilité permet à l'opérateur d'économiser ses adresses IP, en nombre limité dans IPv4. Dans IPv6, il est vraisemblable que chaque terminal mobile sera doté de sa propre adresse permanente.

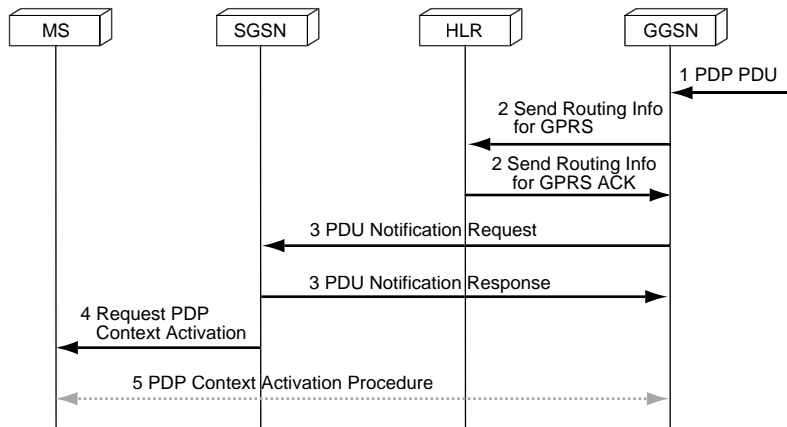
Figure 5.13
Activation d'un
contexte PDP
à l'initiative
du mobile



1. **Le mobile informe** le SGSN de sa demande d'activation de contexte PDP.
2. **Les procédures de sécurité** (authentification de l'utilisateur) peuvent être effectuées.
3. **Le SGSN transmet** une demande de création de contexte PDP au GGSN en relayant les paramètres de QoS demandés par l'utilisateur. Après une phase de négociation (le GGSN peut ne pas accepter la QoS requise), le GGSN crée un nouveau contexte PDP, qui permet de router les paquets du mobile entre le SGSN et le réseau extérieur. Le GGSN confirme au SGSN l'activation du contexte PDP.
4. **Le SGSN met à jour** sa propre table de contexte PDP (avec les paramètres fournis par le GGSN) et en informe le mobile.

GGSN (Gateway GPRS Support Node)	QoS (Quality of Service)
MS (Mobile Station)	SGSN (Serving GPRS Support Node)
PDP (Packet Data Protocol)	

Figure 5.14
Activation d'un
contexte PDP
à l'initiative
du réseau.



1. **Lorsque le GGSN reçoit des paquets** destinés à un mobile sans contexte PDP actif, il peut initier une activation de contexte PDP. En attendant que cette activation soit effective, le GGSN peut mémoriser les paquets suivants destinés au même utilisateur.
2. **Le GGSN interroge le HLR** sur la disponibilité de l'utilisateur. En cas favorable, le HLR répond au GGSN en indiquant le SGSN actuel où se trouve le mobile.
3. **Le GGSN informe le SGSN** de la présence de paquets pour l'utilisateur mobile.
4. **Le SGSN demande** (via du paging) au mobile d'effectuer une demande d'activation de contexte PDP.
5. **La procédure d'activation est effectuée**, comme indiqué à la figure 5.13.

GGSN (Gateway GPRS Support Node)	PDP (Packet Data Protocol)
HLR (Home Location Register)	PDU (Packet Data Unit)
MS (Mobile Station)	SGSN (Serving GPRS Support Node)

Pour exprimer la qualité de service, le mobile dispose d'un ensemble de classes de paramètres : la priorité du service, sa fiabilité, les délais tolérés, le débit moyen et enfin le débit pic des informations transmises. Tous ces paramètres sont négociés entre le GGSN et le mobile lors de l'activation du contexte PDP. En revanche, les moyens pour garantir la qualité de service négociée, c'est-à-dire la définition des stratégies d'allocation de ressources, sont à la charge de l'opérateur, ou du constructeur, mais ne sont en aucun cas standardisés.

Trois classes de priorité, haute, normale et basse, sont définies pour différencier les services en cours. Elles caractérisent la précedence du service requis par l'utilisateur et permettent au réseau d'identifier les données à supprimer, par exemple, en cas de congestion du réseau, les services de classes de priorité basse étant interrompus les premiers.

Trois classes de fiabilité sont également définies. Elles correspondent à des garanties sur les taux de perte, de duplication, de déséquenceement et d'erreur résiduelle de la transmission. Elles doivent être attribuées en fonction de l'application de l'utilisateur. Par exemple, si l'application utilisateur repose sur X.25, il est nécessaire d'avoir une transmission fiable.

Tableau 5.3 – Classes de fiabilité.

Classe de Fiabilité	Probabilité de perte	Probabilité de duplication	Probabilité de déséquenceement	Probabilité d'erreur résiduelle
1	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}
2	10^{-4}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-6}
3	10^{-2}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-2}

La probabilité de perte fait allusion au temps maximal de séjour du paquet dans le réseau GPRS, temps au-delà duquel le paquet est supprimé. Ce temps maximal dépend des protocoles utilisés, tel TCP/IP.

