

QUESTION 16/2

Elaboration de manuels
à l'intention des pays
en développement



UIT-D

COMMISSION D'ÉTUDES 2 2^e PÉRIODE D'ÉTUDES (1998-2002)

Manuel sur les nouvelles technologies et les nouveaux services

*FASCICULE I
Nouvelles technologies
pour de nouveaux réseaux*

Bureau de développement des télécommunications (BDT)

Union internationale des télécommunications



LES COMMISSIONS D'ÉTUDES DE L'UIT-D

Les commissions d'études de l'UIT-D ont été créées aux termes de la Résolution 2 de la Conférence mondiale de développement des télécommunications (CMDT) organisée à Buenos Aires, Argentine, en 1994. Pour la période 1998-2002, la Commission d'études 1 est chargée d'examiner onze Questions dans le domaine des stratégies et politiques de développement des télécommunications. La Commission d'études 2 est, elle, chargée d'étudier sept Questions dans le domaine du développement et de la gestion des services et réseaux de télécommunication. Au cours de cette période, pour permettre de répondre dans les meilleurs délais aux préoccupations des pays en développement, les résultats des études menées à bien au titre de chacune de ces deux Questions sont publiés au fur et à mesure au lieu d'être approuvés par la CMDT.

Pour tout renseignement

Veillez contacter:

Mme Fidélia AKPO
Bureau de Développement des Télécommunications (BDT)
UIT
Place des Nations
CH-1211 GENÈVE 20
Suisse
Téléphone: +41 22 730 6073
Fax: +41 22 730 5884
E-mail: fidelia.akpo@itu.int

Pour commander la présente publication

Les commandes ne sont pas acceptées par téléphone. Veillez les envoyer par téléfax ou par e-mail.

UIT
Service des ventes
Place des Nations
CH-1211 GENÈVE 20
Suisse
Téléphone: +41 22 730 6141 anglais
Téléphone: +41 22 730 6142 français
Téléphone: +41 22 730 6143 espagnol
Fax: +41 22 730 5194
Télex: 421 000 uit ch
Télégramme: ITU GENEVE
E-mail: sales@itu.int

La Librairie électronique de l'UIT: www.itu.int/publications

© UIT 2001

Tous droits de reproduction réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'UIT.

Manuel sur les nouvelles technologies et les nouveaux services

*FASCICULE I
Nouvelles technologies
pour de nouveaux réseaux*

Bureau de développement des télécommunications (BDT)

Union internationale des télécommunications



FASCICULE 1

Nouvelles technologies et nouveaux services**TABLE DE MATIÈRES**

	<i>Page</i>
Remerciements	ix
Préface	xi
Résumé analytique.....	xiv
CHAPITRE 1 – Introduction	1
1.1 Observations générales.....	1
1.2 Structure du Fascicule 1	1
CHAPITRE 2 – Nouvelles technologies des supports de transport (fibres optiques, supports hertziens, satellite)	4
2.1 Fibres optiques	4
2.1.1 Propriétés de transmission	4
2.1.1.1 Affaiblissement	4
2.1.1.2 Dispersion chromatique.....	5
2.1.1.3 Longueur d'onde de coupure	5
2.1.1.4 Dispersion modale de polarisation	6
2.1.2 Types de fibres.....	6
2.1.3 Mise en œuvre des fibres optiques.....	8
2.1.3.1 Protection des fibres	8
2.1.3.2 Méthodes d'installation.....	9
2.1.3.3 Raccordement.....	10
2.1.4 Protection des réseaux optiques.....	10
2.1.4.1 Introduction	10
2.1.4.2 Capacité de survie du réseau	10
2.1.4.3 Critères de sélection pour choisir le rétablissement ou la protection.....	12
2.1.4.4 Conclusions	13
2.1.4.5 Référence UIT-T	14
2.1.5 Abréviations.....	14
2.2 Systèmes de faisceaux hertziens numériques.....	15
2.2.1 Généralités	15
2.2.2 Nouvelles technologies des radiocommunications numériques hyperfréquences (point à point)	16
2.2.3 Description d'un système SDH moderne mettant en œuvre les nouvelles technologies	22
2.2.4 Systèmes radioélectriques à accès multiple	23
2.2.4.1 Architecture du système	24
2.2.5 Réseaux de radiocommunications numériques	33
2.2.6 Publications de l'UIT	35
2.2.7 Abréviations.....	36

	<i>Page</i>	
2.3	Systèmes de communication mobiles.....	38
2.3.1	Introduction.....	38
2.3.2	Le spectre des fréquences radioélectriques.....	39
2.3.3	Systèmes de Terre.....	40
2.3.3.1	Technologies cellulaires analogiques.....	40
2.3.3.2	Systèmes de deuxième génération.....	43
2.3.3.3	Téléphonie sans cordon (CT).....	51
2.3.3.4	Radiocommunications mobiles privées (PMR).....	53
2.3.3.5	Systèmes mobiles de troisième génération – IMT-2000.....	56
2.3.3.6	Utilisation de systèmes à satellites.....	56
2.3.4	Abréviations.....	57
2.4	Systèmes à satellites.....	59
2.4.1	Satellites géostationnaires (OSG).....	61
2.4.1.1	Systèmes à satellites géostationnaires du service fixe.....	62
2.4.1.2	Équipement de multiplexage de circuit numérique.....	63
2.4.1.3	Systèmes à satellites internationaux à grande capacité pour la téléphonie et la transmission de données.....	65
2.4.1.4	Systèmes à satellites régionaux et nationaux (DOMSAT) à petite et moyenne capacité.....	68
2.4.1.5	Systèmes à microstations.....	77
2.4.1.6	Système d'émission de station terrienne transportable pour reportages d'actualités par satellite en modulation numérique (RAS numérique).....	78
2.4.2	Technologie pour les systèmes à satellites géostationnaires (OSG) du service mobile.....	80
2.4.3	Systèmes à satellites non géostationnaires (non OSG).....	81
2.4.3.1	Description des systèmes.....	82
2.4.4	Communications personnelles mobiles mondiales par satellite (GMPCS).....	83
2.4.5	Systèmes mondiaux de repérage par satellite.....	83
2.4.6	Publications de l'UIT-R.....	83
2.4.7	Abréviations.....	83
Annexe 2A	– Système à microstations.....	86
Annexe 2B	– Le système Inmarsat.....	90
Annexe 2C	– Le système Globalstar.....	93
Annexe 2D	– Le système ICO.....	99
Annexe 2E	– Le système Skibrigde: accès mondial pour le multimédia.....	107
Annexe 2F	– Le système Teledesic.....	115
Annexe 2G	– Le système Final Analysis.....	119
CHAPITRE 3	– Systèmes de commutation numériques.....	121
3.1	Introduction.....	121
3.1.1	Notions de base.....	121
3.1.2	Principes de la commutation.....	123
3.1.3	Références.....	124

	<i>Page</i>	
3.2	Commutation des voies.....	124
3.2.1	Phases d'une connexion.....	125
3.2.2	Structure d'un système de commutation.....	126
3.2.3	Spécifications de l'unité fonctionnelle «commutation» d'un système de commutation.....	128
3.2.4	Matrice de commutation.....	128
3.2.5	Commande des dispositifs de commutation.....	135
3.2.6	Références.....	136
3.3	Commutation de messages.....	137
3.3.1	Commutation par paquets.....	137
3.3.2	Commutation de messages.....	139
3.3.3	Commutation ATM.....	140
3.3.4	Connexions virtuelles.....	140
3.3.5	Commutation et acheminement.....	142
3.3.6	Références.....	143
3.4	Technologie de la commutation téléphonique.....	144
3.4.1	Réseau local.....	145
3.4.2	Réseau grande distance.....	146
3.5	Transfert des messages en mode sans connexion.....	146
3.5.1	Principes.....	146
3.5.2	Techniques utilisées.....	147
3.6	Abréviations.....	148
CHAPITRE 4	– Nouveaux Systèmes de signalisation et SS N° 7.....	151
4.1	Introduction.....	151
4.2	Système de signalisation N° 7 (SS 7).....	151
4.2.1	Sous-système transfert de messages (MTP).....	152
4.2.1.1	Introduction.....	152
4.2.1.2	Description.....	152
4.2.1.3	Evolution future.....	155
4.2.2	Sous-système commande des connexions sémaphores (SCCP).....	156
4.2.2.1	Introduction.....	156
4.2.2.2	Description.....	156
4.2.2.3	Evolution future.....	159
4.2.3	Gestionnaire de transactions (TC).....	159
4.2.3.1	Introduction.....	159
4.2.3.2	Description.....	159
4.2.3.3	Evolution future.....	160
4.2.3.4	Synoptique.....	161
4.2.4	Sous-système utilisateur pour le RNIS (ISUP).....	161
4.2.4.1	Introduction.....	161
4.2.4.2	Description.....	161
4.2.4.3	Evolution future.....	163
4.2.4.4	Synoptique (Q.761 à Q.764 et série Q.730).....	164
4.2.5	Sous-système application du réseau intelligent (INAP).....	164
4.2.5.1	Introduction.....	164
4.2.5.2	Description.....	164
4.2.5.3	Exploitation future.....	166
4.2.5.4	Synoptique.....	166

	<i>Page</i>	
4.3	Système de signalisation d'abonné numérique N° 1 (DSS1).....	167
4.3.1	Introduction.....	167
4.3.2	Description.....	167
4.3.2.1	Commande de l'appel	167
4.3.2.2	Commande des services complémentaires	168
4.3.2.3	Evolution future.....	169
4.4	Signalisation à large bande.....	169
4.4.1	Couches inférieures prenant en charge la signalisation du RNIS-LB.....	169
4.4.2	Sous-système utilisateur du RNIS à large bande (B-ISUP).....	172
4.4.2.1	Introduction	172
4.4.2.2	Protocoles de signalisation du sous-système B-ISUP	172
4.4.2.3	Négociation des paramètres de trafic	174
4.4.2.4	Modification des paramètres de trafic	174
4.4.2.5	Indication de la classe de qualité de service (QS) et prise en charge des divers paramètres de QS.....	174
4.4.2.6	Voies virtuelles commutées (SVC) point à multipoint.....	175
4.4.2.7	Services complémentaires	175
4.4.2.8	Recommandations UIT-T.....	176
4.4.3	Système de signalisation d'abonné numérique N° 2 (DSS2)	176
4.4.3.1	Introduction	176
4.4.3.2	Protocoles de signalisation DSS2.....	177
4.4.3.3	Recommandations UIT-T.....	180
4.5	Abréviations	180
Annexe A – Autres protocoles de signalisation ATM		185
Annexe B – Le système DSS2 et les spécifications de signalisation UNI du Forum ATM		186
B.1	Introduction	186
B.2	186
B.3	186
CHAPITRE 5 – Techniques et méthodes de synchronisation.....		188
5.1	Introduction	188
5.2	Synchronisation des systèmes de transmission	189
5.2.1	Extraction du signal d'horloge du train de données binaires.....	189
5.2.2	Synchronisation point-à-point.....	191
5.3	Techniques basées sur la boucle à verrouillage de phase.....	193
5.3.1	Correction temporelle discontinue d'une horloge asservie	193
5.3.2	Régulation par oscillateur en fonctionnement temporel continu	194
5.4	Correction du rythme	195
5.4.1	Correction d'erreur dans le domaine temporel discontinu	195
5.4.2	Correction d'erreur dans le domaine fréquentiel.....	196
5.4.3	Correction d'erreur dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel.....	197

	<i>Page</i>
5.5	Synchronisation des réseaux 197
5.5.1	Synchronisation des centres de commutation téléphoniques dans le RTPC 197
5.5.2	Historique des travaux de l'UIT-T dans le domaine de la synchronisation des télécommunications..... 199
5.6	Synchronisation en mode ATM 205
5.7	Références 205
5.8	Abréviations 206
CHAPITRE 6	– Transmission numérique (PDH, SDH, DWDM, xDSL) 208
6.1	Hiérarchie numérique synchrone (PDH)..... 208
6.1.1	Principes 208
6.1.2	Normes..... 208
6.1.3	Mise en œuvre..... 209
6.2	Hiérarchie numérique synchrone (SDH)..... 210
6.2.1	Principes 210
6.2.2	Normes..... 211
6.2.3	Mise en œuvre..... 212
6.3	Multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) à haute densité..... 217
6.3.1	Principes 217
6.3.2	Normes..... 218
6.3.3	Mise en œuvre..... 220
6.4	Lignes d'abonné numériques (XDSL)..... 222
6.4.1	Lignes d'abonné 222
6.4.2	Systèmes en lignes d'abonné..... 224
6.4.3	ADSL..... 226
6.4.4	HDSL..... 231
6.4.5	VDSL..... 232
6.4.6	Exemple de réseaux 234
6.4.7	Recommandations de l'UIT 237
6.4.8	Perspectives d'avenir..... 237
6.4.9	Bibliographie 238
6.5	Abréviations 238
CHAPITRE 7	– Technologie ATM 241
7.1	Introduction..... 241
7.2	Connexions virtuelles – voie virtuelle et conduit virtuel 246
7.3	Structure en couches des réseaux de transport ATM – théorie générale..... 248
7.4	Commutation en mode ATM des conduits virtuels (VP) et des voies virtuelles (VC) 251
7.5	Format des cellules ATM..... 251
7.6	Le modèle de référence pour le protocole du RNIS à large bande..... 253
7.6.1	Fonctions des couches individuelles du PRM RNIS large bande..... 255
7.6.2	Couche physique..... 256
7.6.3	La couche ATM..... 256
7.6.4	La couche d'adaptation ATM..... 256

	<i>Page</i>
7.7	Exploitation et maintenance 260
7.7.1	Principes OAM 260
7.7.2	Niveaux OAM dans le RNIS-LB 261
7.7.3	Mécanisme de flux F4 (F5)..... 262
7.8	Signalisation dans le réseau ATM..... 262
7.8.1	Capacités de contrôle des connexions ATM par voies virtuelles et des connexions ATM par conduits virtuels pour le transfert de l'information..... 262
7.8.2	Capacité de prise en charge de communications à plusieurs correspondants et à plusieurs connexions 263
7.8.3	Autres capacités 263
7.8.4	Fonction de transport de signalisation 263
7.8.5	Protocoles de signalisation..... 264
7.9	Gestion du trafic 264
7.9.1	Capacités de transfert ATM (ATC) 267
7.9.2	Catégories de services spécifiées par le Forum ATM..... 269
7.10	Références de l'UIT-T 270
7.11	Abréviations 272

Remerciements

Il convient de remercier les personnes dont les noms suivent pour leurs contributions et leur aide à l'élaboration du présent Manuel.

Mme F. Akpo, BDT
M. S. Berman (Bell Lab, Lucent)
M. Bhatnagar, ABU
M. G. Cayla (Lucent Technologies)
M. L. Chae Sub, Président du GT 1/13 de l'UIT-T
M. J. Costa, Nortel Networks
M. Distler, France
M. Embro, Ericsson
M. J.C. Faure (BDT)
M. M. Ghazal, Liban, Rapporteur pour la Question 2/2, ultérieurement 16/2
Dr N. Gospic, Consultant BDT
M. C. Hyde, ICO Global Communications
Dr M. Jankovic
M. H. Jieping, Chine
M. R. Katic, CYPTT
M. N. Kisrawi, Président de la Commission d'études 2 de l'UIT-D
M. J. Magill, Probe Communications, Consultant BDT
M. P. Mège, THALES (précédemment Thomson)
M. B. Moore, Charter Telecomms Consultants Ltd, Consultant BDT
M. A. Nehme, Ericsson
Dr B. Odadzic, CYPTT
M. F. Rahe, Alcatel
Dr I. Reljin, CYPTT
M. Savchuk (Institut ukrainien)
M. Y. Shmaliy, Ukraine
M. R. Simic, CYPTT
M. W. Widl, Suède
M. P. Touré, BDT
Mme B. Wilson, BDT
M. M. Zaragoza, BDT

Avertissement pour le lecteur

Le texte de ce Manuel a été établi par un grand nombre de personnes bénévoles appartenant à plusieurs administrations et entreprises privées. Elles ont présenté des exemples de leurs produits, de leurs systèmes, de leurs modèles d'équipement et de leurs études de cas.

La mention de telles ou telles compagnies ou de tels ou tels produits ne doit pas être interprétée comme une homologation ou une recommandation de l'UIT.

PRÉFACE

1 Historique

Dans la Société mondiale de l'information (GIS, *Global Information Society*) et l'Economie mondiale de l'information (GIE, *Global Information Economy*), telles que nous les connaissons aujourd'hui, le secteur des télécommunications est appelé à jouer un rôle de premier plan en tant qu'industrie de pointe du XXI^e siècle. Pour répondre aux exigences de ce siècle qui s'ouvre et pour combler le fossé de la communication qui existe entre pays industrialisés et pays en développement, le partage des connaissances en matière de technologie et de services de télécommunication est un impératif de la plus haute importance. Cela a été reconnu par la première Conférence mondiale de développement des télécommunications (Buenos Aires, 21-29 mars 1994) et confirmé par la deuxième Conférence mondiale de développement des télécommunications (La Valette, 23 mars – 1^{er} avril 1998), qui a mis en place deux Commissions d'études:

- La Commission d'études 1, chargée de la stratégie et des politiques de télécommunication.
- La Commission d'études 2, chargée du développement et de la gestion des services et des réseaux de télécommunication.

La Question 2/2 de la première période d'études, devenue la Question 16/2 de la Commission d'études 2 dans la période d'études actuelle, a pour objet l'élaboration de nouveaux manuels ou la révision de manuels existants, l'objectif étant de diffuser des connaissances et du savoir-faire dans les domaines précités. Le Manuel «Nouvelles technologies et nouveaux services» est un des moyens qui conduiront à la réalisation de cet objectif.

2 But du Manuel

Le développement rapide des télécommunications, depuis le stade de la technologie jusqu'à celui des marchés, amène dans son sillage des produits, des équipements, des systèmes, des réseaux et des services nouveaux qui interviennent dans la vie de tous les jours. Il serait plutôt ambitieux de vouloir faire en sorte que le présent Manuel couvre tous les aspects des nouvelles technologies et des nouveaux services, et qu'il réponde aux besoins de tous les protagonistes de ce secteur.

Le but du Manuel est le suivant: faire un tour d'horizon de la technologie et des services qui constituent l'environnement, en évolution, des télécommunications, en présentant les caractéristiques et les possibilités générales offertes par les divers réseaux et les nouveaux services sur le marché, sans traiter des particularités techniques qui relèvent de la normalisation. D'une manière générale, les technologies et les nouveaux services ainsi passés en revue sont en conformité avec les Recommandations de l'UIT.

Le Manuel aborde également les questions de genre s'agissant de la préparation et de l'introduction de nouveaux services.

3 Pourquoi le Manuel est-il nécessaire?

Le secteur des télécommunications a connu des changements décisifs au cours de la décennie écoulée, sous l'influence d'une globalisation et d'une libéralisation toujours plus grande d'un marché dans lequel la maîtrise des capacités des réseaux est devenue un facteur stratégique dans la concurrence pour satisfaire les exigences croissantes de la clientèle. L'évolution rapide de l'intelligence des réseaux découle principalement de la convergence entre les télécommunications et les technologies de l'information, dont la conséquence est le développement de divers services multimédias. Dans ces conditions, les réseaux de télécommunication deviennent de plus en plus complexes, leur mise en œuvre et leur exploitation sont des opérations toujours plus ardues, et cette situation est appelée à durer. Par ailleurs, il sera de plus en plus important de posséder la compétence nécessaire pour intégrer dans les réseaux existants des solutions

intelligentes, à haute capacité, afin de répondre aux besoins des usagers et aux impératifs de coût-efficacité.

Le perfectionnement des réseaux existants ou des réseaux nouveaux doit satisfaire à trois exigences:

- *davantage de capacité;*
- *davantage de puissance; et*
- *efficacité accrue.*

Pour résumer les forces qui sont derrière ces exigences, et aussi pour éclairer les idées qui sont à la base du Manuel, nous pouvons énoncer ce qui suit:

- Avec un déficit de capacité (par exemple, largeur de bande, volume en paquets, etc.), les opérateurs des réseaux sont dans l'impossibilité de satisfaire la demande des usagers, même pour le service universel, et surtout pour les services nouveaux et de haute qualité. Pour optimiser un investissement, il faut davantage de créativité et une planification appropriée des applications des nouvelles technologies.
- En mettant à profit les possibilités offertes par les applications des nouvelles technologies pour créer davantage d'intelligence dans les équipements de télécommunication, les exploitants des réseaux et les prestataires de services disposeront de moyens plus puissants, et accroîtront le trafic des réseaux intelligents, source de nouveaux services à valeur ajoutée et d'accroître le trafic dans les réseaux intelligents. L'estimation des besoins des usagers est un outil puissant pour s'imposer dans un marché concurrentiel, à condition de la pratiquer au bon moment.
- La mise en œuvre de concepts nouveaux en matière de gestion des réseaux – dans les domaines exploitation, administration, maintenance et planification – permet d'améliorer l'efficacité d'exploitation et l'organisation de la maintenance, la conséquence étant une baisse des coûts d'exploitation. Si l'on peut avoir une représentation objective des éléments de réseau, des réseaux, des services et des entreprises, il devient possible d'améliorer l'exploitation journalière et la qualité de fonctionnement des réseaux. Cela répond à l'attente des usagers, qui souhaitent avoir une meilleure qualité de service.

Ces considérations constituent les idées forces sur lesquelles repose le présent Manuel.

4 A qui le Manuel s'adresse-t-il?

Le Manuel sera un outil des plus utiles pour tous ceux qui s'intéressent aux télécommunications, mais sa lecture est particulièrement recommandée aux dirigeants, aux experts techniques et aux experts de la planification travaillant pour les opérateurs des télécommunications et pour les services nationaux de régulation au sein des compagnies du secteur, en particulier dans les pays en développement. Les cadres dirigeants pourront utiliser l'information pour mettre en perspective ou développer des concepts à intégrer dans des stratégies à long terme. Les cadres et experts techniques s'intéresseront à la mise en place des réseaux qui fourniront les nouveaux services mondiaux que les usagers attendent au XXI^e siècle. Les instances de régulation, notamment celles de création récente, devront être encouragées à créer un environnement dans lequel les différents acteurs pourront être motivés à innover sans avoir à imposer des contraintes autres que celles nécessaires à l'établissement d'une concurrence fructueuse. D'autres acteurs mettront aussi à profit cette documentation pour améliorer leurs conditions d'accès au marché.

Les références indiquées dans les fascicules du Manuel permettront aux lecteurs des pays en développement de compléter leur information sur les sujets traités.

5 Cohérence du texte

De nombreuses personnes ont contribué à la rédaction de ce Manuel, qui a été édité par Mme N. Gospic, assistée par MM. B. Moore et J. Magill. Les chapitres et les sections de chapitre diffèrent quant à leur portée et quant au niveau de précision dans le traitement des sujets étudiés. Cela était prévisible dans un manuel de cette espèce et reflète les différences de nature entre les contributions.

Le Manuel est une photographie du développement des réseaux et des services à l'époque de sa publication. Il ne fournit pas, par conséquent, une image complète, mais énonce des lignes directrices et contient de nombreuses références pour les études futures.

Il est prévu de mettre à jour le texte de ce Manuel pour accompagner l'évolution des technologies.



Hamadoun I. Touré

Directeur

Bureau de Développement des Télécommunications

Union internationale des télécommunications

RÉSUMÉ ANALYTIQUE

1 Introduction

Compte tenu de l'évolution future des services de télécommunication, dans le domaine technique comme dans celui de l'exploitation, les pays en développement ont besoin de connaître les progrès les plus récents accomplis sur le plan international, afin d'en faire bénéficier leurs populations.

Ces pays doivent se tenir au courant de ces évolutions et des réalisations qui découlent de l'application des nouvelles technologies aux réseaux de télécommunication, afin de répercuter ces progrès dans le service qu'ils assurent aux usagers.

Le Manuel sur les nouvelles technologies et les nouveaux services a été établi dans l'optique de ces deux déclarations de la Conférence de La Valette (1998).

2 Structure du Manuel

Du fait de la complexité des questions de télécommunication et de la diversité des groupes de lecteurs, la structure du manuel doit obéir à certaines conditions de pédagogie. On a cherché à faire en sorte que le lecteur puisse tourner aisément l'information relative à un sujet donné. Par ailleurs, la structure est adaptée aux changements rapides que connaissent les télécommunications et également au fait que certains sujets sont encore à l'étude.

Le manuel se compose de quatre parties qui se présentent comme des fascicules séparés:

Fascicule 1: «Technologies nouvelles au service de réseaux nouveaux»

Fascicule 2: «Réseaux et services numériques»

Fascicule 3: «Réseaux et services basés sur le protocole IP»

Fascicule 4: «Réseaux et services de radiodiffusion sonore et de télévision»

Chaque chapitre forme un tout (dans certains cas, il en est de même pour des sections de chapitre), ce qui simplifiera la mise à jour du texte.

La mention de telles ou telles compagnies dans ce Manuel ne doit pas être interprétée comme une homologation ou une recommandation de l'UIT.

Dans chaque fascicule, le Chapitre 1 donne un aperçu général du sujet traité et précise les relations avec les autres fascicules. Chaque chapitre contient des références aux normes et aux publications pertinentes de l'UIT-T. On trouvera également des renvois aux normes importantes établies par d'autres organisations de normalisation. Certains chapitres donnent, en annexe, des exemples utiles qui élargissent l'éclairage du sujet traité.

On trouvera ci-après le sommaire des fascicules du Manuel. La table des matières détaillée est donnée au début de chaque fascicule.

Fascicule 1 – Technologies nouvelles au service de réseaux nouveaux

Ce fascicule se compose des chapitres suivants:

- 1 Introduction
- 2 Nouvelles technologies des supports de transport
 - Câbles à fibres optiques
 - Technologies numériques dans les systèmes de faisceaux hertziens
 - Systèmes de communication mobiles
 - Systèmes à satellites

- 3 Systèmes de commutation numériques
- 4 Nouveaux systèmes de signalisation et Système de signalisation N° 7
- 5 Techniques et méthodes de synchronisation
- 6 Systèmes de transmission numérique
- 7 Technologie ATM et Système de signalisation N° 7

Le Chapitre 1 – *Introduction et aperçu général*, souligne la nécessité de mettre en œuvre des technologies nouvelles, avec deux objectifs: introduire de nouveaux services et assurer la compétitivité sur le marché, s'agissant des capacités et de la qualité.

Le Chapitre 2 – *Nouvelles technologies des supports de transport*, expose les principales considérations qui sont à la base de la mise en œuvre des technologies optiques, numériques, radioélectriques et satellites.

Le Chapitre 3 – *Systèmes de commutation numériques*, traite des technologies de commutation de circuits et par paquets, ainsi que de l'organisation des systèmes de commutation SPC.

Le Chapitre 4 – *Nouveaux systèmes de signalisation et Système de signalisation N° 7*, donne les spécifications nécessaires pour les nouveaux réseaux numériques.

Le Chapitre 5 – *Techniques et méthodes de synchronisation*, explique comment la synchronisation est mise en œuvre dans les nouveaux réseaux numériques.

Le Chapitre 6 – *Systèmes de transmission numérique*, traite des techniques PDH, SDH, MRL et xDSL, en relation avec les normes les plus importantes, avec des exemples de mise en œuvre.

Le Chapitre 7 – *Technologie ATM et Système de signalisation N° 7*, traite du transport, de la commutation et du format des cellules en technologie ATM, ainsi que de l'exploitation, de la maintenance, de la signalisation et de la gestion du trafic dans les réseaux ATM.

Fascicule 2 – Réseaux et services numériques

Le Fascicule 2 se compose de huit chapitres, avec des annexes et des études de cas:

- 1 Introduction
- 2 Réseaux et services numériques
- 3 Réseaux cellulaires et services mobiles numériques
- 4 Réseaux d'accès
- 5 Gestion des réseaux et des services
- 6 Aspects de planification
- 7 Aspects relatifs aux ressources humaines
- 8 Aspects financiers et économiques

Les *Chapitres 2, 3 et 4* portent sur différents sujets (technologies et structure de réseau, services correspondants), l'accent étant mis sur les principales caractéristiques et les besoins en matière de nouvelles architectures et d'interfonctionnement. Le Chapitre 2 se compose de dix sections consacrées à des réseaux fixes particuliers, par exemple: RTPC, RNIS, réseaux intelligents, réseaux à commutation par paquets, relais de trame, réseaux type ATM, services et normes de l'UIT-T applicables à des sujets connexes. L'Annexe 2A décrit le développement des télécommunications chinoises.

Le *Chapitre 5* traite de la gestion des services et des réseaux à la suite de la mise en œuvre du RGT.

Le *Chapitre 6* expose les lignes directrices de la planification des réseaux, avec des exemples donnés dans des annexes.

Le *Chapitre 7* se rapporte à la gestion des ressources humaines dans la perspective de la mise en œuvre des nouvelles technologies et des nouveaux services.

Enfin, le *Chapitre 8* a trait aux aspects financiers et économiques du développement des nouveaux réseaux et des nouveaux services.

Fascicule 3 – Réseaux et services numériques basés sur le protocole IP

Le Fascicule 3 a la composition suivante:

- 1 Introduction et définitions
- 2 Communications Internet
- 3 Protocole Internet (IP)
- 4 E-Commerce
- 5 Services Internet de base

Le *Chapitre 2* décrit l'augmentation spectaculaire du nombre des utilisateurs de l'Internet, des nouveaux services et des réseaux mettant en œuvre le protocole IP. On trouvera dans ce chapitre les définitions de base concernant le courrier électronique, le réseau WWW, l'Arpanet et les hyperliens.

Le *Chapitre 3* traite des caractéristiques du protocole IP de l'Internet, de la structure des paquets IP, des adresses IP, des systèmes «Voice over IP», Ipv4 et Ipv6.

Dans le *Chapitre 4*, on trouvera des explications sur le e-commerce, nouveau service de données concrétisant la future économie mondiale de l'information.

Le *Chapitre 5* traite de la nouvelle architecture IP des applications des services TeleINternet, en liaison avec les publications de l'UIT.

Le Fascicule 3 représente une première approche du sujet. Des révisions et des développements seront nécessaires.

Fascicule 4 – Réseaux et service de radiodiffusion sonore et de télévision

Ce fascicule se compose de cinq chapitres:

- 1 Introduction
- 2 Radiodiffusion audio numérique
- 3 Services de radiodiffusion télévisuelle numérique
- 4 Stratégies concernant la radiodiffusion télévisuelle numérique
- 5 Radiodiffusion de données

Le *Chapitre 1* est une introduction générale aux questions relatives aux réseaux et services de radiodiffusion sonore de télévision.

Le *Chapitre 2* résume les avantages de la radiodiffusion audionumérique; il donne un aperçu des différents services et systèmes audionumériques. Le principal sujet traité est celui du système de radiodiffusion audionumérique de Terre (T-DSB).

Dans le *Chapitre 3* on trouve l'exposé des avantages de la transmission télévisuelle numérique (télévision à définition normale et télévision à haute définition). Ce chapitre traite des sujets suivants: structure d'un système de télévision numérique, radiodiffusion numérique par satellite, radiodiffusion numérique de Terre, planification, normes, réseaux et services.

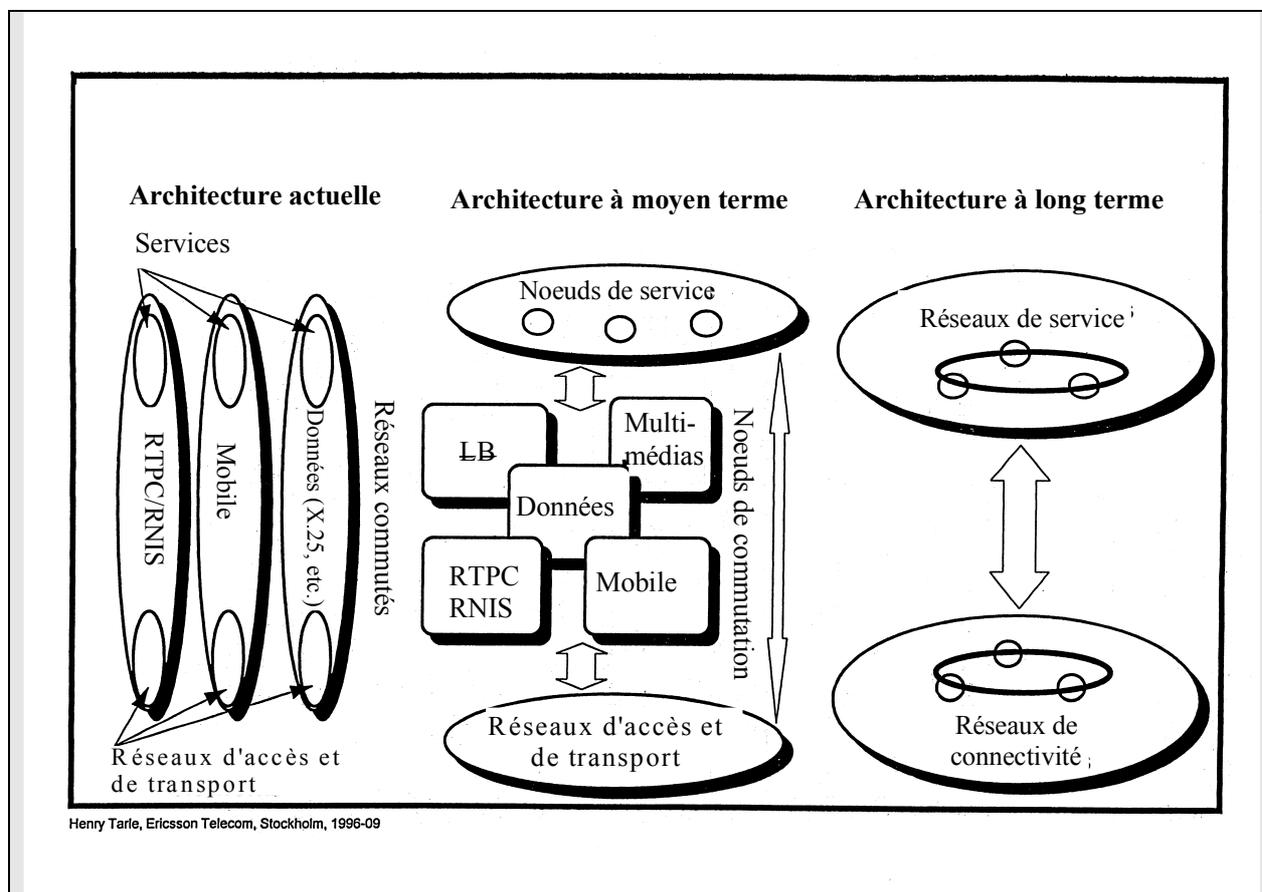
Le *Chapitre 4* porte sur les stratégies appliquées dans le domaine de la télévision numérique, l'accent étant mis sur la nécessité de passer des systèmes analogiques aux systèmes numériques. Ce chapitre spécifie des critères de planification pour différents systèmes, réseaux et services.

Le *Chapitre 5* «Radiodiffusion de données» analyse un nouveau domaine de développement pour les radiodiffuseurs, dans un environnement concurrentiel. On y définit les services de radiodiffusion de données et on donne des spécifications pour les systèmes correspondants. Ce chapitre contient une étude détaillée de la radiodiffusion de données sur les systèmes de Terre, avec utilisation des moyens suivants: radiocommunications à large bande, système de distribution multipoint multicanal, RNIS, distribution de télévision par câble, à quoi s'ajoutent quelques exemples de radiodiffusion en multimédia.

Mode d'emploi du manuel

Pour pouvoir utiliser le Manuel, il faut comprendre les changements qui interviennent dans la gestion des télécommunications. Le succès de cette gestion dépend de trois catégories, qui sont de la plus grande importance:

Figure – Evolution des réseaux et des services de télécommunication de l'intégration verticale vers l'intégration horizontale



Comment lire le Manuel?

Les tableaux qui suivent faciliteront la lecture du Manuel pour différents groupes de lecteurs.

Figure – Pour les cadres des organismes d'exploitation et de régulation des télécommunications

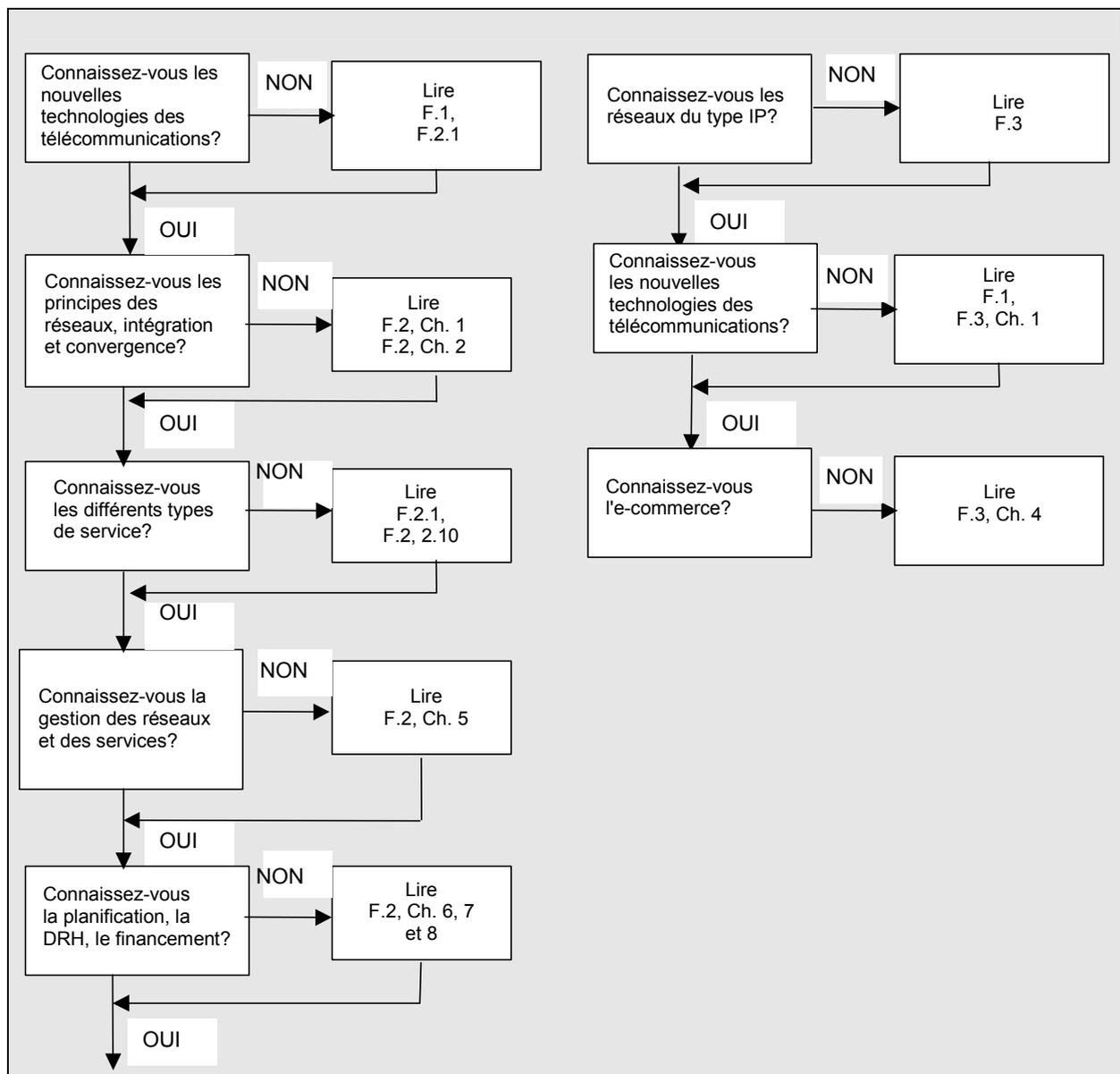


Figure – Pour les cadres et le personnel d'exploitation de la radiodiffusion

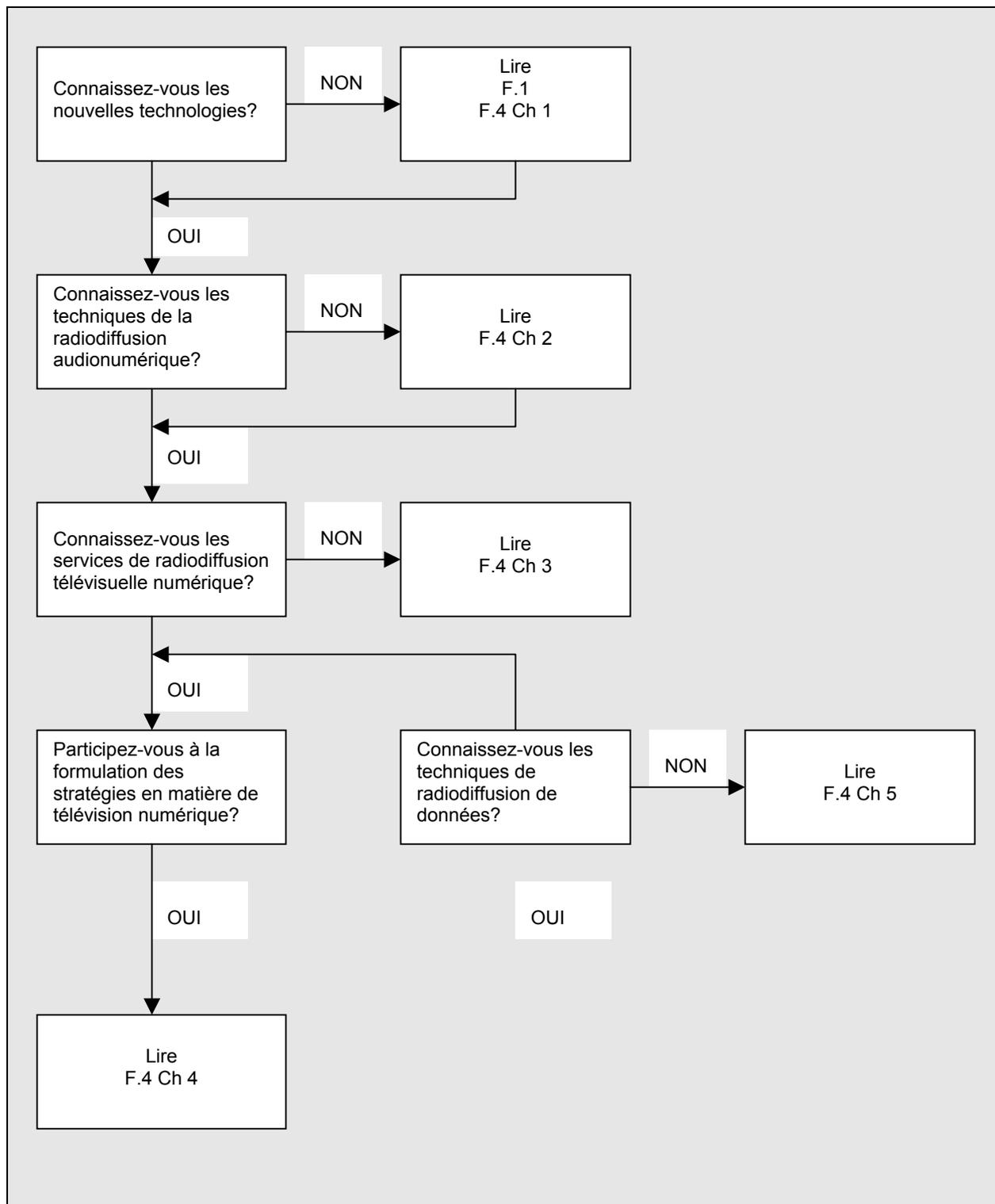
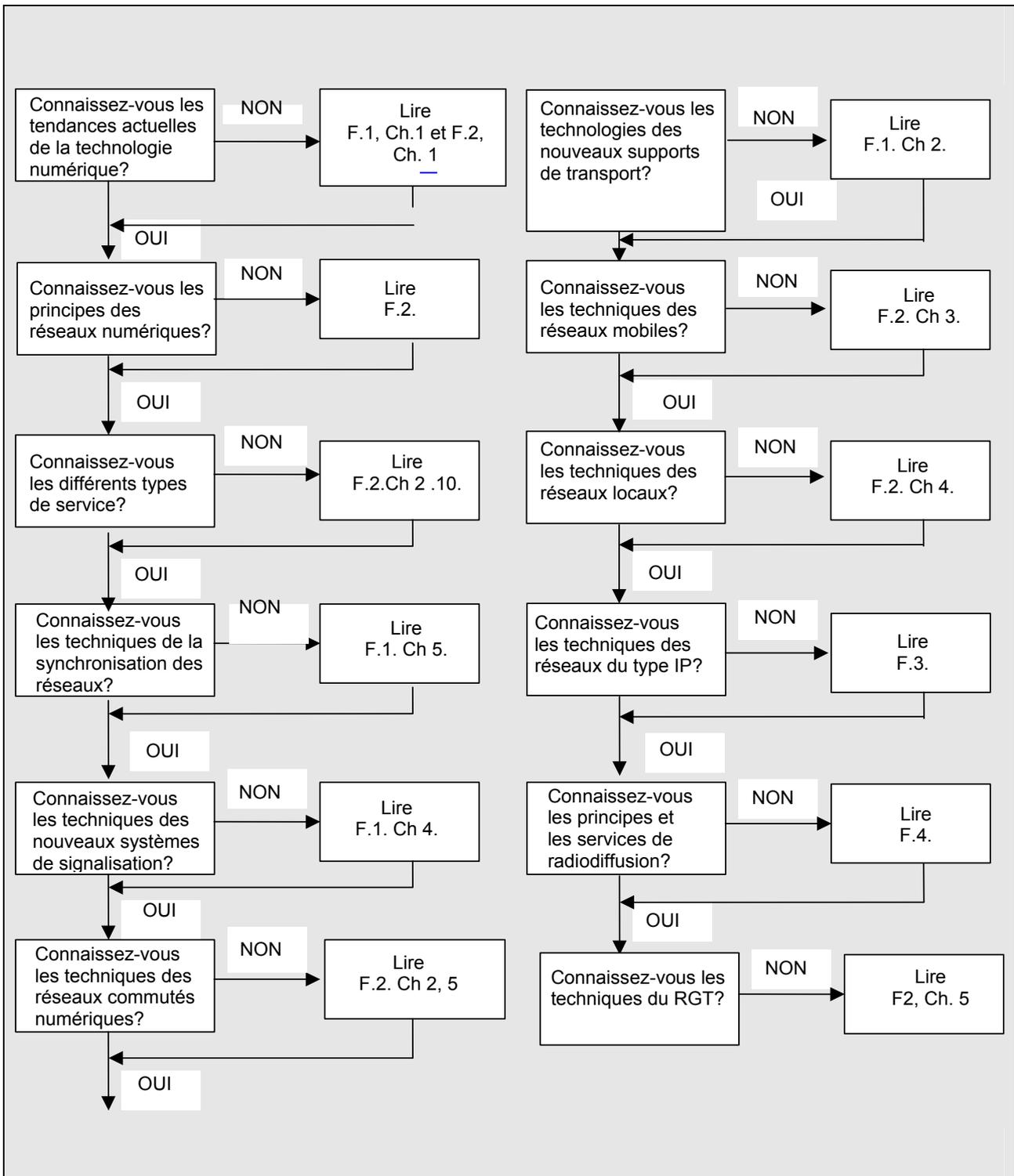


Figure – Pour les planificateurs et les cadres techniques



CHAPITRE 1

Introduction

1.1 Observations générales

Les communications téléphoniques et de données font actuellement l'objet d'une très large demande, qui ouvre des perspectives extrêmement intéressantes aux opérateurs du secteur des télécommunications. La demande en matière de services à large bande, d'accès à l'Internet (nécessitant une transmission de données à grand débit), de vidéo à la demande, etc., appelle une augmentation importante des capacités dans les réseaux, obligeant les opérateurs des réseaux fixes et des réseaux mobiles à perfectionner leurs infrastructures pour répondre à cette demande dans les meilleurs délais. Par ailleurs, les opérateurs des réseaux cellulaires et des réseaux à boucles locales hertziennes ont besoin de lignes de transmission rentables pour les connexions entre leurs stations de base. Une infrastructure performante, avec des supports de transmission adéquats, est la condition à satisfaire pour que les opérateurs puissent s'adapter aux nouvelles évolutions qui se dessinent dans les réseaux et les services. Dans de nombreux cas, l'infrastructure des télécommunications associe des technologies différentes qui concourent à la réalisation de réseaux physiques et de réseaux logiques.