Les application de classe 1 ne doivent généralement avoir aucune contrainte de temps réel, car elles n'acceptent pour ainsi dire aucune erreur. En revanche, les applications tolérant des erreurs peuvent être de classe 3 et avoir des contraintes temps réel.

Quatre classes de délai sont définies. Dans un premier temps, les réseaux GPRS offriront seulement le service de classe 4 (best effort), qui correspond à la classe assurée par les réseaux IP actuels.

Le délai comprend le temps d'accès au canal — niveau RLC-MAC —, le temps de transmission sur l'interface air, le temps de transit dans le réseau GPRS — entre les différents nœuds du réseau — mais ne comprend pas les délais dus aux autres réseaux.

Le débit moyen inclut les périodes de silence pour les services dont le trafic est sporadique. Les classes de débit moyen sont recensées au tableau 5.5.

Le débit pic fait référence à la vitesse maximale de transmission demandée par l'utilisateur. Neuf classes de débit pic sont définies. Elles sont répertoriées au tableau 5.6.

Tableau 5.4 – Classes de délai.

Classe de délai	Paquet de 128 octets		Paquet de 1 024 octets	
	Délai moyen	Délai à 95 %	Délai moyen	Délai à 95 %
1	< 0,5 s	< 1,5 s	< 2 s	< 7 s
2	< 5 s	< 25 s	< 15 s	< 75 s
3	< 50 s	< 250 s	< 75 s	< 375 s
4	- non spécifié -			

Tableau 5.5 – Classes de débit moyen.

Classe de débit moyen	Débit moyen (octet/heure)	Classe de débit moyen	Débit moyen (octets/heure)
1	100 (~0,22 bit/s)	11	200 000 (~0,44 Kbit/s)
2	200 (~0,44 bit/s)	12	500 000 (~1,11 Kbit/s)
3	500 (~1,11 bit/s)	13	1 000 000 (~2,2 Kbit/s)
4	1 000 (~2,2 bit/s)	14	2 000 000 (~4,4 Kbit/s)
5	2 000 (~4,4 bit/s)	15	5 000 000 (~11,1 Kbit/s)
6	5 000 (~11,1 bit/s)	16	10 000 000 (~22 Kbit/s)
7	10 000 (~22 bit/s)	17	20 000 000 (~44 Kbit/s)
8	20 000 (~44 bit/s)	18	50 000 000 (~111 Kbit/s)
9	50 000 (~111 bit/s)	31	Best effort
10	100 000 (~0,22 Kbit/s)		

Tableau 5.6 – Classes de débit pic.

Classe de débit pic	Débit pic (octet/sec)
1	Jusqu'à 1 000 (8 Kbit/s)
2	Jusqu'à 2 000 (16 Kbit/s)
3	Jusqu'à 4 000 (32 Kbit/s)
4	Jusqu'à 8 000 (64 Kbit/s)
5	Jusqu'à 16 000 (128 Kbit/s)
6	Jusqu'à 32 000 (256 Kbit/s)
7	Jusqu'à 64 000 (512 Kbit/s)
8	Jusqu'à 128 000 (1 024 Kbit/s)
9	Jusqu'à 256 000 (2 048 Kbit/s)

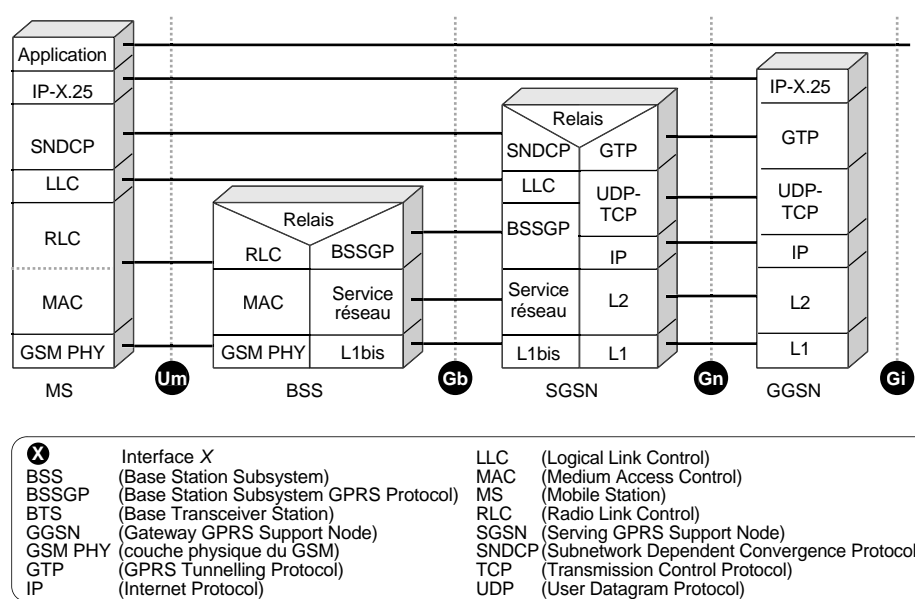
Vous avez vu comment un utilisateur mobile pouvait s'attacher au réseau puis initier une session de transfert de données. Vous allez maintenant aborder brièvement le rôle joué par les protocoles du GPRS.