La fibre optique est reconnue comme le support de transmission le plus performant, ce qui explique qu'elle soit utilisée depuis bien des années. Elle est à la base de la mise en œuvre d'une nouvelle hiérarchie numérique, par exemple la hiérarchie numérique synchrone (SHD, *synchronous digital hierarchy*). On prévoit que la demande mondiale de câbles à fibres optiques va croître annuellement de 15 à 20% au cours des prochaines années. Trente-six millions de kilomètres de fibres ont été posés en 1997. A l'origine, les fibres optiques ont été installées dans des réseaux à grande distance, mais aujourd'hui le marché des câbles optiques pour l'exploitation locale, téléphonie, télévision par câble et communications de données, ne cesse de croître à un rythme de plus en plus rapide. L'installation de ces câbles se fait par enfouissement (pose directe dans des conduites souterraines) ou sur des poteaux. Les progrès accomplis récemment dans le domaine du multiplexage par répartition en longueur d'onde (MRL) montrent qu'il y a intérêt à utiliser des fibres optiques sur de longues périodes et qu'il est possible d'exploiter de façon plus intensive les réseaux existants à fibres optiques. Les nouvelles techniques, telles que les amplificateurs optiques et le multiplexage par répartition en longueur d'onde à forte densité (DWDM, *dense wave length division multiplexing*), ont permis d'abaisser très sensiblement le coût des infrastructures des réseaux.

Grâce aux nouveaux dispositifs optoélectroniques, étudiés dans le présent fascicule, il sera possible de réaliser des réseaux optiques à grande capacité de trafic, qui fonctionneront à des débits binaires très élevés (de plusieurs centaines de Gbits/s jusqu'aux téra-bit/s).

Des progrès importants ont aussi été accomplis dans le domaine des technologies radioélectriques, notamment en matière de satellites et de techniques cellulaires. Il en a résulté des changements spectaculaires dans le développement des télécommunications, l'accès universel et la mobilité des usagers. Afin de faciliter la mise en œuvre de ces technologies des télécommunications, l'UIT a fait paraître un certain nombre de publications qui traitent en détail de ces questions. C'est le cas du présent fascicule, qui fait partie du Manuel intitulé «Nouvelles technologies et nouveaux services».

1.2 Structure du Fascicule 1

Le Fascicule 1 se compose de sept chapitres, la présente introduction constituant le Chapitre 1.

Chaque chapitre forme un tout (hormis le Chapitre 2, dont chaque section forme un tout), ce qui simplifiera la mise à jour du texte.

Le **Chapitre 2**, *Nouvelles technologies des supports de transport*, comporte quatre sections: Câbles à fibres optiques, Technologies numériques dans les systèmes de faisceaux hertziens, Systèmes de communication mobiles et Systèmes à satellites.

La première section, *Fibres optiques*, présente les considérations les plus importantes concernant la mise en œuvre des fibres optiques. Elle traite des propriétés de transmission (par exemple, affaiblissement, dispersion chromatique et polarisation), des types de fibre, de la mise en œuvre des fibres optiques et de la protection des anneaux en fibres optiques.

La deuxième section, *Faisceaux hertziens*, décrit l'évolution des technologies numériques dans le domaine des hyperfréquences, ainsi que l'évolution des systèmes radioélectriques à accès multiple et celle des réseaux numériques.

La troisième section, *Systèmes de communication mobiles*, porte sur les attributions de fréquences du spectre, les actuels systèmes cellulaires analogiques et les divers systèmes cellulaires numériques. On y trouve aussi des développements sur la téléphonie hertzienne et sur l'utilisation des systèmes à satellites. La question des systèmes mobiles de troisième génération est traitée principalement dans le Fascicule 2.

La quatrième et dernière section, *Systèmes à satellites*, est consacrée aux technologies des satellites, considérées comme un cas particulier de la technologie des radiocommunications. Les systèmes à satellites sont semblables aux systèmes radioélectriques. La seule différence étant que la station de liaison intermédiaire est placée sur une orbite. Les satellites servant aux télécommunications sont placés sur l'orbite géostationnaire ou sur des orbites terrestres moyennes ou basses. Les systèmes mobiles mondiaux de communications personnelles par satellite (GMPCS, *global mobile personal communications systems*) vont à la conquête d'un nouveau marché, non encore exploité par les systèmes mobiles classiques par satellites, qui sont des systèmes coûteux. Cette section traite également des nouvelles techniques appliquées dans les communications par satellite, par exemple, VSAT, AMAD, AMRT, EMCN. Les annexes donnent des exemples de systèmes mondiaux à satellites, tels que Globstar, ICO, SkyBridge, Teledesic et Final Analysis.

Le **Chapitre 3**, *Systèmes de commutation numériques*, a trait aux technologies de commutation de circuits et par paquets, et à l'organisation des systèmes de commutation SPC. La technologie SPC a permis de réaliser des points nodaux ayant une vaste fonctionnalité pour la prise en charge de services différents. Ces propriétés, appelées «intelligence de réseau», sont étudiées dans une section de ce chapitre, à côté de procédures nouvelles telles que le mode de transport ATM et la commutation optique.

Le **Chapitre 4**, *Nouveaux systèmes de signalisation et Système de signalisation N° 7*, se compose de quatre sections. L'introduction souligne l'importance de ces nouveaux systèmes pour l'évolution des réseaux et pour les nouveaux services.

Le Système de signalisation N° 7 fait l'objet de la Section 2, avec des développements sur le sous-système transport de messages (SSTM), le sous-système commande des connexions sémaphores (SSCS), les gestionnaires de transactions (GT), le sous-système utilisateur pour le RNIS (SSUR) et le sous-système application de réseau intelligent (INAP, *intelligent network application part*).

La Section 3 traite du Système de signalisation d'abonné numérique N° 1 (DSS1).

La Section 4 contient une évaluation de la signalisation à large bande, avec des explications sur l'interface usager-réseau (UNI), le sous-système utilisateur pour le RNIS à large bande (RNIS-LB), le système de signalisation numérique N° 2 (DSS2) et les Recommandations pertinentes de l'UIT-T. Les annexes à cette section traitent des autres protocoles de signalisation ATM, du système DSS2 et des spécifications de signalisation UNI du Forum ATM.

Le **Chapitre 5** porte sur les *Techniques et méthodes de synchronisation*. Les diverses sections de ce chapitre traitent respectivement de la synchronisation des systèmes de transmission, des boucles à verrouillage de phase, de la correction du rythme, de la synchronisation des réseaux et de la synchronisation en mode ATM.

Le **Chapitre 6** est consacré à la technologie de la transmission: *PDH*, *SDH*, *DWDM* et *xDSL*. On y trouvera une introduction à la hiérarchie numérique synchrone (SDH), avec des explications sur la structure des trames SDH, le système de multiplexage et la gestion de la hiérarchie SDH. Le DWDM est une technologie nouvelle qui permet d'obtenir des débits de transmission élevés sur fibres, avec possibilité d'accroître la capacité sans avoir à poser de nouveaux câbles. Le Chapitre 6 décrit également une nouvelle technologie de transmission capable de valoriser les conducteurs cuivre, par utilisation des techniques de transmission sur ligne d'abonné numérique (DSL, *digital subscriber line*). Plusieurs technologies nouvelles, baptisées xDSL, permettent de renouveler les modalités d'utilisation des réseaux locaux existants, pour la mise en œuvre de services à débit binaire accru.

Le **Chapitre 7** porte sur la *technologie ATM*. Il traite en détail de la structure des trames ATM, du multiplexage, des protocoles et de la gestion du trafic.

Les références qui accompagnent les chapitres devraient permettre au lecteur d'obtenir des compléments d'information sur les sujets traités.

La mention de telles ou telles compagnies ou de tels ou tels produits dans ce fascicule ne doit pas être interprétée comme une homologation ou une recommandation de l'UIT.

CHAPITRE 2

Nouvelles technologies des supports de transport (fibres optiques, supports hertziens, satellite)

2.1 Fibres optiques

2.1.1 Propriétés de transmission

Une fibre optique typique comporte une partie cylindrique centrale, le cœur, dans laquelle la lumière circule normalement, entourée d'une gaine optique qui a pour fonction de guider la lumière à l'intérieur du cœur, c'est-à-dire d'y maintenir le plus d'énergie optique possible. Ces deux éléments, le cœur et la gaine, sont formés généralement de silice dopée ultra pure. Pour leur protection mécanique, ils sont recouverts d'un revêtement primaire concentrique constitué par une matière plastique qui a un rôle très important: assurer un comportement stable et fiable de la fibre. Ce revêtement porte en général un marquage, en l'occurrence un code de couleurs pour l'identification des fibres.

Les publications suivantes contiennent les définitions de ces caractéristiques, et d'autres caractéristiques, ainsi que la description des méthodes qui permettent de les mesurer:

- Recommandation UIT-T G.650:** Définition des paramètres des fibres monomodes et méthodes de test associées.
- Recommandation UIT-T G.651:** Caractéristiques d'un câble à fibres optiques multimodes à gradient d'indice (50/125 μm).
- CEI, Publication 61931:** Fibres optiques-Terminologie.
- CEI, Publication 60793-1:** Fibres optiques – Partie 1: Spécification générique.
- CEI, Publication 60794-1:** Câbles à fibres optiques – Partie 1: Spécification générique.

Pour les fibres monomodes, les seules utilisées en télécommunication (les fibres multimodes interviennent uniquement dans les réseaux locaux et dans les systèmes à courte distance), les principales caractéristiques de transmission sont l'affaiblissement, la dispersion chromatique, la longueur d'onde de coupure et la dispersion modale de polarisation.

Les valeurs numériques de ces caractéristiques sont données dans des normes et des recommandations internationales; elles sont le résultat d'un consensus conclu par les différents membres dans le processus d'élaboration des normes. Dans ces conditions, et compte tenu également de l'évolution technique, il est possible que des valeurs différentes soient données à certains paramètres pour les meilleurs produits présents sur le marché.

Plusieurs caractéristiques des fibres, en particulier les caractéristiques de transmission, peuvent être influencées par le câblage et/ou par les conditions d'installation. Pour la conception d'un système de transmission, il est essentiel de considérer exclusivement les caractéristiques des fibres de câbles installés. En conséquence, les valeurs données ci-après s'entendent de fibres en câble.

2.1.1.1 Affaiblissement

L'affaiblissement se définit comme suit:

- 1 Diminution de l'énergie électromagnétique entre deux points.
- 2 L'expression quantitative de la diminution de l'énergie peut se mettre sous la forme suivante: rapport des valeurs, en deux points, d'une grandeur liée à l'énergie d'une manière bien définie.

L'affaiblissement est certainement un des paramètres les plus importants pour une fibre optique, car c'est le facteur qui limite le plus souvent la distance de transmission maximale pour une liaison optique. Ce

paramètre est donné généralement sous la forme d'un coefficient d'affaiblissement ou affaiblissement linéique (affaiblissement par unité de longueur), et mesuré généralement autour de longueurs d'onde spécifiques: 1 310 et 1 550 nm pour les fibres monomodes courantes. Au cours des dix à quinze dernières années, la valeur du coefficient d'affaiblissement n'a cessé de diminuer en raison des évolutions techniques, pour atteindre actuellement une valeur très proche du minimum théorique.

Pour les fibres en câble, les valeurs maximales du coefficient d'affaiblissement sont actuellement de 0,5 dB/km (1 310 nm) et de 0,4 dB/km (1 550 nm). On trouve dans le commerce des fibres dont le coefficient est compris entre 0,38 et 0,40 dB/km à 1 310 nm, avec une valeur d'environ 0,25 dB/km à 1 550 nm.

2.1.1.2 Dispersion chromatique

Définition de la dispersion chromatique:

Dispersion d'une impulsion lumineuse par unité de largeur spectrale de la source dans une fibre optique, causée par la différence des vitesses de propagation de groupe des diverses longueurs d'onde qui constituent le spectre de la source.

NOTE – La dispersion chromatique peut être due aux causes suivantes: dispersion par le matériau, dispersion du guide d'ondes, dispersion du profil.

Ce phénomène peut aussi limiter la distance maximale pour une liaison optique, surtout pour les débits binaires élevés, qui sont de plus en plus utilisés. Dans le cas des fibres monomodes de base, l'affaiblissement minimum est obtenu dans la fenêtre de 1 550 nm et la dispersion chromatique minimum se produit dans la fenêtre de 1 310 nm. Pour tenter de résoudre ce problème, on a proposé de nouveaux types de fibres qui associent affaiblissement minimum et dispersion chromatique réduite. Voir le chapitre suivant.

La valeur spécifiée pour les fibres G.652/B1.1 est actuellement: $S_{0\max}$ (ps/nm².km) \leq 0,093.

2.1.1.3 Longueur d'onde de coupure

Définition de la longueur d'onde de coupure:

Longueur d'onde à laquelle le rapport de la puissance totale, y compris les modes d'ordre supérieur d'injection, à la puissance du mode fondamental décroît à une valeur inférieure à la valeur spécifiée, les modes étant essentiellement excités de manière uniforme.

NOTE 1 – Cette valeur spécifiée est choisie actuellement égale à 0,1 dB.

NOTE 2 – La longueur d'onde de coupure dépend des conditions de mesure et, en particulier, de la longueur, de la courbure et du câblage de l'échantillon.

NOTE 3 – La longueur d'onde de coupure diffère généralement de la longueur d'onde de coupure théorique qui peut être calculée à partir du profil de l'indice de réfraction de la fibre. La longueur d'onde de coupure théorique est un paramètre moins utile pour la détermination des caractéristiques de fonctionnement des fibres dans un réseau de télécommunication.

Ce paramètre conditionne le comportement monomode de la fibre. D'après la deuxième note ci-dessus, on peut comprendre que cette longueur d'onde est influencée par l'opération de câblage et, éventuellement, par les conditions d'installation. Il faut par conséquent connaître les conditions de mise en œuvre d'une fibre pour pouvoir évaluer sa longueur d'onde de coupure, laquelle doit être inférieure à la longueur d'onde de fonctionnement du système. La note suivante de la Publication 60793-2 de la CEI donne des indications sur la manière de choisir la longueur d'onde de coupure:

En général, il n'y a pas de relation unique entre la longueur d'onde de coupure de la fibre λ et celle de la fibre câblée λ_c . La valeur nécessaire de λ_c pour toute application à un système particulier dépend de la fibre, du câble et de la configuration du système (y compris le débit binaire et la longueur d'onde de fonctionnement du système) ainsi que des longueurs et rayons de courbure prévus des câbles de réparation. Cependant, il est possible de déterminer une relation générale entre λ et λ_c pour des conceptions particulières de câbles à fibres. La valeur prescrite pour λ_c est encore à l'étude et sera indiquée dans la spécification de produit sur les câbles optiques (CEI 60794-2).

Pour certaines applications, certains utilisateurs ont préféré établir des limites de λ au-dessous de la longueur d'onde de fonctionnement envisagée. Dans de tels cas, des valeurs typiques dans la plage de 1 100 à 1 280 nm ont été adoptées. Pour d'autres applications, certains utilisateurs ont choisi de permettre que la valeur λ aille jusqu'à 1 350 nm, comptant sur les effets de la fabrication et de l'installation du câble pour obtenir des valeurs inférieures à la plage de longueur d'onde de fonctionnement.

2.1.1.4 Dispersion modale de polarisation

Définition de la dispersion modale de polarisation (PMD: *polarization mode dispersion*):

Distorsion du signal transmis due aux variations des vitesses des composants de polarisation du même mode, en fonction de la longueur d'onde.

NOTE – La dispersion de polarisation est négligeables dans des fibres rectilignes à symétrie circulaire non soumises à des contraintes mécaniques.

On a découvert récemment que la PMD est un facteur de limitation potentiel pour les liaisons à grande distance exploitées avec des débits binaires très élevés. Du fait de la nature statistique de cette caractéristique, il est assez difficile de prévoir avec précision l'effet qu'elle produit sur l'ensemble d'une liaison. Les conséquences de la PMD sont particulièrement importantes dans le cas de la transmission à grande distance: dégradation possible de la qualité dans un système optique de grande longueur fonctionnant avec un débit binaire élevé (par exemple, transport à 10 Gbit/s sur 100 km). Pour cette raison, dans la conception d'un système de ce type, il est recommandé de prévoir l'utilisation de fibres à très faible PMD, pour prévenir tout risque de dégradation de qualité de l'ensemble de la liaison.

Les valeurs de PMD recommandées actuellement pour les fibres en câble sont $\leq 0,5 \text{ ps.km}^{-1/2}$. On trouve sur le marché des fibres avec $\text{PMD} \leq 0,2 \text{ ps.km}^{-1/2}$, ou moins.

2.1.2 Types de fibres

Pour les télécommunications à grande distance, on utilise exclusivement des fibres monomodes, en raison de leurs caractéristiques favorables: plus petit affaiblissement et plus grand pouvoir de transmission, mais il existe plusieurs types de fibres monomodes, correspondant à des applications différentes. Leur description est donnée dans les Recommandations suivantes de l'UIT-T:

- G.652 Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes
- G.653 Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes à dispersion décalée
- G.654 Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes avec affaiblissement réduit au minimum à la longueur d'onde de 1 550 nm
- G.655 Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes à dispersion décalée non nulle

La CEI spécifie les fibres sur la base des caractéristiques suivantes:

- B1.1 Dispersion non décalée pour fonctionnement à 1 310 nm
- B1.2 Affaiblissement minimalisé pour fonctionnement à 1 550 nm
- B2 Dispersion décalée pour fonctionnement à 1 550 nm
- B3 Dispersion aplaniée pour fonctionnement à 1 310 nm et 1 550 nm
- B4 Dispersion non nulle pour fonctionnement à 1 550 nm

Les caractéristiques de ces différentes catégories de fibres sont spécifiées dans la Publication 60793-2 de la CEI: *Fibres optiques – Partie 2: Spécifications de produits*.

Le produit le plus répandu, en termes de quantités installées depuis la mise en œuvre de la technologie des fibres monomodes, est la fibre B1.1, qui correspond à la Recommandation G.652. C'est actuellement la fibre qui possède la plus grande part de marché, la raison étant qu'elle donne, pour un coût optimum, une bonne qualité de fonctionnement dans la plupart des secteurs des télécommunications.

Avec les fibres monomodes de la catégorie B1.1, l'affaiblissement minimum est obtenu dans la fenêtre de 1 550 nm et la dispersion chromatique minimum se produit dans la fenêtre de 1 310 nm. Il est donc impossible d'obtenir un comportement optimum à la fois pour l'affaiblissement et la dispersion. Les fibres à dispersion décalée (DSF, *dispersion shifted fibres*, catégorie B2 selon la terminologie de la Recommandation UIT-T G.653) ont été mises au point pour répondre à la nécessité d'une optimisation simultanée. Toutefois, du fait de leur prix plus élevé, conséquence de leur structure plus complexe, on les réserve à des applications pour lesquelles cette caractéristique supplémentaire est indispensable, par exemple les liaisons en câbles sous-marins.

Les fibres à affaiblissement réduit au minimum (catégorie B1.2, correspondant à la Recommandation G.654) ont été utilisées sur quelques liaisons de très grande longueur, où la limitation de l'affaiblissement était une condition essentielle.

Plus récemment, on s'est aperçu que, dans le multiplexage par répartition en longueur d'onde (MRL), un paramètre important est la stabilité de la dispersion chromatique pour les différentes longueurs d'onde utilisées. C'est ce qui a conduit à la création d'une nouvelle catégorie de fibres (catégorie B4, correspondant à la Recommandation UIT-T G.655) appelée fibre à dispersion non nulle (NZDSF: *non-zero dispersion fibre*). Une fibre NZDSF donne une dispersion chromatique plus grande qu'une fibre DSF à 1 550 nm, mais la courbe de la dispersion en fonction de la fréquence a une pente moins raide, ce qui est favorable au fonctionnement en multiplexage MRL.

L'UIT et la CEI ont commencé à normaliser cette nouvelle catégorie de fibres, suite aux décisions d'installation prises dans quelques pays; un certain nombre de valeurs normalisées ont été adoptées et rendues publiques. Toutefois, ces valeurs ne donnent qu'une définition très générale, elles sont insuffisantes pour définir avec précision un produit normalisé. Plusieurs produits différents, correspondant à des interprétations diverses de la catégorie, peuvent être inclus dans la norme existante. Il n'a pas été possible, jusqu'à présent, de spécifier un ensemble de valeurs agréé qui permettrait de spécifier une véritable catégorie uniforme normalisée.

La Publication 60794-2 de la CEI, la plus récente pour la définition des caractéristiques des fibres, indique que toutes les fibres monomodes possèdent plusieurs caractéristiques de base communes, telles que les suivantes:

diamètre de la gaine:	125 ± 2 µm
diamètre du revêtement primaire:	245 ± 10 µm (non coloré) 250 ± 15 µm (coloré)

On trouve actuellement des gaines ayant un diamètre de 125 ± 1 µm, ce qui présente des avantages pour les raccordements.

En revanche, plusieurs autres caractéristiques diffèrent d'une catégorie à une autre. Par exemple, le diamètre du champ de mode prend les valeurs suivantes:

8,6 à 9,5 µm à 1 310 nm pour B1.1

7,8 à 8,5 µm à 1 550 nm pour B2

6 µm à 1 310 nm et 7 µm à 1 550 nm pour B3

à l'étude pour B1.2 et B4.

Les paramètres de transmission tels que le coefficient d'affaiblissement et la dispersion diffèrent évidemment d'une catégorie à une autre. Les catégories B1, B2 et B3 sont définies plus ou moins complètement et B4 est encore à l'étude pour la plupart de ses paramètres.

2.1.3 Mise en œuvre des fibres optiques

En règle générale, les fibres optiques ne sont pas utilisées individuellement, elles sont placées dans un câble. Ce câble a pour fonction de protéger les fibres contre les attaques d'ordre mécanique et environnemental, mais les opérations de câblage et d'installation peuvent détériorer les caractéristiques des fibres si ces opérations ne sont pas effectuées selon les règles. Par ailleurs, une seule longueur peut ne pas être suffisante et l'on peut être amené à raccorder plusieurs longueurs, ce qui exige une analyse plus poussée des caractéristiques des fibres et des câbles.

L'UIT-T a déjà publié une série de Recommandations sur ce sujet. Les plus récentes sont les suivantes:

- [L.12] (07/92) – Epissurage des fibres optiques
- [L.13] (07/92) – Raccords d'enveloppe et modules d'agencement pour câbles à fibres optiques en installation extérieure
- [L.14] (07/92) – Méthode de mesure pour déterminer les caractéristiques sous contraintes des câbles à fibres optiques soumis à un effort de traction
- [L.15] (03/93) – Réseaux de distribution locaux optiques – Facteurs à prendre en considération pour leur construction
- [L.17] (06/95) – Raccordement d'un abonné au réseau téléphonique public commuté au moyen de fibres optiques
- [L.17, App.1] (02/97) – Raccordement d'un abonné au réseau téléphonique public commuté, Appendice 1: Exemples d'applications possibles
- [L.20] (10/96) – Création d'un code de sécurité incendie pour les installations de télécommunication
- [L.22] (10/96) – Protection incendie
- [L.23] (10/96) – Extinction des incendies – Classification et répartition des installations et des équipements d'extinction dans les locaux
- [L.25] (10/96) – Maintenance des réseaux en câbles à fibres optiques
- [L.26] (10/96) – Câbles à fibres optiques pour installations aériennes
- [L.27] (10/96) – Méthode d'estimation de la concentration en hydrogène dans les câbles à fibres optiques
- [L.28] (10/96) – Protection externe additionnelle pour câbles terrestres adaptés au milieu marin
- [L.29] (10/96) – Rapport de pose et journal de maintenance et de réparation pour les installations de câbles terrestres adaptés au milieu marin
- [L.30] (10/96) – Marqueurs sur câbles terrestres adaptés au milieu marin
- [L.34] (10/98) – Installation des câbles hybrides terre-optique (OPGW)
- [L.35] (10/98) – Installation de câbles à fibres optiques dans le réseau d'accès

2.1.3.1 Protection des fibres

Le premier niveau de protection est fourni par le revêtement primaire.

Le choix de ce revêtement est d'importance capitale pour la fiabilité de la fibre. Un revêtement primaire de bonne qualité protégera la fibre contre les effets des contraintes mécaniques, l'abrasion, etc., et contre les effets d'origine environnementale et chimique, par exemple l'humidité. Le revêtement ne doit pas créer de microcourbature (ce qui peut se produire s'il n'est pas appliqué concentriquement aux éléments en silice); il doit faciliter la manipulation de la fibre et doit pouvoir être éliminé aisément (pour l'exécution des épissures).

Par ailleurs, le revêtement primaire fournit également un moyen d'identification sous la forme d'un code de couleurs. Il doit être adapté à cette fonction et la fibre colorée doit posséder les mêmes caractéristiques qu'une fibre non colorée. La compatibilité entre le revêtement primaire et les couleurs utilisées doit être prouvée après la production et aussi pendant toute la durée de vie utile de la fibre. L'identification par les couleurs doit aussi être stable, et il doit y avoir compatibilité avec tous les matériaux constitutifs du câble.

Toutes ces exigences montrent qu'il faut une technologie de pointe pour développer et mettre en œuvre un revêtement primaire de bonne qualité.

Il n'est pas possible, dans la pratique, de mettre les fibres à l'abri des contraintes mécaniques en permanence pendant toute leur durée de vie utile. On peut leur appliquer certaines contraintes, soit de façon continue, soit pendant une courte période. Il faut par conséquent analyser cette situation et évaluer les effets ainsi produits sur les fibres.

Quand on applique à la fibre une contrainte supérieure à un certain niveau qui est fonction de la structure du câble, un effet évident est une dégradation des caractéristiques de transmission, en particulier une dégradation du coefficient d'affaiblissement. Cela apparaît immédiatement lorsqu'on soumet le câble à des essais appropriés.

On peut citer une autre conséquence, qui est aussi très importante même si elle n'est pas décelable immédiatement: c'est une diminution de la durée de vie nominale de la fibre, lorsqu'on applique à celle-ci une contrainte supérieure à une certaine valeur, comme expliqué plus haut. Cet effet demande à être étudié avec une grande attention, parce que le résultat n'est pas mesurable directement.

Pour savoir si une fibre est capable de supporter des contraintes mécaniques, il faut connaître les paramètres de résistance à la corrosion sous contrainte. La Publication 60793-1-3 de la CEI donne les définitions et les méthodes de mesure des paramètres statique et dynamique (respectivement n_s et n_d) utilisés dans la pratique. La durée de vie d'une fibre dans les conditions d'exploitation est liée à la valeur de n_s et de n_d de la fibre: pour des conditions données, la durée de vie nominale augmente en même temps que n_s et n_d .

Le câble a pour fonction de réduire le transfert des contraintes à la fibre sous l'effet des conditions ambiantes pendant la durée de vie utile du système, mais la règle indiquée ci-dessus à propos des valeurs des paramètres n reste valable: cette règle signifie que, pour une contrainte externe donnée, si des câbles de structure différente transfèrent différemment la contrainte à la fibre, moins ils transfèrent, mieux cela vaut. En revanche, pour un niveau donné de contrainte s'exerçant sur la fibre, toute augmentation de la valeur de n a pour effet d'allonger la durée de vie de la fibre.

Pour $n_s \geq 20$ et $n_d \geq 25$ – valeurs réalisées actuellement avec de nombreux produits – on peut obtenir, dans les conditions normales et sur la base de calculs théoriques couramment acceptés, une durée de vie minimum satisfaisante. Avec des valeurs plus élevées, on obtient une durée de vie nominale plus longue.

Le second niveau de protection est assuré par le câble lui-même. Les caractéristiques des câbles optiques et les méthodes à appliquer pour mesurer ces caractéristiques sont décrites dans la Publication 60794-1 de la CEI: Câbles à fibres optiques – Partie 1: Spécification générique.

En particulier, la question de la durée de vie, évoquée ci-dessus, est en relation avec l'absence de microcourbure de la fibre, qui peut être caractérisée par un essai thermique cyclique (voir la Publication 60794-1-2 de la CEI).

Il faut aussi évaluer le comportement du câble en présence de contraintes telles que la traction, l'écrasement, les chocs, la courbure, la torsion, en fonction des exigences de l'exploitation. Le texte de référence est le même que ci-dessus (Publication 60794-1-2 de la CEI).

2.1.3.2 Méthodes d'installation

Il est important de maintenir inchangées les caractéristiques des câbles à fibres optiques, en ayant recours à des méthodes d'installation appropriées.

Des informations utiles sur ce sujet sont données dans l'Annexe C (informatif) de la Publication 60794-1-1 de la CEI. L'introduction de ce document résume comme suit les points les plus importants:

Les câbles à fibres optiques sont conçus de façon à pouvoir utiliser, dans la mesure du possible, des pratiques et des matériels d'installation classiques. Ils présentent, cependant, une limite de contrainte quelque peu inférieure à celle des câbles à conducteurs métalliques et, dans certaines circonstances, des précautions et des dispositions spéciales peuvent être nécessaires pour garantir une installation réussie.

Il est important de prêter une attention particulière aux recommandations du fabricant de câbles ainsi qu'aux limites physiques indiquées, et de ne pas dépasser la contrainte de traction assignée, indiquée pour un câble particulier. Les dommages provoqués par une surcharge au cours de l'installation sont susceptibles de ne pas être immédiatement apparents, mais peuvent engendrer une défaillance ultérieurement durant la durée de vie du câble.

2.1.3.3 Raccordement

Deux types de caractéristiques sont à prendre en considération pour le raccordement des câbles à fibres optiques: les caractéristiques de la fibre et celles de la structure du câble.

S'agissant de la fibre, les pertes dues au raccordement augmentent en même temps que les tolérances. En réduisant à $\pm 1 \mu\text{m}$ les tolérances sur le diamètre de la gaine (voir plus haut), on diminue ces pertes.

On obtient le même résultat en réduisant la tolérance sur le diamètre du champ de mode, $2 w_0$: la valeur spécifiée est $\pm 1 \mu\text{m}$, et il est possible de réaliser des valeurs de $\pm 0,5 \mu\text{m}$ ou moins.

La manipulation des fibres pour le raccordement est caractérisée par l'ondulation des fibres (voir la Publication 60793-1-3 de la CEI). Le rayon de l'ondulation, r , doit être aussi grand que possible; l'opinion générale est qu'un rayon minimum de 2 mètres est nécessaire. On trouve sur le marché des fibres dont le rayon d'ondulation est plus grand.

La structure du câble est aussi une caractéristique importante: modularité, facilité d'accès aux fibres (enlèvement de l'enveloppe ou du tube), identification des fibres dans la structure du câble (code de couleurs, stabilité des couleurs dans le temps).

En conclusion, il apparaît clairement que la mise en œuvre des fibres optiques est subordonnée à de nombreux paramètres. Quelques paramètres d'intérêt général ont été passés en revue, mais il importe aussi de connaître avec précision les conditions d'utilisation du réseau pendant son installation et tout au long de sa durée d'exploitation. Cela est nécessaire pour pouvoir choisir les conditions optimales de protection des fibres.

2.1.4 Protection des réseaux optiques

2.1.4.1 Introduction

La capacité de survie est sans doute un des facteurs les plus importants pour l'évaluation et la conception des réseaux de télécommunication à fibres optiques. Le problème se pose en cas d'accroissement du volume de trafic écoulé par la même infrastructure avec fibres et lorsque des centraux à capacité accrue sont susceptibles de desservir un plus grand nombre d'utilisateurs. La question de la capacité de survie a été rendue encore plus cruciale par l'évolution vers un réseau à deux couches MRL/SDH.

2.1.4.2 Capacité de survie du réseau

La capacité de survie d'un réseau est l'aptitude de ce réseau à récupérer le trafic en cas de défaillance d'un de ses éléments, par exemple la panne complète d'une liaison de transmission ou le dérangement d'un central. Le principal objectif de la capacité de survie d'un réseau est de garantir l'application d'un accord relatif à un certain niveau de trafic dans le service.

L'amélioration de la capacité de survie du trafic consiste à remplacer des entités de transport défaillantes ou dégradées. Le remplacement fait suite, en général, à la détection d'un défaut, à une baisse de qualité ou à une demande de gestion externe.

La caractéristique la plus importante des mécanismes de protection normalisés dans des Recommandations de l'UIT-T telles que G.841 et G.842 est la suivante: ces mécanismes sont capables de rétablir le trafic très rapidement, la plupart d'entre eux étant en mesure de protéger le trafic en moins de 50 ms. Par ailleurs, la protection fonctionne de façon autonome par rapport au centre d'exploitation du réseau, en utilisant une capacité préassignée entre les points nodaux. Dans l'architecture de protection la plus simple, on a une seule entité de protection spécialisée pour chaque entité d'exploitation (1 + 1). Dans l'architecture la plus complexe, on a m entités de protection utilisées en partage par n entités d'exploitation (m:n).

Les mécanismes de protection suivants ont été complètement définis dans les Recommandations de l'UIT-T:

2.1.4.2.1 SNC-P/I (Protection de connexion de sous-réseau avec supervision intrinsèque)

Ce mécanisme de protection se fonde sur l'architecture 1 + 1, ce qui signifie qu'on a besoin d'une connexion de sous-réseau de réserve pour protéger un sous-réseau en service. Le mécanisme est du type unidirectionnel, c'est-à-dire que chaque sens d'écoulement du trafic est protégé indépendamment. Les défaillances auxquelles le mécanisme SNC-P/I est capable de réagir en assurant la protection sont des défaillances graves: défaillances des équipements, des interfaces optiques et des liaisons. Les interruptions de courte durée, qui déclenchent le signal d'indication d'alarme d'une unité affluente (TU AIS) ou la coupure d'alimentation d'une unité affluente (TU LOP) déclenchent aussi la protection par SNC-P/I. Ce mécanisme peut être mis en œuvre conteneur virtuel après conteneur virtuel, ce qui permet à une installation de transmission donnée de transporter du trafic non protégé et du trafic protégé.

2.1.4.2.2 SNC-P/N (Protection de connexion de sous-réseau avec supervision non intrusive)

Ce mécanisme de protection diffère du précédent seulement du point de vue de la nature des défaillances pour lesquelles il est capable d'assurer la protection. SNC-P/N assure cette protection dans le cas des défaillances graves indiquées plus haut pour SNC-P/I mais aussi pour des défaillances telles que celles provoquées par les activités humaines ou par les erreurs de gestion ou de mise en œuvre du système en exploitation. Ces types de défaillances pourraient être dus à une erreur de connexion de matrice ou à une ouverture de connexions. Le mécanisme SNC-P/N protège aussi contre des défaillances temporaires dues à la dégradation des interfaces optiques ou à des erreurs survenant dans une liaison radioélectrique sur laquelle est dépassée la valeur seuil prédéterminée pour le TEB maximum acceptable.

2.1.4.2.3 Protection linéaire d'un chemin de section de multiplexage (MS)

Il s'agit ici d'un mécanisme de protection globale du trafic, capable d'assurer la protection en cas de coupure de fibres, de défaillances des interfaces optiques, et contre les dégradations de qualité des interfaces et des fibres optiques. Ce mécanisme de protection peut s'appliquer à de nombreux types d'architecture, 1 + 1 ou 1:N. La largeur de bande mise à la disposition de la protection peut être utilisée pour transporter du trafic non prioritaire quand tous les arcs en service fonctionnent sans défaillances. On peut aussi avoir recours à la protection linéaire d'un chemin de multiplexage pour protéger les arcs dans les réseaux du type linéaire ou en chaîne.

2.1.4.2.4 MS-SPRING (Anneau avec protection partagée de section de multiplexage)

MS-SPRING (*multiplex section shared protected ring*) est aussi un mécanisme de protection globale du trafic capable d'assurer la protection en cas de coupure de fibres, de défaillances des interfaces optiques, et contre les dégradations de qualité des interfaces et des fibres optiques. Pour pouvoir fonctionner, ce mécanisme a cependant besoin d'une topologie physique d'anneau de réseau. Un des principaux avantages de MS-SPRING par rapport aux autres mécanismes de protection est son aptitude à réutiliser la capacité

de largeur de bande. Cela en fait le mécanisme de protection le plus efficace lorsque le trafic est uniformément réparti.

On considère généralement que les MS-SPRING sont à leur place dans les parties du réseau où le trafic est uniformément réparti.

La Recommandation UIT-T G.841 décrit aussi une variante de mise en œuvre d'un MS-SPRING dans laquelle ce mécanisme est optimisé pour des applications à grande distance, par exemple dans des réseaux en câbles sous-marins ou dans les réseaux de base des pays très étendus; où les distances entre les nœuds peuvent atteindre plusieurs milliers de kilomètres. Pendant les défaillances d'un réseau et pendant une intervention de maintenance, le conduit auquel la protection est appliquée peut être beaucoup plus long qu'en exploitation normale, car des basculements se produisent dans l'anneau près de l'endroit où a eu lieu la défaillance du réseau. Cela entraîne des temps de transmission plus longs des signaux vocaux, ce qui peut être préjudiciable à la fluidité des conversations dans un réseau RTPC à grande distance. Afin de limiter cette dégradation de la qualité vocale, on a perfectionné la fonctionnalité du MS-SPRING, pour obtenir des MS-SPRING destinés à des applications grande distance, dont la description est donnée dans l'Annexe A de la Recommandation UIT-T G.841.

2.1.4.2.5 Rétablissement

L'opération de rétablissement utilise la capacité disponible entre les nœuds pour récupérer le trafic lors de défaillances dans le réseau. Les algorithmes employés pour le rétablissement font généralement intervenir un réacheminement. Lorsqu'on a recours au rétablissement, un certain pourcentage de la capacité du réseau de transport est réservé au réacheminement du trafic. L'opération de rétablissement n'a pas encore été normalisée: les divers produits disponibles actuellement sur le marché répondent à plusieurs cahiers des charges spécifiques d'utilisateurs.

Le rétablissement est la technique la plus efficace pour améliorer la disponibilité du trafic si la topologie physique du réseau est une topologie suffisamment bien maillée. Par exemple, si les nœuds du réseau peuvent être atteints au moyen d'au moins trois artères physiques, ou au moyen d'artères physiques plus disjointes, une réserve de largeur de bande d'environ 33% par arc, ou moins, consacrée à la capacité de réserve, serait suffisante pour assurer le rétablissement dans le cas d'une défaillance unique sur un arc. On comparera ce chiffre aux 50% de capacité de réserve qui sont nécessaires pour les mécanismes de protection par anneau décrits plus haut.

Le système centralisé possède toutes les informations concernant la répartition du trafic, la capacité en réserve et le profilage du trafic en fonction des priorités respectives de récupération. Selon la nature de la défaillance, le mécanisme de rétablissement peut gérer l'utilisation du trafic d'exploitation et des autres catégories de trafic non prioritaires, tout en rétablissant le trafic plus prioritaire. Cette caractéristique porte le nom de préemption de trafic. La réaction de rétablissement est plus lente que la protection car elle a une grande souplesse de récupération du trafic et un grand rendement en largeur de bande. Les mécanismes centralisés de rétablissement automatique sont capables de récupérer le trafic en l'espace de 5 à 10 secondes sans entraîner d'indisponibilité du trafic sur les circuits concernés.

2.1.4.3 Critères de sélection pour choisir le rétablissement ou la protection

Pour mettre en place des architectures de réseau ayant un bon rapport coût-efficacité, il convient d'utiliser parallèlement des mécanismes de protection en anneau et des mécanismes de rétablissement maillés. Il faut bien comprendre que ces deux types de mécanismes ne sont pas mutuellement exclusifs pour la mise en œuvre de réseaux fiables, mais qu'ils sont parfaitement complémentaires du fait de leurs différences, et qu'il convient par conséquent de les utiliser conjointement. Les critères à utiliser pour choisir l'un ou l'autre doivent tenir compte de la répartition des fibres et des stations sur le terrain. La connectivité physique des nœuds se définit comme le nombre moyen de liaisons à acheminements différents qui convergent vers un nœud (commutateur central). Cette connectivité est très variable, selon les conditions démographiques. En règle générale, les zones à grande densité de population sont desservies par une infrastructure de réseau bien connectée ou «maillée». Dans les régions moins peuplées, on aurait tendance à avoir moins de fibres, avec des réseaux dont la topologie est à base de longues chaînes ou de grands

anneaux. Enfin, là où la densité de population est très faible, les radiocommunications, avec très peu de fibres, représentent la technologie rentable pour la fourniture des services de télécommunication.

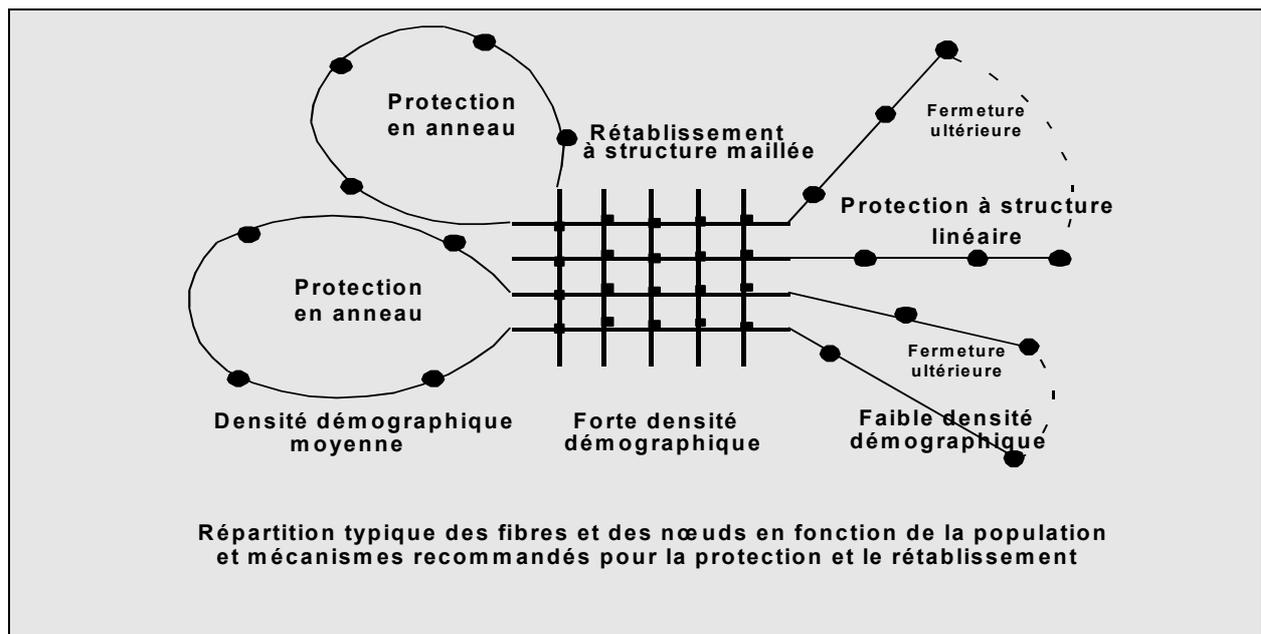
Dans les cas où la connectivité des nœuds du réseau est suffisamment grande, par exemple supérieure à 3, il peut être plus indiqué de recourir au rétablissement maillé, car il est alors possible de mettre à profit tous les avantages de cette technique. Parmi ces avantages, citons une utilisation minimale de la largeur de bande en réserve dans le réseau, une croissance souple et la préemption.

La plupart des pays possèdent à la fois des zones à grande densité de population desservies par un réseau à maillage serré et des zones moins peuplées avec moins de connectivité par fibres optiques.

On peut dire, par conséquent, qu'il est possible d'utiliser conjointement, avec une bonne efficacité, la protection maillée et la protection à structure en anneau. Ces deux structures se complètent mutuellement pour donner des architectures de réseau à grande capacité.

La figure ci-après illustre ce concept, qui traduit les critères exposés ci-dessus: répartition démographique et infrastructure de télécommunication nécessaire pour desservir la population.

Figure 2.1.1 – Répartition typique des fibres et des nœuds



2.1.4.4 Conclusions

La planification et la mise en œuvre d'architectures pour des réseaux de transport reposent sur un certain nombre de considérations d'ordre économique. L'intérêt des réseaux de transport à grande disponibilité réside dans leur capacité à fournir, avec une bonne rentabilité, une gamme complète de services, avec la qualité y afférente. Des réseaux fiables permettent de réduire considérablement les dépenses de maintenance en exploitation. Vu la possibilité de différer et de regrouper les actions de maintenance, il est beaucoup plus facile de les planifier de façon optimale.

Par ailleurs, la seule façon de tirer parti, en toute sécurité, de l'évolution des systèmes MRT et MRL à grande capacité consiste à prévoir une architecture de réseau du type à autoréparation.

Les mécanismes de rétablissement maillé et de protection en anneau contribuent à la réalisation de réseaux fiables. Les études montrent que les mécanismes de protection en anneau sont la solution parfaite pour une infrastructure de réseau à faible interconnexion, telle qu'on la trouve dans les zones à densité démographique moyenne.

La technique du rétablissement, avec sa souplesse de mise en œuvre et l'économie qu'elle permet de réaliser en matière de largeur de bande, est la meilleure solution dans une infrastructure de réseau bien interconnectée, comme il en existe généralement dans les zones à grande densité démographique. La plupart des pays possèdent des régions à densité démographique élevée, moyenne et faible. La bonne solution pour la mise en place d'architectures de réseaux de transport stables dans le siècle à venir consistera par conséquent à combiner respectivement le rétablissement maillé, la protection en anneau et la protection linéaire.

2.1.4.5 Références UIT-T

Pour de plus amples renseignements sur la planification et la protection des réseaux optiques, on consultera les Recommandations suivantes de l'UIT-T, qui sont des textes importants en cette matière:

- [G.872]: Architecture des réseaux optiques de transport
- [G.709]: Interface de nœud de réseau pour le transport optique
- [G.691]: Interfaces optiques pour systèmes multicanaux
- [G.959.1]: Interfaces de la couche optique du réseau optique de transport
- [G.871]: Cadre pour les Recommandations relatives au réseau optique de transport
- [G.798]: Caractéristiques fonctionnelles des équipements de réseaux optiques
- [G.874]: En préparation: Gestion des éléments de réseaux optiques
- [G.875]: En préparation: Modèle d'information pour les équipements de réseaux optiques

2.1.5 Abréviations

DSF	Fibre à dispersion décalée (<i>dispersion shifted fibre</i>)
MRL	Multiplexage par répartition en longueur d'onde (<i>wavelength division multiplexing</i>)
MS	Section de multiplexage (<i>multiplex section</i>)
MS-SPRING	Anneau de section de multiplexage (<i>multiplex section – shared protected ring</i>)
NZDSF	Fibre à dispersion non nulle (<i>non-zero dispersion fibre</i>)
PMD	Dispersion modale de polarisation (<i>polarization mode dispersion</i>)
RTPC	Réseau téléphonique public commuté (<i>public switched telephone network</i>)
SDH	Hiérarchie numérique synchrone (<i>synchronous digital hierarchy</i>)
SNC-P/I	Protection de connexion de sous-réseau avec supervision intrinsèque (<i>sub-network connection protection with inherent monitoring</i>)
SNC-P/N	Protection de connexion de sous-réseau avec supervision non intrusive (<i>sub-network connection protection with non-intrusive monitoring</i>)
TEB	Taux d'erreur binaire (<i>bit error rate</i>)
TU AIS	Signal d'indication d'alarme de l'unité affluente (<i>tributary unit – alarm indication signal</i>)
TU LOS	Coupure d'alimentation de l'unité affluente (<i>tributary unit – loss of power</i>)

2.2 Systèmes de faisceaux hertziens numériques

2.2.1 Généralités

Les faisceaux hertziens numériques (FHN) sont utilisés dans de nombreuses applications, depuis le transport de signaux de téléphonie et de télévision jusqu'au transport d'une grande variété de signaux de données modernes. Les distances couvertes sont comprises entre moins d'un kilomètre et des distances continentales et au-delà. De la même façon, la capacité d'un faisceau hertzien numérique peut aller du débit d'un seul signal DS1 (1,54 Mbit/s) jusqu'à 1 000 Mbit/s. Une petite portion seulement du spectre électromagnétique se prête aux applications des faisceaux hertziens et, à l'intérieur de cette gamme de fréquences restreinte, on ne dispose que d'un nombre limité de bandes. Ces bandes sont subdivisées en canaux qui peuvent transmettre des signaux numériques à petite ou grande capacité.

Pendant plus de trente ans, le développement des réseaux numériques a été conditionné par le passage du trafic téléphonique de l'analogique au numérique. Le trafic de données n'est devenu un facteur important qu'à une époque récente. A l'heure actuelle, ce trafic est généré de plus en plus par des modems à bande vocale, des terminaux RNIS, des terminaux de visioconférence et de télévision de haute qualité, et par d'autres sources de données.

Les avantages des faisceaux hertziens numériques sont les suivants:

- *Coûts modiques*: Les radiocommunications ont un meilleur rapport coût-efficacité que d'autres systèmes tels que les câbles à conducteur cuivre ou à fibres optiques. L'installation d'un câble et le câble lui-même peuvent être très coûteux, et on peut rencontrer des difficultés pour obtenir les droits de passage nécessaires.
- *Rapidité d'implantation*: Il est facile de déplacer les équipements radioélectriques pour répondre aux besoins d'implantation des réseaux, qui évoluent rapidement. Les infrastructures nécessaires sont modestes.
- *Facilité de maintenance*: La maintenance est limitée aux stations qui jalonnent le trajet radioélectrique, et qui sont peu nombreuses, alors qu'un système en câble est exposé à des risques de rupture en tous points de son trajet.

Spectre

L'UIT organise périodiquement des conférences internationales, les Conférences mondiales des radiocommunications (CMR), au cours desquelles le spectre électromagnétique est attribué aux services utilisateurs. Il existe aussi des Conférences régionales des radiocommunications (CRR), chargées d'élaborer des accords relatifs à l'utilisation du spectre des fréquences radioélectriques à l'échelon régional. Les résultats de ces conférences sont consignés dans le Règlement des radiocommunications de l'UIT, dans lequel le Tableau d'attribution des bandes de fréquences couvre la partie du spectre qui va de 9 kHz à 400 GHz. Outre le service fixe de terre et le service fixe par satellite dont il sera question ici, le spectre est attribué à de nombreux autres services utilisateurs: mobile (terrestre, aéronautique, maritime), radiodiffusion (sonore, télévision), météorologie, spatial (exploitation, recherche, inter-satellites, exploration de la Terre), radioastronomie, amateur et radiopérage (radar). L'attribution des bandes de fréquences dans le Règlement des radiocommunications (RR) n'est faite que dans les grandes lignes. La plupart des pays se servent du RR comme base pour établir leurs propres tableaux nationaux de fréquences, dans lesquels ils introduisent des informations supplémentaires, relatives respectivement à l'utilisation par les pouvoirs publics et à l'usage privé.

Les Recommandations de l'UIT-R ne reflètent pas toujours les dispositions les plus récentes des canaux radioélectriques utilisés dans les divers pays. Il est fréquent que des initiatives nouvelles soient prises dans un pays, concernant ces canaux, et homologuées par la suite dans une Recommandation de l'UIT-R. En conséquence, si un fabricant souhaite introduire son matériel radioélectrique sur le marché d'un autre pays, il devra se documenter sur les pratiques propres à ce pays. Il peut se faire, également, qu'un pays donné autorise la mise en place d'une disposition de canaux non normalisée, ou qu'il ouvre à l'usage privé une bande de fréquences réservée aux pouvoirs publics.

Les Recommandations de l'UIT-R (série F) décrivent les dispositions générales des canaux dans les bandes de fréquences suivantes pour les faisceaux hertziens:

- a) 1,4, 2, 4, 5, L6, U6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14 et 15 GHz
- b) 18, 23, 27, 31, 38 et 55 GHz

Les faisceaux hertziens numériques fonctionnant au-dessous de 15 GHz sont indispensables pour établir des liaisons de jonction et des liaisons de base dans les réseaux à grande distance et les réseaux régionaux. Ils sont utilisés également dans les zones reculées et sur terrain difficile, venant ainsi en complément à d'autres systèmes de transmission tels que les fibres optiques. En raison de l'encombrement des bandes situées au-dessous de 15 GHz, il est souvent impossible d'augmenter le nombre des liaisons dans une zone donnée. D'où l'importance grandissante des bandes supérieures à 15 GHz. Dans beaucoup de pays, on met en œuvre, en grandes quantités, des équipements fonctionnant au-dessus de 15 GHz pour des réseaux d'accès à courte distance (dérivations SDH, réseaux LAN, liaisons temporaires, protection des câbles) et pour l'infrastructure des réseaux mobiles (par exemple, GSM, AMPS, DCS 1800).

Capacité des canaux numériques

Les débits binaires transportés par les faisceaux hertziens numériques sont normalisés dans les Recommandations UIT-T G.702, G.703 et G.704 pour les hiérarchies numériques plésiochrones et dans les Recommandations UIT-T G.707, G.708 et G.709 pour les hiérarchies numériques synchrones (SDH ou SONET). Comme indiqué dans les Recommandations de l'UIT, et en fonction de la largeur de bande des canaux et de la modulation (MAQ-4, MAQ-16, MAQ-256, MAQ-512), la capacité des faisceaux hertziens numériques exprimée en débits binaires f_b comprend des multiples de DS1 (1,544 Mbit/s) et DS3 (44,736 Mbit/s), E1 (2,048 Mbit/s) et E3 (34,368 Mbit/s), STS1 ou Sous-STM1 (51,84 Mbit/s) et STM-1 (155,52 Mbit/s). Ce sont les débits binaires à destination et en provenance des faisceaux hertziens numériques. A l'intérieur de ces faisceaux hertziens, le débit binaire, f_{br} est souvent supérieur d'environ 6% à ces valeurs ($f_{br} = 1,06 f_b$), pour les raisons suivantes: addition d'une correction d'erreur directe (CED), addition d'un surdébit pour la maintenance radioélectrique interne et pour le multiplexage radioélectrique interne de plusieurs trains binaires normalisés.

2.2.2 Nouvelles technologies des radiocommunications numériques à hyperfréquences (point à point)

Dans la suite de la présente section, on étudiera en détail quelques-uns des domaines dans lesquels les nouvelles technologies ont fait leur apparition au cours des dernières années. Ces technologies sont appliquées dans les équipements à hiérarchie numérique synchrone (SDH: *synchronous digital hierarchy*) pour les radiocommunications numériques à hyperfréquences (DMR: *digital microwave radio*) et assureront sans à-coups la transition à partir de l'actuelle architecture de la hiérarchie numérique plésiochrone (PDH: *plesiochronous digital hierarchy*).

- **CED (Correction d'erreur directe) et techniques de modulation par codage**

Dans la conception classique initiale des faisceaux hertziens numériques, les fonctions de codage CED et de modulation sont mises en œuvre indépendamment l'une de l'autre. On utilise plusieurs types de techniques de correction d'erreur tels que le code complet et le code de convolution.

Dans un système de codage complet CED, le train de données d'entrée à coder est divisé en k symboles d'information auxquels on ajoute des symboles redondants de parité ou de contrôle, pour former un mot codé composé de n symboles qui sont ensuite modulés et transmis. Un codeur indépendant fonctionnant selon ce système donne un code complet (n, k) ou code complet au débit k/n . Dans le récepteur, le train de bits démodulé est décodé, ce qui extrait les bits d'information qui sont corrigés, si nécessaire, par les bits de parité ou de contrôle.

Dans un système de codage de convolution CED, les bits de parité ou de contrôle sont calculés sur une chaîne de bits pour former un train binaire continu. Ce codage est aussi spécifié à l'aide des paramètres n et k . Ici, n désigne le nombre de bits codés qui servent à former une certaine séquence de bits et k désigne la chaîne de bits qui constitue la séquence. Le paramètre k s'appelle la longueur de contrainte. Le codage

de convolution est généralement mis en œuvre pour des décodeurs particuliers: décodage Viterbi, décodage séquentiel ou décodage de syndromes.

Dans la modulation par codage, on combine les fonctions de codage CED et de modulation en insérant des bits redondants dans des multiétats de la constellation de signaux transmise. Les techniques de modulation par codage les plus répandues, utilisées traditionnellement dans les faisceaux hertziens numériques de Terre, sont: 1) la modulation codée par blocs (BCM: *block coded modulation*), 2) la modulation à codage en treillis (MCT), et 3) la modulation avec codage à niveaux multiples (MCNM). Parmi ces techniques, c'est la modulation MCNM qui a progressé le plus rapidement au cours des dernières années.

La modulation BCM donne un gain de codage plus faible que la modulation MCT. On peut définir le gain de codage (dB) comme le gain qui permet d'obtenir le même TEB sur une liaison radioélectrique, même si le rapport C/N diminue. Ainsi, si un système de modulation a un gain de codage de 3 dB, par exemple, le rapport C/N pourra être réduit de 3 dB pour le même TEB. En revanche, la modulation BCM est plus simple à mettre en œuvre que la modulation MCT et elle peut être utilisée dans des configurations de démodulation parallèles.

Les systèmes de modulation MCT font appel à des techniques de codage de convolution, qui nécessitent une largeur de bande réduite pour une valeur donnée du débit de transmission et de la probabilité d'erreur binaire (TEB). Le démodulateur utilisé pour un système MCT est souvent mis en œuvre avec des algorithmes de Viterbi dans un circuit d'estimation de la séquence de probabilité maximale (ESPM). Les systèmes MCT peuvent être très complexes, mais aussi extrêmement souples. Leurs caractéristiques sont telles que leur gain de codage est plus élevé dans un canal non linéaire que dans un canal linéaire. Cet avantage de la modulation MCT aura pour conséquence une diminution du TEB résiduel pour les systèmes de modulation très complexes.

Dans la modulation MCNM, on considère que chaque niveau de modulation est une voie de communication distincte; des codages CED différents peuvent être appliqués aux divers niveaux. Par ailleurs, un système MCNM donné ne se limite pas à un seul système de codage. Par exemple, on peut utiliser des codes complets pour certains niveaux et des codes de convolution pour d'autres niveaux. La conséquence est une souplesse de sélection des débits de codage, car ces débits peuvent être choisis séparément pour chaque niveau.

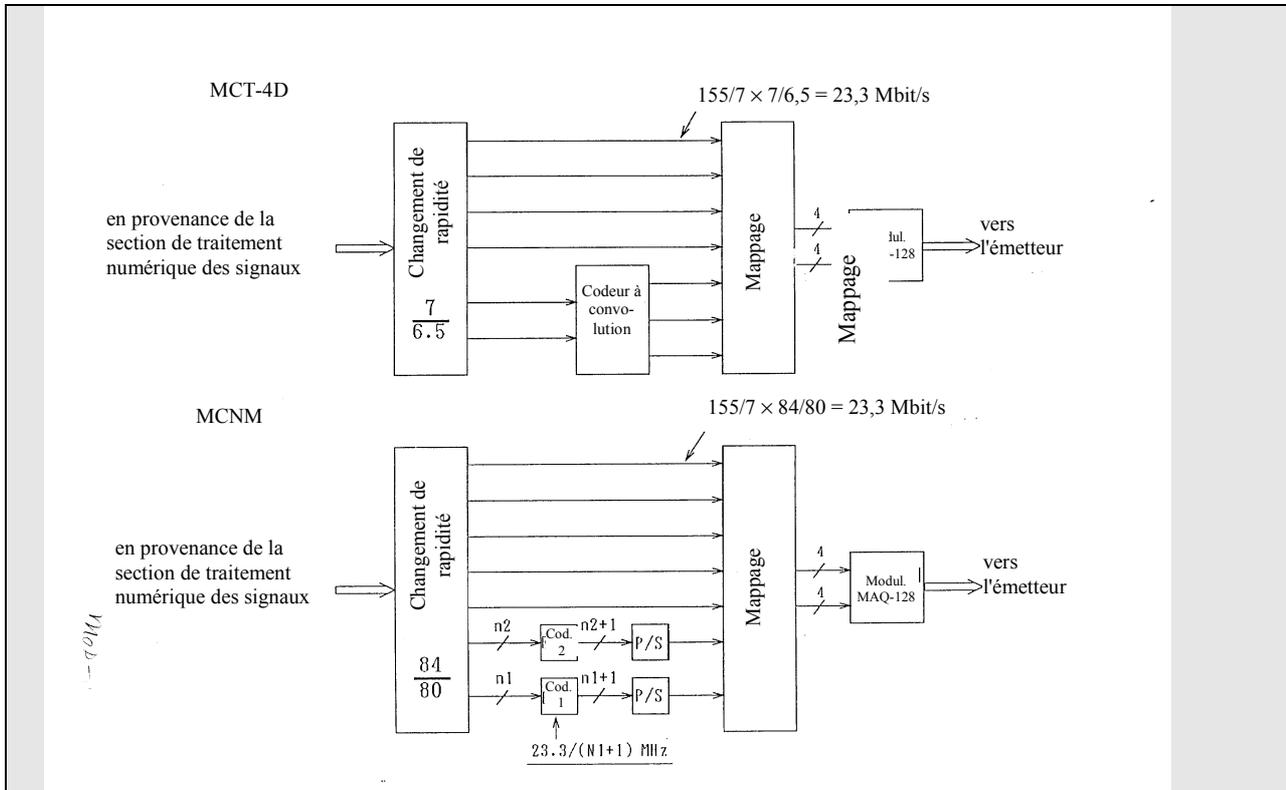
La Figure 2.2.1 illustre les techniques de base des systèmes MCT et MCNM. Dans le cas MCNM, il y a changement de rapidité du train binaire série entrant et conversion du mode série en mode parallèle. Par exemple, le codeur 1 applique les bits CED au bit de moindre poids (LSB: *least significant bit*) au débit $R = 3/4$ (un total de quatre bits est transmis pour trois bits d'information) et le codeur 2 peut appliquer les bits CED au deuxième LSB au débit $R = 11/12$ (12 bits transmis pour chaque séquence de 11 bits d'information). Après ce codage interviennent une conversion parallèle-série des signaux de sortie des codeurs puis une combinaison de ces signaux avec les autres niveaux binaires dans un circuit de mappage, suivie de la transmission vers le modulateur MAQ-128. Du fait de la diminution de rapidité de fonctionnement du codage et du décodage, on obtient un type de circuit plus fiable et plus robuste.

Dans l'exemple de la Figure 2.2.1, la redondance totale du codage MCNM est seulement d'environ 5% (80/84). L'avantage de ce système est la possibilité d'avoir un canal supplémentaire de 2 Mbit/s (canal auxiliaire). Cet avantage n'existe pas en MCT, où la redondance de codage est seulement de 8% en MCT à 4 dimensions, ce qui ne permet pas d'avoir un canal auxiliaire.

- **Techniques de suppression du brouillage contrapolaire (SBPC)**

Les bandes de fréquences utilisées dans les faisceaux hertziens numériques (comme dans d'autres systèmes de radiocommunication) sont des ressources limitées, dont il convient par conséquent de faire usage le plus économiquement possible. Elever le niveau de modulation (voir le paragraphe précédent) est un des moyens permettant d'accroître la capacité d'un système donné. Un autre procédé pour augmenter l'utilisation d'une bande de fréquences donnée consiste à utiliser cette bande deux fois dans le même système, en transmettant les porteuses radioélectriques avec des polarisations différentes.

Figure 2.2.1 – Principes de base des techniques MCT et MCNM

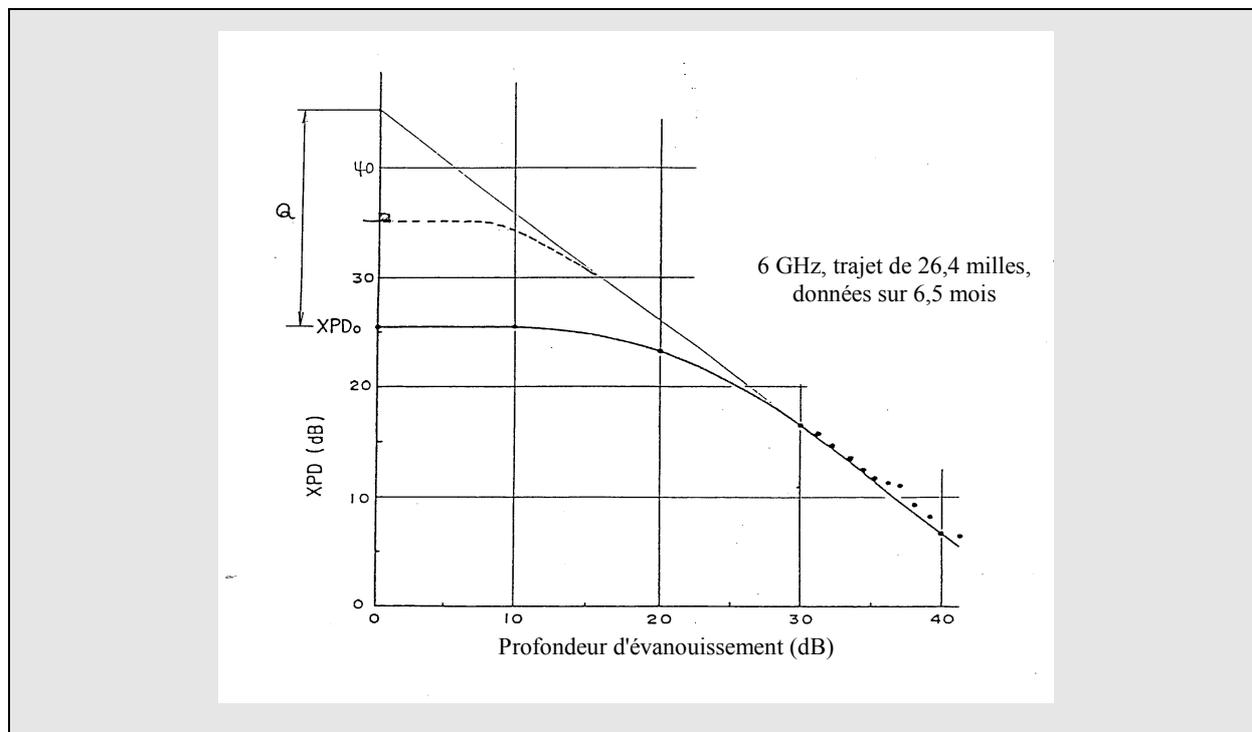


Les équipements à double polarisation dans le même canal sont en service depuis de nombreuses années dans les systèmes à satellites commerciaux, mais ils n'ont été introduits que récemment dans les faisceaux hertziens hyperfréquences de terre. La raison en est que les systèmes à satellites fonctionnent rarement avec des angles d'élévation d'antenne inférieurs à 5 degrés et qu'ils ne posent pas de sérieux problèmes d'évanouissement de propagation. En revanche, les faisceaux hertziens de terre sont exposés intrinsèquement à des évanouissements profonds, pour deux raisons: d'une part, ils transmettent parallèlement à la surface terrestre, d'autre part, le découplage de polarisation (XPD, brouillage des signaux entre les deux polarisations) est fortement influencé par les porteuses RF qui subissent des évanouissements dans la propagation par trajets multiples.

La Figure 2.2.2 montre la variation prévisible de XPD en fonction de la profondeur des évanouissements. Ces résultats ont été obtenus pour une antenne fonctionnant avec un grand découplage de polarisation. La figure montre qu'en l'absence d'évanouissements on peut s'attendre à un XPD₀ (XPD dans les conditions normales) de 35 dB.

Pour maintenir la valeur de XPD entre les deux polarisations, même en présence d'évanouissements, les développeurs d'équipements ont mis au point des antennes avec XPD accru autour de l'axe de visée, et des supprimeurs de brouillage contrapolaire (SBPC), par utilisation d'une technique d'égalisation transversale. Comme les systèmes de Terre transmettent souvent plusieurs porteuses RF à la fois, il convient de traiter simultanément le problème du brouillage dû au canal adjacent, en mettant en œuvre des filtres appropriés à coupure raide. A titre d'exemple, un système MAQ-256 améliore le rendement d'utilisation de la bande en le portant d'environ 7 bits/Hz à 14 bits/Hz.

Figure 2.2.2 – Découplage de polarisation prévu en fonction de la profondeur des évanouissements



Le circuit SBPC prélève des échantillons des signaux brouilleurs et les applique aux signaux utiles pour supprimer le brouillage. La suppression peut s'opérer au niveau RF, FI ou bande de base. La complexité de ces circuits croît avec le nombre d'états caractéristiques des systèmes de modulation à codage multiniveau; les systèmes MAQ-256 et MAQ-512 nécessitent des circuits SBPC extrêmement complexes. Mais on obtient ainsi des liaisons de communication très fiables, même en présence d'évanouissements profonds.

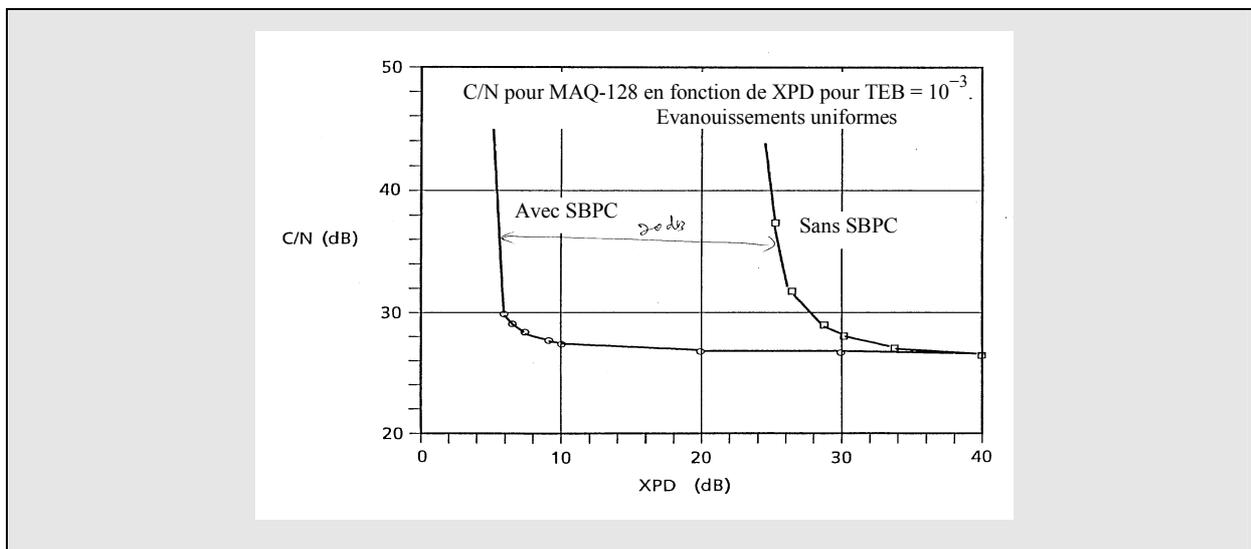
En raison d'imperfections contrôlées dans les antennes, on peut s'attendre à des brouillages au niveau des signaux FI. La porteuse polarisée verticalement sera brouillée par la porteuse polarisée horizontalement, et inversement. Le niveau du brouillage dépend du XPD de l'antenne et de la profondeur des évanouissements. En l'absence d'évanouissements, on a un brouillage minimum qui est acceptable.

La Figure 2.2.3 montre l'amélioration de XPD pouvant résulter de l'emploi de circuits SPBC. Cette figure donne des résultats de mesure obtenus avec un système qui utilise la modulation MAQ-128, pour un TEB constant (10^{-3}) et en présence d'évanouissements uniformes. L'amélioration attendue est d'environ 20 dB.

- **Commande automatique de la puissance d'émission (ATPC)**

La mise en œuvre de circuits de commande automatique de la puissance d'émission (ATPC: *automatic transmission power control*) dans les faisceaux hertziens numériques a pour effet d'abaisser le niveau de brouillage, notamment entre des canaux établis sur une même artère et entre des canaux qui partent d'un même point du système. Les avantages de l'ATPC sont de plusieurs ordres: 1) diminution de la séparation angulaire entre des artères radiales adjacentes; 2) diminution du brouillage à grande distance entre des bandes où la même fréquence est réutilisée; 3) diminution du brouillage entre des canaux, numériques et analogiques, qui utilisent en partage la même bande de fréquences.

Figure 2.2.3 – Amélioration (mesurée) de XPD obtenue avec des équipements SBPC



L'ATPC procure d'autres avantages en ce qui concerne les équipements: 4) réduction de la consommation d'énergie continue par l'amplificateur RF, réduction qui peut être importante (jusqu'à 40%); 5) amélioration du TEB résiduel (valeur typique: 1×10^{-13}).

La portée dynamique des circuits ATPC est généralement comprise entre -12 dB et $+2 \text{ dB}$, par échelons asservis de 1 dB , avec une vitesse de poursuite d'évanouissement de 100 dB/s . Le niveau de seuil du signal reçu peut être préréglé entre -50 dBm et -70 dBm .

- **Egaliseurs pour réduire les évanouissements de la propagation par trajets multiples**

Les évanouissements dans la propagation par trajets multiples posent un problème majeur sur la plupart des liaisons par faisceaux hertziens numériques établies de par le monde. Jusqu'à présent, on limitait les effets préjudiciables de ces évanouissements en installant des équipements fonctionnant en diversité d'espace ou en diversité de fréquence.

Une autre manière de combattre les effets des évanouissements par trajets multiples consiste à utiliser des égaliseurs de type adaptatif dans le domaine temporel ou fréquentiel. Les progrès techniques récents ont permis d'améliorer très sensiblement les performances de ces égaliseurs; cela est particulièrement important pour les faisceaux hertziens numériques dans lesquels on applique la modulation codée à plusieurs niveaux.

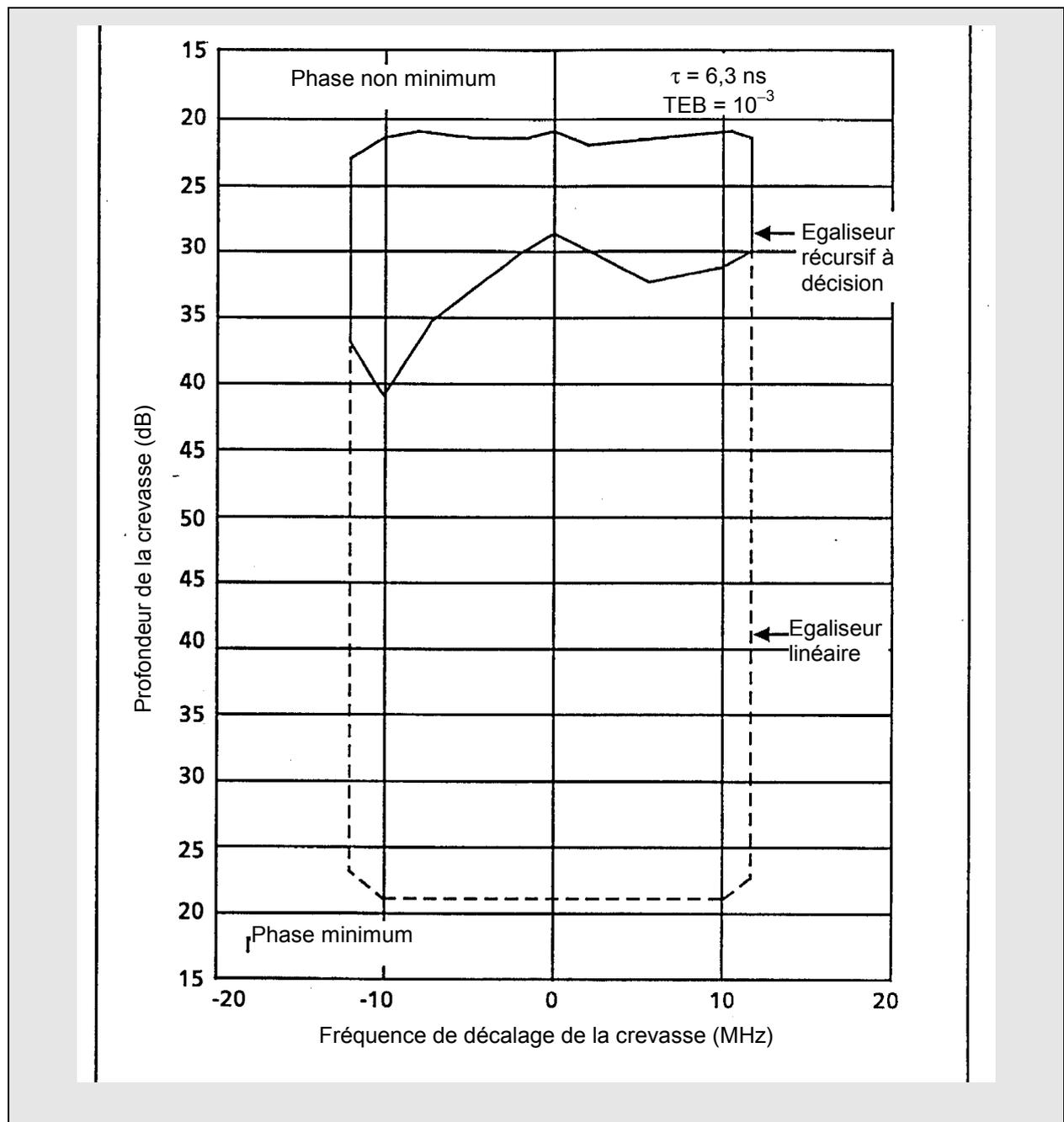
Les égaliseurs adaptatifs peuvent être mis en œuvre au niveau FI ou au niveau bande de base. Les circuits les plus couramment utilisés sont les égaliseurs récursifs avec décision (ERD) et les égaliseurs transverses linéaires.

Les effets des évanouissements sur une liaison radioélectrique numérique sont souvent exprimés en termes de «signature» du système; c'est l'indication statique de la sensibilité de l'équipement à un modèle à deux rayons du canal dans lequel se fait la propagation par trajets multiples, pour la phase minimum et la phase non minimum. La signature est souvent utilisée pour comparer des équipements.

Les évanouissements par trajets multiples étant de nature dynamique, il convient de soumettre les équipements à des essais dynamiques. On le fait au moyen d'un simulateur dynamique, capable de simuler les séquences temporelles de ces évanouissements. Ces essais de simulation permettent d'optimiser les circuits de synchronisation et les circuits d'adaptation des coefficients des égaliseurs.

La Figure 2.2.4 représente la signature (mesurée) d'un faisceau hertzien numérique fonctionnant en MAQ-64 à 155 Mbit/s et comprenant des circuits de décision récursifs. L'égaliseur linéaire a le même pouvoir d'égalisation à l'égard des évanouissements à phase minimum qu'à l'égard des évanouissements à phase non minimum. En revanche, l'égaliseur adaptatif fonctionnant dans le domaine temporel dont la signature est représentée dans la Figure 2.2.4 égalise complètement les évanouissements à phase minimum et il est possible d'égaliser des évanouissements profonds dans lesquels le niveau de l'onde réfléchie vient à dépasser celui du signal principal.

Figure 2.2.4 – Signature (mesurée) d'un système MAQ-64 à 155 Mbit/s équipé d'égaliseurs ERD



2.2.3 Description d'un système SDH moderne mettant en œuvre les nouvelles technologies¹

En 1988, l'UIT-T a recommandé que l'on adopte la hiérarchie numérique synchrone (SDH: *synchronous digital hierarchy*) dans les faisceaux hertziens numériques à grande distance, le but étant de synchroniser les équipements sur des zones géographiques plus étendues. Les systèmes SDH prennent ainsi la relève des systèmes à hiérarchie numérique plésiochrone (PDH: *plesiochronous digital hierarchy*) qui sont en exploitation depuis un certain nombre d'années. Les équipements SDH doivent être conçus et mis en œuvre de telle manière que cette relève se fasse en douceur.

Les systèmes SDH fonctionnent généralement dans des bandes de fréquences comprises entre 4 et 13 GHz, avec modulation d'amplitude en quadrature (MAQ) du type 64 ou 128; leur capacité de transmission est celle du module de transport synchrone de niveau 1 (STM-1). Ces systèmes peuvent être logés dans les canaux radioélectriques libérés par les systèmes PDH.

Un faisceau hertzien numérique moderne de type SDH doit posséder des caractéristiques de nature à faciliter son exploitation et sa maintenance, et à permettre l'utilisation la plus rationnelle de la largeur de bande radioélectrique disponible. Il convient de mettre en œuvre, dans toute la mesure du possible, les progrès techniques les plus récents qui sont décrits dans ce Manuel. Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- Conformité aux normes internationales les plus récentes, en l'occurrence les normes UIT-R, UIT-T et ETS.
- Protection contre les évanouissements: commutation par diversité de fréquence (FD: *frequency diversity*) et/ou par diversité d'espace (SD: *space diversity*). Par ailleurs, la capacité de trafic du système doit pouvoir être augmentée, de préférence par simple addition de modules d'équipements.
- Nécessité d'avoir un gain de système élevé, ce qui suppose l'emploi de récepteurs à faible facteur de bruit. Dans les systèmes fonctionnant avec commutation FD et/ou SD, la commutation ne doit pas entraîner une augmentation excessive du taux d'erreur binaire (TEB).
- On utilisera la modulation avec codage à niveaux multiples (MCNM), qui améliore l'efficacité et la qualité de fonctionnement. Il y a lieu d'optimiser le gain de codage et de réduire à un minimum la redondance de codage, pour pouvoir insérer un ou plusieurs canaux de service supplémentaires à 2,048 ou 1,544 Mbit/s, dans le champ du préfixe complémentaire de trame hertzienne (RFCOH: *radio frame complementary overhead*).
- On envisagera l'utilisation de la commande automatique de la puissance d'émission (ATPC), dont les avantages sont les suivants: réduction des brouillages causés aux systèmes voisins, amélioration du TEB résiduel, diminution des évanouissements et baisse de la consommation d'énergie.
- Il convient de mettre en œuvre des égaliseurs récursifs à décision (ERD) ou d'autres systèmes d'égalisation appropriés, afin de réduire la distorsion dispersive d'amplitude et de temps de propagation dans la bande, distorsion due aux évanouissements par trajets multiples.
- Aux fins de la redondance, on utilisera deux horloges de synchronisation externes différentes, en plus d'une horloge d'oscillateur interne.
- Le système SDH devra pouvoir être intégré aux réseaux PDH à bande de base existants. L'adaptation de l'interface à la transmission STM-1 devra pouvoir être réalisée par sélection sur logiciel.
- Le préfixe de section (SOH: *section overhead*) devrait se terminer, de préférence, dans deux directions: non seulement pour la section radioélectrique, mais également pour la section en ligne électrique ou optique qui aboutit à la station radioélectrique.