Les protocoles

La figure 5.15 illustre les protocoles du plan de transmission du GPRS.

Figure 5.15

Les protocoles du plan de transmission du GPRS.



La couche physique (GSM PHY) gère les canaux physiques et est responsable des opérations de modulation, démodulation, codage, décodage, synchronisation, mesures, etc. Elle est similaire à celle du GSM, avec néanmoins quelques extensions.

La couche MAC gère l'accès à la ressource radio tandis que la couche RLC est responsable de la segmentation et du réassemblage des paquets LLC. La couche RLC peut en outre fournir un transport fiable entre le mobile et la station de base. Ces trois couches ont été détaillées à la section « L'interface radio », précédemment dans ce chapitre.

La couche LLC (Logical Link Control) offre une liaison fiable et cryptée entre le mobile et le SGSN. Deux modes d'opération existent : un mode acquitté et un mode non acquitté. Dans le premier cas, un CRC permet de détecter les erreurs de transmission, et des retransmissions peuvent être demandées selon une stratégie de retransmission sélective. Dans le mode non acquitté, le CRC peut permettre d'éliminer les trames erronées (mode protégé), mais ce n'est pas obligatoire. Les modes acquittés des couches LLC et RLC peuvent paraître redondants,

surtout si l'application de bout en bout repose sur TCP, qui, lui aussi, fiabilise la connexion par des retransmissions. Une coordination entre ces protocoles, qui n'agissent pas au même niveau et qui tous ajoutent leur propre en-tête, permettrait une communication plus efficace.

Le protocole SNDCP (Subnetwork Dependent Convergence Protocol) s'étend entre le mobile et le SGSN. Il permet d'adapter les protocoles des couches supérieures aux protocoles spécifiques du GPRS. Il permet d'adapter n'importe quel protocole réseau existant, tel que IP, X.25, etc., ou futur à l'accès mobile du GPRS. Il peut, de surcroît, appliquer des méthodes de compression pour diminuer la taille des paquets à transmettre sur l'interface air et économiser ainsi les ressources radio.

Le protocole BSSGP (Base Station Subsystem GPRS Protocol) transporte les informations de routage et de QoS entre le BSS et le SGSN. Il ne fournit pas de contrôle ni de détection d'erreur. La connexion entre le BSS et le SGSN en GPRS est fondée sur le relais de trames. Du côté du réseau fixe, le réseau reliant les différents SGSN et GGSN de l'opérateur est un réseau IP.

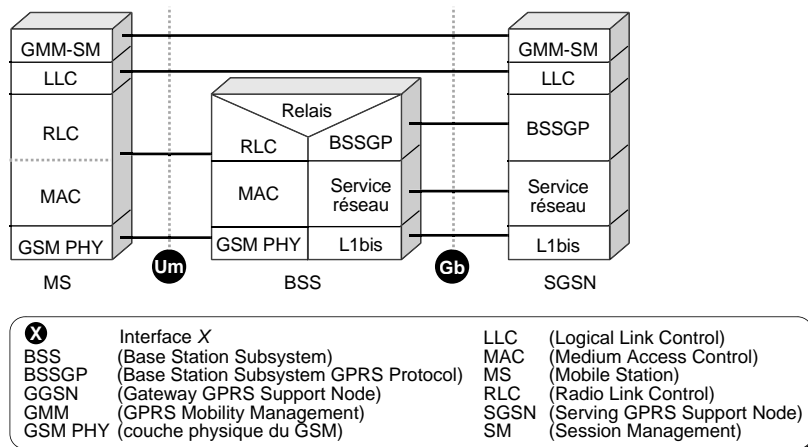
Le protocole GTP (GPRS Tunnelling Protocol) encapsule les flux utilisateur entre le GGSN et le SGSN de manière transparente. Il utilise soit TCP, soit UDP, en fonction de la QoS définie dans les contextes PDP.

À l'extérieur du réseau de l'opérateur, on peut trouver n'importe quel protocole de données entre le mobile et son correspondant, comme un réseau IP ou X.25.

La figure 5.16 illustre le plan de signalisation sur l'interface radio. Vous retrouvez à peu près les mêmes couches de protocoles qu'en GSM. Évidemment, les messages de signalisation sont groupés dans la couche GMM (GPRS Mobility Management), pour la gestion de la mobilité, et la couche SM (Session Management), pour la gestion des appels. Les équivalents respectifs de ces couches en GSM sont le MM et le CM.

Figure 5.16

Les protocoles du plan de signalisation entre mobile et SGSN.



De même, les protocoles de signalisation dans le cœur du réseau réutilisent ceux du GSM, c'est-à-dire le MAP (Mobile Application Part) issu du SS7.

Ainsi, le GPRS a étendu le GSM au monde de la transmission de paquets par l'ajout d'éléments nouveaux dans le réseau cœur et par un partage dynamique des ressources radio.

EDGE

En utilisant plusieurs timeslots dans le HSCSD et le GPRS, un utilisateur peut augmenter son débit. Le GPRS offre de surcroît différents taux de codage, permettant d'augmenter le débit lorsque les conditions de propagation sont correctes. Néanmoins, le débit brut sur un timeslot reste celui du GSM, c'est-à-dire environ 270 Kbit/s. EDGE (Enhanced Data for GSM Evolution) permet de s'affranchir de cette limite, moyennant l'introduction d'une nouvelle modulation, de nouveaux schémas de codage et la généralisation du principe de l'adaptation de lien (*link adaptation*).

EDGE peut s'appliquer au HSCSD et au GPRS. Leur association est respectivement connue sous le nom ECSD (Enhanced Circuit Switch Data) et E-GPRS (Enhanced-General Packet Radio Service). Du fait du faible attrait des opérateurs pour le HSCSD, l'ECSD risque de disparaître devant l'E-GPRS, lequel est souvent considéré comme un système de troisième génération. De leur côté, les principes d'EDGE ont été repris et adaptés pour l'évolution de l'IS136, le standard TDMA américain. Cette évolution est connue sous le nom d'UWC136 ou d'EDGE compact.

Principes généraux

EDGE est issu de la constatation que, dans un système cellulaire, tous les mobiles ne disposent pas de la même qualité de transmission. Le contrôle de puissance tente de pallier ces inégalités en imposant aux mobiles favorisés une transmission moins puissante. Cela permet plutôt d'économiser les batteries des terminaux que d'augmenter les capacités de transmission. Vous verrez au chapitre suivant que, dans les systèmes fondés sur un accès par répartition en code tel que CDMA, ce contrôle de puissance a un rôle autrement plus important.

EDGE permet à ces utilisateurs favorisés de bénéficier de transmissions plus efficaces, augmentant par conséquent le trafic moyen offert dans la cellule. En réalité, EDGE fait correspondre à chaque condition radio rencontrée le schéma de modulation et de codage, ou MCS (Modulation and Coding Scheme), le plus approprié en regard de la qualité de service requise sur la liaison. Pour cela, EDGE a évidemment introduit de nouveaux MCS, en comparaison de ceux existant dans le GSM ou le GPRS. Le tableau 5.7 décrit à titre d'exemple les MCS définis pour l'E-GPRS et les débits obtenus correspondants.

Les codes protecteurs d'erreurs utilisés sont des codes convolutifs, comme en GSM ou en GPRS, mais de nouveaux polynômes générateurs ont été introduits. De plus une modulation supplémentaire est apparue. Il s'agit d'une modulation linéaire à huit états (3 bits par

symbole) dans lesquels chaque symbole est associé à une phase spécifique par un mapping de Gray (voir l'annexe technique A).

Tableau 5.7 – Les neuf schémas de codage et de modulation d'E-GPRS.

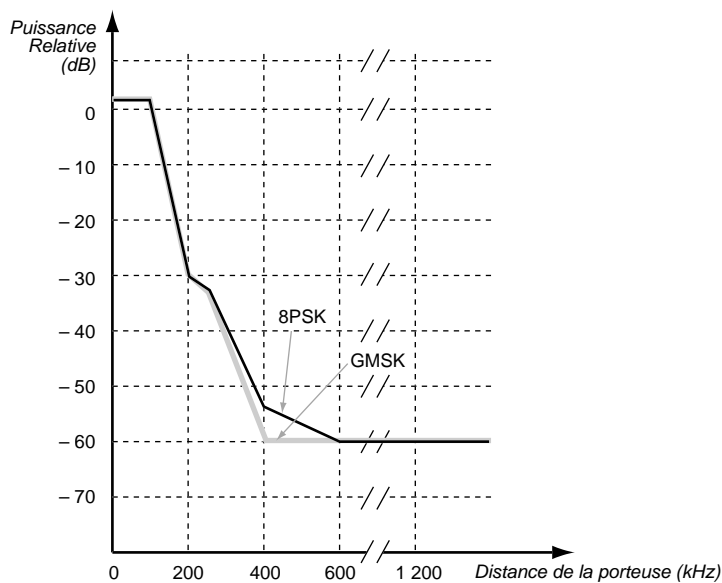
Schéma	Taux de codage	Modulation	Nombre de blocs RLC par 20 ms	Famille	Débit (Kbit/s)
MCS-9	1.0	8PSK	2	A	59,2
MCS-8	0.92		2	A	54,4
MCS-7	0.76		2	B	44,8
MCS-6	0.49		1	A	29,6 27,2
MCS-5	0.37		1	B	22,4
MCS-4	1.0	GMSK	1	C	17,6
MCS-3	0.80		1	A	14,8 13,6
MCS-2	0.66		1	B	11,2
MCS-1	0.53		1	C	8,8

La principale contrainte à prendre en compte pour introduire une nouvelle modulation, plus efficace que la GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying), consiste à respecter le gabarit spectral du GSM, c'est-à-dire à ne pas déborder des canaux larges d'environ 200 kHz. La forme du spectre a pour principale origine les transitions dues, d'une part, à la modulation, telles que les changements d'états, et, d'autre part, aux émissions par bursts, qui s'accompagnent d'une montée puis d'une descente en puissance respectivement en début et en fin de burst. Le standard a défini pour cela des gabarits, que doivent respecter les émetteurs EDGE. Ces gabarits sont illustrés aux figures 5.17 et 5.20.