¹ Le Chapitre 6 contient des informations complémentaires sur les principes de la hiérarchie SDH.

- Le système devra être équipé d'une interface électrique ou optique STM-1 pour chaque canal. L'interface optique devra être adaptable à deux longueurs de câble différentes, ou davantage: pour les applications internes aux commutateurs et les applications à grande distance entre commutateurs.
- Outre le flux de trafic principal STM-1 ou 140 Mbit/s, on procédera, dans chaque terminal et dans chaque station de répéteur radioélectrique, à l'extraction et à l'insertion de plusieurs voies de service numériques (DSC: *digital service channels*) et, selon le système MCNM utilisé, à l'extraction et à l'insertion d'une ou de deux voies de service supplémentaires à 2,048 ou 1,544 Mbit/s. Ces voies seront transportées dans le préfixe RFCOH.
- L'équipement doit être doté de nombreuses fonctions de contrôle et de commande de la qualité de fonctionnement. Les paramètres correspondants doivent être conformes aux spécifications de la Recommandation UIT-T G.784. Par ailleurs, on mettra en place un comptage des opérations de commutation de protection et on déterminera les durées d'interruption dans les différents canaux. Ces fonctions devront intervenir, de préférence, à partir d'un système de gestion du réseau (NMS: *network management system*).
- Afin d'améliorer la fiabilité des équipements et le MTBF, on généralisera l'emploi des circuits intégrés pour micro-ondes (MIC: *microwave integrated circuits*) et des circuits intégrés hybrides (HIC: *hybrid integrated circuits*) réalisés en intégration à grande échelle (LSI). D'un autre côté, il convient d'utiliser, dans toute la mesure du possible, l'intégration LSI avec semi-conducteur complémentaire à oxydes métalliques (CMOS: *complementary metal oxide semi-conductor*), afin de réduire l'encombrement des équipements ainsi que la consommation d'énergie.
- Les équipements seront installés dans des bâtis normalisés offrant des possibilités d'extension. Ils devront pouvoir fonctionner dans des conditions d'environnement extrêmement variées.
- Equipements à grande souplesse d'utilisation et reconfigurables.
- Les communications de service seront réalisées, de préférence, avec une ligne de service prioritaire et une ligne de service omnibus, avec utilisation des octets E2 et E1, respectivement, du préfixe SOH. Les voies de service devront fournir des communications vocales sur toute l'étendue du réseau SDH, avec intervention de systèmes d'appel sélectif sur la base d'une signalisation multifréquence bitonalité (DTMF: *dual tone multifrequency*).
- Les caractéristiques de gestion seront réalisées en conformité avec les dispositions, entre autres, des Recommandations UIT-T de la série M.3000 et de la Recommandation UIT-T G.784. Cela permettra l'interconnexion de plusieurs fournisseurs au système de gestion du réseau (NMS) basé sur le réseau de gestion des télécommunications (RGT), par l'intermédiaire de l'interface Q3 (pour plus d'information, voir le Fascicule 2, Chapitre 5, *Gestion des réseaux et des services*).

2.2.4 Systèmes radioélectriques à accès multiple

Partout dans le monde, les gens s'entassent de plus en plus dans les zones urbaines. Malgré cela, la majeure partie de la population continue à vivre dans des zones rurales, où les aspirations et les besoins de télécommunication sont essentiellement les mêmes que dans les grandes villes. La densité démographique de ces populations rurales est souvent extrêmement faible sur de vastes étendues géographiques.

Les organismes nationaux de télécommunication, chargés d'assurer des liaisons de communication sur tout le territoire national, n'ont jamais eu de grandes possibilités pour ce faire, surtout quand il s'agissait de services de haute qualité comme la télévision et les communications de données à grande rapidité. Dans de nombreux cas, la seule possibilité était l'utilisation d'une paire de fils de cuivre.

Depuis l'apparition de satellites à grande puissance au cours des dernières années, on peut avoir recours à des systèmes composés de «microstations» (VSAT: *very small aperture terminal*) pour mettre en place des services de télévision et de données à grand débit à l'intention des zones rurales. Ces systèmes peuvent être mis en œuvre rapidement et à un coût unitaire assez modique par terminal. Cependant, on les considère généralement comme des systèmes à faible capacité: l'implantation de microstations sur une

vaste zone faiblement peuplée peut se révéler comme une entreprise coûteuse. Il faudra attendre encore quelques années pour voir la généralisation d'appareils téléphoniques portables de prix modique fonctionnant en liaison avec des satellites sur orbites terrestres basses ou moyennes (LEO/MEO). De toute manière, il est fort possible que les dépenses de premier établissement et les coûts d'exploitation de ces installations ne soient pas à la portée de nombreuses zones rurales (pour plus de détails, voir le § 2.4, *Systèmes à satellites*, du présent fascicule).

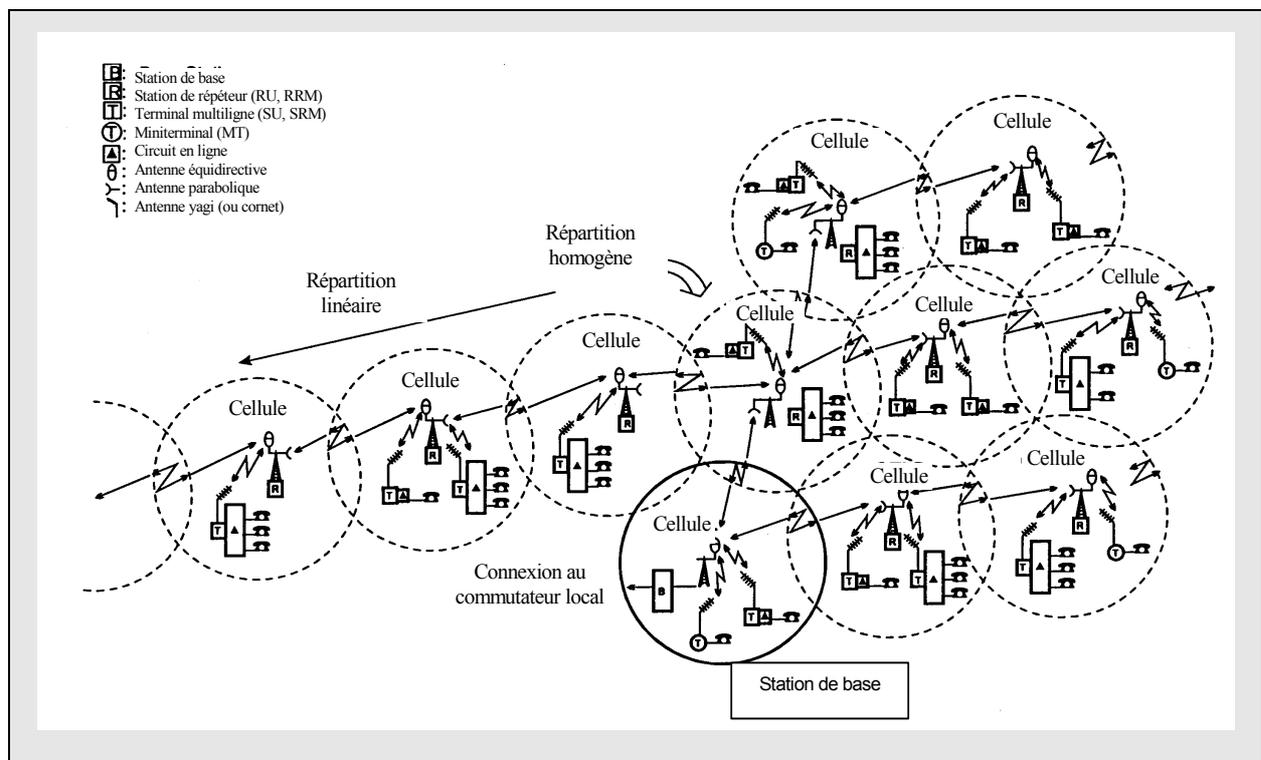
Les systèmes de radiocommunication d'abonnés à accès multiple peuvent être considérés comme une solution de remplacement intéressante aux communications rurales. Un système de ce type, appliquant une technologie numérique moderne, peut être mis en œuvre avec un maximum d'environ 1 000 lignes d'abonné réparties sur un rayon d'un millier de kilomètres autour d'une seule station de base. Cela représente plus de 3 000 kilomètres carrés par abonné. En termes d'économie et de services fournis, un tel système supporte la comparaison avec les systèmes à microstations et avec les postes téléphoniques portables communiquant par l'intermédiaire de satellites sur orbites LEO/MEO.

2.2.4.1 Architecture du système

Un système radioélectrique d'abonnés se compose de trois éléments principaux: la station de base, les stations de répéteurs et les stations terminales (d'abonné). Un tel système peut être mis en œuvre en configuration homogène (cas typique des systèmes urbains) ou en configuration linéaire (systèmes ruraux). Ils fonctionnent dans les bandes de fréquences 1,5-2,4 GHz, le plus souvent avec multiplexage par répartition dans le temps (MRT) à raison de 60 intervalles de temps pour 1 024 abonnés dans le sens centrifuge (de la station de base vers les abonnés), et en AMRT (accès multiple par répartition dans le temps) dans le sens centripète. Les voies téléphoniques sont codées en modulation par impulsions et codage (MIC) à 64 kbit/s. Un système de cette nature est souvent appelé système radioélectrique numérique d'abonné à accès multiple (DRMASS: *digital radio multiple access subscriber system*). Dans les systèmes les plus récents, le codage des signaux vocaux se fait en MIC adaptif différentiel à 32 kbit/s et il y a environ deux fois plus d'intervalles de temps.

Un système radioélectrique d'abonnés est formé de cellules dans une structure en nid d'abeilles, un peu comme les systèmes radioélectriques cellulaires pour usagers mobiles. La Figure 2.2.5 représente schématiquement un tel système et la Figure 2.2.6 donne un exemple de disposition type des cellules et d'attributions de fréquences pour un système DRMASS à 14 canaux. La station de base est généralement implantée sur le même site qu'un commutateur téléphonique urbain, afin de faciliter la mise en interface des circuits DRMASS avec le réseau téléphonique national. L'interface peut être soit numérique (à 2 Mbit/s, par exemple), soit composée de circuits analogiques à deux fils. Chaque cellule du système DRMASS est dotée d'équipements d'émission et de réception radioélectriques pour transférer les appels à la cellule suivante ou pour les communications avec les abonnés de son ressort.

Figure 2.2.5 – Représentation schématique d'un système radioélectrique numérique à accès multiple



L'équipement d'abonnés d'un système DRMASS comporte des unités d'abonnés à lignes multiples pour les sites regroupant plusieurs abonnés, et des miniterminaux pour les sites qui comptent un ou deux abonnés.

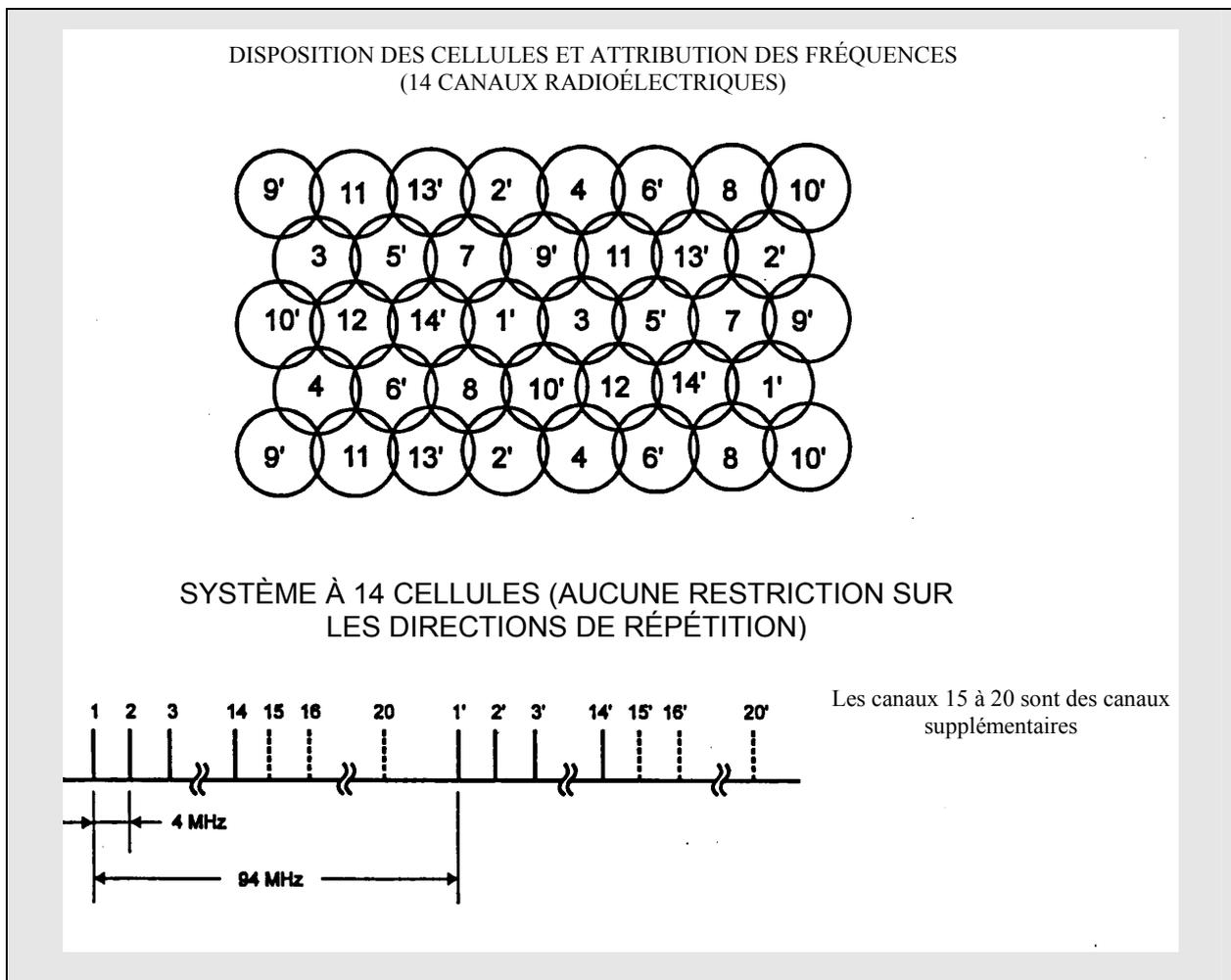
Dans une technologie récente, il est possible d'inclure dans le système DRMASS une cellule à l'usage d'abonnés mobiles et/ou fixes. Une telle cellule, appelée cellule de système téléphonique numérique sans cordon (DCTS: *digital cordless telephone system*), sert aux communications avec des appareils téléphoniques sans fil ou avec de petits terminaux fixes fonctionnant à 32 kbit/s, en modulation MICDA (modulation par impulsions et codage différentiel adaptatif).

Dans les systèmes DRMASS, la station de répéteur de chaque cellule est capable de couvrir une zone ayant un rayon d'environ 45 km, et une cellule DCTS peut communiquer avec des terminaux fixes sur une distance d'environ 3 km.

Un système DRMASS fournit ses services en concentrant un grand nombre de lignes d'abonné dans les intervalles de temps disponibles. Ce système est généralement transparent à la signalisation à destination et en provenance des abonnés.

Les voies téléphoniques provenant du commutateur téléphonique local subissent les traitements suivants: concentration, conversion en signaux numériques et transmission vers le répéteur le plus proche puis, le cas échéant, vers d'autres répéteurs. Chaque répéteur communique avec l'abonné qui lui est rattaché à l'aide d'une antenne équidirective. Un des 60 intervalles de temps disponibles est automatiquement alloué à l'abonné qui lance un appel. Pour la transmission centripète, de l'abonné vers la station de base via une station de répéteur, l'abonné reçoit un intervalle de temps; sa transmission se fait par salves (AMRT), sans risque de chevauchement avec d'autres abonnés. Deux fréquences seulement sont utilisées pour la transmission centripète et la transmission centrifuge.

Figure 2.2.6 – Exemple de disposition des cellules et d'attributions des fréquences pour 14 canaux



La Figure 2.2.7 montre le format d'ensemble d'une trame ainsi que les différents champs d'information de la trame. La Figure 2.2.8 donne le format type pour une voie dans un intervalle de temps d'abonné (voie V).

La trame radioélectrique se compose des éléments suivants: 60 voies téléphoniques (VCH: *voice channels*), une voie de commande (CCH), une voie de supervision (SV CH: *supervisory channel*), une voie de service (OW CM: *order wire channel*) une voie télégraphique (TELEX CH), une voie d'acquisition et de maintenance locale (ACQ/LOCAL CH) et une séquence de synchronisation de trame (F, F'). La période de trame est de 4 millisecondes et la séquence de trame couvre 7 bits dans la partie avant des voies C CH et ACQ/LOCAL CH. Le début de cette partie avant est un mot fixe de 5 bits et les 2 autres bits forment un mot variable (ID NO). Ces mots servent à distinguer les artères les unes des autres et à identifier la trame. Les identifications des blocs de 16 trames sont effectuées par un module de test. La polarité des voies ACQ/LOCAL CH et C CH est inversée dans le mot fixe, et elle alterne à des intervalles de 2 millisecondes.

Figure 2.2.7 – Format de la trame dans un système DRMASS du type MRT/AMRT

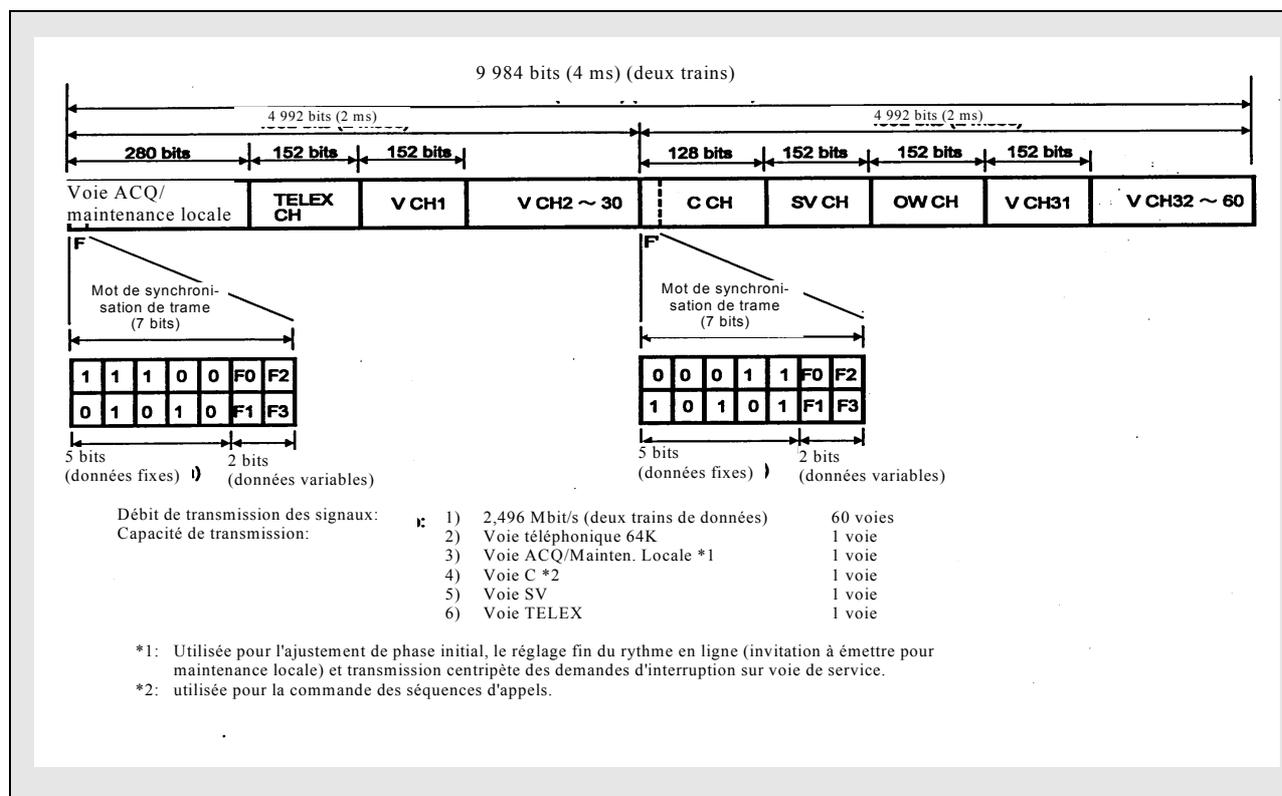
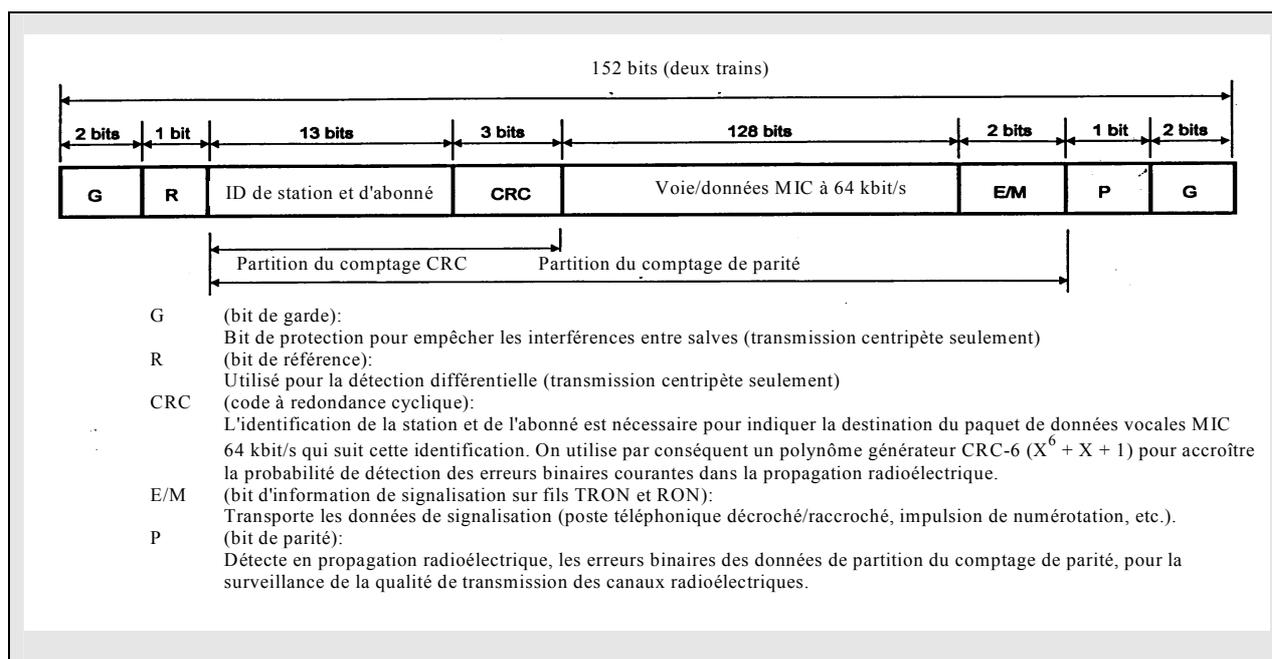


Figure 2.2.8 – Format de la trame dans l'intervalle de temps d'abonné



La synchronisation de trame s'effectue par une méthode de recherche avec décalage de 1 bit et la protection de la synchronisation est réalisée par 3 impulsions «oui» continues/4 impulsions «non» continues.

Chaque voie V CH, OW CH et SV CH dispose de 152 bits pour les flux de signaux centripètes et centrifuges et transporte les données proprement dites (par exemple, 64K pour les signaux vocaux) ainsi que l'information de commande. Dans le flux de signaux centripète, on a deux intervalles de temps de garde au début et à la fin de la trame. La voie C CH, avec ses 128 bits, est utilisée pour la mise en séquence des connexions des appels. La voie ACQ/LOCAL CH comporte 280 bits. Dans le mode acquisition, elle sert aux ajustements de phase dans le cadre du réglage initial du système. Dans le mode maintenance locale, elle est utilisée pour les réglages de phase fins. La voie TELEX CH, qui a aussi 152 bits, peut être utilisée pour les petits débits de données (jusqu'à 19,2 kbit/s), ou jusqu'à 40 voies télex. La voie V CH a la même structure dans le service télex et le service de données. La modulation utilisée est généralement la modulation MDPQ, avec transmission de 2 bits de données MIC par symbole. Ainsi, pour une trame de 4 ms, il y a transmission de 256 bits de données MIC (64 kbit/s) par voie V CH.

• Services assurés et qualité d'écoulement du trafic

Un système radioélectrique d'abonnés moderne à accès multiple est un système de haute technologie qui devrait fournir au minimum les services suivants:

- Service téléphonique normal.
- Service téléphonique avec prépaiement.
- Transmission de données, normalement jusqu'à 384 kbit/s qui, avec des logiciels modernes, se prête bien à la réalisation de visioconférences de qualité moyenne de PC à PC.
- Service télex.
- Voies téléphoniques et voies de données (préassignées) spécialisées.
- Communications à 4 fils avec signalisation TRON et RON.
- Service intracommunication: communications entre abonnés utilisant la même station terminale.
- Services d'appels prioritaires d'urgence. Si ce service est utilisé, les appels non prioritaires peuvent être abandonnés.
- Service de rappel prioritaire automatique. Si un abonné bénéficie de cette priorité, son appel peut être placé dans une file d'attente si le système est occupé. Il sera rappelé automatiquement, avec priorité sur les rappels ordinaires, lorsqu'une voie deviendra disponible.
- Service de rappel ordinaire automatique.
- Renvoi d'appel en cas d'occupation/de non-réponse/sans conditions.
- Appel en instance.
- Conférence à trois.
- Opérations de surveillance et d'acquisition de données (SCADA: *supervisory control and data acquisition*).
- Service AMAD (accès multiple avec assignation à la demande) sur 4 fils.
- Service dans le RNIS (réseau numérique à intégration de services).

Etant donné qu'un système DRMASS applique le principe de la concentration, le nombre maximum d'utilisateurs pouvant être desservis dans un tel système dépend du trafic moyen généré par chaque usager, de la probabilité de blocage souhaitée et du nombre d'intervalles de temps.

L'expérience a montré que, dans un système DRMASS, le taux d'appel horaire moyen pour le trafic commercial est en général de 0,09 erlang/ligne. Ce chiffre correspond à un exemple d'exploitation où les postes téléphoniques à prépaiement (0,3 erlang/ligne) occuperaient 10% de la capacité du système, les communications d'affaires (0,1 erlang/ligne) représenteraient 30% de cette capacité, et les lignes d'abonnés privés (0,05 erlang/ligne) représenteraient 60%. La probabilité de blocage (rapport du nombre

d'appels vers des numéros occupés au nombre total d'appels au cours d'une période de temps donnée) est généralement fixée à 0,01, soit 1%. Avec ces hypothèses, un système DRMASS fonctionnant sur 60 intervalles de temps pourra desservir 512 abonnés. Il sera cependant possible de doubler le nombre des lignes d'abonné (1 024) en introduisant l'intracommutation dans le système.

- **La station de base**

Dans la plupart des cas, un système radioélectrique d'abonnés doit être mis en interface avec un réseau téléphonique national à commutation. Dans ces conditions, l'emplacement le plus pratique pour la station de base est le copositionnement avec un commutateur existant qui dispose déjà d'un pylône radioélectrique utilisable et d'une installation générant suffisamment d'énergie alternative/continue pour alimenter la station de base. Cependant, si cela n'est pas réalisable en pratique, une partie de l'équipement de cette station (notamment les modules radiofréquences) peut être implantée n'importe où; le reste de l'équipement peut être logé sur le site du commutateur téléphonique, à condition que les deux sites puissent être reliés par une connexion numérique à 2 Mbit/s ou par des liaisons de radiocommunication.

Les principaux éléments de l'équipement de la station de base sont les suivants:

- Un module de commande de la station de base (BSCM: *base station controller module*)
- Une unité de commande MRT (TCU: *TDM controller unit*) avec émetteur, récepteur et antenne RF;
- Un ou plusieurs modules en boucle unidirectionnels (LOEM: *loop open end modules*)
- Une ou plusieurs unités de données (DU: *data units*)
- Un système informatisé de supervision et de commande pour l'exploitation et la maintenance

Si, pour telle ou telle raison, il n'est pas commode d'installer tous les équipements de la station de base sur le site du commutateur téléphonique, le pylône radioélectrique avec l'antenne et le module TCU pourront être implantés ailleurs et reliés au BSCM par deux liaisons à 2 Mbit/s.

Les fonctions des équipements de communications de la station de base sont décrites ci-après:

Module de commande de la station de base (BSCM)

Ce module, qui agit comme un concentrateur, fournit une interface à 2 fils pour un maximum de 1 024 circuits d'abonné en ligne. Il concentre 1 024 lignes téléphoniques et les convertit en 60 intervalles de temps dans deux trains de données MRT à 2,048 Mbit/s. Le concentrateur contient des processeurs qui, commandés par des programmes enregistrés, effectuent la mise en séquence des appels ainsi que la supervision à distance pour l'ensemble du système.

Modules en boucle unidirectionnels (LOEM) et unités de données (DU)

Le(s) module(s) LOEM assure(nt) l'interface avec le commutateur local à l'aide de cartes enfichables. On dispose généralement de deux types de carte: une carte pour 8 lignes téléphoniques normales et une carte pour 4 lignes téléphoniques à prépaiement. Le type de carte et la quantité requise dépendent de la configuration des circuits en ligne (LC: *line circuit*) dans les postes d'abonné et les stations de répéteurs.

Le module DU contient des cartes enfichables pour les interfaces des voies de données avec le commutateur téléphonique. La configuration de ces cartes dépend de la structure d'ensemble du système DRMASS; les cartes contiennent des interfaces pour des accès de données, des voies télex et pour une signalisation TRON et RON à 4 fils.

Unité de commande MRT (TCU)

L'unité TCU transforme les deux trains de données de 2,048 Mbit/s en provenance du concentrateur en deux signaux radioélectriques MRT de 2,496 Mbit/s pour le trajet d'émission «centrifuge» et effectue l'opération inverse pour le trajet de réception «centripète». Les signaux de la voie de service et les signaux de supervision/maintenance sont multiplexés/démultiplexés dans la TCU. Pour améliorer la fiabilité, on adopte généralement une configuration dédoublée (équipement en service et équipement en réserve). Par ailleurs, il existe une version non protégée pour les applications de coût modique. L'unité TCU peut être

implantée à une certaine distance du concentrateur BSCM, auquel elle est reliée par deux liaisons de communication au débit de 2,048 Mbit/s, avec des interfaces répondant aux spécifications de la Recommandation UIT-T G.703.

La partie radioélectrique ou MRT de l'unité TCU accomplit les fonctions suivantes:

- Elle transforme les deux trains de données de 2,048 Mbit/s fournis par le concentrateur en paquets de données pour la radiocommunication, et ajoute à ces données, par multiplexage, les signaux de commande, de supervision et de maintenance. Les données sont modulées et transmises à la station de répéteur la plus proche et, de là, à la (aux) station(s) de répéteurs suivante(s) et aux postes des abonnés, selon le cas.
- Elle effectue les opérations suivantes: réception des signaux RF AMRT en mode salves en provenance de la station de répéteur la plus proche; régénération des données en paquets; élimination des informations de commande, supervision et maintenance présentes dans les données en bande de base; enfin, conversion des signaux en deux trains de données à 2,048 Mbit/s et envoi de ces données au concentrateur.

Dans l'unité TCU, un processeur principal gère le transfert des données, côté TCU, entre la TCU et le module BSCM, pour la commande du protocole radioélectrique. Le convertisseur de trame transforme la trame MIC 2,048 Mbit/s de la bande de base pour la mettre au format 2,496 Mbit/s de la trame radioélectrique (sens centripète), et effectue l'opération inverse, de 2,496 Mbit/s à 2,048 Mbit/s (sens centrifuge). Il réalise aussi le multiplexage et le démultiplexage des trames radioélectriques, et supervise les erreurs de transmission.

Les 60 intervalles de temps sont transmis sur des porteuses radioélectriques modulées en MDPQ. La puissance de l'émetteur est généralement de l'ordre de 1 watt, fournie par un amplificateur à transistors, et le récepteur a un facteur de bruit d'environ 3 dB. Il fonctionne avec des TEB acceptables jusqu'à des niveaux s'abaissant aux alentours de -85 dBm. Selon la configuration du système, on utilise le plus souvent des antennes équidirectives (gain = 10 dB) ou des antennes paraboliques (gain = 32-37 dB) dont le diamètre peut aller jusqu'à 4 mètres.

• Les stations de répéteur

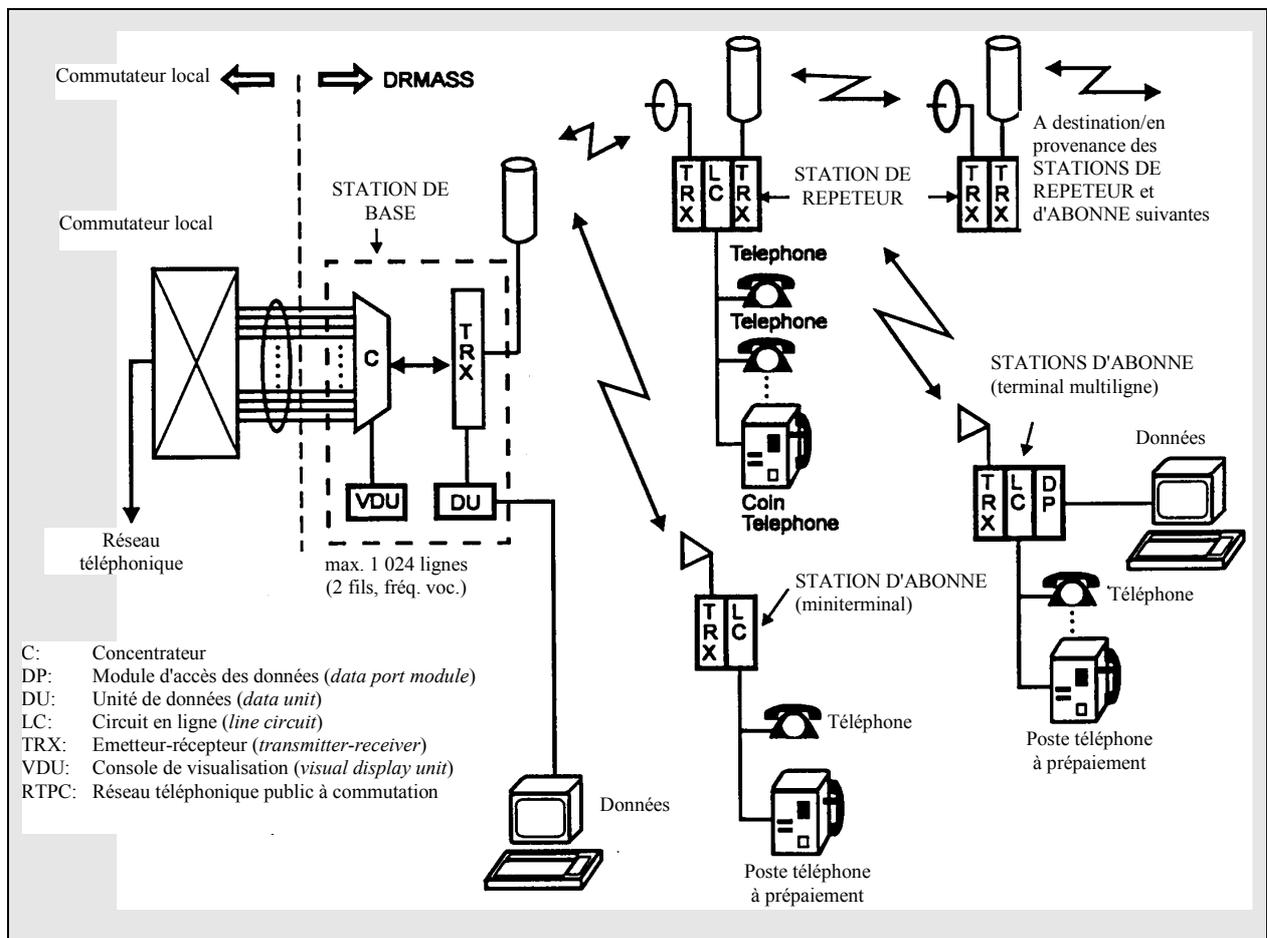
Les stations de répéteur ont deux fonctions. D'une part, une station de répéteur communique avec les abonnés résidant dans sa zone de couverture. Le nombre typique de ces abonnés est au total de 256. D'autre part, la station transmet l'appel au répéteur suivant si cet appel n'est pas destiné à l'un de ses propres abonnés. Il n'y a pas vraiment de limitation en ce qui concerne le nombre de répéteurs d'un système mais, pour des considérations d'ordre pratique, il est rare qu'un système DRMASS soit mis en œuvre avec plus de 23 répéteurs et sur des distances supérieures à 1 080 km.

La Figure 2.2.9 donne le schéma de principe d'une partie d'un système DRMASS type. La figure représente deux stations de répéteur et deux postes d'abonné (un miniterminal avec deux lignes téléphoniques desservies par la station de base et un terminal multiligne pouvant comporter jusqu'à 16 lignes téléphoniques, desservi par une station de répéteur).

La station de répéteur reçoit le train de signaux «centrifuge» émis par la station de base (ou par la station de répéteur précédente). Après avoir régénéré le signal, le répéteur le retransmet, sur une radiofréquence différente, non seulement aux postes d'abonné de sa zone de service, mais aussi aux répéteurs avoisinants. Le signal «centripète» est transmis à la station de base en sens inverse.

L'utilisation multiple de répéteurs permet d'élargir la zone de service pratiquement jusqu'à une distance quelconque sans dégradation sensible de la qualité des signaux. La raison en est que l'on procède par transmission numérique avec régénération des signaux.

Figure 2.2.9 – Représentation partielle du système DRMASS



Une station de répéteur peut être mise en œuvre en tant qu'installation intérieure ou extérieure. Les principaux éléments de l'équipement sont le répéteur proprement dit, pour la réception, la régénération et la retransmission des signaux RF, et une ou plusieurs unités d'extraction. Une unité d'extraction dessert en général 64 abonnés dans une station de répéteur extérieure. Les répéteurs intérieurs peuvent comporter jusqu'à quatre unités d'extraction et desservir 256 abonnés.

• Les stations d'abonné

Une station d'abonné peut être un terminal multiligne ou un miniterminal. Une station d'abonné multiligne se compose d'une SU (*subscriber unit*: unité d'abonné) et d'une DOU (*drop-out unit*: unité d'extraction) avec une capacité pouvant atteindre 64 abonnés dans le cas des répéteurs extérieurs. Il existe une autre formule, avec un ensemble constitué par un bâti d'abonné (SRM: *subscriber rack mount*) et un bâti d'extraction (DORM: *drop-out rack mount*) ayant une capacité pouvant aller jusqu'à 256 abonnés (répéteur intérieur). Le miniterminal intérieur est utilisé pour de petites capacités d'abonnés (il se compose en général d'un poste téléphonique et d'une ligne téléphonique à prépaiement).

La technologie LSI permet d'abaisser fortement la consommation d'énergie des unités d'abonné, d'où la possibilité d'utiliser l'énergie solaire pour ces terminaux. L'équipement du terminal et le système d'alimentation en énergie solaire, y compris les batteries d'accumulateurs, peuvent être montés dans de petits coffrets, pour installation sur un mur d'un bâtiment existant ou sur un poteau d'antenne à l'extérieur.

Les fonctions d'une station d'abonné sont les suivantes:

- Réception des émissions radiofréquences de la station de base ou de la station de répéteur, régénération de l'information du signal téléphonique analogique transmis en 2 fils et retransmission de cette information vers la ligne d'abonné destinataire.
- Détection des demandes d'appel en provenance de la ligne d'abonné; transformation des signaux téléphoniques analogiques transmis sur deux fils en paquets de signaux RF qui sont ensuite transmis à la station de répéteur ou à la station de base.

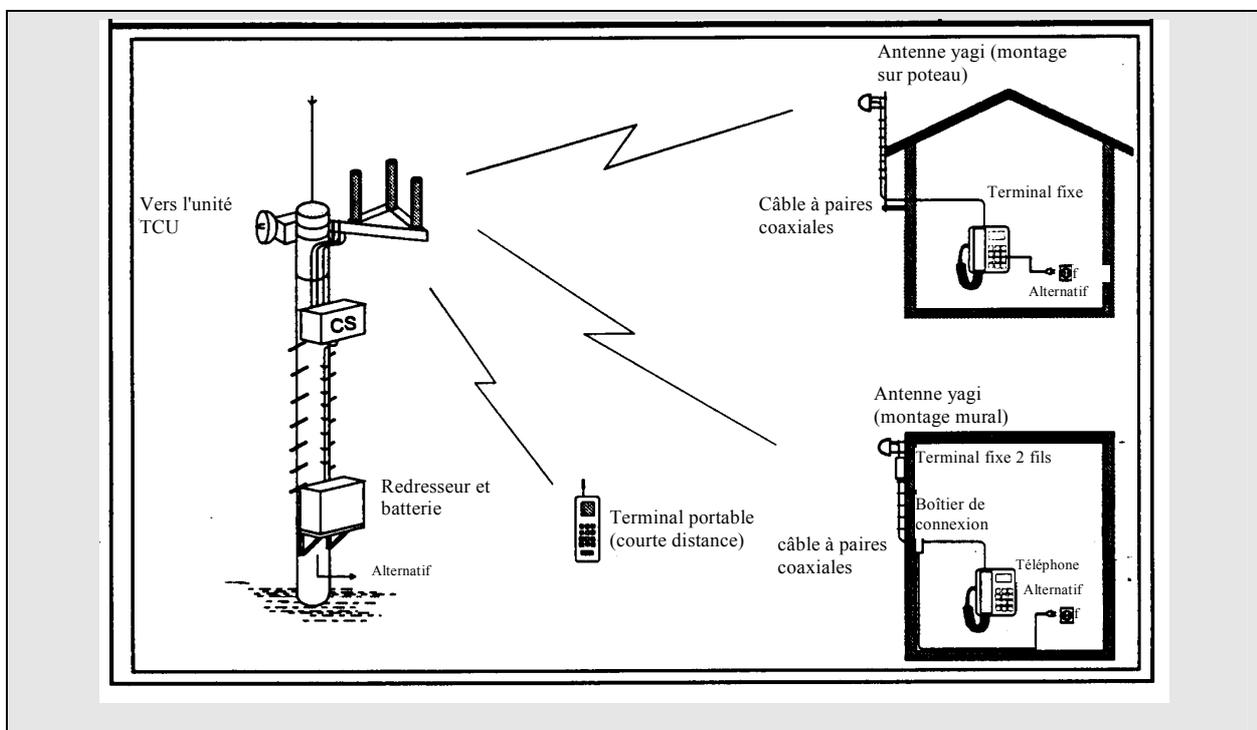
Les cartes «vocales» peuvent être remplacées par des cartes «accès données» pour l'obtention de voies de communication de données.

Le miniterminal convient bien à des sites où l'on peut se contenter d'une ou de deux lignes d'abonné. Ces lignes peuvent desservir des installations telles que les suivantes: deux postes téléphoniques, deux lignes téléphoniques à prépaiement, un poste téléphonique et une ligne à prépaiement, une ligne téléphonique et une ligne de transmission de données, ou une ligne téléphonique à prépaiement et une ligne de transmission de données.

• Stations cellulaires du système téléphonique numérique sans cordon (DCTS)²

Il est possible d'intégrer à un système radioélectrique d'abonnés de petits terminaux téléphoniques économiques, mobiles ou fixes, ayant une portée de fonctionnement limitée. Ces terminaux appliquent la technologie la plus moderne en matière de téléphonie numérique sans fil. Ils peuvent être utilisés à des distances de 3 à 5 km par rapport à une station cellulaire d'un système DCTS (*digital cordless telephone system*) dans le cas des terminaux fixes et à des distances allant jusqu'à 1 km environ pour les appareils portables. La Figure 2.2.10 représente schématiquement une station cellulaire dans laquelle tout le matériel électronique, y compris l'alimentation en énergie, est monté sur un poteau.

Figure 2.2.10 – Station cellulaire (CS) DCTS



² Voir également le Fascicule 2, Chapitre 4.

En général, les terminaux portables seront équipés d'une petite antenne fouet et les installations fixes d'une petite antenne yagi montée sur un poteau. Les terminaux fonctionnent en modulation MICDA (modulation par impulsions et codage différentiel adaptatif) à 32 kbit/s et le système est exploité avec assignation dynamique des voies. Les stations cellulaires DCTS fonctionnent également dans la bande des 1,9 GHz. Un maximum de 52 abonnés peuvent accéder à une station cellulaire en utilisant les techniques AMRT avec une charge de trafic de 0,1 erlang et un taux de blocage de 1%. Les services de transmission de données dans la bande vocale et de télécopie sont possibles à des débits pouvant aller jusqu'à 7,2 kbit/s.

- **Gestion centralisée de l'exploitation et de la maintenance**

Avec l'évolution de l'exploitation et de la maintenance des systèmes de communication modernes, les systèmes radioélectriques d'abonnés à accès multiple seront dotés de moyens centralisés automatiques pour l'exploitation et la maintenance. Cela est particulièrement important pour les télécommunications rurales, dans lesquelles tous les équipements fonctionnent sans surveillance directe, souvent dans des environnements hostiles, et dans lesquelles on ne dispose pas sur place de personnels techniques compétents, avec des interventions de maintenance qui se font attendre longtemps lorsqu'elles sont requises.

Un système centralisé d'exploitation et de maintenance est généralement installé à côté de l'équipement de la station de base; ce système contient des appareils pour la surveillance de l'état de fonctionnement de l'ensemble des équipements, leur maintenance et leurs essais. Plus précisément, à partir d'un point central, un opérateur devrait être en mesure de surveiller et de commander les fonctions relevant des domaines suivants:

- Etat et signalisation des alarmes.
- Essais des lignes d'abonné (résistance d'isolement, capacité électrique) et appels d'essai à certains abonnés.
- Etablissement de statistiques de trafic.
- Reconfiguration du système.

Toutes ces fonctions doivent être assurées à distance et commandées à partir de la station de base. Si un tel système est mis en œuvre parallèlement au système radioélectrique d'abonnés à accès multiple, il devient possible de faire fonctionner un système desservant 1 024 abonnés dans un rayon de 1 080 km autour de la station de base, avec un seul ingénieur de maintenance et un seul technicien, à condition que les équipements aient été conçus pour satisfaire aux exigences modernes en matière de moyenne des temps de bon fonctionnement (MTBF).

2.2.5 Réseaux de radiocommunications numériques

a) *Systèmes radioélectriques numériques à grande distance*

Les systèmes radioélectriques numériques à grande distance et grande capacité peuvent soutenir la concurrence des systèmes à fibres optiques, surtout en terrain difficile: régions montagneuses, traversée de lacs ou de fleuves, zones urbaines où les droits de passage sont onéreux ou impossibles à obtenir, ou dans les cas où la rapidité de mise en œuvre est un facteur important. Par ailleurs, il est possible de réutiliser pour ces systèmes numériques un vaste ensemble de tours et de bâtiments qui servaient précédemment pour les faisceaux hertziens analogiques faisant partie des réseaux de télécommunication de base nationaux. Les capacités en voies de ces systèmes représentent le maximum de ce que l'on peut réaliser avec les méthodes de modulation MAQ donnant un grand nombre d'états caractéristiques. Un système de commutation $n + 1$ permet d'exploiter de nombreux canaux sur une même artère. En raison des longues distances qui entrent en jeu, les bandes de fréquences basses (4 et 6 GHz) ont été largement utilisées dans nombre de pays.

b) *Systèmes radioélectriques numériques à courte distance*

De nos jours, on fait très souvent appel aux systèmes radioélectriques numériques dans tous les cas où la pose de câbles serait une opération difficile, coûteuse et trop longue. Ces systèmes peuvent être mis en place très rapidement, surtout s'il s'avère possible d'installer de petites antennes, peu visibles, sur des bâtiments ou des pylônes existants, et dans la mesure où les distances sont relativement courtes. Les équipements fonctionnant sur des fréquences supérieures à 15 GHz satisfont parfaitement à ces exigences parce qu'ils sont peu encombrants, robustes et économiques. La croissance exponentielle des réseaux cellulaires pour les radiocommunications mobiles a donné naissance à un vaste marché pour ces systèmes à ondes millimétriques. Ceux-ci réalisent la liaison entre les cellules par l'intermédiaire de centres de commutation mobiles (MSC: *mobile switching centres*) avec des capacités relativement petites: de 1-DS1 à 4-DS1 ou de 1-E1 à 4-E1. En raison de cette faible capacité, on ne prévoit pas toujours de protection; tout au plus est-elle effectuée, dans certains cas, par une commutation de secours automatique à action instantanée. Comme les bonds sont de faible longueur, il est inutile d'introduire la protection par diversité de fréquence ou d'espace contre les évanouissements de la propagation par trajets multiples. L'affaiblissement dû à la pluie est la cause principale d'interruption des signaux, qui peut être maintenue dans les limites fixées par l'UIT moyennant l'utilisation de systèmes radioélectriques à gain élevé et de bonds courts.

Pour des bonds plus longs, il faut avoir recours à des systèmes de faisceaux hertziens numériques utilisant des fréquences inférieures à 15 GHz. Aux Etats-Unis d'Amérique, les compagnies de production d'électricité et de gaz ont largement fait appel à la bande des 2 GHz pour leurs liaisons à faible capacité. Cette bande est à présent attribuée pour diverses utilisations des réseaux de communication personnelle, et les services de radiocommunication existants peuvent être redéployés dans la partie inférieure de la bande des 6 GHz (L6), dans la partie supérieure de cette même bande (U6) et dans la bande des 11 GHz, qui ont été ouvertes à l'utilisation des systèmes numériques à faible capacité. Les évanouissements dus à la pluie n'existent pas dans ces bandes qui, de ce fait, permettent des transmissions sur de grandes distances. Dans ce contexte, on utilise des systèmes de diversité d'espace et de fréquence pour remédier aux évanouissements dus à la propagation par trajets multiples, la diversité de fréquence étant généralement mise en œuvre sous la forme d'une commutation de protection du type $n + 1$. Par souci d'économiser le spectre, la FCC des Etats-Unis d'Amérique demande que le nombre n soit porté à 3, au minimum, dans les trois années qui suivent la mise en œuvre du système sur une relation. Cette prescription élimine l'utilisation permanente des systèmes de diversité de fréquence du type $1 + 1$. D'autres pays peuvent être amenés à édicter des règles différentes ou renoncer à réglementer en cette matière.

c) *Réseaux locaux hertziens (RLAN)*

Les activités commerciales basées sur l'informatique sont tributaires aujourd'hui, dans une large mesure, de l'infrastructure de communication fournie par les réseaux locaux (LAN: *local area networks*). Les LAN doivent être prolongés en ligne pour accompagner l'augmentation du nombre des utilisateurs de terminaux; ils doivent par conséquent être en mesure d'écouler le trafic en paquets afin de pouvoir se partager efficacement les ressources informatiques. Cependant, un réseau LAN câblé doit supporter de nombreuses contraintes en matière de coût, de maintenance et d'installation, en particulier, dans les réseaux à architecture compliquée.

Il existe de nombreux types de réseaux locaux hertziens (RLAN: *radio local area networks*), avec une mention spéciale pour ceux qui sont déjà en service ou qui seront réalisés dans l'avenir proche. Le Tableau 2.2.1 donne des exemples typiques de réseaux RLAN utilisant des bandes de fréquences supérieures à 1 GHz et dont le débit de données maximum dépasse 1 Mbit/s.

On trouvera dans le § 4.2.2.1 du Fascicule 2 des informations sur les technologies appliquées dans les boucles locales hertziennes.

Tableau 2.2.1 – Exemples de caractéristiques de RLAN

Bandes de fréquences	Système de modulation et/ou d'accès	Débit de données (typique)	Application	Portée ¹⁾ (typique)
403-470 MHz 806-869 MHz 946 MHz	MDF-4	19,2 kbit/s	Equipement d'abonné ARDIS ²⁾	Zone de service ARDIS
850 MHz (cellulaire)	MDF	14,4 kbit/s 9,6 kbit/s (télécopie)	Communications personnelles par téléphone cellulaire	Zone de service de téléphone cellulaire
902-928 MHz	Sauts de fréquence (MDF)	64 à 500 kbit/s	Réseaux de campus et réseaux privés, liaisons de données point à point	4 km
	Séquence directe	2 Mbit/s 215 kbit/s à 1,0 Mbit/s	Réseaux locaux portables Réseaux locaux Ethernet	250 m 100 à 1 000 m
	Etalement du spectre AMDC/AMDT	Débit de ligne 1,536 Mbit/s	Réseaux de communication personnelle	450 à 5 000 m ²
	Séquence directe avec sélection du canal de 1,5 MHz	60 kbit/s	Lecture de code-bar	120 à 210 m
	Séquence directe codé en treillis MDF	5,7 Mbit/s	Réseau local Ethernet (IEEE 802.3)	80 m
2,4 à 2,4835 GHz 2,4 à 2,485 GHz (émetteur-récepteur vers nœud) 5,745 à 5,830 GHz (central à émetteur-récepteur)	AMDC, séquence directe, sauts de fréquence Séquence directe, codé en treillis MDF-16	1 Mbit/s (approximativement) 5,7 Mbit/s	– Réseau local Ethernet (IEEE 802.3)	– 80 m
5,2 GHz	MDMG (BT = 0,4)	Débit de données brut: 24 Mbit/s	Réseaux locaux à hautes performances (HYPERLAN)	50 m
17,2 GHz	En cours de détermination	En cours de détermination	Réseaux locaux à hautes performances (HYPERLAN)	En cours de détermination
18,8 GHz 19,2 GHz	AMRT-TDD MDF-4	15 Mbit/s	Réseau local Ethernet	40 m (maximum)
19,5 GHz	AMRT-TDD MDF-4	25 Mbit/s	Réseau local Ethernet	40 m (maximum)

1) La portée en exploitation d'un réseau local hertzien peut varier fortement en fonction du débit de données, de la fréquence, de la puissance d'émission, de l'antenne et des conditions de propagation.

2) Service radioélectrique d'information par communication de données à hautes performances.

2.2.6 Publications de l'UIT

La Manuel de l'UIT-R intitulé Faisceaux hertziens numériques, publié en 1996, est une somme où l'on traite des principes de base, des paramètres de conception et des pratiques actuelles en matière de conception et d'ingénierie de ces faisceaux hertziens. Cet ouvrage est publié dans toutes les langues de l'UIT. Citons une autre publication utile de l'UIT, le Manuel sur les télécommunications rurales, Volume I – Systèmes radioélectriques utilisés dans les zones rurales, 1994.

2.2.7 Abréviations

ACQ/LOCAL CH	Voie d'acquisition et de maintenance locale (<i>acquisition and local maintenance channel</i>)
AMAD	Accès multiple avec assignation en fonction de la demande
AMDC	Accès multiple par différence de code
AMPS	Système téléphonique mobile perfectionné (<i>advanced mobile phone system</i>)
AMRT	Accès multiple par répartition dans le temps
ARDIS	Service radioélectrique par communication de données à haute performance (<i>advanced radio data information service</i>)
ATPC	Commande automatique de la puissance d'émission (<i>automatic transmission power control</i>)
BCM	Modulation codée par blocs (<i>block coded modulation</i>)
BSCM	Module de commande de la station de base (<i>base station controller module</i>)
C CH	Voie de commande (<i>control channel</i>)
CMOS	Semi-conducteur complémentaire à oxydes métalliques (<i>complementary metal oxide semiconductor</i>)
CRC	Contrôle à redondance cyclique
CRR	Conférence régionale des radiocommunications
DCS	Système cellulaire numérique (<i>digital cellular system</i>)
DCTS	Système téléphonique numérique sans cordon (<i>digital cordless telephone system</i>)
DMR	Relais hertzien numérique à hyperfréquences (<i>digital microwave relay</i>)
DORM	Bâti d'extraction (<i>drop-out rack mount</i>)
DOU	Unité d'extraction (<i>drop-out unit</i>)
DRMASS	Système radioélectrique numérique d'abonné à accès multiple (<i>digital radio multiple access subscriber system</i>)
DTMF	Multifréquence bitonalité (<i>dual tone multi-frequency</i>)
DU	Unité de données (<i>data unit</i>)
ERD	Egalisateur récursif avec décision
ESPM	Estimation de la séquence de probabilité maximale
ETS	Norme européenne de télécommunications (<i>european telecommunication standard</i>)
FCC	Federal Communications Commission (Etats-Unis)
FD	Diversité de fréquence (<i>frequency diversity</i>)
FHN	Faisceau hertzien numérique
FI	Fréquence intermédiaire
HIC	Circuit intégré hybride (<i>hybrid integrated circuit</i>)
IC	Circuit intégré (<i>integrated circuit</i>)
LAN	Réseau local (<i>local area network</i>)
LC	Circuit en ligne (<i>line circuit</i>)
LEO	Orbite terrestre basse (<i>low earth orbit</i>)
LOEM	Module en boucle unidirectionnel (<i>loop open end module</i>)
LSI	Intégration à grande échelle (<i>large scale integration</i>)
MAQ	Modulation d'amplitude en quadrature

MCNM	Modulation avec codage à niveaux multiples
MCT	Modulation à codage en treillis
MDP	Modulation par déplacement de phase
MDPQ	Modulation par déplacement de phase en quadrature
MEO	Orbite terrestre moyenne (<i>medium earth orbit</i>)
MIC	Circuit intégré pour micro-ondes (<i>microwave integrated circuits</i>)
MIC	Modulation par impulsions et codage
MICDA	Modulation par impulsions et codage différentiel adaptatif
MRT	Multiplexage par répartition dans le temps
MSC	Centre de commutation mobile (<i>mobile switching centre</i>)
MTBF	Moyenne des temps de bon fonctionnement
NMS	Système de gestion du réseau (<i>network management system</i>)
OCH	Voie de service (<i>orderwire channel</i>)
PDH	Hierarchie numérique plésiochrone (<i>plesiochronous digital hierarchy</i>)
RCP	Réseau de communication personnelle
RF	Radiofréquence; fréquence radioélectrique
RFCOH	Préfixe complémentaire de trame hertzienne; trame complémentaire pour faisceaux hertziens (<i>radio frame complementary overhead</i>)
RLAN	Réseau local hertzien (<i>radio local area network</i>)
RNIS	Réseau numérique à intégration de services
RR	Règlement des radiocommunications
SBCP	Suppresseur de brouillage contrapolaire
SCADA	Surveillance et acquisition de données (<i>supervisory control and data acquisition</i>)
SD	Diversité d'espace (<i>space diversity</i>)
SDH	Hierarchie numérique synchrone (<i>synchronous digital hierarchy</i>)
SOH	Préfixe de section (<i>section overhead</i>)
SONET	Réseau optique synchrone (<i>synchronous optical network</i>)
SRM	Bâti d'abonné (<i>subscriber rack mount</i>)
STM-1	Module de transport synchrone d'ordre 1 (<i>synchronous transport module level 1</i>)
SU	Unité d'abonné (<i>subscriber unit</i>)
SV CH	Voie de supervision (<i>supervisory channel</i>)
TCU	Unité de commande MRT (<i>TDM controller unit</i>)
TEB	Taux d'erreur binaire
TELEX CH	Voie télex (<i>telex channel</i>)
UIT	Union internationale des télécommunications
UIT-R	Union internationale des télécommunications – Radiocommunications
V CH	Voie téléphonique (<i>voice channel</i>)
VSAT	Microstation (<i>very small aperture terminal</i>)
XPD	Discrimination de polarisation; rapport de découplage (<i>cross polarisation discrimination</i>)
XPDo	Discrimination de polarisation dans les conditions normales (<i>cross polarisation discrimination in normal condition</i>)

2.3 Systèmes de communication mobiles

2.3.1 Introduction

Les systèmes de radiocommunication mobiles offrent de multiples possibilités à leurs usagers: se déplacer librement dans la zone de service et pouvoir communiquer avec tout abonné des services de téléphonie, de télécopie, de transmission de données et de courrier électronique, où qu'il se trouve dans le monde; déterminer eux-mêmes leur position; suivre les mouvements de cargaisons de marchandises de grande valeur; améliorer la gestion de parcs de véhicules et la distribution de marchandises; améliorer la sécurité du trafic; mettre en place des liaisons de communication vitales dans des situations d'urgence, des opérations de recherche et de secours; ect. Ces communications *sans lien (hertziennes, sans fil)*, ces échanges d'information, cette détermination de positions, d'itinéraires et de distances parcourues, etc., sont possibles grâce à la propriété spécifique des radiocommunications d'utiliser un *aérien (antenne)* pour rayonner et recevoir les ondes électromagnétiques. Dans les cas où l'antenne radioélectrique de l'utilisateur est immobile pendant une longue période, on parle de *radiocommunications fixes*; un émetteur-récepteur pouvant être transporté ou déplacé, mais restant immobile lorsqu'il fonctionne, est un *appareil de radiocommunication portatif*; un émetteur-récepteur pouvant être transporté et utilisé par un véhicule ou par une personne en déplacement est un *appareil de radiocommunications mobiles*. Les usagers des radiocommunications peuvent communiquer soit directement, soit en passant par un ou plusieurs intermédiaires qui peuvent être un ou plusieurs *répéteur(s) radioélectrique(s) passif(s), station(s) de base* ou *commutateur(s)*. Si tous les intermédiaires sont situés sur la surface terrestre, on dit qu'on a affaire à un *système de radiocommunication (faisceau hertzien) de terre* ou *système radioélectrique*; si l'un au moins des intermédiaires est placé dans un satellite, on a un *système de radiocommunication par satellite* ou *système à satellites*. Selon l'endroit où se trouve l'utilisateur, on distingue les systèmes de radiocommunications *terrestres, maritimes, aéronautiques, spatiales* et pour *l'espace lointain*. La seconde propriété spécifique de tous les systèmes de radiocommunication, de terre et par satellite, est qu'ils utilisent tous en partage la même ressource naturelle: les *ondes hertziennes* (les *bandes de fréquences et l'espace*).

Les progrès accomplis récemment dans les domaines des **circuits intégrés monolithiques pour hyperfréquences (MMIC: microwave monolithic integrated circuit)** des **circuits intégrés d'application (ASIC: application specific application circuit)**, du traitement des signaux analogiques/numériques (A/DSP: *analogue/digital signal processing*) et de la technologie des batteries d'accumulateurs, progrès reposant sur la **conception assistée par ordinateur (CAO)** et par la robotique pour la fabrication, permettant une mise en œuvre viable d'émetteurs-récepteurs radioélectriques miniaturisés. L'action continue et harmonieuse des forces du marché (stimulées par la perspective d'innombrables services nouveaux et de profits importants); des instances internationales et nationales de normalisation (qui gèrent la ressource naturelle commune: les ondes hertziennes et des organismes techniques (capables de réaliser des produits viables) a conduit à la création d'une grande diversité de systèmes de communication (signaux vocaux et données), d'information et de navigation qui sont à l'origine d'une croissance exponentielle des services de radiocommunication mobiles au bénéfice des voyageurs.

Les termes service (de radiocommunication) fixe et service (de radiocommunication) mobile sont définis dans le Règlement des radiocommunications de l'UIT:

Service fixe: service de radiocommunication entre points fixes déterminés.

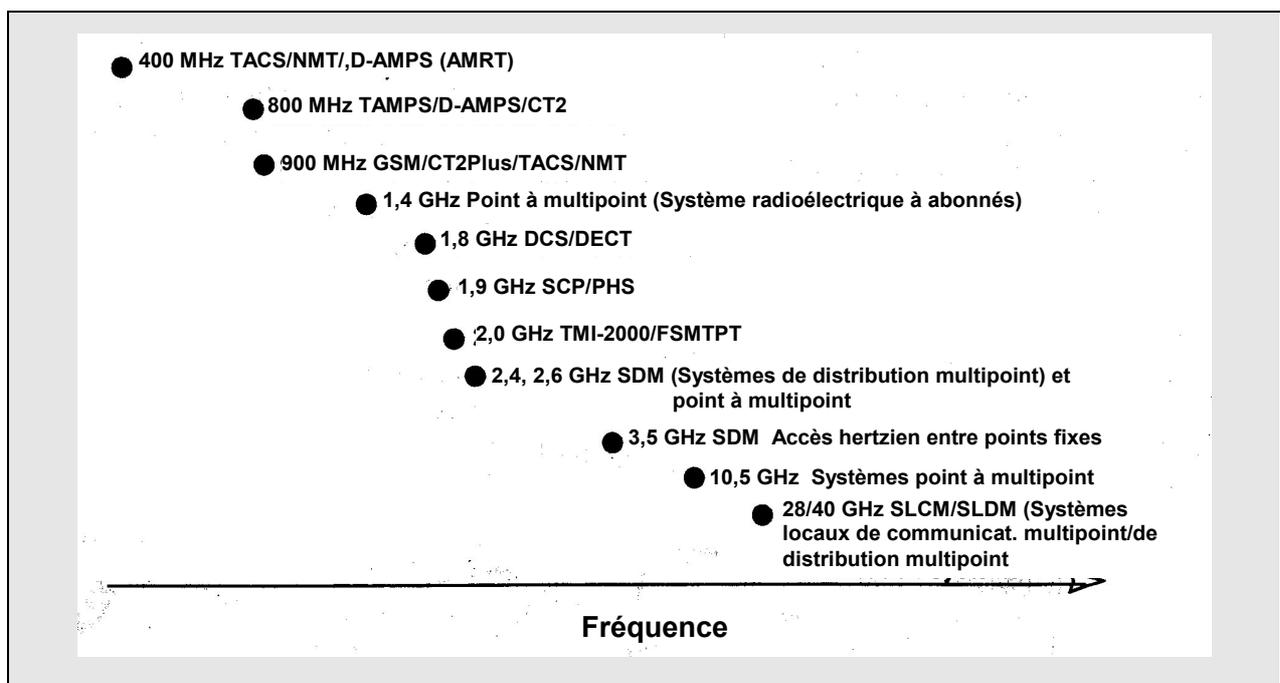
Service mobile: service de radiocommunication entre stations mobiles et stations terrestres, ou entre stations mobiles.

Ces définitions sont, en fait, à la base de l'attribution des fréquences du spectre radioélectrique, sur le plan international par l'UIT, comme aussi sur le plan national dans chaque pays. Dans l'ensemble, l'UIT a fait des attributions communes aux services fixe et mobile dans diverses bandes de fréquences. Dans quelques pays, un choix a été fait, selon une certaine tradition, entre les deux services.

2.3.2 Le spectre des fréquences radioélectriques

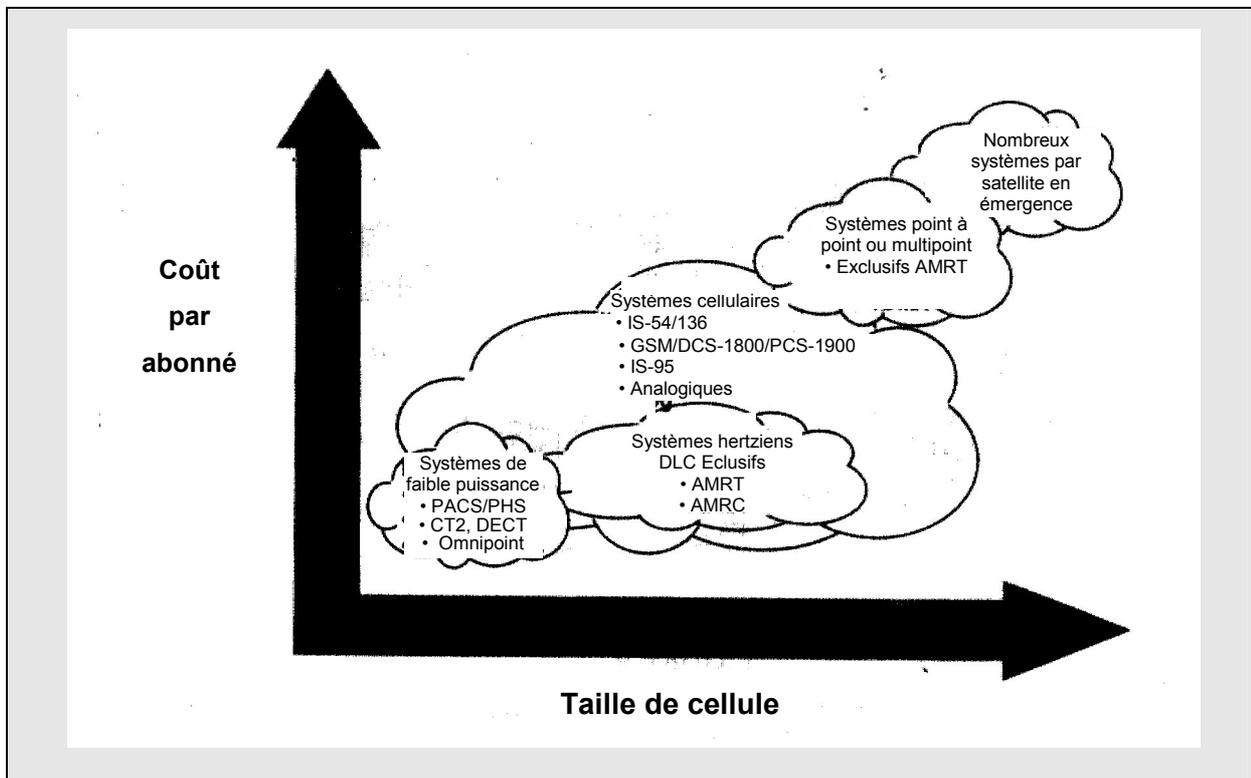
Les paramètres fondamentaux à la base de la conception d'un réseau hertzien sont l'évolution de la densité téléphonique dans le temps et les caractéristiques de l'utilisation par les abonnés (par exemple, nombre d'erlangs par abonné). Ces variables déterminent la densité de trafic (par exemple, erlangs par kilomètre carré) que le système hertzien doit prendre en charge. La capacité de transport de trafic d'un système radioélectrique dépend de la disponibilité du spectre, du découpage en canaux dans la technologie utilisée pour l'accès radioélectrique, de la mesure dans laquelle les fréquences peuvent être réutilisées et de la taille des cellules. Du point de vue de la planification radioélectrique pour les réseaux, les systèmes à accès hertzien sont implantés de la même manière que les systèmes cellulaires, même si les exigences en matière de densité téléphonique peuvent être différentes. Il faut examiner les besoins de fréquences radioélectriques et la disponibilité de ces fréquences. La Figure 2.3.1 indique les bandes du spectre radioélectrique dans lesquelles des systèmes fixes à accès hertzien fonctionnent dans certains pays. Les conditions exactes de disponibilité du spectre pour ces applications sont fixées par des règlements locaux. Par exemple, en plus des bandes des 1,4 et des 2,4/2,6 GHz, la CEPT et l'ETSI ont autorisé l'utilisation de la bande des 3,5 GHz, ainsi que la bande des 10,5 GHz en Europe. Par ailleurs, on étudie actuellement l'utilisation de la bande 3,4-3,7 GHz pour l'accès hertzien dans certains pays de la Région 2. Les applications indiquées dans la Figure 2.3.1 pour diverses bandes de fréquences peuvent porter des noms différents, selon l'utilisation traditionnelle de ces bandes. Toutefois, le dénominateur commun est l'accès hertzien, qui peut présenter un grand nombre de modalités différentes, en fonction des possibilités offertes pour le transport des signaux (par exemple, signaux vocaux, données, images, vidéo), nature des services (par exemple, seulement fixe, mixte fixe/mobile, itinérant) et de la distance (par exemple, utilisation de répéteurs).

Figure 2.3.1 – Exemples de bandes du spectre radioélectrique utilisées pour l'accès hertzien



La technologie doit être choisie en fonction de la capacité requise et des impératifs de coût, comme le montre la Figure 2.3.2.

Figure 2.3.2 – Correspondance entre les technologies et les exigences



2.3.3 Systèmes de terre

Dans un réseau de radiocommunication mobile de terre, il était courant d'installer un répéteur au point le plus élevé de la région, ce qui donnait une zone de service de superficie maximale. Avec l'augmentation du nombre des usagers, le spectre disponible ne suffisait plus à écouler le volume de trafic croissant et il fallut recourir à la réutilisation des fréquences. La zone de service fut divisée en un grand nombre de sous-zones, appelées cellules, et on vit apparaître l'expression «radiocommunications cellulaires». La réutilisation des fréquences permet d'accroître la capacité d'un système et de petites cellules contribuent à améliorer la qualité, mais au prix d'une plus grande complexité du terminal de l'utilisateur et de l'infrastructure du réseau. La forme et la taille d'un réseau cellulaire dépendent d'un certain nombre de facteurs: les compromis à faire entre disponibilité des terrains (stations de base) et coûts, le prix des équipements (stations de base et stations mobiles), la complexité du réseau et la dynamique de la mise en œuvre.

2.3.3.1 Technologies cellulaires analogiques

La modulation cellulaire analogique repose sur le principe de la modulation de fréquence (MF). Les signaux de parole à transmettre modulent l'onde porteuse, dont ils font varier l'amplitude et la fréquence. Dans la plupart des systèmes cellulaires analogiques, on utilise la modulation de fréquence (MF) pour les signaux de parole et la modulation par déplacement de fréquence (MDF) pour les données. Dans ces systèmes, un canal de trafic est généralement réalisé par modulation d'une seule radiofréquence.

Le Tableau 2.3.1 présente quelques systèmes de radiocommunication cellulaires analogiques: AMPS (Amérique du Nord), systèmes terrestres MCS-L1 et MCS-L2 (Japon), NMT-900 (pays nordiques), C450 (Allemagne) et TACS (Royaume-Uni).

Tableau 2.3.1 – Comparaison des systèmes de radiocommunication

Caractéristique	AMPS	MCS-L1 MCS-L2	NMT	C450	TACS
Fréq. d'émiss., MHz					
Base	869-894	870-885	935-960	461-466	935-960
Mobile	824-849	925-940	890-915	451-456	890-915
Accès multiple	AMRF	AMRF	AMRF	AMRF	AMRF
AMRF	DRF	DRF	DRF	DRF	DRF
Méthode duplex	30,0	25,0 12,5	12,5	20,0 10,0	25,0
Largeur de bande des voies, kHz					
Nombre de voies de trafic par canal radioélectrique	1	1	1	1	1
Nombre total de voies de trafic	832	600 1 200	1 999	222 444	1 000
Modulation vocale	Analogique	Analogique	Analogique	Analogique	Analogique
Compression syllabique	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1
Débit des signaux de parole, kbit/s	–	–	–	–	–
Modulation	MP	MP	MP	MP	MP
Excursion de crête, kHz	±12	±5	±5	±4	±9.5
Débit de voie, kbit/s	–	–	–	–	–
Commande	Numérique	Numérique	Numérique	Numérique	Numérique
Modulation	MDF	MDF	MDF	MDF	MDF
Forme d'onde bande de base	Manch.	Manch.	Manch.	Manch.	Manch.
Excursion de crête, kHz	±8	±4,5	±3,5	±2,5	±6,4
Débit de voie, kbit/s	10,0	0,3	1,2	5,3	8,0
Codage de voie	BCH	BCH	B 1	BCH	BCH
Base-mobile	(40,28)	(43,31)	Salve	(15,7)	(40,28)
Mobile-base	(48,36)	a.(43,31) p.(11,07)	Salve	(15,7)	(48,36)

- **AMPS – Système téléphonique mobile perfectionné**

L'interface hertzienne de l'AMPS (*advanced mobile phone system*) est spécifiée actuellement par l'*American National Standards Institute*, l'*Electronic Industries Association* (EIA) et la *Telecommunication Industry Association* (TIA). La version actuelle porte la désignation EIA/TIA-553.

- **NMT – Système téléphonique mobile nordique**

Les systèmes nordiques sont conçus pour fonctionner dans la bande 400-470 MHz. Mis au point à la fin des années 70, le NMT était opérationnel dès avant la mise en œuvre des systèmes cellulaires. Il fonctionne de la même manière qu'un système cellulaire et est en exploitation en Islande, Suède, Finlande, Suisse et aux Pays-Bas. Une version modifiée est aussi utilisée au Danemark.

- **TACS – Système de communication à accès total**

Le TACS (*total access communication system*) est un système occupant un spectre de 15 MHz qui est utilisé en Europe, dans quelques régions d'Asie, au Moyen-Orient et en Afrique.

Espacement des voies	25 kHz
Espacement duplex	45 MHz
<i>Gamme de fréquences pour les voies:</i>	
Réception base/émission mobile	890,0125-904,9875 MHz
Emission base/réception mobile	935,0125-949,9875 MHz
Nombre total de voies téléphoniques	558
Voies de signalisation	42

- **E-TACS – Système élargi de communication à accès total**

L'E-TACS (*expanded total access communication system*), qui ajoute 16 MHz au spectre du système TACS existant, est considéré comme une extension du TACS, mais sans voies de signalisation supplémentaires. 640 voies téléphoniques sont attribuées: 320 pour la bande A et 320 pour la bande B. Les fréquences d'émission et de réception sont espacées de 45 MHz.

Espacement des voies	25 kHz
Espacement duplex	45 MHz
<i>Gamme de fréquences pour les voies:</i>	
Réception base/émission mobile	872,0125-887,9875 MHz
Emission base/réception mobile	917,0125-932,4975 MHz
Nombre total de nouvelles voies téléphoniques	640
Nombre total de voies téléphoniques (TACS + E-TACS)	1198

- **J-TACS – Système japonais de communication à accès total, et N-TACS – Système de communication à accès total à bande étroite**

Les systèmes J-TACS (*japanese total access communication system*) et N-TACS (*narrow-band total access communication system*) sont des systèmes à une seule bande de fréquences utilisés actuellement au Japon. La bande occupe en tout 10 MHz de spectre, ce qui donne un total de 800 voies. Dans ces systèmes, les voies ne sont pas scindées en bandes séparées (A ou B). Dans la spécification initiale, J-TACS, seules les voies paires étaient utilisées. Les voies impaires ont été mises en service lors de l'application de la spécification N-TACS (bande étroite).

Espacement des voies	25 kHz
Espacement duplex	545 MHz
<i>Gamme de fréquences pour les voies téléphoniques et les voies de signalisation:</i>	
Réception base/émission mobile	915,025-924,475 MHz
Emission base/réception mobile	860,025-869,975 MHz
Voies téléphoniques: N-TACS	752 J-TACS 376
Voies de signalisation: N-TACS	48 J-TACS 24

Les stations fonctionnant dans les cellules des systèmes J-TACS/N-TACS reçoivent sur les fréquences supérieures du spectre attribué et émettent sur les fréquences inférieures de ce spectre. La situation est inversée pour les fréquences d'émission et de réception de ces stations dans les systèmes AMPS et TACS. Il en va de même pour les unités d'abonnés des systèmes TACS et AMPS: ces unités ne peuvent pas être utilisées dans les systèmes J-TACS et N-TACS.

- **Système universel de communication à accès total (U-TACS)**

Le système U-TACS (*universal total access communication system*) est utilisé en Europe, dans quelques régions d'Asie, au Moyen-Orient, en Chine et en Afrique. Ce système occupe un spectre de 15 MHz, avec un espacement de 25 kHz entre les voies, et fournit jusqu'à 920 voies. Le spectre de fréquences et la répartition en voies de U-TACS sont les mêmes que dans la combinaison TACS/E-TACS, sauf dans les 8 MHz inférieures des spectres. Avec 8 MHz de spectre en moins, U-TACS dispose de 320 voies en moins.

2.3.3.2 Systèmes de deuxième génération

Etudiés pendant les années 80, tous les systèmes de communication mobiles dits de deuxième génération sont des systèmes numériques. Pour les appels téléphoniques, les signaux vocaux codés sont transmis sur l'interface hertzienne avec utilisation d'un des nombreux procédés de modulation numérique disponibles. La complexité du traitement nécessaire pour ces systèmes numériques est compensée par deux avantages:

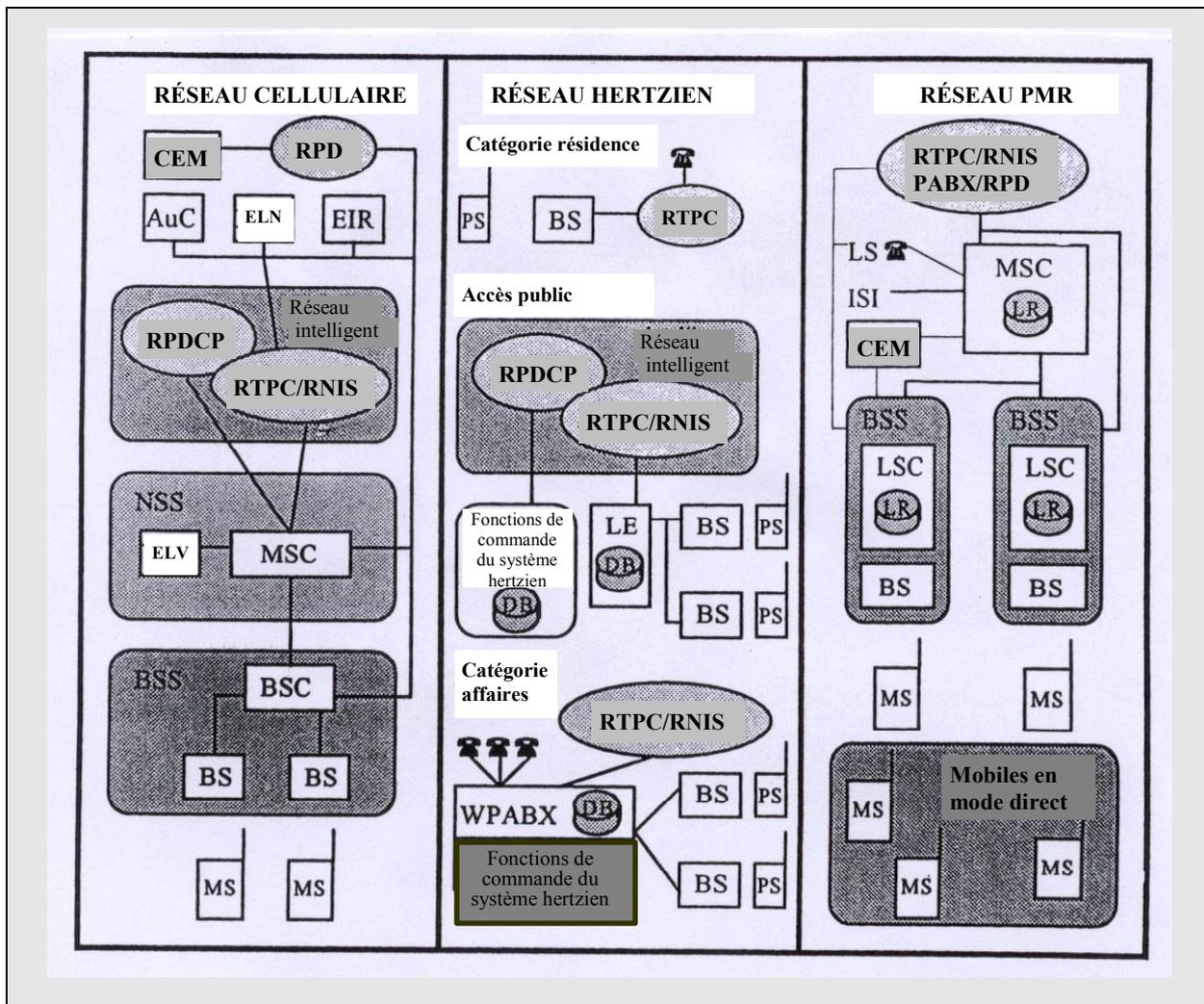
- 1) la possibilité d'utiliser des méthodes de transmission radioélectrique économes en spectre (par exemple, l'accès multiple par répartition dans le temps [AMRT] ou l'accès multiple par différence de code [AMDC]), comparées à la méthode analogique d'accès multiple par répartition en fréquence (AMRF), utilisée précédemment;
- 2) la possibilité de mettre en œuvre toute une série de services (intégrés) de téléphonie et de transmission de données ainsi que des dispositions de sécurité (par exemple, chiffrement).

La Figure 2.3.3 représente des architectures types de réseaux cellulaires, hertziens et radiotéléphoniques mobiles privés (PMR). Il s'agit de modèles de référence qui ne s'appliquent pas toujours complètement à tous les systèmes décrits plus loin.

Dans les systèmes cellulaires, le sous-système station de base (BSS) comprend une unité de commande de station de base (BSC) et des émetteurs-récepteurs radioélectriques (BS ou BTS) qui assurent la radiocommunication avec les stations mobiles (MS) dans la zone couverte. Le sous-système réseau (NSS: *network subsystem*) comprend un équipement de commutation mobile spécialisé (MSC: *mobile switching equipment*) qui relie tous les éléments du système par l'intermédiaire de lignes louées qui aboutissent au RTPC, au RNIS et au réseau public pour données à commutation par paquets (RPDCP). Les registres de localisation et de rattachement (HLR: *home location registers*) et les registres de localisation des visiteurs (VLR: *visitor location registers*) sont des bases de données qui contiennent des informations sur les abonnés mobiles et qui servent à l'enregistrement des abonnés et à la gestion de la mobilité. Des copies des clés de secret des abonnés sont stockées dans le centre d'authentification (AuC) et les numéros de série des équipements sont mémorisés dans l'enregistreur d'identité des équipements (EIR). Le Système de signalisation N° 7 de l'UIT-T (SS 7) et les protocoles d'application correspondants sont souvent utilisés dans le réseau mobile. Le centre d'exploitation et de maintenance (CEM) assure l'exploitation, la commande et la maintenance de tous les éléments du réseau.