Le gabarit de la modulation de phase à huit états, ou 8PSK (Eight-level Phase Shift Keying) correspond aux nouvelles modulations introduites par EDGE et est légèrement moins contraignant que celui d'origine du GSM. Néanmoins, pour respecter ce gabarit, EDGE a dû affiner la 8PSK d'origine. En effet, certaines transitions d'une 8PSK classique peuvent amener des transitions d'amplitude brutales. Il suffit pour cela que la trajectoire en bande de base d'un symbole au suivant passe à proximité de l'origine du plan complexe. Or, les amplificateurs de puissance des mobiles comme des stations de base sont souvent utilisés dans des zones non linéaires, dans lesquelles le rendement de l'amplification est souvent meilleur, et provoquent des distorsions dans un signal dont l'enveloppe ne serait pas constante.

Figure 5.17

Gabarit du spectre
des modulations
GMSK et 8PSK.

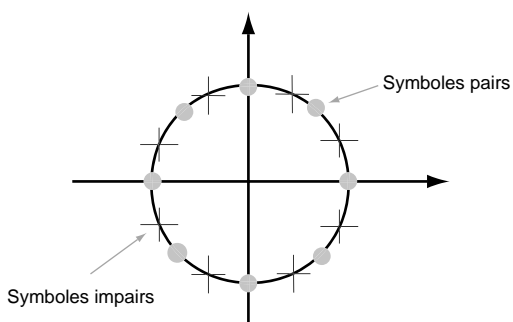


Source : ETSI, 05.05, 2000

C'est pourquoi EDGE applique une rotation systématique de $3\pi/8$ à chaque symbole, ce qui revient à avoir deux constellations 8PSK utilisées de façon alternée, comme illustré à la figure 5.18. Les variations d'amplitude sont ainsi atténuées. Elles le sont d'autant plus qu'un filtrage gaussien est appliqué comme filtre de mise en forme (voir l'annexe technique A).

Figure 5.18

Constellations
8PSK.

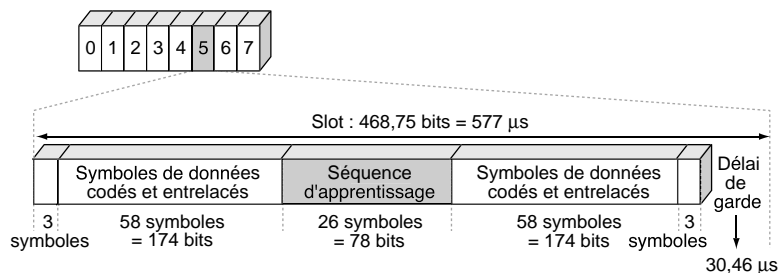


La structure du burst normal associé à la modulation 8PSK est identique à celle du GSM, si ce n'est que les bits sont maintenant des symboles 8PSK, comme illustré à la figure 5.19. Le débit brut sur le slot est ainsi environ trois fois supérieur à celui du GSM, c'est-à-dire de l'ordre de 810 Kbit/s. Le nombre de bits utiles transportés par un burst normal en 8PSK est de 348, soit un débit utile par burst d'environ 600 Kbit/s. Il ne faut pas oublier, toutefois, qu'en

réalité, le calcul du débit d'un utilisateur doit tenir compte de la structure du multiframe (voir le chapitre 4). Dans l'hypothèse où l'utilisateur ne dispose que d'un slot par trame, son débit est de $348 \times 4,615 / (26/24) = 69 \text{ Kbit/s}$.

Figure 5.19

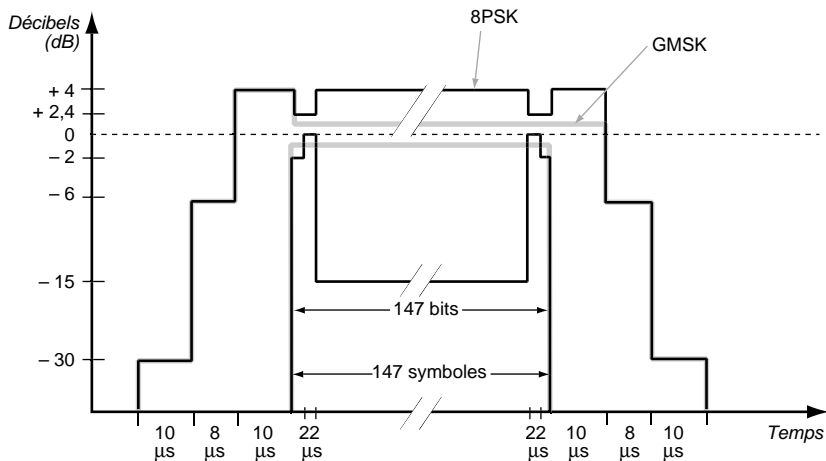
Structure du burst normal 8PSK.