L'architecture d'un réseau hertzien dépend de l'application. Dans la catégorie résidence, la station portable (PS) se comporte comme un poste téléphonique et accède directement au RTPC par l'intermédiaire de la station de base (BS) privée. Dans un système à accès public, les BS sont reliées à un commutateur local (LE: *local exchange*) qui contient une base de données (DB) locale servant à l'enregistrement des abonnés et à la gestion de la mobilité dans la zone couverte. Les commutateurs locaux sont reliés au RTPC/RNIS (pour l'acheminement du trafic) et à des éléments centralisés du système hertzien par l'intermédiaire du RPDCP (pour les besoins de la signalisation). Ces éléments centralisés accomplissent des fonctions de commande (identification des usagers, taxation, gestion du réseau) et peuvent contenir une base de données centralisée qui stocke les mises à jour des localisations des abonnés, permettant ainsi l'acheminement des appels entrants. Pour des applications commerciales, on peut utiliser le même autocommutateur privé (PABX) pour l'accès par fil et l'accès hertzien. Le PABX hertzien (WPABX: *wireless PABX*) réalise l'interconnexion des stations de base (BS) du réseau privé, de sorte que les abonnés d'un réseau hertzien peuvent avoir accès soit à d'autres abonnés de réseaux en fil privés, soit au RTPC/RNIS. Le WPABX contient en général la base de données (DB) abonnés et accomplit les fonctions de commande du système hertzien.

Figure 2.3.3 – Modèles de référence des réseaux



L'architecture d'un réseau PMR est assez semblable à celle des réseaux cellulaires, mais le sous-système station de base (BSS) se compose ici d'un seul équipement qui intègre la station de base (BS) et l'unité de commande de la station locale (LSC: *local station controller*). Comme la LSC contient une copie de l'enregistrement des localisations d'abonnés (LR: *location register*), les communications locales (qui représentent une proportion importante du trafic) peuvent être établies et acheminées dans le sous-système BSS; on a ainsi des temps d'établissement courts et la possibilité de maintenir l'exploitation locale, même dans le mode de repli, en cas d'interruption de la liaison BSS-MSC. Les appels entre stations sont acheminés par le centre de commutation mobile (MSC: *mobile switching centre*) et l'accès à d'autres réseaux (RTPC/RNIS/RPD) ou à d'autres installations (PABX) peut être réalisé au niveau MSC ou BSS. Les stations en ligne (LS) peuvent être reliées soit directement au BSS ou au MSC, soit par l'intermédiaire d'un réseau (par exemple, RNIS). L'interface intersystèmes (ISSI) permet l'interfonctionnement de différents réseaux PMR appliquant la même norme. Les mobiles peuvent aussi communiquer en simplex direct (mode direct), soit en autonome, soit en restant en contact avec le réseau (double veille).

Le Tableau 2.3.2 donne les spécifications des principaux systèmes de deuxième génération.

Tableau 2.3.2 – Caractéristiques des interfaces hertziennes des systèmes de deuxième génération

Norme	Systèmes cellulaires				Systèmes hertziens			Systèmes PMR	
	GSM1800 (DCS)	IS-54	IS-95	PDC	CT2	DECT	PHPS	TETRA	APCO Projet 25
Bande de fréquences (MHz)	Europe	USA	USA	Japon	Europe et Asie	Europe	Japon	Europe	USA.
Liaison centripète	890-915 (1 710-1 785)	824-849	824-849	940-956 (1 429-1 441, 1 453-1 465)	864-868	1880-1900	1 895-1 907	380-400?	Diverses bandes, par exemple 150-170
Liaison centrifuge	935-960 (1 805-1 880)	869-894	869-894	810-826 (1 477-1 489, 1 501-1 513)					~800
Espacement duplex (MHz)	45 (95)	45	45	130 (48)	–	–	–	10?	?
Espacement porteuses (kHz)	200	30	1250	25	100	1728	300	25	12,5 (6,25)
Nombre de canaux radioélectr. dans la bande de fréquences	124 (DCS: 374)	832	20	640	40	10	77	?	Plusieurs centaines de couples de canaux
Accès multiple	AMRT	AMRT	AMDC	AMRT	AMRF	AMRT	AMRT	AMRT	AMRF
Mode duplex	DRF	DRF	DRF	DRF	DRT	DRT	DRT	DRF	DRF
Nombre de canaux par porteuse	(Débit moitié: 16)	(Débit moitié: 6)	MABC	(Débit moitié: 6)	1	12	4	4	1
Modulation	MDMG	MDPQD $\pi/4$	MDPQD $\pi/4$ MDPQD $\pi/2$	MDPQ MDPB.	MDFG	MDFG	MDPQ MDPB	MDPQ MDPB	C4FM ou MDPQC
Débit binaire porteuse (kbit/s)	270,8	48,6	1 288	42	72	1 152	384	36	9,6
Codeur parole – Débit binaire net, kbit/s	RPE-LTP 13	VSELP 7,95	QCELP (débit variable: 8, 4, 2, 1)	VSELP 6,7	MICDA 32	MICDA 32	MICDA 32	ACELP 4,5	IMBE 4,4
Codeur de voie pour voies téléphoniques	Convol. 1/2 + CRC	Convol. 1/2 + CRC	Convol. Débit 1/2 (centrifuge) 1/3 (centripète) + CRC	Convol. 1/2 + CRC	Non	Non	Non	Convol. 2/3 et 4/9 + CRC	Codes de Golay et de Hamming
Débit binaire brut Codage parole + voies (kbit/s)	22,8	13	Débit variable 19,2, 9,6, 4,8, 2,4	11,2	–	–	–	7,2	7,2
Durée trame (ms)	4,6	40	20	20	2	10	5	57	20
Puiss. d'émission des stat. mobiles	Valeur crête moy.	Valeur crête moy.		Valeur crête moy.	Valeur crête moy.	Valeur crête moy.	Valeur crête moy.	Valeur crête moy.	?
	20 2,5	9 3	0,6 2	0,66 0,01	0,005 0,25	0,01 0,08	0,01 10	10 2,5	
	8 1	4,8 1,6						3 0,7	
	5 0,62 5	1,8 1,6						1 2,5	
	2 0,25								
	DCS1800								
	8 0,12 5								
	0,25 0,03 1								
Régulat. de puiss. stat. mob./station de base	Oui	Oui	Oui	Oui	Mode faible puiss. dans stat. mob.	Non	Oui	Oui	Non
Control BS	Oui	Oui	Oui	Oui		Non	Oui	Non	Non
C/I opérationnel (dB)	9	16	6	17	20	12	26	19	?
Egaliseur	Nécessaire	Nécessaire	Récepteur Rake	Option	Non	Option	Non	Option	Non
Transfert de trafic	Oui	Oui	Transfert progressif	Oui	Non	Oui	Oui	Option	Option

2.3.3.2.1 Réseaux mobiles cellulaires numériques

2.3.3.2.1.1 Système mondial de communications mobiles/système cellulaire numérique 1800 (GSM/DCS 1800)

La norme GSM a été édictée par l'Institut européen des normes de télécommunications (ETSI) pour les services paneuropéens de radiocommunications mobiles cellulaires numériques. Elle avait pour objet de répondre au besoin d'une norme commune applicable aux télécommunications mobiles dans l'ensemble de l'Europe, où l'on avait une diversité de systèmes cellulaires analogiques incompatibles entre eux, comme le Système téléphonique mobile nordique (NMT) et le Système de communication à accès total (TACS). Parmi les autres décisions importantes ouvrant la voie à un réseau européen, citons l'attribution d'une bande de fréquences paneuropéenne spécifique autour de 900 MHz et la signature d'un Mémorandum d'accord (MoU: *memorandum of understanding*) par des pays qui se sont engagés à mettre en œuvre des réseaux GSM nationaux avec possibilités d'interconnexion entre ces réseaux.

La phase 1 de la norme GSM, bouclée par l'ETSI en 1990, constitue la base des réseaux mis en œuvre actuellement. Elle rend possible la réalisation de toute une série de services de téléphonie et de transmission de données, qui sont progressivement mis à la disposition des usagers: téléphonie ordinaire, appels d'urgence, communications conférence, télécopie, messages courts et transmission de données à un certain nombre de débits allant jusqu'à 9 600 bit/s. Sont définis également des services supplémentaires tels que le renvoi des appels, l'interdiction d'appels et l'identification de la ligne connectée.

L'architecture des réseaux GSM applique de très près les principes généraux exposés dans la section précédente. Toutes les interfaces entre éléments de réseau ont été normalisées, y compris les interfaces entre les centres de commutation mobiles et les unités de contrôle des stations de base (MSC-BSC (A)) et les interfaces entre ces unités de contrôle et les interfaces (BSC-BTS (Abis)). Les interfaces AuC/ELN/EIR et RTPC/RNIS utilisent le Système de signalisation N° 7, avec le protocole du sous-système application mobile (SSAM) pour la signalisation non liée aux circuits. Cette architecture, qui fait une nette distinction entre les différents équipements et les différentes parties fonctionnelles (par exemple, la gestion des ressources radioélectriques dans l'unité de contrôle BSC), facilite l'évolution.

Le module d'identification de l'abonné (SIM: *subscriber identity module*) est la clé de la mobilité personnelle: il suffit à l'utilisateur d'introduire sa carte SIM pour pouvoir utiliser tout équipement terminal GSM. Cette carte SIM, qui contient toutes données relatives à l'abonné, est utilisée également pour les fonctions de sécurité de base, par exemple l'authentification de l'identité de l'abonné et la production de clés pour le chiffrement du trafic sur l'interface hertzienne. Cela empêche l'utilisation frauduleuse du système et assure le secret des communications.

L'interface hertzienne du système GSM se caractérise par un procédé AMRT du huitième ordre avec duplex par répartition en fréquence (DRF). La bande de fréquences disponible en Europe est de 2×25 MHz, avec un écartement de 200 kHz entre les canaux. Les données sont modulées à 270 kbit/s, par application de la modulation à déplacement minimum à filtre gaussien (MDMG), et transmises en paquets de 577 μ s. Chaque trame AMRT est constituée par huit intervalles de temps qui correspondent à huit canaux physiques distincts. Chacun de ces canaux prend en charge une combinaison de voies logiques qui transmettent à leur tour des données de signalisation ou de trafic. La technique du saut de fréquence lent permet de remédier aux conditions de propagation défavorables, et la plupart des formes de réalisation de l'infrastructure comportent des antennes de BTS (*base transceiver station*: station d'émission-réception de base) pour la réception en diversité. La valeur opérationnelle du rapport porteuse/brouillage (C/I) est relativement faible (9 dB); elle est obtenue par application de techniques performantes de codage des voies, d'entrelacement et d'égalisation. La transmission de la parole repose sur un codage de prédiction linéaire appelé prédiction à long terme excitée par impulsion régulière (RPE-LTP: *regular pulse excited-long term prediction*), qui donne un débit binaire net de 13 kbit/s et un débit binaire brut de 22,8 kbit/s après codage de la voie. Le protocole de l'interface hertzienne a une structure en couches classique et inclut un certain nombre de fonctions de pointe qui sont propres aux

radiocommunications mobiles, par exemple: transfert de trafic assisté par le mobile (MAHO: *mobile assisted handover*), régulation de la puissance (sur les liaisons centripètes et centrifuges) et transmission discontinuée (DTX) basée sur la détection de l'activité vocale (VAD: *voice activity detection*).

La normalisation du système GSM se poursuit au sein de l'ETSI; plusieurs nouveaux services et fonctions (communications sur ligne partagée, codeur à débit moitié, service général de données à transmission par paquets) seront offerts dans la phase 2. On a commencé également à normaliser une version GSM adaptée aux chemins de fer. Cette version comprendra des fonctions spécifiques comme l'appel de groupe et la desserte de mobiles circulant à grande vitesse.

Le GSM possède une extension importante, le système cellulaire numérique 1800 (norme DCS 1800 conçue pour les réseaux de communication personnelle [RCP] optimisée pour l'exploitation urbaine et suburbaine); plusieurs licences ont déjà été octroyées en Europe. Les principales différences avec le système GSM concernent la bande de fréquences (autour de 1 800 MHz), les possibilités d'itinérance nationale et une réduction de la puissance d'émission (donc des cellules plus petites). Cette norme pourrait aussi être envisagée pour les *Personal Communication Services* (PCS) des Etats-Unis dans la bande des 1 900 MHz.

Destinée initialement au marché européen, la norme GSM/DCS 1800 est à présent reconnue et mise en œuvre dans le monde entier. Plus de 65 pays ont déjà adopté la norme GSM et au moins 40 réseaux GSM/DCS 1800 sont en service de par le monde. Ces chiffres sont en progression constante (pour de plus amples renseignements, voir le Chapitre 3 du Fascicule 2).

2.3.3.2.1.2 Interim Standard (IS-54)

La demande de services cellulaires a connu une croissance rapide dans les années 80 en Amérique du Nord, ce qui a été le principal moteur de la définition d'une norme numérique de deuxième génération. Cette demande aurait facilement dépassé la capacité des réseaux analogiques appliquant le système téléphonique mobile perfectionné (AMPS). La nouvelle norme numérique a donc été élaborée par la *Telecommunications Industry Association* (TIA), à la demande de la *Cellular Telecommunications Industry Association* (CTIA), l'objectif central étant le suivant: accroître très sensiblement la capacité du système tout en assurant la compatibilité «vers le haut» avec le système AMPS, dont l'utilisation s'était généralisée. Toutefois, la Federal Communications Commission (FCC) décida d'ouvrir la bande cellulaire existante (2×25 MHz dans la gamme des 800 MHz) à toute technologie appropriée.

La norme IS-54 a finalement été choisie parmi plusieurs propositions, et publiée en janvier 1991. La spécification porte sur des stations mobiles et des stations de base à double mode d'exploitation (AMPS/IS-54), permettant ainsi la conception d'équipements capables de fonctionner en analogique ou en numérique. D'autres normes apparentées ont aussi été établies: IS-55 et IS-56, respectivement pour les spécifications de la qualité de fonctionnement et pour les méthodes de mesure applicables aux stations mobiles et aux stations de base. S'agissant des aspects réseau, la TIA a élaboré depuis 1988 un certain nombre de normes qui n'ont rien à voir avec la conception des interfaces hertziennes et qui, de ce fait, sont applicables au système AMPS analogique ainsi qu'à IS-54 et à d'autres systèmes.

La norme IS-54 est moins orientée RNIS que la norme GSM, mais elle est capable néanmoins de prendre en charge, elle aussi, plusieurs services, par exemple le service téléphonique, le service des messages courts et les services de transmission de données fonctionnant au débit maximum de 9,6 kbit/s. Au titre des services supplémentaires, citons le renvoi d'appel, la communication à trois et l'interdiction d'appel. Les fonctions de sécurité offertes sont le numéro d'identification personnel (NIP), l'authentification de l'abonné au moment de la connexion au système et le chiffrement des signaux vocaux et des données de l'abonné.

L'interface hertzienne IS-54 applique la technologie AMRT/DRF avec trois voies par porteuse AMPS 30 kHz. Le débit binaire de modulation est de 48,6 kbit/s et on utilise la modulation par déplacement de phase en quadrature avec détection différentielle (MDPQD). Pour chaque voie (à débit total), le débit binaire brut est de 13 kbit/s, la parole étant codée à 7,95 kbit/s par application d'un

algorithme de prédiction linéaire excitée par une somme vectorielle (VSELP: *vector sum excited linear prediction*).

Le rendement spectral est amélioré par une technique performante de commande de la liaison radio-électrique, basée sur la régulation de puissance et la transmission discontinue (DTX). Le protocole de l'interface hertzienne, qui est compatible avec le protocole AMPS, inclut un mode élargi optionnel permettant l'addition de nouvelles fonctions système et de nouvelles possibilités d'exploitation.

On prévoit que la capacité de trafic réalisable avec IS-54 sera de trois à quatre fois plus grande que celle des systèmes AMPS existants. Cette capacité sera doublée avec l'introduction d'un codec à débit moitié, actuellement en cours de normalisation. En utilisant la bande de fréquences spécifiée initialement pour le système AMPS, on procède, à l'heure actuelle, au remplacement des voies analogiques par des voies numériques conformes à la norme IS-54; cela permet de remédier à la pénurie de spectre tout en facilitant le passage de l'analogique au numérique. Plusieurs constructeurs proposent déjà des équipements de réseau et des équipements terminaux, et le service commercial est disponible dans les plus grandes villes des Etats-Unis.

Sur la base de la norme IS-54, Hughes a développé une nouvelle technologie appelée E-TDMA, avec laquelle des réseaux ont été mis en exploitation aux Etats-Unis et qui a été adoptée pour plusieurs réseaux en Russie et en Chine. Cette technologie permettrait d'obtenir une capacité nettement plus grande, grâce à des perfectionnements tels que le codage à débit moitié, la concentration numérique des conversations (CNC) et les groupages de voies.

2.3.3.2.1.3 Interim Standard IS-95

Introduction

L'accès multiple par différence de code (AMDC) fournit une solution numérique économique en spectre pour la deuxième génération de systèmes de téléphonie cellulaire hertzienne et de systèmes de communication personnelle (SCP). L'interface hertzienne AMDC utilise de façon quasi optimale la puissance d'émission de la station d'abonné, permettant ainsi l'emploi commercial généralisé d'appareils portables légers de coût modique dont les batteries ont une plus large durée de vie. Cette technologie est aussi quasi optimale en ce qui concerne les bilans de liaison, avec un nombre minimum de stations de base requises pour une couverture donnant une excellente qualité de service. Lorsque la pénétration du service augmente dans une zone donnée, le système donne un surcroît de capacité. Il a été démontré que la technique AMDC permet d'obtenir un accroissement de capacité supérieur d'au moins dix fois à celui du service AMPS; cela signifie qu'il faudra jusqu'à dix fois moins de stations de base pour faire face à l'accroissement de la demande de service des usagers. Le recours au transfert progressif du trafic élimine presque complètement un certain nombre d'inconvénients: abandon d'appels, évanouissements, mauvaise qualité vocale.

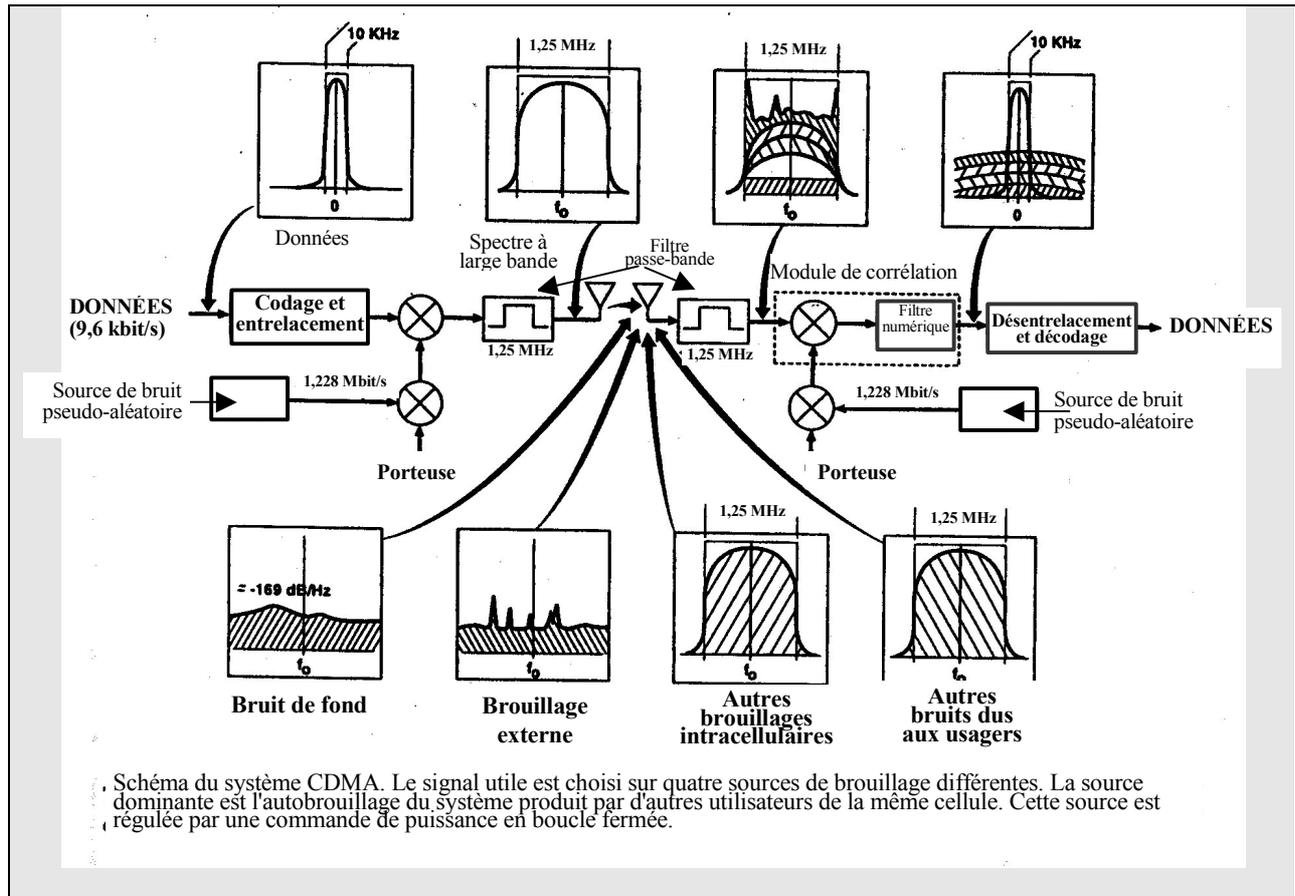
Dans ce contexte, AMDC ne signifie pas seulement accès multiple par différence de code, mais la forme spécifique de cette technique décrite dans la norme relative à l'interface hertzienne: *TIA/EIA/IS-95-A: Mobile Station – Base Station Compatibility Standard for Dual-Mode Wideband Spread Spectrum Cellular System*. Le respect des prescriptions de cette norme garantit aux abonnés et aux fournisseurs de services un interfonctionnement satisfaisant des équipements de tous types.

Le point de départ de la norme IS-95-A est un système développé à partir d'avril 1989 par la société QUALCOMM. Les premières spécifications furent définies par les opérateurs de systèmes cellulaires, les données étant fournies par les fabricants et les opérateurs et aussi par des essais publics. A la suite de la proposition initiale et de l'élaboration d'un projet d'interface hertzienne, une commission de normalisation regroupant des opérateurs de systèmes, des fournisseurs d'équipements d'abonné, d'équipements d'infrastructure et d'équipements d'essai a examiné, révisé et formalisé l'interface. L'homologation officielle de ce qui est à présent l'interface hertzienne IS-95-A est intervenue en décembre 1993.

Le système CDMA (AMDC)

Ce système d'accès multiple utilise l'isolation fournie par les caractéristiques suivantes: le système d'antenne, l'espacement géométrique, le déclenchement de puissance des émissions par l'activité vocale, la régulation de puissance, un modem performant et un type de signal soumis à un codage efficace de correction d'erreur.

Figure 2.3.4 – Schéma du système AMDC



Un ensemble de régulation de puissance en bande ouverte et en boucle fermée (par mesures de la puissance reçue dans la station mobile et dans la station de base) commande à la station mobile d'effectuer des réglages de puissance afin de conserver uniquement le niveau de puissance nécessaire pour une qualité de fonctionnement adéquate. Cela réduit à un minimum les brouillages causés à d'autres usagers, contribue à vaincre les évanouissements et économise la puissance de la batterie dans la station mobile.

Le signal du système cellulaire numérique AMDC module une porteuse à spectre étalé constituée par un bruit pseudo-aléatoire (PN: *pseudo-random noise*). Pour le débit des éléments de la séquence d'étalement PN, on a choisi une valeur telle que la largeur de bande soit de l'ordre de 1,25 MHz après filtrage, soit environ le dixième de la largeur de bande totale allouée à la porteuse du service cellulaire.

La Federal Communications Commission (FCC) des Etats-Unis a attribué un total de 25 MHz pour le sens de transmission station mobile vers cellule et 25 MHz pour le sens cellule vers station mobile, aux fins de l'exploitation des services cellulaires. Elle a divisé cette attribution à parts égales entre deux prestataires de services, les opérateurs A et B, dans chaque zone de service. En raison des délais imposés par les procédures de la FCC pour attribuer une portion de spectre aux services cellulaires, les 12,5 MHz alloués à chaque opérateur pour chaque sens de transmission sont subdivisés en deux sous-bandes. Pour les porteuses B, les sous-bandes sont respectivement de 10 MHz et 2,5 MHz, les chiffres correspondants pour les porteuses A étant 11 MHz et 1,5 MHz. Toutes les sous-bandes peuvent contenir une largeur de spectre de signal inférieure à 1,5 MHz; en revanche, une sous-bande sur les quatre ne peut contenir une largeur de spectre inférieure à 2,5 MHz.

Chaque opérateur peut utiliser un ensemble de dix voies AMDC larges de 1,25 MHz si le spectre attribué est converti en totalité à l'exploitation en AMDC. Dans un premier temps, il suffit de soustraire une seule voie de 1,25 MHz, ou un petit nombre de ces voies, à l'actuel service analogique à modulation de phase (MP) pour réaliser le service numérique. Cela facilite la mise en œuvre, grâce à une réduction progressive de la capacité analogique. Chaque segment AMDC de 1,25 MHz fournit environ deux fois plus de capacité que la totalité des 12,5 MHz attribués à l'actuel système MF. Il faut prévoir une bande de garde de fréquences si des voies adjacentes cellulaires (ou autres) sont utilisées avec une grande puissance, et la capacité maximale de la cellule AMDC est nécessaire. Il est possible de sacrifier de la capacité si on souhaite diminuer la bande de garde. Les voies AMDC adjacentes n'ont pas besoin de bande de garde.

Vue d'ensemble de la norme AMDC IS-95

La norme commune IS-95-A relative à l'interface hertzienne commune spécifie en détail le fonctionnement des stations d'abonné en mode mixte AMDC/AMPS et, à un degré moindre, le fonctionnement des stations de base. L'utilisation de stations d'abonné conformes garantit aux constructeurs des stations de base un comportement prévisible sur lequel ils peuvent se fonder pour la conception des systèmes. Une station d'abonné conforme à IS-95-A peut bénéficier du service en communiquant avec une station de base AMPS (MP analogique) ou avec une station de base AMDC. Le choix dépend de l'existence de l'un ou l'autre système dans l'aire géographique de la station, et aussi de sa préférence telle qu'elle a été programmée. L'interface hertzienne de base est complétée par des spécifications de qualité de fonctionnement minimales pour les stations de base en mode mixte (IS-97) et les stations d'abonné en mode mixte (IS-98).

La norme IS-95-A met l'accent sur les conditions auxquelles doit satisfaire la station d'abonné, cela pour deux raisons: parce que toutes les fonctions de traitement des appels se trouvent côté abonné et parce que la spécification est plus simple dans le cas d'un seul usager. Comparées aux spécifications détaillées des stations d'abonné, celles des stations de base sont incomplètes. En général, la norme prescrit uniquement les spécifications de la station de base qui sont importantes pour la conception des stations d'abonné, les fonctions non spécifiées étant laissées à l'initiative des fournisseurs. Les stations de base sont mises en œuvre en nombre beaucoup plus petit mais pour un coût unitaire très supérieur. Dans ces conditions, on est conduit à offrir des matériels de bonne qualité, les lois du marché aidant.

La norme prescrit que les stations mobiles communiquant avec des stations de base analogiques respectent les dispositions de compatibilité analogique de la norme EIA/ITA/IS-54-B, *Dual-Mode Mobile Station-Base Station Compatibility Specification*, janvier 1992. L'inclusion des sections analogiques de EIA/ITA/IS-54-B en remplacement de EIA/ITA-553 (*Mobile Station-Land Station Compatibility Specification*, septembre 1989) permet de tenir compte de toutes les modifications que la norme EIA/ITA/IS-54-B (mode mixte) impose au fonctionnement analogique.

2.3.3.2.1.4 Communications cellulaires numériques personnelles (PDC)

Comme en Amérique du Nord et en Europe, l'élaboration de la norme PDC au Japon, à la fin des années 80, a été motivée par la saturation des réseaux cellulaires analogiques et par un besoin de services nouveaux et plus performants. Après une phase d'étude lancée par le Ministère des postes et télécommunications du Japon en avril 1989, la norme relative à l'interface hertzienne PDC a été publiée

en avril 1991 par le *Research and Development Centre for Radio Systems* (RCR) sous l'appellation [RCR-STD27, 1991]. La norme a été complétée par les spécifications d'une interface de réseau, constituant la base pour la mise en place d'un système cellulaire numérique unifié au Japon et assurant la connectivité avec le RNIS fixe.

RCR STD27 est une spécification commune pour une interface hertzienne. Malgré quelques ressemblances avec la norme américaine IS-54 en ce qui concerne les caractéristiques techniques, on n'a pas eu besoin ici d'assurer la compatibilité avec les systèmes analogiques existants. Les nouveaux systèmes numériques japonais bénéficient d'une attribution de spectre qui leur est propre, initialement dans la bande des 800 MHz et par la suite dans celle des 1,5 GHz.

L'espacement des porteuses est de 25 kHz et l'accès multiple est du type AMRT/DRF d'ordre 3 avec l'actuel codec à débit total et il sera d'ordre 6 avec le futur codec à débit moitié. Le débit binaire des porteuses est de 42 kbit/s, avec utilisation de la modulation MDPQD $\pi/4$. Le codec vocal à débit total applique un algorithme VSELP avec un débit binaire brut de 11,2 kbit/s et un débit net de 6,7 kbit/s; la correction d'erreur directe repose sur un code convolutif (débit $1/2$) et un contrôle de redondance cyclique (CRC). Une méthode spécifique d'assignation des voies (réutilisation souple des voies d'une station de base à une autre) permet d'accroître la capacité du système. La norme spécifie également la régulation de puissance et les procédures de transfert du trafic (type MAHO).

Les systèmes PDC assureront de nombreux services: transmission de la parole, transmission de données (télécopie Groupe 3, modems, vidéotex) et service de messages courts. On prévoit aussi des services supplémentaires tels que l'identification de la ligne appelante, le renvoi d'appel ou le service comportant un troisième correspondant. Le protocole de l'interface hertzienne est un protocole orienté RNIS, avec une structure en couches conforme aux principes de l'interconnexion des systèmes ouverts (OSI: *open systems interconnection*); cela comprend un protocole d'accès à la liaison appelé LAP DM au niveau de la couche 2, et une couche 3 divisée comme suit: gestion de la transmission radioélectrique (RT: *radio transmission*), gestion de la mobilité (MM: *mobility management*) et commande d'appel (CC: *call control*), voir la Recommandation UIT-T I.451). Parmi les fonctions de sécurité, citons l'authentification et le chiffrement.

Les interfaces placées entre les éléments de réseau et un système PDC ont été définies par les opérateurs de systèmes cellulaires japonais, à l'exception de l'interface A (BSS-MSC) dont les spécifications dépendront de la forme de mise en œuvre. L'architecture du réseau s'inspire du modèle de référence du Système de signalisation N° 7 de l'UIT-T, pour l'utilisation entre éléments de réseau et sur l'interface avec d'autres réseaux. Les protocoles d'application sont une version améliorée du sous-système utilisateur pour le RNIS (SSUR) pour la signalisation associée au circuit et le sous-système application mobile (SSAM), développé comme élément de service d'application sur le sous-système d'application pour la gestion des transactions (SSGT), aux fins de la signalisation non associée au circuit.

La NTT a lancé le service commercial avec un réseau PDC, en 1993, dans la bande des 800 MHz et en 1994 dans la bande des 1,5 GHz. Deux autres opérateurs ont lancé en 1994 des services cellulaires numériques dans la bande des 500 MHz et le Gouvernement japonais a décidé récemment d'autoriser deux nouveaux opérateurs à offrir le service numérique dans la bande des 1,5 GHz. Par ailleurs, il est prévu d'apporter des perfectionnements à la norme PDC (codec à débit moitié, transmission de données par paquets, etc.).

2.3.3.3 Téléphonie sans cordon (CT)

La première génération de postes téléphoniques sans fil du Royaume-Uni (CT1: *cordless telephones*) a vu le jour en réaction à l'importation de grandes quantités d'équipements de radiocommunications mobiles qui étaient de qualité technique supérieure, mais n'étaient pas couvertes par des licences. La simplicité et la rentabilité des produits CT1 (radiocommunications analogiques et stations de base) utilisant huit canaux radioélectriques et l'accès multiple AMRF s'expliquent par le fait que les applications de ces matériels sont limitées à des appels entrants en provenance d'un nombre restreint d'utilisateurs mobiles et destinés à des télépoints isolés. L'accroissement du nombre des usagers a eu pour conséquence une élévation des niveaux du brouillage dans la même voie et une dégradation de la qualité de service.

En prévision de cette situation, on a élaboré la deuxième génération de normes relatives aux équipements de radiocommunications numériques sans cordon et aux *interfaces radioélectriques communes* (CT2/CAI), incompatibles avec les équipements CT1. Les produits CT2 transmettent des signaux vocaux numériques mais appliquent les mêmes principes AMRF que les systèmes CT1. Les questions de réutilisation des réseaux et des fréquences, qui doivent être prises en compte pour faire face à la croissance prévisible du trafic des abonnés des catégories résidence, affaires et télépoint, n'ont pas été traitées de façon satisfaisante. Compte tenu de ces insuffisances, et en prévision des exigences du marché, on a mis au point un certain nombre de systèmes AMRF, AMRT, AMDC et mixtes à l'usage des télécommunications mobiles cellulaires et numériques sans cordon (DCT: *digital cordless telecommunications*). Le Tableau 2.3.3 donne les caractéristiques techniques de quelques-uns de ces systèmes.

Tableau 2.3.3 – Comparaison des systèmes téléphoniques numériques sans cordon

Paramètre	CT2Plus	CT3	DECT	AMDC
Méthode d'accès multiple	AMRF (F/T)	AMRT	AMRT	AMDC
Méthode de duplexage	DRT	DRT	DRT	DRF
Largeur des canaux radioélectr. (MHz)	0,10	1,00	1,73	2 × 1,25
Débit dans les canaux radioélectri. (kbit/s)	72	640	1152	1228,80
Nbre de voies de trafic par canal radioélectr.	1	8	12	32
Durée d'un paquet/d'une trame (ms)	1/2	1/16	1/10	Sans objet
Type de modulation	MDMG	MDMG	MDMG	MDPB/MDPQ
Codage	Cyclique, RS	CRC 16	CRC 16	Conv 1/2, 1/3
Puissance d'émission (mW)	≤ 10	≤ 80	≤ 100	≤ 10
Echelons de puissance d'émission	2	1	1	Nombreux échelons
Gamme de puissance d'émission (dB)	16	0	0	≥ 80
Type de vocodeur	MICDA	MICDA	MICDA	CELP
Débit du vocodeur (kbit/s)	Fixe 32	Fixe 32	Fixe 32	Jusqu'à 8
Débit de données max (kbit/s)	32	RNIS 144	RNIS 144	9,6
Délai de traitement (ms)	2	16	16	80
Efficacité de réutilisation ³				
Minimale	1/25	1/15	1/05	1/4
Moyenne	1/15	1/07	1/07	2/3
Maximale	1/02 ¹	1/02 ¹	1/02 ¹	3/4
Nombre théorique de voies téléph. par cellule dans 10 MHz	100 × 1	10 × 8	6 × 12	4 × 32
Valeur pratique par 10 MHz				
Minimale	4	5-6	5-6	32 (08) ²
Moyenne	7	11-12	11-12	85 (21)
Maximale	50 ¹	40 ¹	40 ¹	96 (24)
¹ Capacité (dans le nombre de voies téléphoniques) pour une cellule isolée unique.				
² La capacité indiquée entre parenthèses peut correspondre à un vocodeur 32 kbit/s.				
³ L'efficacité de réutilisation et les capacités correspondantes concordent avec nos estimations.				
Source: 4U Communications Research Inc., 23/02/1995-22:39.				

La description complète de ces systèmes est donnée dans le Chapitre 4 du Fascicule 2.

2.3.3.4 Radiocommunications mobiles privées (PMR)

Le monde des PMR est multiple, avec ses nombreux et divers groupes d'utilisateurs dont les besoins diffèrent grandement sur le plan de l'exploitation. Les PMR sont utilisées par de grandes organisations responsables de la sécurité publique: police, douanes, pompiers, secours et ambulances, etc., qui ont besoin de réseaux à structure hiérarchique assurant une couverture locale, régionale, voire nationale. On peut citer également d'autres autorités non investies de responsabilités à caractère d'urgence, telles que les départements ministériels, la santé publique, la protection de l'environnement, les postes et télécommunications, etc., qui ont recours au même genre de réseaux. A signaler, cependant, que les PMR sont utilisées aussi par des groupes d'utilisateurs petits et moyens dont les besoins sont extrêmement variés, dans un large éventail d'applications.

Les PMR mettent en œuvre une grande diversité de technologies et des applications extrêmement variées, depuis des communications locales dans de petits groupes d'utilisateurs jusqu'à des réseaux assurant une couverture nationale.

Définitions

Pour comprendre en quoi les PMR sont un système souple et unique, il faut connaître, dans le détail, les exigences économiques et d'exploitation auxquelles ces radiocommunications doivent satisfaire ainsi que les propriétés qui en découlent. Donnons tout d'abord une *brève définition* des PMR:

Les PMR offrent des radiocommunications bidirectionnelles (téléphonie, données, ou les deux) dans des réseaux non publics conçus en fonction des besoins d'exploitation spécifiques de groupes d'utilisateurs mobiles professionnels, pour des communications efficaces et souples dans le domaine de leurs opérations quotidiennes.

Jusqu'aux alentours de l'année 1980, la plupart des systèmes PMR fonctionnaient avec une seule station de base ou un seul répéteur, la modulation était analogique (MF ou MP) et les modes d'exploitation étaient le simplex, le semi-duplex ou le duplex. On pouvait desservir jusqu'à 80 stations mobiles par canal radioélectrique et la couverture pouvait s'étendre jusqu'à 30 km. PMR était synonyme essentiellement de transmission vocale gérée par les PTT, avec un nombre relativement limité de services privés de communication de données.

Plus récemment, on a ajouté à ces services des systèmes de recherche de personnes et de traitement de données, la commutation et les jonctions numériques, ainsi que des connexions dans le RTPC et le RNIS. On a aussi introduit des modulations numériques performantes, notamment des procédés à enveloppe non constante, et le traitement numérique des signaux permet d'utiliser des techniques de transmission qui donnent davantage de voies et réduisent le brouillage. De plus, on a plus largement recours à des services de données intégrées (X.25, X.400, etc.) et il est possible à présent de desservir des groupes fermés d'utilisateurs dynamiquement reconfigurables.

L'utilisation d'une voie commune, qui s'est généralisée, est un facteur déterminant de l'efficacité spectrale des PMR. Dans de nombreuses applications, l'accès aux voies doit être obtenu presque instantanément, par exemple en moins de 200 ms. Il est important de noter que le trafic des PMR est très différent de celui des services cellulaires: la durée des conversations est de l'ordre des secondes, au lieu des minutes, avec des appels beaucoup plus fréquents. Il doit donc exister une relation raisonnable entre la durée d'accès aux voies et la durée des conversations. Il faut que la couverture soit fiable et bien adaptée aux besoins des utilisateurs, notamment les besoins de couverture dans des zones où les conditions de propagation sont défavorables. Etant donné que les PMR englobent une diversité de systèmes de radiocommunication ciblés sur les besoins spécifiques de divers groupes d'utilisateurs, on distingue plusieurs applications principales.

Grands systèmes PMR autoinstallés: ces systèmes sont constitués par des réseaux qui desservent généralement plus de 300 mobiles dans des zones à grande densité de population. Les principaux groupes d'utilisateurs sont des services publics, des compagnies de transport en commun urbain, des compagnies de chemin de fer, des compagnies de distribution d'énergie électrique et de grandes entreprises industrielles. Ces groupes ont des besoins spécifiques, notamment un accès limité au RTPC et au RNIS.

Les petits réseaux PMR desservent moins de 50 mobiles. Les clients types de ces systèmes sont les taxis, les services de récupération de véhicules et les entreprises commerciales. L'avenir de ce secteur est incertain, du fait de la migration vers le système GSM.

Les systèmes PMR fournis par le service sont souvent appelés radiocommunications mobiles à accès public (PAMR: *public access mobile radio*) ou CBS (*community base stations*: stations de base communautaires). Il s'agit de systèmes à liaisons partagées, exploités par un opérateur, en service depuis le milieu des années 80. Les conditions techniques et les conditions d'octroi des licences varient d'un pays à un autre. Là où l'accès au RTPC ou au RNIS est possible, ces systèmes pourraient être considérés comme un service public en concurrence avec le système GSM. Il existe de nombreux réseaux PMR ou PAMR dont la couverture régionale est limitée, mais aussi des réseaux fonctionnant à l'échelle nationale pour la police et d'autres organismes qui assurent des services d'urgence.

Attributions spectrales

Dans un premier temps, les PMR ont reçu des fréquences de la bande 40-80 MHz, sur le plan *national*. Il n'y avait donc pas d'harmonisation, ce qui a donné trois valeurs différentes de l'espacement et beaucoup d'autres différences. Par la suite, les attributions aux PMR ont été considérablement élargies.

Equipement

a) Equipement analogique

Les défauts des systèmes PMR classiques à un seul canal sont un encombrement par le trafic et une utilisation inefficace du spectre. Les systèmes à canaux partagés (*trunked*) utilisent les voies de transmission pour la commande et pour le trafic. Avantages: utilisation plus efficace du spectre et, partant, plus grand volume de trafic par voie.

Dans le souci d'économiser des fréquences et, par voie de conséquence, de pouvoir desservir un plus grand nombre d'utilisateurs dans les bandes attribuées aux radiocommunications PMR, on est passé d'un espacement de canaux de 20 ou 25 kHz à un espacement de 12,5 kHz au cours des années 1970 et 1980, cela dans la plupart des pays européens et dans la plupart des bandes PMR. Dans la réalité des choses, cependant, le gain total en efficacité spectrale n'est pas de 2,0 mais de 1,1 environ si l'on tient compte des évanouissements et de l'effet d'occultation.

Les systèmes PMR à canaux partagés appelés MPT 1327 et MPT 1343, fonctionnant avec transmission analogique de la parole et signalisation à 1 200 bit/s, occupent actuellement une position dominante dans le secteur PAMR, avec plusieurs variantes différentes disponibles. D'une façon générale, ce sont des protocoles privés qui dominent le secteur des PMR à canaux partagés. Les utilisateurs des PMR classiques s'orientent, eux aussi, vers les solutions offertes par les systèmes à canaux partagés, pour cause de meilleure utilisation des fréquences.

b) Equipement numérique

La première tentative pour établir une norme complète relative à un système PMR numérique (DPMR: *digital PMR*) a été faite par l'ETSI pour radiocommunications numériques de courte portée (DSRR: *digital short range radio*) avec voies de 25 kHz dans la bande des 900 MHz, utilisant la modulation MDMG et le codeur vocal GSM. Le système TETRA (*trans european trunk radio system*: réseau 3RD européen), rebaptisé EP TETRA, est la deuxième *norme de système DPMR*, avec des équipements permettant d'effectuer toutes catégories de transmission numérique, par exemple données et signaux vocaux numérisés. Les résultats des travaux de numérisation sur TETRA figurent dans la série des normes ETS 300 392 à 396 de l'ETSI.

i) *TETRA* est un système AMRT fonctionnant avec quatre intervalles de temps par porteuse et fournissant des voies de 25 kHz dans les gammes 385-470 MHz et 870-921 MHz. Le débit binaire brut est de 38 kbit/s, ce qui donne des débits nets pouvant aller jusqu'à 28,8 kbit/s avec groupage des intervalles de temps. Dans les voies de trafic à un seul intervalle de temps, on a un débit binaire brut de 9 kbit/s et un débit d'utilisateur non protégé de 7,2 kbit/s.

- ii) Par ailleurs, deux normes PMR de facto ont été élaborées sur la base de spécifications privées: MPT 1327 et 1343 (basées sur la spécification DTI du Royaume-Uni et prévoyant l'appel numérique et la transmission de données à 1,2 kbit/s en combinaison avec la téléphonie analogique) et MOBITEX (norme établie à l'origine uniquement pour la transmission de données à 1,2 kbit/s, alors que MOBITEX II ou MOBITEX 8k prévoit un débit binaire brut de 8,0 kbit/s sur des voies de 25 kHz dans les bandes des 400 et 900 MHz).
- iii) A cela s'ajoutent plusieurs systèmes PMR privés entièrement numériques qui ont été mis en œuvre au cours des dernières années. On trouvera ci-après la liste des plus importants de ces systèmes DPMR privés présents sur le marché:
- *APCO 25* est un système AMRF entièrement numérique mis au point aux Etats-Unis pour les bandes des 150, 400 et 800 MHz, avec un espacement de voies de 12,5 kHz et modulation C4FM. On envisage pour l'avenir le passage à des voies de 6,25 kHz et à une modulation linéaire (MDPQC).
 - *ASTRO* est un système AMRF développé par Motorola pour les applications DPMR dans les bandes des 2 mètres, avec trois espacements de voies: 12,5, 20 et 25 kHz. Modulation MDPQC et débit binaire brut 9,6 kbit/s.
 - *EDACS* est le système *enhanced digital access communications* (Système de communication perfectionné à accès numérique) mis au point par Ericsson pour des espacements de voies de 12,5 et 25 kHz dans les bandes des 160, 450, 800 et 900 MHz. Ce système fonctionne en modulation MDMG; l'accès multiple AMRF analogique peut être perfectionné (conversion voie par voie au numérique), avec aussi possibilité d'AMRT. La version AMRT, lancée en 1995, a été entièrement numérisée. EDACS est un système multisites qui offre un débit binaire brut de 9,6 kbit/s et une vaste zone de couverture.
 - GeoNet est un système *FHMA (frequency hopping multiple access: accès multiple par saut de fréquence)* réalisé par Geotek, avec des versions pour les bandes des 800 et des 900 MHz. Ce réseau, avec 50% de trafic de données, aurait une capacité qui pourrait être jusqu'à 30 fois supérieure à celle d'un système PMR analogique à canaux partagés. (Ce résultat est obtenu grâce au débit de transmission, qui est très supérieur à celui de systèmes tels que MPT 1327.)
 - *MIRS, motorola integrated radio service*, a été mis en exploitation par Motorola aux Etats-Unis en 1991, et rebaptisé *iDEN (integrated dispatch enhanced network)* en 1995. Il s'agit d'un système 6AMRT à modulation linéaire m16MAQ (m = 4) qui donne un débit binaire brut de 64 bit/s. Il aurait ainsi une capacité six fois supérieure à celle des systèmes PMR classiques, et même 18 fois supérieure si on applique une réutilisation géographique appropriée des fréquences. Ce système a été mis au point pour les bandes des 800, 900 et 1 500 MHz.
 - Développé par Matra, le système TETRAPOL est en service depuis 1992. Il fonctionne en accès multiple AMRF dans les bandes des 80 MHz et des 400 MHz, avec un espacement de voies de 12,5 kHz (possibilité d'espacement de 10 kHz sur demande). Le débit binaire brut est de 8,0 kbit/s, en modulation MDMG. La plupart des applications de ce système sont actuellement des applications de sécurité publique.

Les systèmes PMR numériques modernes sont structurés selon le modèle OSI de l'Organisation internationale de normalisation dans un ordre systématique et transparent. Les *services de base* sont les *téléservices* et les *services supports*; les *services supplémentaires* se composent du *service supplémentaire type PMR* et des *services supplémentaires type téléphonie*.

Les téléservices offrent différents types d'appel, chiffrés ou non chiffrés; il s'agit principalement d'appels individuels (point à point), d'appels de groupe (point à multipoint), d'appels de groupe avec accusé de réception et d'appels en mode diffusion. De leur côté, les services supports permettent des transmissions de données non protégées ou protégées en mode circuit et des transmissions de données par paquets en mode connexion ou sans connexion, généralement disponibles avec différents débits de transmission dans le réseau: dans le cas TETRA, par exemple, de 2,4 à 9,6 kbit/s pour les données protégées et de 7,2 à 28,8 kbit/s pour les données non protégées en mode circuit.

Il existe aussi toute une série de services supplémentaires type PMR. Les plus intéressants sont la priorité d'accès, la priorité avec préemption, l'appel prioritaire, l'appel autorisé par l'aiguilleur et comprenant l'appel, le transfert de la commande de groupe, l'entrée tardive, l'écoute d'ambiance, l'écoute discrète, la sélection de zone, l'adressage avec numéro abrégé, l'identification de l'interlocuteur et l'affectation dynamique de numéros de groupe.

Enfin, on dispose de nombreux services supplémentaires type téléphonie, par exemple: appel pour recherche de liste, renvoi d'appel, interdiction d'appel, compte rendu d'appel, appel en instance, maintien d'appel, présentation de l'identité du demandeur, restriction sur l'identification du demandeur, aboutissement d'appel, avis de taxe et rétention d'appel.

Cette diversité des services offerts témoigne de la complexité des systèmes PMR modernes. Elle montre aussi que ces systèmes n'offrent pas seulement la totalité des fonctions PMR habituelles mais également quelques services additionnels de pointe et un large choix de services de téléphonie.

2.3.3.5 Systèmes mobiles de troisième génération – IMT-2000

Les systèmes mobiles de troisième génération IMT-2000 transmettront directement à l'utilisateur des signaux vocaux, graphiques, vidéo et autres informations à large bande, quels que soient l'emplacement, le réseau ou le terminal. Les services de communications entièrement personnelles permettront la mobilité terminale et de service dans des réseaux fixes et des réseaux mobiles, grâce à la convergence des actuels et futurs réseaux fixes et mobiles, et grâce aux synergies potentielles découlant de cette convergence. Les principaux avantages qu'on peut attendre d'IMT-2000 sont une amélioration de qualité et de sécurité, avec mise en place de services multimédias à large bande et en réseau, une souplesse dans la création de services et la portabilité des services en tous lieux.

On peut définir le **multimédia en réseau** comme incluant des services tels que la télévision à péage, la vidéo et l'audio à la demande, les programmes de divertissement interactifs, les services d'éducation et d'information, enfin des services de communication comme le visiophone et le transfert rapide de fichiers volumineux.

Pour des plus amples renseignements sur IMT-2000, on se reportera au Chapitre 3 du Fascicule 2 et aux Actes finals de la Conférence mondiale des radiocommunications 2000.

2.3.3.6 Utilisation de systèmes à satellites

Ces systèmes utilisent un ou plusieurs satellites qui jouent le rôle de station(s) de base et/ou de répéteur(s) dans un réseau de radiocommunication mobile. La position des satellites par rapport à la zone de service est d'importance primordiale s'agissant de la couverture, de la qualité de service, des coûts et de la complexité de l'ensemble du réseau. Lorsqu'un satellite tourne autour de la Terre par périodes de 24 heures, on parle d'une *orbite géosynchrone*. Une orbite dont le plan fait un angle avec le plan de l'équateur s'appelle une orbite inclinée: si cette inclinaison est de 90 degrés, on a affaire à une *orbite polaire*. Une orbite géosynchrone circulaire 24 heures contenue dans le plan de l'équateur (inclinaison 0°) est une *orbite géostationnaire*; cette désignation s'explique par le fait que, vu d'un point quelconque de la surface terrestre, le satellite semble être stationnaire. Cette orbite convient particulièrement bien aux services terrestres aux latitudes basses et aux services maritime et aéronautique aux latitudes inférieures à 80°. Les systèmes INMARSAT, MSAT et AUSSAT utilisent des satellites géostationnaires. Une orbite géosynchrone elliptique inclinée à 63,4° est une *orbite toundra*. On appelle *orbite Molniya* une orbite elliptique 12 heures inclinée à 63,4°. Ces deux types d'orbite ont été choisis pour la couverture des latitudes septentrionales et des régions voisines du pôle Nord; pour les usagers qui se trouvent à ces latitudes, les satellites semblent osciller autour du zénith pendant une longue période. La couverture d'une région donnée (*couverture régionale*) et de la totalité du globe (*couverture mondiale*) peut être assurée par différentes constellations de satellites, notamment sur orbites inclinées et orbites polaires. Par exemple, on a proposé des constellations de satellites sur orbites circulaires pour le système GPS (18-24 satellites, inclinaison 55-63°) et pour le système Globalstar (48 satellites, inclinaison 47°); ces systèmes assureront une couverture mondiale. Le système ORBCOM utilise des satellites sur orbites

terrestres basses, lancés par des fusées Pegasus et assurant une couverture ininterrompue de la surface terrestre au-dessous des latitudes $\pm 60^\circ$ et une couverture intermittente mais fréquente des régions polaires.

Les systèmes d'antenne des satellites peuvent donner un seul faisceau (*système monofaisceau à couverture globale*) ou plusieurs faisceaux (*système multifaisceau à couverture ponctuelle*). Les systèmes multifaisceau, qui sont semblables aux systèmes cellulaires des services de terre, sont équipés d'antennes directives qui améliorent la réutilisation des fréquences, au prix d'une plus grande complexité du système.

Pour plus d'information, on se reportera au § 2.4 du Fascicule 1 et aux Actes finals de la Conférence mondiale des radiocommunications 2000.

2.3.4 Abréviations

AMAD	Accès multiple par assignation en fonction de la demande
AMDC	Accès multiple par différence de code
AMPS	Système téléphonique mobile perfectionné (<i>advanced mobile phone system</i>)
AMRF	Accès multiple par répartition en fréquence
AMRT	Accès multiple par répartition dans le temps
AMSF	Accès multiple par saut de fréquence
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASIC	Circuit intégré d'application (<i>application specific integrated circuit</i>)
AuC	Centre d'authentification (<i>authentication centre</i>)
BSC	Unité de commande de la station de base (<i>base station controller</i>)
BSS	Sous-système station de base (<i>base station sub-system</i>)
CAO	Conception assistée par ordinateur
CBS	Station de base communautaire (<i>community base station</i>)
CC	Commande d'appel (<i>call control</i>)
CELP	Prédiction linéaire excitée par code (<i>code excited linear prediction</i>)
CEM	Centre d'exploitation et de maintenance
CRC	Contrôle de redondance cyclique
CT	Téléphonie sans cordon; téléphonie hertzienne (<i>cordless telephony</i>)
CTIA	<i>Cellular Telecommunications Industry Association</i>
DB	Base de données (<i>database</i>)
DCS	Système cellulaire numérique (<i>digital cellular system</i>)
DCT	Télécommunications numériques (<i>digital cordless telecommunications</i>)
DPMR	Radiocommunications mobiles privées numériques (<i>digital private mobile radio</i>)
DRF	Duplex à répartition en fréquence
DRT	Duplex par répartition dans le temps
DSI	<i>digital speech interpolation</i>
DSP	Traitement des signaux numériques (<i>digital signal processing</i>)
DTX	Transmission discontinue (<i>discontinuous transmission</i>)

EIR	Enregistreur d'identité des équipements (<i>equipment identity register</i>)
E-TACS	Système de communication élargi à accès total (<i>expanded total access communication system</i>)
ETSI	Institut européen des normes de télécommunication (<i>european telecommunications standards Institute</i>)
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
GFU	Groupe fermé d'utilisateurs
GSM	Groupe spécial mobile
HLR	Registre de localisation et de rattachement (<i>home location register</i>)
IMT	Télécommunications mobiles internationales (<i>international mobile telecommunications</i>)
J-TACS	Système japonais de communication à accès total (<i>japanese total access communication system</i>)
LE	Commutateur local (<i>local exchange</i>)
LR	Enregistreur de localisation (<i>location register</i>)
LSC	Unité de commande de station locale (<i>local station controller</i>)
MAHO	Transfert de trafic assisté par le mobile (<i>mobile assisted handover</i>)
MAQ	Modulation d'amplitude en quadrature
MDF	Modulation par déplacement de fréquence
MDP	Modulation par déplacement de phase
MDPQ	Modulation par déplacement de phase quadrivalente
MDPQD	Modulation par déplacement de phase différentielle en quadrature
MF	Modulation de fréquence
MICDA	Modulation par impulsions et codage différentiel adaptatif
MIRS	<i>Motorola integrated radio service</i>
MMIC	Circuit intégré monolithique pour hyperfréquences (<i>microwave monolithic integrated circuit</i>)
MoU	Mémoire d'accord (<i>Memorandum of understanding</i>)
MP	Modulation de phase
MPEG	Groupe d'experts en images animées (<i>moving picture expert group (ISO)</i>)
MSC	Centre de commutation mobile (<i>mobile switching centre</i>)
NMS	Système de gestion du réseau (<i>network management system</i>)
NMT	Système téléphonique mobile nordique (<i>nordic mobile telephone</i>)
NSS	Sous-système réseau (<i>network sub-system</i>)
N-TACS	Système de communication à accès total à bande étroite (<i>narrow-band total access communication system</i>)
OSI	Interconnexion des systèmes ouverts (<i>open systems interconnection</i>)
PABX	Autocommutateur privé (<i>private automatic branch exchange</i>)
PAL	Protocole d'accès à la liaison
PAMR	Radiocommunications mobiles à accès public (<i>public access mobile radio</i>)
PDC	Communications cellulaires numériques personnelles (<i>personal digital cellular</i>)

PMR	Radiocommunications mobiles privées (<i>private mobile radio</i>)
PS	Station portative (<i>portable station</i>)
RDR	Centre de recherche-développement pour les systèmes de radiocommunications (<i>research and development centre for radio systems</i>)
RNIS	Réseau numérique avec intégration des services
RPDCP	Réseau public pour données à commutation par paquets
RPE-LTP	Prédiction à long terme excitée par impulsions régulières (<i>regular pulse excited – long term prediction</i>)
RT	Transmission radioélectrique (<i>radio transmission</i>)
RTPC	Réseau téléphonique public commuté
SCP	Système de communication personnelle
SS7	Système de signalisation N° 7
SSAM	Sous-système application mobile
SSGT	Sous-système d'application pour la gestion des transactions
SSUR	<i>Sous-système utilisateur pour le RNIS</i>
TACS	Système de communication à accès total (<i>total access communication system</i>)
TETRA	Réseau 3RD européen (<i>trans-european trunk radio system</i>)
TIA	<i>Telecommunications Industry Association</i>
VAD	Détecteur d'activité vocale (<i>voice activity detector</i>)
VLR	Registre de localisation des visiteurs (<i>visitor location register</i>)
VSELP	Prédiction linéaire excitée par somme vectorielle (<i>vector sum excited linear prediction</i>)
WPABX	Autocommutateur privé sans fil (<i>wireless private automatic branch exchange</i>)

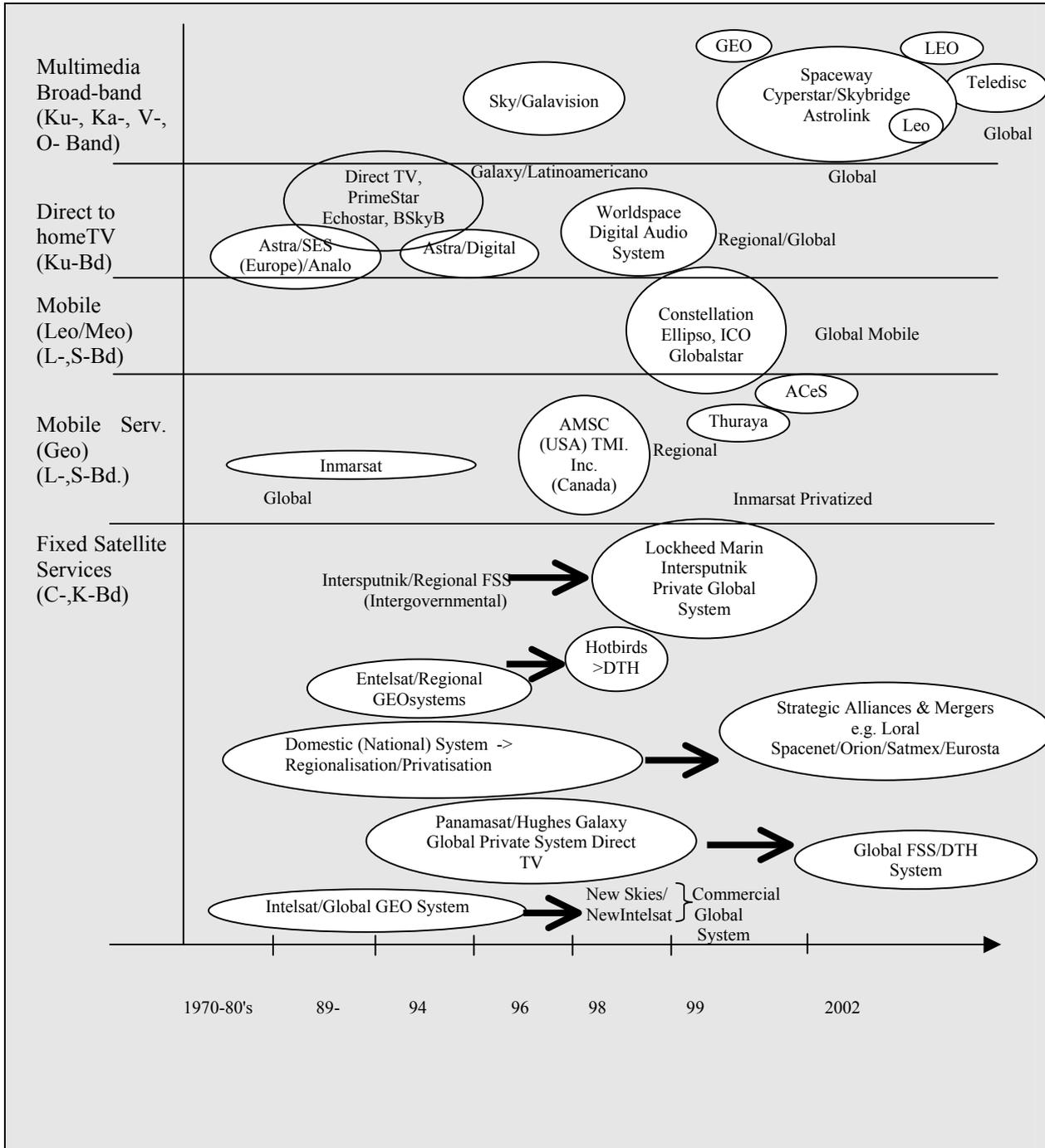
2.4 Systèmes à satellites

La couverture mondiale par des satellites est réalisée depuis de nombreuses années, avec utilisation de grandes stations terriennes. Actuellement, on étend ce mode d'exploitation à des terminaux mobiles de plus en plus petits.

Les trois catégories d'orbites se prêtant le mieux aux télécommunications sont les suivantes:

- l'orbite géostationnaire ou orbite des satellites géostationnaires (OSG)
- les orbites non géostationnaires (non OSG)
 - 1) orbites terrestres moyennes (MEO: *medium Earth orbit*)
 - 2) orbites terrestres basses (LEO: *low Earth orbit*)

Tableau 2.4.1 – Evolution des systèmes à satellites



Orbites des satellites

- Si on utilise l'OSG, il est possible de couvrir la totalité de la surface terrestre, à l'exception des régions polaires, avec seulement 3 satellites en orbite équatoriale. Ces satellites doivent être placés à une altitude d'environ 35 800 km au-dessus de la surface terrestre. Ils paraîtront stationnaires pour un observateur lié à la Terre.

- Si on utilise une constellation du type MEO, l'altitude doit être choisie entre la ceinture de radiation intérieure de Van Allen et la ceinture extérieure, normalement aux alentours de 10 355 km au-dessus de la surface terrestre. Dans ce cas, la période de révolution orbitale sera de 6 heures. Le globe peut être couvert par 10 ou 12 satellites placés dans 2 ou 3 plans orbitaux, par exemple: avec 2 plans, 5 satellites par plan et avec 3 plans, 4 satellites par plan.
- Si on utilise une constellation LEO, l'altitude des satellites est beaucoup plus basse, généralement comprise entre 700 et 2 000 km, avec une période orbitale comprise entre 100 et 120 minutes. En raison de la basse altitude, le satellite voit une portion relativement petite de la surface terrestre: le nombre de plans orbitaux nécessaires pour couvrir la totalité du globe devra être porté à 6-8 et il faudra 6 satellites dans chaque plan.

La Figure 2.4.1 illustre l'évolution de la technologie des systèmes à satellites ainsi que les tendances futures.

La technologie des systèmes à satellites des types OSG et non OSG est analysée dans les paragraphes qui suivent.

2.4.1 Satellites géostationnaires (OSG)

Les débuts des télécommunications par satellite ont été dominés par la notion de satellite géostationnaire. Le satellite Syncom-2, lancé le 19 juillet 1963, a été le premier satellite géosynchrone (inclinaison orbitale 33 degrés) et Syncom-3, lancé le 19 août 1964, a été le premier satellite géostationnaire.

Les principaux avantages des satellites OSG sont les suivants:

- Il suffit de trois satellites opérationnels pour obtenir la couverture de la totalité de la surface terrestre, à l'exclusion des calottes polaires.
- Les satellites OSG semblent être immobiles dans le ciel. On n'a donc pas besoin de grandes antennes de station terrienne, avec des systèmes de poursuite automatique à action rapide, comme c'est le cas avec les satellites LEO.
- L'antenne de la station terrienne travaille avec un seul satellite OSG pour réaliser une connexion continue. Tel n'est pas le cas pour les satellites LEO: il faut utiliser ici soit une antenne de station terrienne capable de sauter rapidement d'un satellite qui disparaît à l'horizon à un satellite qui apparaît à l'horizon, soit deux antennes dans chaque station terrienne.
- L'antenne embarquée du satellite géostationnaire peut avoir une très grande directivité. Un satellite LEO, du fait de son altitude modérée et de sa grande vitesse par rapport à la Terre, doit être pourvu d'une antenne à faible gain, ou de systèmes de poursuite à action rapide si on augmente le gain de l'antenne embarquée.

Les satellites OSG présentent quelques inconvénients par rapport aux satellites LEO:

- Temps de propagation beaucoup plus long, pouvant causer un écho avec un écart de temps d'environ 500 ms.
- Affaiblissement en espace libre beaucoup plus grand. La distance entre un point de la surface terrestre et le satellite peut varier entre un minimum de 35 786 km (point sur l'équateur aligné avec le satellite et le centre de la Terre) et un maximum de 41 756 km (points sur le cône dont le satellite est le sommet et qui est tangent à la surface terrestre). De ce fait, l'affaiblissement en espace libre sur une liaison par satellite OSG varie d'une gamme de fréquences à une autre.
- Les satellites géostationnaires n'assurent pas la couverture des calottes polaires.
- Ils n'assurent pas toujours la couverture des grandes villes pour les communications mobiles terrestres, en raison des ombres radioélectriques créées par les bâtiments élevés.

2.4.1.1 Systèmes à satellites géostationnaires du service fixe

Les systèmes à satellites du service fixe continueront à utiliser des satellites en orbite géostationnaire. Toutefois, à mesure qu'augmentera l'encombrement des bandes d'hyperfréquences basses attribuées à ces systèmes (par exemple, la bande C), on peut s'attendre à une utilisation de bandes de fréquences plus élevées (par exemple, la bande Ku) pour ces systèmes à satellites. C'est ce qui explique, d'une part, l'intérêt porté à la mise au point d'équipements destinés à des bandes d'hyperfréquences nouvelles, plus élevées dans le spectre, d'autre part, les études visant à accroître la capacité des bandes de fréquences utilisées actuellement. Mentionnons ici deux systèmes de communication typiques différents qui mettent en œuvre des concepts numériques de pointe:

- a) L'accès multiple avec assignation en fonction de la demande (AMAD);
- b) L'accès multiple par répartition dans le temps (AMRT).

Dans le mode AMAD, un groupe de voies de répéteur de satellite est assigné à plusieurs usagers. Ce mode d'exploitation réalise une connectivité instantanée, par commutation, entre de nombreux usagers; c'est une solution intéressante pour un usager qui cherche à bénéficier d'une technologie numérique d'un bon rapport coût-efficacité, jointe à un investissement minimum dans le matériel. Les coûts d'exploitation sont, eux aussi, modestes car les taxes afférentes aux circuits AMAD sont fonction du volume des ressources satellite effectivement utilisées, selon un tarif à la minute de communication. L'AMRT est un service numérique mis en œuvre sur des réseaux publics commutés dans lesquels on a besoin d'un degré élevé de connectivité sur des artères à densité de trafic moyenne. L'AMAD est une formule attractive pour des usagers qui recherchent le service INTELSAT de qualité maximale: plus grande stabilité, meilleure souplesse d'utilisation des équipements et meilleur taux d'erreur binaire (TEB) que dans tout autre service INTELSAT. La qualité et la disponibilité de ce service soutiennent la comparaison avec la technologie actuelle des fibres optiques.

Les exemples suivants illustrent la recherche d'un surcroît de capacité dans une largeur de bande donnée:

Technologie des antennes

Les antennes conçues pour les bandes d'hyperfréquences élevées fournissent ce surcroît de capacité, surtout si l'on pratique la réutilisation des bandes de fréquences avec différentes polarisations et différents espacements entre les faisceaux d'antenne. Cette technologie s'applique tout aussi bien à la conception des satellites qu'à celle des stations terriennes.

Technologie des amplificateurs à faible bruit et grande puissance

Avec des répéteurs de satellite plus puissants et des équipements de station terrienne plus sensibles, on peut loger un plus grand nombre de voies de communication dans une largeur de bande donnée.

Oscillateurs et changeurs de fréquence de haute précision

Les systèmes de communication numériques sont étroitement tributaires de la stabilité et de la pureté des oscillateurs et des sources de signaux d'horloge dérivés des oscillateurs. Par exemple, dans les systèmes AMRT (accès multiple par répartition dans le temps) à grande capacité utilisés dans les systèmes à satellites, l'instant d'arrivée, dans le répéteur du satellite, des salves de signaux émises par un grand nombre de stations terriennes participantes est régulé à quelques microsecondes près, en dépit des mouvements du satellite, de l'effet Doppler et des autres anomalies de la propagation. Si cette régulation rigoureuse n'était pas possible, il faudrait prévoir un intervalle de temps de garde plus grand entre les salves, avec pour conséquence une diminution de la capacité de trafic des canaux.

Technologie moderne

Un progrès important a été réalisé dans la technologie des modems, lorsqu'on a abaissé le seuil du rapport porteuse/bruit (C/N) de ces appareils pour une valeur donnée du taux d'erreur binaire (TEB). Si le modem fonctionne avec un faible rapport C/N, il aura besoin de moins de puissance satellite et on disposera par conséquent de davantage de puissance pour les canaux de l'engin spatial. Les progrès de la technologie

moderne sont aussi étroitement liés à la correction d'erreur directe (CED) ou correction d'erreur sans voie de retour.

Utilisation du traitement numérique des signaux

La technique de la CED est un des exemples des technologies pouvant être mises en œuvre grâce au traitement numérique des signaux.

Parmi les autres progrès dans ce domaine, citons le traitement de ces signaux pour la compression et la décompression des signaux afin d'obtenir des débits de transmission de plus en plus petits. Cette technique est appliquée aux signaux analogiques de toutes espèces, par exemple dans les voies à fréquences vocales ou les signaux de télévision. Une diminution du débit de transmission entraîne une diminution de la bande passante du répéteur, d'où la possibilité d'accroître le nombre de voies dans une largeur de bande donnée.

L'équipement de multiplication de circuit numérique (EMCN), dont il sera question ci-après, donne un autre exemple de l'utilisation du traitement numérique des signaux dans les systèmes à satellites du service fixe. En appliquant cette technologie, on peut multiplier pratiquement par 5 le nombre des voies téléphoniques ou des voies de transmission de données contenues dans un canal radioélectrique de satellite.

2.4.1.2 Equipement de multiplexage de circuit numérique

Un des grands avantages de la numérisation des systèmes de télécommunication analogiques est le fait que de très nombreuses possibilités diverses s'ouvrent en matière de traitement des signaux. Trois techniques de traitement, prises séparément, ont déjà permis d'apporter des améliorations importantes aux communications numériques. Associées ensemble, elles ont eu une influence profonde sur la conception des systèmes numériques. Ce sont 1) le codage à faible débit (CFD) et les techniques de compression/décompression, 2) la concentration numérique des conversations (CNC), et 3) la correction d'erreur directe (CED). On appelle équipement de multiplication de circuit numérique (EMCN) le dispositif qui met en œuvre les deux premiers de ces procédés.

La technique CED est incorporée aux porteuses RF numériques transmises par la liaison par satellite.

Comme indiqué plus haut, les deux principales technologies associées dans les équipements EMCN sont le codage CFD et la CNC. Le codage CFD conduit à une diminution du nombre des bits nécessaires pour transmettre une quantité d'information donnée. On obtient la voie MIC standard à 64 kbit/s en échantillonnant une voie d'entrée analogique 8 000 fois par seconde et en convertissant chaque échantillon en un code MIC à 8 bits. Toutefois, en utilisant diverses techniques, il est possible de réduire très sensiblement le nombre de bits transmis pour chaque échantillon. Cette réduction dépend de la qualité d'écoulement de trafic requise et de la nature de la transmission: signaux vocaux, données dans la bande vocale ou signalisation. Il est possible de ramener le débit de 64 kbit/s à 8 kbit/s, et l'UIT-T travaille actuellement à la mise au point d'un codeur vocal qui fonctionnera à 4 kbit/s.

La technique CNC met en œuvre des procédés d'assignation dynamique: un intervalle de temps (voie satellite) est assigné, à la demande, à une voie de communication internationale donnée, mais le même intervalle de temps n'est pas utilisé pendant toute la durée de la communication téléphonique. Cette technique est applicable pour la raison suivante: l'émission de parole n'est pas continue pendant une conversation téléphonique, de sorte que l'on n'a pas besoin de la voie de transmission en permanence et que l'intervalle de temps peut être affecté à une autre voie. Les circuits CNC concentrent un certain nombre de voies d'entrée de terre (généralement appelées voies de jonction) en un plus petit nombre d'intervalles de temps (appelés voies supports ou voies satellite). Dans le sens de transmission opposé, les voies supports concentrées sont transformées en un plus grand nombre de voies de jonction. Le nombre maximum de voies satellite (intervalles de temps) est de 61 (81 en période de surcharge).

On utilise dans les équipements EMCN une technique d'assignation statique appelée échange des intervalles de temps (TSI: *time slot interchange*): les voies de transmission de terre sont assignées manuellement à des artères internationales jusqu'à ce qu'il soit nécessaire de procéder à une réassignation manuelle. Les lignes de terre aboutissent à l'EMCN dans des porteuses au débit de 2 Mbit/s qui peuvent contenir de nombreux intervalles de temps vides (le nombre de ces porteuses est généralement au maximum de 10). En conséquence, le nombre potentiel de voies de terre (normalement 310) est supérieur aux 216 voies internationales pouvant être traitées par les circuits CNC. Le procédé d'assignation statique (procédé TSI) est la méthode qui consiste à choisir manuellement 216 voies internationales sur le nombre maximum de 310 voies de terre. Ainsi, par le moyen des techniques d'assignation statique (TSI), on choisit 216 voies internationales parmi 310 voies de terre, et les techniques d'assignation dynamique (CNC) permettent de comprimer les 216 voies pour obtenir 61 (ou 81) voies satellite.

Une voie de jonction donnée n'est connectée à une voie support donnée que pendant la durée d'activité de la voie de jonction (y compris un temps de maintien approprié), c'est-à-dire pendant que cette voie transmet une salve de signaux vocaux, des données dans la bande vocale ou des signaux de signalisation. Compte tenu des intervalles de temps qui séparent les salves de signaux vocaux pendant une conversation téléphonique normale, une voie de jonction n'est active que durant quelque 30% à 40% du temps. En conséquence, pour un grand nombre de ces voies, il est possible de réduire très sensiblement (en le divisant par un facteur de 2,5 à 3,0) le nombre des voies supports (passant par le satellite) en assignant les voies support «à la demande». Il devrait cependant être possible de préassigner les voies dans l'équipement.

Des informations sur l'assignation voie de jonction/support doivent être transmises fréquemment entre les stations terriennes correspondantes, afin de s'assurer que la voie de jonction d'émission est reliée à la voie de jonction de réception voulue, à l'extrémité distante, pendant la durée de la conversation téléphonique ou de la transmission de données dans la bande vocale. Ces informations sont échangées dans une voie d'assignation (AC: *assignment channel*) spéciale.

Du côté «de terre» de l'interface, chaque module EMCN est relié à un centre de commutation international (CCI) par l'intermédiaire d'un maximum de dix liaisons de communication à 2 Mbit/s (soit un total de 310 voies de téléphonie ou de transmission de données (64 kbit/s), plus 20 voies de synchronisation et de signalisation). Du côté «satellite» de l'interface, chaque module EMCN est relié à un modem à débit binaire intermédiaire (IDR: *intermediate data rate*) qui fonctionne au débit de données de 2,048 Mbit/s.

L'équipement EMCN peut être utilisé dans des systèmes autres que les systèmes à satellites (par exemple, les câbles sous-marins). Dans les applications spatiales, les modes d'exploitation sont les suivants:

- Mode à une seule destination (SD)
- Mode multiclique (MC)
- Mode multideestination (MD)
- Mode mixte SD/MD

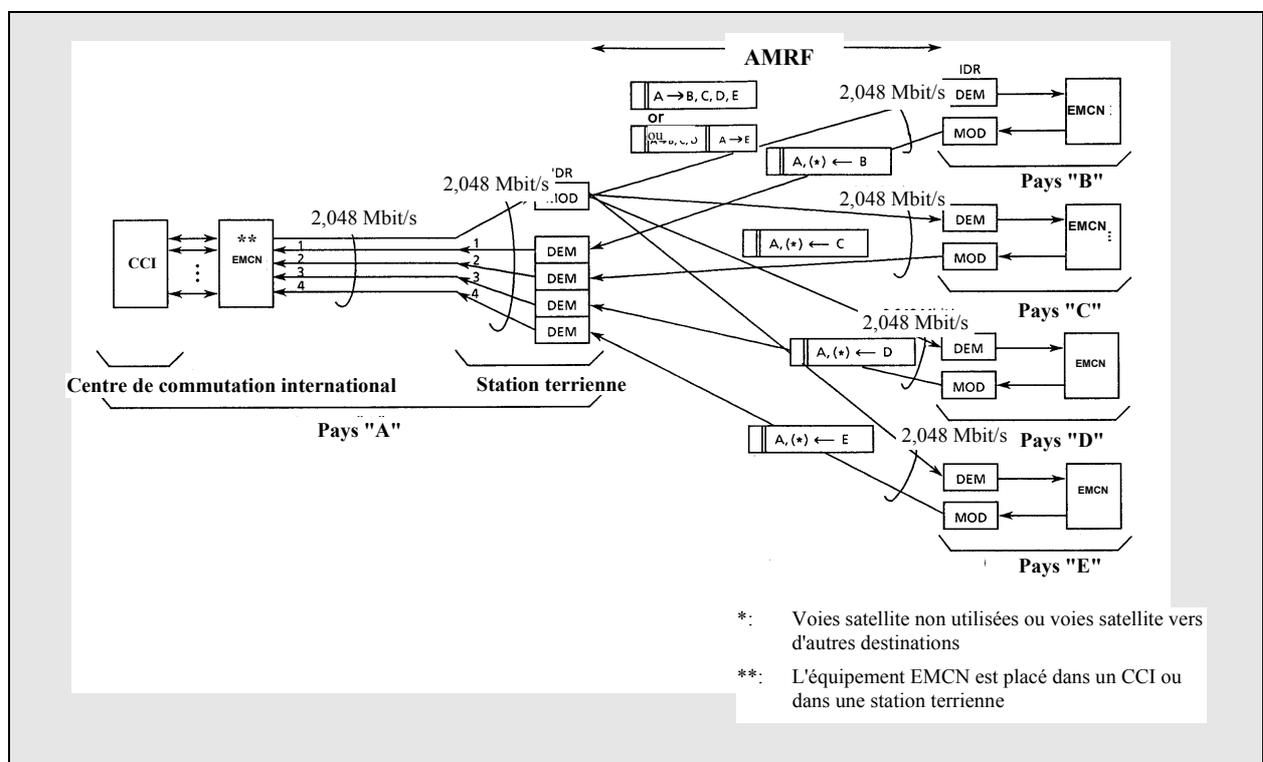
Le mode SD, comme son nom l'indique, est le mode le plus simple et le plus économique pour les gros utilisateurs. La spécification minimale en ce qui concerne l'équipement EMCN/IDR est la suivante: un ensemble redondant de modules EMCN et un ensemble redondant de modems IDR. Par ailleurs, l'équipement des stations terriennes doit comprendre des élévateurs et des abaisseurs de fréquences, des amplificateurs à faible bruit, des amplificateurs de puissance et une antenne. L'équipement EMCN/IDR peut être mis en œuvre dans une station terrienne de conception nouvelle ou intégré à une station existante. Dans ce dernier cas, il est possible que des installations telles qu'un faisceau hertzien de terre, une alimentation en énergie et un système de climatisation soient déjà disponibles.

En exploitation multiclique, les voies supports satellite, côté émission, forment un ou deux blocs distincts, ou «clicques», chaque clique étant associée à une destination propre. Etant donné que deux destinations sont desservies, la station terrienne aura besoin de deux démodulateurs IDR, qui donneront à la sortie les voies utiles et les voies non désirées. Pour éviter d'envoyer les voies non désirées au centre de commutation CCI, ce qui diminuerait la capacité de la liaison de terre, on sélectionne uniquement les

voies utiles, qui sont envoyées au CCI par un équipement de brassage numérique ou équipement de dérivation numérique. En plaçant l'équipement EMCN non pas dans la station terrienne, mais dans le CCI, on parvient à réduire le nombre de voies nécessaires non seulement dans le satellite mais également sur la liaison de Terre.

On peut recourir à l'exploitation multidestination pour un maximum de quatre destinations par équipement EMCN. Ce mode d'exploitation est économique dans le cas d'utilisateurs écoulant un volume de trafic modeste et qui ont besoin de plusieurs destinations. Toutes les voies supports satellite sont soumises au traitement CNC quelle que soit leur destination. La Figure 2.4.2 représente la structure d'un système à 4 destinations. Dans cet exemple, il faut un modulateur IDR et 4 démodulateurs pour chaque équipement EMCN. Cet équipement peut être placé dans la station terrienne ou dans le centre de commutation international CCI.

Figure 2.4.2 – Représentation schématique du mode d'exploitation multidestination avec EMCN/IDR



L'équipement EMCN fonctionnant sur une liaison par satellite doit permettre la mise en œuvre des services supports du RNIS (réseau numérique avec intégration des services). Cela signifie que l'EMCN doit être transparent aux voies de transmission de Terre à 64 kbit/s utilisées en mode circuit sans restriction, avec différents protocoles d'accès. Par ailleurs, la voie à 64 kbit/s doit pouvoir transmettre des données en bande vocale à 3,1 kHz en provenance de modems. En outre, l'EMCN doit être à même de traiter des transmissions de signaux téléphoniques et de données en alternance pendant la même communication.

2.4.1.3 Systèmes à satellites internationaux à grande capacité pour la téléphonie et la transmission de données

C'est avant tout la capacité qui fait la différence entre les systèmes à satellites utilisés respectivement pour des liaisons internationales et pour des communications nationales ou régionales. Les stations terriennes internationales sont le plus souvent des installations à grande capacité, capables de traiter plusieurs centaines, voire des milliers, de voies de téléphonie et de transmission de données, avec plusieurs canaux

de télévision. De leur côté, les systèmes nationaux ou régionaux sont généralement réalisés avec une petite ou moyenne capacité: par exemple, quelques douzaines ou au plus quelques centaines de voies et un seul canal de télévision.

Qu'une station terrienne soit conçue pour des liaisons internationales à grande capacité ou pour des communications nationales ou régionales à faible capacité, la technologie mise en œuvre dans les équipements est fondamentalement la même. La différence réside, d'une part, dans le dimensionnement de ces équipements pour les adapter à l'application recherchée et, d'autre part, dans l'utilisation d'équipements qui permettront d'augmenter le nombre des voies de transmission dans les liaisons à grande capacité.

On trouvera ci-après des indications sur les divers sous-systèmes d'équipement que l'on trouve dans une station terrienne type. Les différences qui caractérisent une station terrienne à grande capacité par rapport à une station terrienne à faible capacité sont les suivantes:

- Antenne de plus grandes dimensions, afin d'accroître le gain d'antenne et, par voie de conséquence, la capacité de la station. Une valeur type du diamètre d'antenne est comprise entre 16 et 18 mètres. Le facteur de qualité de la station s'exprime par son rapport G/T, rapport du gain de l'antenne de réception à la température de bruit thermique du système en kelvins. Par exemple, une antenne de 16 mètres fonctionnant à 4 GHz pourra avoir un gain de réception de $3,16 \times 10^{-5}$ (55 dB) et une température de bruit de 100 K pour l'angle d'élévation de fonctionnement. Cette température de bruit possède deux composantes principales: la température de l'amplificateur à faible bruit (AFB; par exemple, 50 K) et la température de bruit de l'antenne (50 K). Cela donnerait pour la station un rapport G/T de 35 dB/K, valeur typique pour une station terrienne internationale. L'équipement d'alimentation et de poursuite de l'antenne est identique à ceux qui seront décrits dans la section suivante de ce Manuel.
- Les amplificateurs à grande puissance (AGP), ou amplificateurs de puissance, doivent avoir une puissance de sortie nominale plus élevée. Les grandes stations internationales émettent souvent deux porteuses radioélectriques, ou plus, à partir d'un même AGP. Dans ces conditions, il faut prévoir un recul de puissance plus important dans ces amplificateurs, pour cause d'intermodulation, et l'AGP doit être dimensionné en conséquence.
- Le(s) modulateur(s) et le(s) démodulateur(s) doivent être capables de traiter des trains de données d'information à grande capacité (valeurs types: 2,048, 6,312, 8,448, 32,064, 34,368 et 44,736 Mbit/s). Des débits d'information encore plus élevés, par exemple 139,264 Mbit/s en hiérarchie numérique plésiochrone (PDH) et 155,52 Mbit/s en hiérarchie numérique synchrone (SDH), peuvent être envisagés dans les systèmes de télécommunication par satellite.
- Les stations terriennes à grande capacité sont souvent dotées d'un équipement de multiplication de circuit numérique (EMCN). Cet équipement applique les techniques du codage à faible débit (CFD) et de la concentration numérique des conversations (CNC) pour multiplier, par un facteur pouvant aller jusqu'à 5,0, le nombre des voies téléphoniques ou des voies de transmission de données dans la bande vocale, à l'intérieur de la bande passante d'un répéteur de satellite.