Remarquez, à la figure 5.20, que le gabarit de montée en puissance de la 8PSK est plus souple que celui de la GMSK. En effet, la GMSK est une modulation à enveloppe constante — l'amplitude du signal transmis reste constante à l'intérieur du burst, à l'exception des périodes transitoires de début et de fin de burst — alors que la 8PSK, même celle modifiée d'EDGE, produit des variations d'enveloppe plus importantes.

Figure 5.20

Gabarit de puissance pour l'émission d'un burst GSM et EDGE.



Source : ETSI, 05.05, 2000

Avec le mode circuit du GSM, EDGE permet d'obtenir des canaux logiques de données à de plus hauts débits. On les appelle des E-TCH (Enhanced-Traffic CHannel). Un E-TCH offre, après codage protecteur d'erreur, des débits utilisateur allant jusqu'à 43,2 bit/s, lorsqu'un seul slot par trame est alloué à un utilisateur.

Adaptation de lien et redondance incrémentale

C'est associé au GPRS qu'EDGE revêt tout son intérêt, notamment grâce au principe d'adaptation de lien.

L'adaptation de lien consiste à sélectionner le schéma de modulation et de codage le mieux adapté aux conditions radio rencontrées par le mobile. En cas de conditions favorables, un ensemble modulation-codage efficace, quoique offrant une protection réduite, est utilisé. Dans des conditions difficiles, un schéma de modulation-codage robuste est préférable.

La qualité du lien radio est ainsi régulièrement estimée, et la couche RLC en déduit le meilleur MCS pour la transmission. Contrairement au GPRS, qui offre quatre schémas de codage différents, les changements de MCS peuvent se faire entre deux paquets d'un même flux.

E-GPRS permet d'effectuer des retransmissions de redondance incrémentale, ou *incremental redundancy*, entre deux MCS de la même famille. Cela revient à effectuer la première tentative de transmission d'un paquet RLC avec une faible protection et, en cas de mauvaise réception, de ne retransmettre que de la redondance, dont le décodage conjoint avec le paquet initial améliore fortement la chance de recevoir correctement le paquet.

Constitution des blocs RLC-MAC d'E-GPRS

Alors qu'en GPRS, il existe quatre types de codage différents, E-GPRS définit neuf schémas de modulation et de codage (MCS). La longueur (L_i) des blocs transmis de la couche RLC-MAC à la couche physique dépend du type de codage appliqué à ces blocs avant leur transmission sur l'interface air. De plus, la structure interne de ces blocs (en-têtes, nombre de blocs RLC transmis dans un bloc RLC-MAC, etc.) varie également suivant le type de codage appliqué et le sens dans lequel le bloc est transmis. Pour mémoire, un bloc RLC-MAC est transmis toute les 20 ms.

Le tableau suivant récapitule la taille des blocs d'information issus de la couche RLC, auxquels l'en-tête MAC est ajoutée, avant codage et transmission par la couche physique.

Tableau 5.8 – Format des blocs RLC-MAC *.

Codage	Taille du bloc RLC-MAC (L_i) (en bit)	Taille du bloc d'information (en bit)	Taille de l'en-tête MAC (en bit)
MCS-1	209	178	31
MCS-2	257	226	31
MCS-3	329	298	31
MSC-4	385	354	31
MSC-5	487 (UL) 478 (DL)	450	37 (UL) 28 (DL)
MSC-6	631 (UL) 622 (DL)	594	37 (UL) 28 (DL)
MSC-7	946 (UL) 940 (DL)	2 × 450	46 (UL) 40 (DL)
MSC-8	1 138 (UL) 1 132 (DL)	2 × 546	46 (UL) 40 (DL)
MSC-9	1 236 (UL) 1 228 (DL)	2 × 594	46 (UL) 40 (DL)

* UL (UpLink) désigne le sens montant et DL (DownLink) le sens descendant.

Le bloc d'information issu de la couche RLC contient systématiquement 2 bits d'en-tête. Ainsi, la taille des informations utiles est, en MCS-1, de 176 bits, transmis en 20 ms, d'où un débit minimal de 8,8 Kbit/s. Pour MSC-7, MSC-8 et MSC-9, les données transmises correspondent à deux blocs RLC, transmis en 20 ms. Ainsi, le débit maximal est obtenu avec le codage MCS-9 et est égal à $2 \times 592/20 = 59,2$ Kbit/s.

Lorsque la couche physique reçoit des couches RLC-MAC le bloc RLC-MAC à émettre, elle peut déduire de la longueur L_1 du bloc le type de codage de canal (MCS-1 à MCS-9) à utiliser. Elle doit également indiquer à la couche physique de l'entité réceptrice le type de codage utilisé. Elle utilise pour cela non pas les 8 bits de préemption des quatre bursts sur lesquels sont entrelacées les bits codés, comme en GPRS, mais une partie de l'en-tête MAC, appelée CPS (Coding and Puncturing Scheme). Pour les codages MCS-1 à MCS-4, les bits de préemption (00010110, quel que soit le codage) sont ajoutés aux 456 bits codés ; pour les codages MCS-5 à MCS-9, les bits de préemption (00000000 ou 11100111) sont insérés dans les $464 = [(57 + 1) \times 2 \times 4]$ symboles résultants.

Parvenu à la couche physique, le bloc RLC-MAC de L_1 bits est codé par l'un des MCS. Par rapport au GPRS, notez que l'en-tête MAC est codé indépendamment du ou des deux blocs RLC. De plus, le codage et la modulation respectent les règles suivantes :

- La modulation utilisée est la GMSK pour les codages MCS-1 à MCS-4 et la 8PSK pour les codages MCS-5 à MCS-9. La possibilité d'utiliser la GMSK est conservée afin d'offrir une transmission correcte dans un canal radio fortement perturbé.
- Le codage des données et celui de l'en-tête MAC se décomposent toujours de la manière suivante : ajout de 8 ou 12 bits de parité pour protéger le bloc (d'en-tête ou de données), ajout de 6 bits de traînée, passage dans un code convolutif de taux 1/3 et de profondeur 6, poinçonnage pour parvenir à un bloc de 456 bits (MCS-1 à MCS-4) ou 464 symboles (MCS-5 à MCS-9), entrelacement et insertion dans quatre bursts.
- Pour les codages MCS-1 à MCS-4, dans le sens descendant, les 3 bits d'USF (Uplink Status Flag) sont codés indépendamment des 28 autres bits de l'en-tête MAC ; ils sont transformés, de la même manière que pour le codage CS-4 du GPRS, en 12 bits, qui ne passent pas ensuite dans le codeur convolutif. À ces 12 bits, on ajoute les 68 bits issus du codage convolutif et du poinçonnage des 28 autres bits de l'en-tête MAC.
- Dans le sens montant, on n'isole pas, contrairement au GPRS, les 3 premiers bits pour leur appliquer le même traitement qu'aux bits d'USF : les 31 bits de l'en-tête MAC passent dans le codeur convolutif, mais le poinçonnage en sortie diffère de celui effectué dans le sens descendant afin d'avoir finalement le même nombre de bits d'en-tête codés (80) en montant qu'en descendant.
- Pour les codages MCS-5 à MCS-9, dans le sens descendant, les 3 bits d'USF sont codés indépendamment des 25 ou 37 autres bits de l'en-tête MAC ; ils sont codés en une suite de 36 bits, qui ne passent pas ensuite dans le codeur convolutif. À ces 36 bits, on ajoute les 68 bits issus du codage convolutif et du poinçonnage des 28 autres bits de l'en-tête MAC.

Ces règles sont résumées au tableau 5.9.

Tableau 5.9 – Codages appliqués à la transmission de données en E-GPRS;

Codage	Codage des données (bloc RLC)						Codage de l'en-tête MAC						Bloc RLC-MAC
	Nbre bit en entrée	Nbre bit de parité	Nbre bit de traînée	Taux de codage	Nbre bit poinçonnés	Nbre bit en sortie (1)	Nbre bit en entrée	Nbre bit de parité	Nbre bit de traînée	Taux de codage	Nbre bit poinçonnés	Nbre bit en sortie (2)	Nbre bit transmis (3)
MCS-1	178	12	6	1/3	216	372		8	6 non transmis	1/3			456
UL							31				37	80	+ 4
DL							3/28				40	12 + 68	
MCS-2	226	12	6	1/3	360	372		8	6 non transmis	1/3			456
UL							31				37	80	+ 4
DL							3/28				40	12 + 68	
MCS-3	298	12	6	1/3	576	372		8	6 non transmis	1/3			456
UL							31				37	80	+ 4
DL							3/28				40	12 + 68	
MCS-4	354	12	6	1/3	744	372		8	6 non transmis	1/3			456
UL							31				37	80	+ 4
DL							3/28				40	12 + 68	
MCS-5	450	12	6	1/3	156	1248		8	6 non transmis	1/3			1 392
UL							37				-	135 + 1	+ 8
DL							3/25				-	36 + 99 + 1	
MCS-6	594	12	6	1/3	588	1248		8	6 non transmis	1/3			1 392
UL							37				-	135 + 1	+ 8
DL							3/25				-	36 + 99 + 1	
MCS-7	2 × 450	2 × 12	2 × 6	1/3	2 × 792	2 × 612		8	6 non transmis	1/3			1 392
UL							46				2	160	+ 8
DL							3/37				11	36 + 124	
MCS-8	2 × 546	2 × 12	2 × 6	1/3	2 × 1 080	2 × 612		8	6 non transmis	1/3			1 392
UL							46				2	160	+ 8
DL							3/37				11	36 + 124	
MCS-9	2 × 594	2 × 12	2 × 6	1/3	2 × 1 024	2 × 612		8	6 non transmis	1/3			1 392
UL							46				2	160	+ 8
DL							3/37				11	36 + 124	

1. Nbre bit en sortie = (nbre bit en entrée + nbre bit de parité + nbre bit de traînée)/(taux de codage – nbre bit poinçonnés).

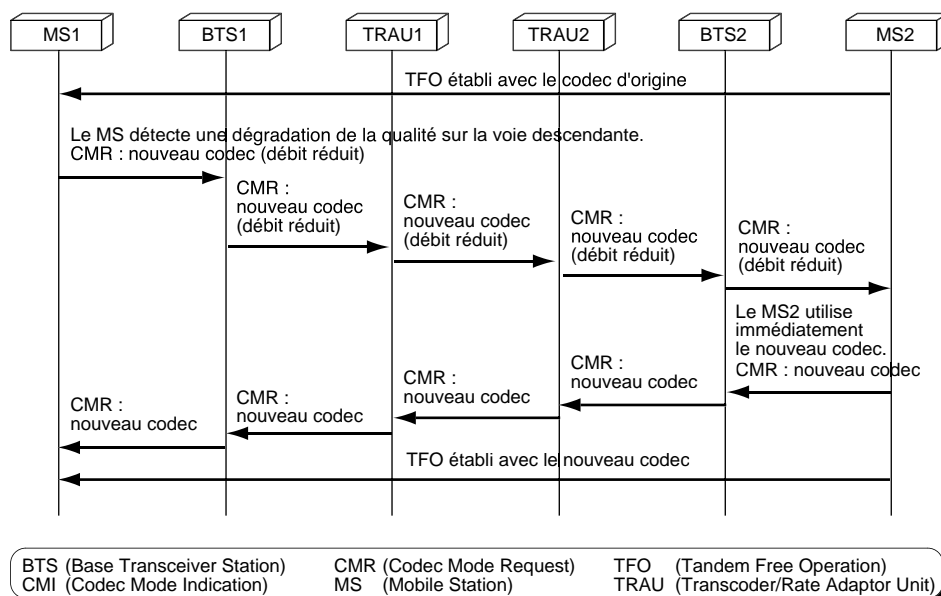
2. Nbre bit en sortie = (nbre bit en entrée + nbre bit de parité)/(taux de codage – nbre bit poinçonnés).

3. Nbre bit transmis = nbre bit en sortie (1) + nbre bit en sortie (2) + bit de bourrage.

Les principes d'adaptation de lien existent aussi dans le monde du circuit et de la transmission de voix. Dans ce cas, il suffit que le codeur de source — celui qui transforme le signal analogique de voix en suite numérique — sache adapter son débit en fonction des conditions de propagation. Lorsque ces conditions sont satisfaisantes, le codeur de parole utilise des algorithmes délivrant une bonne qualité auditive mais requérant un débit important, alors que, dans des conditions plus médiocres, plutôt que de rompre la communication, le codeur de voix réduit son débit et sa qualité. On parle alors de codeur AMR (Adaptive Multi-Rate). Évidemment, il est nécessaire qu'émetteur et récepteur échangent de la signalisation pour reconnaître les changements de débits.

La figure 5.21 illustre un cas particulier dans lequel deux mobiles sont en communication et disposent de codeurs AMR. Ils peuvent utiliser un protocole particulier, TFO (Tandem Free Operation), qui permet, lors de l'établissement de la communication, de trouver le meilleur jeu de paramètres de codeurs de parole, en fonction des conditions de propagation des deux mobiles.

Figure 5.21
*Exemple
de changement
de débit entre
deux mobiles.*



Perspectives

Le GSM a connu un très grand succès avec la téléphonie mobile et a naturellement évolué vers le transfert de données, en commençant par réutiliser l'architecture définie pour la téléphonie. Ses premiers services ont été le fax et le transfert de données à faible débit en mode circuit.

Les limitations en débit du GSM ont été vite repoussées par le HSCSD, qui autorise l'allocation de plusieurs timeslots à un utilisateur, multipliant d'autant son débit. L'architecture du réseau restait toutefois toujours dévolue au monde de la téléphonie, inadapté au transfert des données.

Le GPRS est alors apparu pour offrir plusieurs slots à un utilisateur ainsi qu'un partage dynamique de la ressource radio et un réseau fixe complètement adapté au transfert de paquet.

En dotant l'interface radio de schémas de modulation et de codage plus efficace, EDGE ouvre enfin le GSM aux systèmes de troisième génération. Les débits et plus généralement les services qu'offre E-GPRS respectent le cahier des charges de l'Union internationale des télécommunications (UIT) des systèmes 3 G.

Ces évolutions vont vraisemblablement permettre de répondre aux exigences des utilisateurs rapidement et à un coût modéré. Néanmoins, à plus long terme, opérateurs, constructeurs et utilisateurs devront investir dans une véritable troisième génération, telle que l'UMTS, présentée en détail au chapitre suivant, pour réaliser un réseau de mobiles pleinement comparable à un réseau filaire.