Modems à grande capacité

La technologie des modulateurs et des démodulateurs (modems) a progressé à grands pas au cours des dernières années. Ces progrès ont consisté essentiellement à réduire les dimensions des appareils et à introduire un grand nombre de fonctions dans des circuits réalisés en intégration à grande échelle (LSI: *large scale integration*). Parmi ces fonctions, on citera la correction d'erreur directe (CED) qui permet au démodulateur de fonctionner avec des valeurs de plus en plus basses du rapport porteuse/bruit (C/N) ou du rapport énergie par bit/densité (Eb/No), pour une valeur donnée du taux d'erreur binaire (TEB).

Les modems à grande capacité modernes sont disponibles aujourd'hui dans toute une série de configurations variées: modulateurs et démodulateurs séparés, modems combinés, modems à débit de transmission fixe, modems à débit variable, modems à montage sur bâti ou à carte enfichable.

Dans la configuration modem combiné, un modem joue le rôle de secours sur chaque châssis pour les 8 autres modems en ligne, le châssis portant également un module de commande automatique et manuelle de la commutation. On trouve aussi sur le châssis des combineurs FI, des diviseurs et un tableau de connexions. En ce qui concerne la capacité en voies, un bâti de 210 cm peut donc loger jusqu'à 32 modems en ligne qui ont une capacité maximale totale de 3 840 voies téléphoniques et/ou voies de transmission de données à 64 kbit/s, avec 64 voies de synchronisation et de signalisation. S'agissant de la capacité exprimée en bits par seconde, la capacité totale d'un tel bâti est de l'ordre de 270 Mbit/s.

Que le modem soit réalisé sous la forme de deux unités séparées ou d'une unité combinée, il est capable de fonctionner avec correction d'erreur FEC aux débits 1/2, 3/4 et 7/8, et peut être mis en œuvre en technologie de codage Reed-Solomon avec concaténation. Les interfaces d'utilisateur utilisées sont des types RS-422/449 ou V.35 (48-8 448 kbit/s) ou encore Rec. UIT-T G.703 (1 544-8 448 kbit/s). Avec la correction d'erreur CED au débit 1/2, le démodulateur donne normalement un TEB de 10^{-6} , ou mieux, et un rapport $E_b/N_0 = 6,1$ dB. Les valeurs correspondantes de E_b/N_0 pour CED 3/4 et CED 7/8 sont respectivement de 7,6 dB et 8,7 dB.

Le modulateur fonctionne en modulation par déplacement de phase (MDP) à 4 phases et le démodulateur en MDP cohérente à 4 phases. Les fréquences intermédiaires (FI) sont de 70 ou 140 MHz, et le modem peut réaliser l'accord par échelon de 2,5, 22,5 ou 25 kHz sur l'étendue de la bande passante de l'étage FI. La stabilité de fréquence est généralement de $\pm 10^{-6}$ par année. Par ailleurs, le modulateur fournit des signaux de synchronisation et des signaux de voie de service technique (ESC: *engineering service channel*) aux démodulateurs qui lui sont associés, et des signaux multiplexés d'extraction et d'insertion sont disponibles à des débits de données compris entre 64 et 1 920 kbit/s. Des étages tampons plésiochrones/Doppler peuvent être introduits pour synchroniser les démodulateurs sur les modulateurs. La puissance consommée par un châssis complètement équipé (9 modems) est d'environ 8 kVA.

Pour fonctionner de façon adéquate, les modems à grande capacité doivent être complétés par de nombreux dispositifs de surveillance et de commande locales et à distance. Les Tableaux 2.4.1 et 2.4.2 énumèrent des caractéristiques types qui peuvent être surveillées et commandées dans les modems de conception moderne.

Tableau 2.4.1 – Caractéristiques surveillées et commandées dans un modulateur à grande capacité

Caractéristique	Commande	Surveillance
Etat de fonctionnement de l'équipement		0
Fréquence porteuse (nombre de voies)	0	0
Niveau de la porteuse d'émission	0	0
Débit binaire d'information	0	0
Débit de CED	0	0
Type de verrouillage de trame à l'émission	0	0
Interface de Terre à l'émission	0	0
Emission/coupure de la porteuse	0	0
Marche/arrêt du circuit de mise en boucle	0	0
Marche/arrêt de l'embrouilleur	0	0
Signal d'indication d'alarme		0
Perte des données d'entrée		0
Alarme vers l'amont		0

Tableau 2.4.2 – Caractéristiques surveillées et commandées dans un démodulateur à grande capacité

Caractéristique	Commande	Surveillance
Etat de fonctionnement de l'équipement		0
Fréquence porteuse (nombre de voies)	0	0
Niveau de la porteuse d'émission	0	0
Débit de CED	0	0
Type de verrouillage de trame à la réception	0	0
Interface de Terre à la réception	0	0
Marche/arrêt du circuit de mise en boucle	0	0
Marche/arrêt du désembrouilleur	0	0
Réinitialisation du tampon	0	0
Taux d'erreur binaire		0
Perte de synchronisation		0
Signal d'indication d'alarme		0
Alarme pour taux d'erreur binaire élevé		0
Alarme vers l'amont	4 destinations	0

2.4.1.4 Systèmes à satellites régionaux et nationaux (DOMSAT) à petite et moyenne capacité

Avec la libéralisation des politiques de télécommunication qui a déferlé sur le monde au cours des dernières années, avec aussi la tendance qui se dessine d'une plus grande libéralisation encore dans l'avenir, on assiste à la mise en œuvre, dans le monde entier, de nouveaux systèmes à satellites par des organisations qui, auparavant, face à des situations de monopole, auraient été dans l'impossibilité de mettre en place leur système. Ces systèmes, qui ont en général une capacité de trafic supérieure à celle des systèmes à microstations (VSAT: *very small aperture terminal*), sont le plus souvent mis en service à l'intérieur des frontières nationales (Domsats: *domestic satellites*, satellites nationaux) mais ils peuvent aussi desservir plusieurs pays d'une région.

Avec la prolifération de nouveaux systèmes à satellites et le passage à des bandes de fréquences plus élevées, on a besoin de stations terriennes à fonctionnement plus souple et de sous-systèmes de stations terriennes qui soient à la fois économiques et ultra fiables, car beaucoup de ces stations fonctionneront sans surveillance sur place. La consommation d'énergie est aussi un paramètre important dans la conception des nouveaux équipements; en effet, des stations terriennes en nombre de plus en plus grand utiliseront des sources nouvelles d'énergie primaire, par exemple l'énergie d'origine solaire.

Les équipements qui constituent une station terrienne moderne à exploitation numérique se rangent dans les grandes catégories suivantes:

- 1) système d'antenne avec système d'alimentation et de poursuite (s'il y a lieu),
- 2) dispositifs à faible bruit,
- 3) dispositifs à grande puissance,
- 4) élévateurs et abaisseurs de fréquence,
- 5) modems (voir le paragraphe précédent),
- 6) systèmes centralisés de surveillance et de commande.

Il est possible aujourd'hui de réaliser un type d'antenne à fonctionnement souple, qui peut être mis en œuvre simultanément dans les bandes C et Ku, c'est-à-dire les bandes 6/4 et 14/11 GHz. Cela est important parce que beaucoup de satellites modernes seront équipés de répéteurs conçus pour ces deux bandes de fréquences dans le service fixe par satellite. Cette souplesse de fonctionnement présente d'ailleurs des avantages pour les stations terriennes transmettant des signaux de télévision sur la liaison montante et appelées à remplacer des câbles en réparation: ces stations ont parfois besoin d'accéder à des satellites qui fonctionnent dans la bande C ou la bande Ku, ou dans les deux bandes à la fois.

Le développement de dispositifs à faible bruit destinés à l'étage d'entrée des stations terriennes comprend les travaux suivants: abaissement de la température de bruit, réduction des dimensions des appareils, augmentation de la moyenne des temps de bon fonctionnement (MTBF) et réalisation de dispositifs capables de fonctionner sans maintenance et sans refroidissement. Il n'est pas rare que des amplificateurs à faible bruit (AFB) modernes aient des MTBF de 500 000 heures.

La technique des amplificateurs de puissance a évolué, partant des klystrons et des tubes à ondes progressives pour aboutir aux amplificateurs à transistors à effet de champ (TEC), sous l'appellation générique d'amplificateurs de puissance à semi-conducteurs (SSPA: *solid state power amplifiers*). Cette évolution a entraîné une diminution importante des dimensions des amplificateurs et une énorme amélioration de la fiabilité, grâce surtout à une simplification des systèmes d'alimentation en énergie.

Les convertisseurs de fréquence sont des éléments essentiels des stations terriennes. Ils permettent de passer, dans le répéteur du satellite, des bandes communes de fréquences intermédiaires aux fréquences radioélectriques assignées. Avec le passage de l'analogique au numérique, les performances des convertisseurs ont pris une importance nouvelle, en ce qui concerne le bruit de phase, la linéarité, les signaux de sortie parasites et la fiabilité. Les convertisseurs de fréquence modernes font largement appel aux technologies de pointe: amplificateurs RF monolithiques à transistors TEC, amplificateurs FI monolithiques bipolaires et circuits intégrés hybrides à couche mince et couche épaisse pour micro-ondes (MHIC: *microwave hybrid integrated circuits*).

Les modulateurs et les démodulateurs jouent un rôle important dans les stations terriennes à fonctionnement numérique: ils déterminent en grande partie la qualité d'ensemble d'une liaison par satellite et sont capables, d'une part, de réduire la puissance radioélectrique qui doit être fournie par le satellite, d'autre part, de maintenir un niveau de qualité élevé sur la liaison. Ces résultats sont obtenus par l'application de procédés très performants de correction d'erreur directe (CED) qui ont pour effet d'abaisser le seuil du démodulateur jusqu'à des valeurs très petites.

Enfin, il faut souligner l'importance d'une supervision et d'une commande centralisées d'une ou de plusieurs stations terriennes, ou d'un système national ou régional complet. En effet, les équipements fonctionnent souvent sans surveillance directe, non seulement dans la station terrienne principale (centrale) mais aussi, très souvent, dans les stations distantes asservies à la station centrale. Un sous-système moderne de supervision et de commande est composé d'équipements informatisés (en général, un ou plusieurs PC dans un réseau local) à partir desquels un opérateur unique peut surveiller et commander tous les équipements de la station principale et des stations distantes. Le logiciel utilisé à cette fin met en pratique les architectures modernes à fenêtres, avec interface homme-machine conviviale.

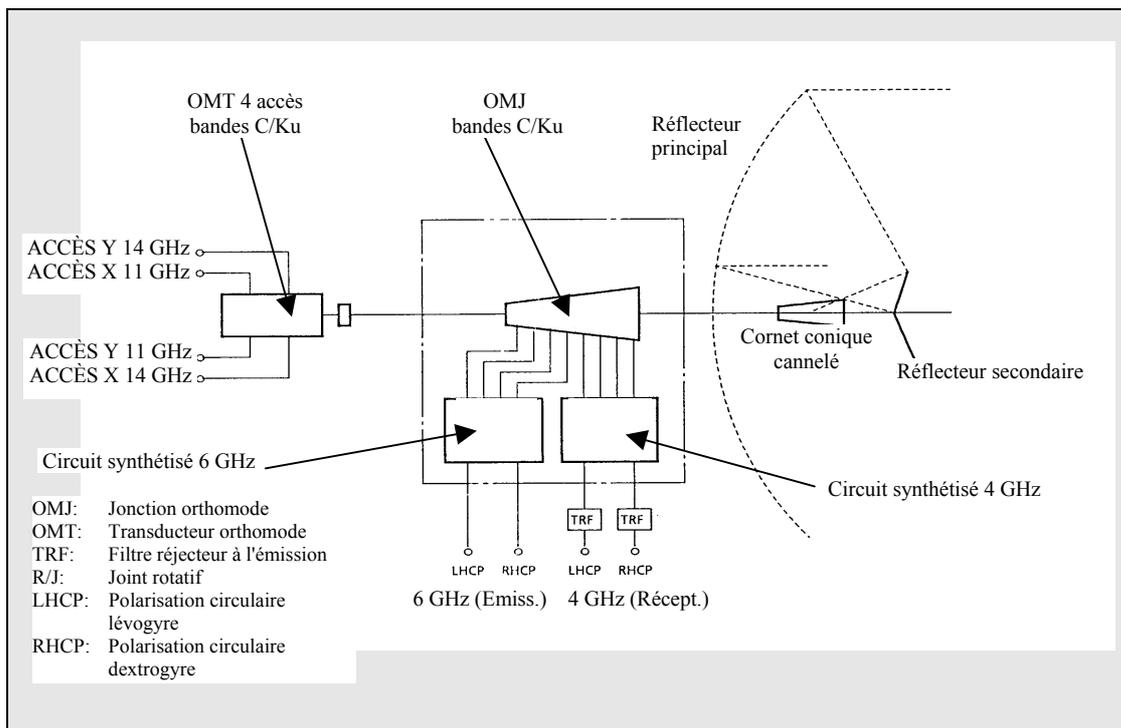
Structures d'antennes mixtes bande C/bande Ku

Face à la diversité des systèmes des stations terriennes et aux différentes bandes de fréquences utilisées, on dispose aujourd'hui d'une technologie d'antenne parabolique mixte, bande C/bande Ku, avec des systèmes d'alimentation (émission et réception) qui permettent le fonctionnement simultané en double bande et double polarisation. Les diamètres de ces antennes vont de 7,6 mètres à 16 mètres. Dans le passé, on utilisait la double polarisation circulaire dans les bandes C (4/6 GHz) et la double polarisation rectiligne dans les bandes Ku (11-12/14 GHz). Avec l'accroissement de la demande de bandes de fréquences, on prévoit que la polarisation rectiligne et la polarisation circulaire seront aussi utilisées, respectivement, dans les bandes C et dans les bandes Ku. On prévoit également la mise en œuvre, dans les systèmes à satellites, d'une technologie de systèmes d'alimentation fonctionnant avec commutation entre ces deux types de polarisation.

Alimentation combinée bande C/bande Ku

C'est dans le domaine des alimentations combinées bande C/bande Ku que les travaux de développement technologique sur les nouvelles antennes ont été les plus poussés. La Figure 2.4.3 représente schématiquement une antenne parabolique mixte à double bande et double polarisation. Le système d'alimentation se présente sous la forme d'une structure mécanique unique intégrée, longue d'environ 3 mètres et contenant exclusivement des dispositifs hyperfréquences passifs.

Figure 2.4.3 – Système d'alimentation d'antenne combiné pour bandes C et Ku avec double bande de fréquences et double polarisation



Le Tableau 2.4.3 donne les valeurs du gain total (émission et réception) de l'antenne (dB) pour les bandes C et Ku et les valeurs de la température du bruit thermique en kelvins (K).

Poursuite des satellites

Selon le diamètre de l'antenne d'une station terrienne et selon les mouvements du satellite, il peut être nécessaire, ou non, d'avoir une poursuite manuelle/automatique de l'engin spatial. Par ailleurs, le degré de complexité du système de poursuite peut varier d'un usager à un autre.

A l'une des extrêmes de l'échelle, les petites stations terriennes (diamètre d'antenne maximum 5-6 mètres), communiquant avec des satellites géostationnaires, peuvent se passer de système de poursuite: leur faisceau d'antenne est tellement large que le satellite n'en sort jamais. Tout au plus peut-on prévoir des réorientations, peu fréquentes, de l'antenne à l'aide d'un vérin à entraînement manuel ou d'un système motorisé.

Tableau 2.4.3 – Gain total et température de bruit thermique des antennes à fonctionnement mixte

	Diamètre des antennes à fonctionnement mixte bandes C/bandes Ku																			
	7,6 mètres				9,2 mètres				11 mètres				13 mètres				16 mètres			
	Gain (dB)				Gain (dB)				Gain (dB)				Gain (dB)				Gain (dB)			
Bande de réception de 4 GHz	48,0				49,7				51,4				53,0				54,9			
Bande d'émission de 6,0 GHz	51,7				53,7				55,4				56,9				58,1			
Bande de réception de 11,2 GHz	55,2				57,6				59,6				61,1				61,2			
Bande d'émission de 14,25 GHz	56,8				59,0				60,9				62,3				62,3			
Élévation en degrés	5	10	20	40	5	10	20	40	5	10	20	40	5	10	20	40	5	10	20	40
Bruit thermique à 4 GHz (K)	59	46	40	37	58	45	39	36	57	44	38	35	56	44	38	35	58	46	41	38
Bruit thermique à 11,2 GHz (K)	93	75	63	56	90	73	61	54	89	72	60	53	89	72	60	53	94	77	66	59

A l'autre extrême de l'échelle, les grandes stations terriennes Intelsat (type A), dont les antennes ont un diamètre de 16 mètres ou plus, doivent être équipées d'un système de poursuite automatique quel que soit le satellite utilisé. Cela s'explique par le fait que ces stations ont des faisceaux d'antenne très étroits. Par exemple, une antenne de 16 mètres pour la bande Ku a un faisceau dont l'ouverture à mi-puissance est de l'ordre de 0,12 degré à 11,2 GHz. Une poursuite simple, manuelle et automatique, est un minimum indispensable pour ces stations si elles communiquent avec des satellites géostationnaires stables; mais le degré de complexité technique des équipements de poursuite croît rapidement si la station terrienne doit fonctionner avec des satellites moins stables ou non géostationnaires; si elle doit opérer des commutations rapides entre deux satellites, ou plus; si elle est située dans une zone géographique où les signaux subissent fréquemment des affaiblissements et/ou des scintillations; ou même si la station est appelée à communiquer avec des satellites dont les orbites sont stables mais inclinées par rapport à l'orbite des satellites géostationnaires.

Il y a eu une évolution de la technologie de poursuite des satellites qui est passée de la méthode analogique avec monoimpulsion, fondée sur les techniques du radar à la poursuite numérique moderne pour échelons commandée par ordinateur, cette dernière étant moins coûteuse et techniquement supérieure par le nombre de fonction qui peuvent être mises en œuvre. Ces fonctions sont généralement accomplies par une unité de commande d'antenne (ACU, *antenna control unit*) pilotée par microprocesseur.

La formule minimale est la mise en œuvre de l'unité ACU pour une simple poursuite motorisée à commande manuelle. Dans ce cas, on n'a pas besoin d'un abaisseur de fréquence ni d'un récepteur de signaux de balise, sauf si l'on souhaite une indication quant au niveau de ces signaux. Dans le cas de la poursuite automatique, l'ACU évalue le niveau (en courant continu) des signaux de balise. Si ce niveau

s'abaisse jusqu'à une valeur prédéterminée, et dès que cela se produit, l'ACU imprime à la structure d'antenne des mouvements par échelons, en azimut et en élévation, jusqu'à optimisation du niveau. Ces mouvements sont commandés par une unité de commande motorisée qui agit sur des moteurs d'entraînement de l'antenne (moteurs à courant alternatif ou continu). Une fois le niveau du signal optimisé, l'unité ACU neutralise le système de poursuite et se met en attente pendant un intervalle de temps prédéterminé ou jusqu'à la prochaine baisse du niveau du signal.

Un ou plusieurs des modes de poursuite suivants peuvent être mis en œuvre dans une station terrienne moderne, en fonction des exigences de l'opération de poursuite:

- Mode manuel. Agissant sur le panneau avant de l'unité ACU, l'opérateur de la station terrienne déplace manuellement l'antenne en azimut et en élévation pour lui donner l'orientation voulue.
- Mode automatique. Le système de poursuite suit tous les mouvements du satellite de façon entièrement automatique.
- Mode préréglé. Agissant sur le panneau avant de l'ACU, l'opérateur introduit une position de satellite (azimut et élévation). En réponse à la manœuvre d'un bouton poussoir ou au terme d'une période prédéterminée, l'ACU place l'antenne dans la position préréglée.
- Mode programme. Dans ce mode, l'opérateur de la station terrienne introduit 11 paramètres de données d'éphémérides qui ont été fournis par l'opérateur du satellite. L'ACU utilise ces données pour calculer les positions du satellite et pour pointer l'antenne sur ces positions à intervalles réguliers.
- Mode mémoire. Pour pouvoir choisir ce mode, il faut que la poursuite automatique ait été effectuée au minimum pendant les 26 heures précédentes. L'ACU utilisera les données ainsi recueillies pour poursuivre le satellite à partir de ce moment. Pour ce faire, on pose par hypothèse que l'orbite ne variera pas d'un jour au jour suivant, ou qu'elle variera très peu.
- Mode programme intelligent à auto-apprentissage. Ce mode de poursuite (qu'on pourrait appeler mode de poursuite actif) est une extrapolation du mode mémoire (passif). Dans ce mode intelligent, l'unité ACU analyse les données de poursuite recueillies au cours des 24 heures écoulées et, sur la base du résultat, elle prédit les positions du satellite à partir de ce moment. Ce mode de poursuite est plus précis que tous les autres, y compris la poursuite automatique. Il permet de réduire l'usure des éléments mécaniques de l'antenne parce que le matériel est activé moins souvent. Par ailleurs, il peut fonctionner sans signal de balise et il est particulièrement indiqué pour les stations terriennes qui sont soumises à de fréquents problèmes de scintillation.

On aura une idée de la complexité de l'unité ACU et du système de poursuite dans son ensemble si l'on considère qu'il lui est impossible de savoir si une baisse de niveau du signal (en courant continu) est due à l'une des causes suivantes:

- 1) le satellite sort du faisceau principal de l'antenne;
- 2) changement d'orientation du faisceau principal de l'antenne de la station terrienne, par exemple sous l'effet de vents violents;
- 3) le signal de balise subit des anomalies de propagation en amplitude et en phase (les systèmes 14/11 GHz, en particulier, sont sujets à ces anomalies);
- 4) absence ou dégradation du signal de balise. L'ACU doit assumer et résoudre tous ces problèmes.

Amplificateurs et convertisseurs à faible bruit

Le bon fonctionnement des liaisons par satellite dépend d'un petit composant à faible bruit appelé transistor à effet de champ (TEC), à l'arséniure de gallium (AsGa), que l'on monte dans l'étage d'entrée d'une chaîne d'amplificateur installée dans la structure d'antenne, tout près du système d'alimentation. La chaîne d'amplification s'appelle un amplificateur à faible bruit (AFB). Dans certains cas, les signaux reçus en provenance du satellite sont abaissés en fréquence dans ce même composant; l'amplificateur d'entrée prend alors le nom de convertisseur à faible bruit (CFB).

La technologie des amplificateurs à faible bruit pour les communications par satellite a suivi une évolution qui a conduit des amplificateurs diodes à bande étroite, refroidis à l'azote ou à l'hélium liquide, jusqu'aux unités modernes à transistors TEC AsGa à large bande qui n'ont besoin d'aucun refroidissement. Parallèlement on a réduit considérablement les dimensions de l'amplificateur AFB qui, dans certains modèles, peut être pratiquement incorporé au guide d'ondes.

Dans la bande Ku, les stations terriennes peuvent être réalisées avec des amplificateurs AFB ou des convertisseurs CFB conçus pour cette bande. Si le choix se porte sur des AFB, une unité d'amplification a en général les mêmes dimensions qu'un AFB pour bande C. Une telle unité pourra avoir une température de bruit comprise entre 80K et 180K, et un gain total de 55 dB. Selon l'application, l'amplificateur AFB peut avoir une bande passante extrêmement large, couvrant par exemple toutes les bandes de fréquences du service fixe par satellite (10,95-12,75 GHz).

Si la station terrienne fonctionnant en bande Ku est réalisée avec un convertisseur CFB en tant qu'amplificateur d'entrée, les signaux à 11-12 GHz reçus du satellite sont abaissés en fréquence dans le convertisseur pour donner une bande à fréquence intermédiaire fixe, généralement voisine de 1,0-1,5 GHz. Les températures de bruit et le gain sont normalement du même ordre de grandeur que dans les amplificateurs AFB: de 80K à 180K et 55 dB, selon l'application.

Amplificateurs à grande puissance (AGP)

Pour les stations terriennes qui ont besoin d'une puissance d'émission de l'ordre des kilowatts dans les bandes de fréquences du service fixe par satellite, l'élément central de l'amplificateur de puissance (AGP) est le tube à ondes progressives (TOP) ou le klystron amplificateur. Le choix du modèle pour une application donnée dépend des caractéristiques techniques ainsi que des coûts d'investissement et d'exploitation.

Avec les progrès accomplis dans la technologie des semi-conducteurs, les stations terriennes sont de plus équipées d'amplificateurs AGP réalisés avec des transistors à effet de champ (TEC). Ces amplificateurs abandonnent peu à peu les bandes d'hyperfréquences basses pour la bande Ku et les bandes plus élevées, avec des puissances de sortie accrues. On range généralement ces amplificateurs dans la catégorie générique des amplificateurs SSPA (amplificateurs de puissance à semi-conducteurs). Leur intérêt réside dans leurs caractéristiques: bonne performance technique, faible consommation d'énergie et grande fiabilité. Pour les mêmes raisons, on les utilise de plus en plus comme amplificateurs de puissance dans les répéteurs de satellite modernes.

Un amplificateur de puissance moderne de haute technologie, mis en œuvre dans une nouvelle station terrienne, devrait avoir les caractéristiques suivantes:

- Grande fiabilité et bonne MTBF (moyenne des temps de bon fonctionnement).
- Gain élevé et bonne stabilité du gain.
- Faible distorsion d'intermodulation.
- Faible consommation d'énergie.
- Peu de conversion MA/MP.
- Faible MA résiduelle et faible bruit de phase.
- Faible surintensité de courant à l'entrée.
- Faibles signaux parasites à la sortie.
- Simplicité des procédures d'exploitation et de maintenance.
- Indicateurs de défauts et d'état de fonctionnement efficaces.
- Circuits de protection et d'alarme efficaces avec séquençage logique pour prévenir les dysfonctionnements.
- Recyclage automatique pour redémarrage automatique après les pannes d'alimentation ou autres causes.

- Conditionnement compact et intégré.
- Aptitude à l'intégration dans une chaîne d'émission redondante, avec commutation automatique entre AGP en ligne et AGP en réserve.
- Aptitude à être surveillé et commandé à distance.

En tenant compte du satellite et de la bande de fréquences à utiliser, il est possible de faire choix d'un amplificateur de puissance pour une station terrienne donnée. Le Tableau 2.4.4 donne des valeurs types de la puissance de sortie des AGP dans les bandes de fréquences attribuées aux télécommunications par satellite, pour les trois principaux types d'amplificateurs.

Tableau 2.4.4 – Puissance de sortie des amplificateurs à grande puissance dans plusieurs bandes de fréquences

	Bande de fréquences	Puissance de sortie
AGP, TOP	5,850-6,425 GHz	700W, 3KW
	12,75-13,25 GHz 13,75-14,50 GHz	13W, 300W, 600W
	14,00-14,50 GHz	1KW
	17,20-18,10 GHz	400KW
	Bande des 30 GHz	100W, 200W, 500W
AGP, klystron	5,850-6,475 GHz	1,7KW, 3,4KW
	14,00-14,50 GHz	2KW, 3KW
	17,30-18, GHz	1,5KW
	Bande des 30 GHz	350KW, 450KW
AGP, SSPA	1,626-1,661 GHz	5W, 50W
	5,850-6,425 GHz	10W, 20W, 50W, 100W
	14,00-14,50 GHz	6W, 15W, 35W

Convertisseurs de fréquence

Le passage de l'analogique au numérique dans les télécommunications par satellite a donné une importance accrue aux convertisseurs de fréquence des stations terriennes.

On distingue les convertisseurs éleveurs et les convertisseurs abaisseurs de fréquence, pour le passage entre les bandes RF et la bande FI. L'éleveur de fréquence a pour fonction de placer une ou plusieurs porteuses RF dans la bande passante du répéteur de satellite, pour l'émission. De la même façon, l'abaisseur de fréquence a pour fonction de recevoir une ou plusieurs porteuses RF dans la bande passante d'un répéteur chargé de la réception. Pour ce faire, les deux convertisseurs sont normalement accordés sur la fréquence centrale du répéteur. La fréquence intermédiaire (FI) est fixée à 70 ou 140 MHz. Une FI de 70 MHz suffit si l'exploitation est prévue avec un répéteur de satellite standard de 36 MHz. Il est préférable de prendre FI = 140 MHz si on envisage d'utiliser des répéteurs à bande passante plus large, par exemple 72 MHz.

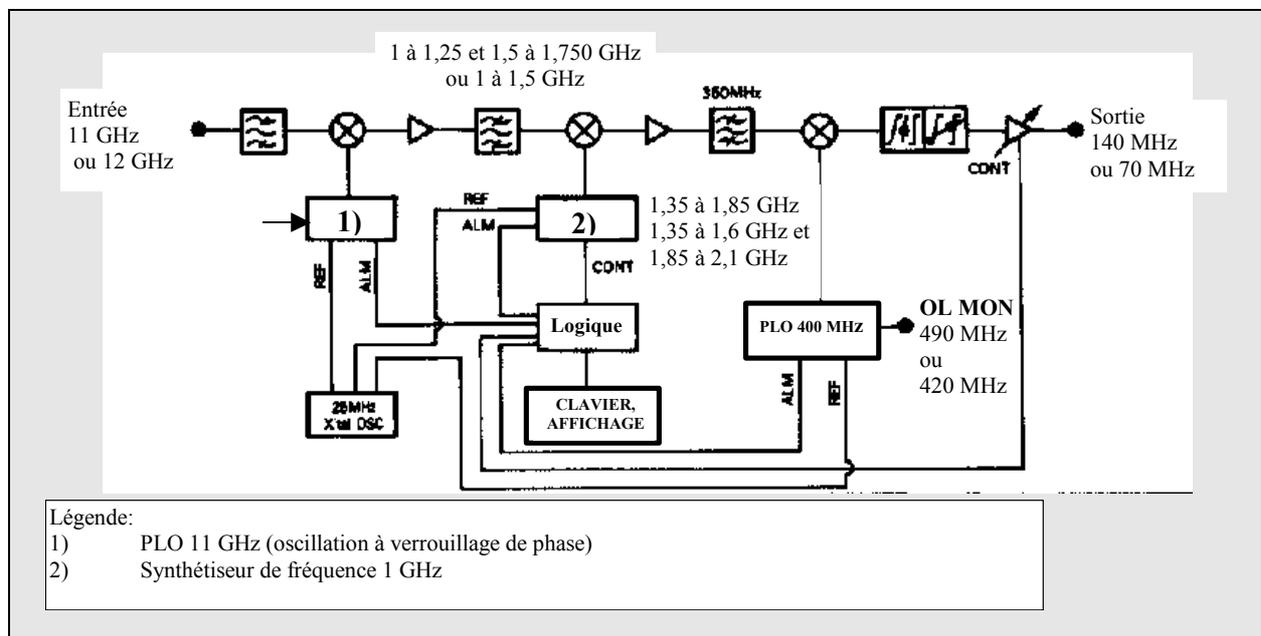
Les convertisseurs éleveurs et abaisseurs modernes devraient avoir les caractéristiques suivantes:

- Grande fiabilité et bonne MTBF (moyenne des temps de bon fonctionnement).
- Bonne stabilité de gain.

- Bonne linéarité.
- Faible distorsion d'intermodulation.
- Caractéristique d'amplitude FI/RF plate.
- Bonne caractéristique de temps de propagation de groupe FI/RF.
- Faible consommation d'énergie.
- Faible bruit de phase.
- Faible bruit thermique.
- Faibles signaux parasites à la sortie.
- Simplicité des procédures d'exploitation et de maintenance.
- Indicateurs de défauts et d'état de fonctionnement efficaces.
- Aptitude à être surveillé et commandé à distance.
- Conditionnement compact et intégré.
- Aptitude à l'intégration dans une chaîne d'émission ou de réception redondante, avec commutation automatique entre unités en ligne et unités en réserve.

Par ailleurs, il devra être possible de compléter l'abaisseur de fréquence par une commande automatique de gain (CAG) et une commande automatique de fréquence (CAF) si ces systèmes n'ont pas été prévus dans l'équipement d'origine. La Figure 2.4.4 représente un convertisseur-abaisseur type 12 GHz fonctionnant avec trois changements de fréquence.

Figure 2.4.4 – Schéma de principe d'un convertisseur abaisseur à trois changements de fréquence pour la bande Ku



On obtient une grande fiabilité et une bonne MTBF en ayant recours à des circuits intégrés hybrides pour micro-ondes (MHIC) à couche mince et à couche épaisse, à des circuits monolithiques tels que les transistors TEC AsGa et à des amplificateurs à transistors bipolaires. Pour assurer un fonctionnement aisé et souple, il est préférable d'utiliser un oscillateur local synthétisé plutôt qu'un oscillateur local à préassignation fixe. Par ailleurs, il y a intérêt à avoir un convertisseur à trois changements de fréquence, qui permet de réduire le nombre d'échelons de fréquence par lesquels on peut faire passer le convertisseur-élévateur ou abaisseur à l'intérieur de sa bande passante nominale.

Modulateurs et démodulateurs

Les modulateurs et les démodulateurs numériques destinés aux systèmes à satellites nationaux et régionaux ne diffèrent guère, au point de vue technique, de leurs homologues utilisés dans les systèmes à grande capacité qui sont décrits par ailleurs dans ce Manuel. La différence réside plutôt dans le volume de trafic qu'ils peuvent traiter.

Un système à satellites national de faible capacité peut être mis en œuvre avec seulement un petit nombre de voies téléphoniques numériques préassignées, lesquelles peuvent être exploitées avec un débit d'information ne dépassant pas 16 kbit/s. Un système à capacité plus grande peut être conçu pour plusieurs centaines de voies de téléphonie et de transmission de données. Il est peu probable que toutes les voies seront actives simultanément et qu'on en aura besoin entre les mêmes lieux géographiques chaque fois qu'elles seront utilisées. Il est donc inutile d'attribuer à chaque voie une bande de fréquences permanente dans le répéteur du satellite. Au lieu de cela, les voies satellite seront assignées à la demande et le système à satellites comportera un sous-système d'*accès multiple en fonction de la demande* (AMAD) qui assignera les voies au fur et à mesure des besoins. Il en résulte une économie sur la bande passante du répéteur du satellite et, par conséquent, une baisse des dépenses d'exploitation de l'opérateur du système à satellites.

La distribution de programmes de télévision est une fonction essentielle de nombreux systèmes à satellites nationaux. Avec les puissants répéteurs dont on dispose aujourd'hui, les programmes peuvent être distribués à de petits récepteurs de télévision installés sur le toit des bâtiments. On a recours à la transmission télévisuelle analogique depuis le début des télécommunications par satellite; ce mode de transmission continue à être utilisé dans les nouvelles stations terriennes, principalement parce que de nombreux récepteurs analogiques sont en service dans la plupart des pays. Cependant, la télévision analogique est appelée à être supplantée peu à peu par la télévision numérique qui, associée à des techniques de compression modernes telles que MPEG-2, permettra une utilisation plus rationnelle de la largeur de bande et de la puissance des satellites. Les modulateurs et les démodulateurs destinés à la télévision numérique fonctionneront avec des débits binaires qui dépendront de la qualité souhaitée pour l'image et le son. Par exemple, un débit de 64 kbit/s pourrait être acceptable pour une visioconférence privée de PC à PC; par contre, un système chargé de fournir des images et des signaux son de qualité studio devra fonctionner avec un débit binaire de 2 Mbit/s, voire davantage.

Système centralisé de surveillance et de commande

A l'instar de l'évolution actuelle dans le domaine de l'exploitation et de la maintenance des systèmes de communication complexes, on met souvent en œuvre des systèmes sophistiqués de surveillance et de commande (M&C, *monitoring and control*) des stations terriennes, tels que l'exploitation et la maintenance d'une ou de plusieurs de ces stations puissent s'opérer à partir d'une installation centrale. Cette installation peut se trouver sur le site de la ou des stations terriennes, ou ailleurs. Ces systèmes sont aussi appelés systèmes informatisés de gestion des stations (CSMS, *computerized station management systems*). Les fonctions M&C peuvent être étendues à la surveillance et à la commande des stations terriennes distantes, qui sont asservies à une station terrienne centrale dans un système à satellites national ou régional.

Un système CSMS moderne, chargé de la surveillance et de la commande d'une station terrienne (ou d'un complexe de plusieurs stations terriennes) doit avoir les caractéristiques suivantes:

- Il doit être spécifiquement adapté à l'application. Une station terrienne moderne est tellement complexe que le fonctionnement d'un système M&C standard pourrait laisser à désirer.
- Il doit être exhaustif et s'appliquer à l'exploitation et à la maintenance de tous les sous-systèmes, que l'équipement ait été produit par un seul constructeur ou que certaines parties aient été livrées par plusieurs fournisseurs. Il doit aussi être capable de surveiller des équipements auxiliaires tels que des détecteurs de flammes et de fumée, et des détecteurs d'intrusion.

- Il doit avoir une grande souplesse d'utilisation. En cas de reconfiguration de la station terrienne, pour cause d'augmentation ou de remplacement d'équipements, le système CSMS doit pouvoir, lui aussi, être reconfiguré par le personnel de maintenance de la station, sans reprogrammation du logiciel CSMS. Une fonction d'apprentissage constituerait aussi une caractéristique des plus utiles.
- Il doit être doté de larges fonctions d'enregistrement, afin que les performances de la ou des stations terriennes puissent être analysées hors ligne.
- L'initiation à son fonctionnement doit se faire aisément. A cet effet, le système doit être constitué de matériels standard, dans toute la mesure du possible et il doit être équipé d'un système d'exploitation informatique standard et convivial, répondant aux techniques modernes des logiciels.

2.4.1.5 Systèmes à microstations

Un système à satellites doté de microstations (VSAT, *very small aperture terminal*) fournit une solution intéressante pour répondre aux besoins en matière de téléphonie et de communications de données, dans les cas où l'on peut se contenter d'une capacité limitée dans chaque station mais où les stations peuvent se compter par milliers. La souplesse de ces systèmes et telle qu'ils peuvent être mis en œuvre très rapidement pour un petit nombre de sites, après quoi ils s'étendent progressivement à mesure que le trafic s'accroît ou lorsque les conditions économiques le permettent. Ce type de système constitue par conséquent la solution idéale pour les communications rurales: chaque petite collectivité rurale n'a peut-être besoin que d'un petit nombre de voies de téléphonie et de transmission de données, mais il peut y avoir des centaines, voire des milliers, de ces collectivités disséminées sur tout le territoire d'un pays.

La solution microstation est aussi intéressante dans les cas où, en plus des communications de téléphonie et de données, on a besoin d'un service de radiodiffusion télévisuelle et sonore unidirectionnelle à des fins éducatives ou autres. Ici, les microstations serviront non seulement de stations d'émission et de réception pour la téléphonie et la transmission de données, mais également comme stations réceptrices seulement de télévision et de radiodiffusion sonore.

Par ailleurs, les voies de transmission de données numériques des microstations modernes peuvent être configurées, à la demande, pour des applications spécifiques. Cela ouvre la voie à toute une série d'applications nouvelles, dont la téléconférence en général et la télé-médecine en particulier se rangent peut-être parmi les plus importantes. Prenons un exemple: supposons qu'une équipe médicale semi-qualifiée, pourvue d'une caméra vidéo et d'un équipement médical se prêtant à la communication de données, se rende à intervalles réguliers dans des collectivités qui disposent d'une microstation. Au cours de ces visites, des voies par satellite, pour communications vidéo et vocales bidirectionnelles, seront établies pour des consultations entre patients et personnels médicaux qualifiés exerçant dans des centres de soins du pays.

Du fait de leur souplesse d'utilisation, les systèmes à microstations sont capables d'écouler diverses catégories de trafic. Par exemple, certaines organisations (privées ou publiques) peuvent avoir besoin de: 1) communications vocales et de voies de communication de données à usage continu, à divers débits de transmission, entre de nombreux sites; alors que d'autres organisations peuvent avoir besoin de 2) communications de données interactives rapides et fréquentes et de transmissions occasionnelles de données par lots à des débits fixes, entre un ordinateur central et un grand nombre de sites distants; ou 3) d'autres organisations peuvent avoir besoin de ces deux types de communications, avec effet immédiat. Il faut aussi tenir compte de l'acheminement du trafic dans le cadre de ces besoins. Le système à microstations doit être capable d'acheminer le trafic 4) dans une configuration en *étoile*, dans laquelle tout le trafic, ou la plus grande partie de celui-ci, s'écoule entre une station centrale et les microstations distantes, et/ou 5) dans une configuration *maillée*, dans laquelle tout le trafic, ou la plus grande partie, est également répartie entre les microstations et la station centrale. Le système doit pouvoir aussi prendre en charge 6) le mode *diffusion*, dans lequel la station centrale, ou station de commande, peut émettre simultanément à destination de toutes les microstations ou d'un groupe prédéterminé de microstations. Enfin, 7) on devrait pouvoir réaliser la transmission de signaux de télévision numériques ou analogiques en utilisant, dans la station centrale et dans les microstations, les mêmes équipements radioélectriques qui servent aux transmissions dans les voies de téléphonie et de données.

Un système à microstations bien conçu devrait pouvoir mettre en œuvre toutes les fonctions de communication décrites ci-dessus. Il devrait être capable de fournir plusieurs débits de transmission entre ses usagers. Il devrait aussi pouvoir utiliser économiquement la voie satellite disponible (répéteur ou fraction de répéteur), en ce qui concerne la *puissance*, la *largeur de bande* et le *temps*. Enfin, le système à microstations doit faire l'objet d'une *gestion*, d'une *supervision* et d'une *commande* efficaces.

La manière d'économiser la *puissance* d'un répéteur de satellite consiste à prévoir, dans le système à microstations, des procédés de codage efficaces pour la correction d'erreur directe (CED). Les démodulateurs du système pourront ainsi fonctionner avec un très petit rapport porteuse/bruit (C/N), la conséquence étant une diminution de la puissance nécessaire du répéteur. Par ailleurs, si le système est mis en œuvre pour assurer des communications vocales, le codage de la voix doit être effectué au débit le plus faible compatible avec la qualité vocale souhaitée.

On préfère que le système à microstations puisse fournir plusieurs débits de transmission entre ses usagers, aussi bien dans les voies de données que dans les voies téléphoniques. Cela entraîne que la *largeur de bande* des répéteurs de satellite soit assignée à la demande. Ce principe de la largeur de bande à la demande (BOD, *bandwidth-on-demand*) doit être étendu aux débits de transmission entre tous les modulateurs et tous les démodulateurs du système.

Le *temps* du répéteur de satellite doit être utilisé le plus efficacement possible. On obtient ce résultat en faisant en sorte que le système à microstations fonctionne avec accès multiple en fonction de la demande (AMAD), les circuits satellite (téléphonie ou données) étant assignés seulement à la demande (c'est-à-dire quand on en a besoin).

Si l'on veut que le système à microstations fonctionne de façon fiable, sans incidents et avec un effectif minimum de personnel qualifié, il faut le doter d'un système de gestion du réseau (NMS: *network management system*) qui assurera la *gestion*, la *supervision* et la *commande*.

Les systèmes à microstations peuvent être mis en œuvre dans la bande C attribuée aux télécommunications par satellite ainsi que dans les bandes Ku. Des progrès techniques importants ont été accomplis dans la mise au point des matériels et des logiciels utilisés dans ces systèmes. Ceux-ci peuvent être réalisés comme des installations autonomes, ou intégrés à des équipements de station terrienne préexistants. Cette dernière solution est une source d'économies financières et permet d'abréger les délais de mise en œuvre.

On trouvera dans l'Annexe A la description détaillée d'une forme de réalisation particulière d'un système à microstations.

2.4.1.6 Système d'émission de station terrienne transportable pour reportages d'actualités par satellite en modulation numérique (RAS numérique)

Pour répondre à la demande croissante de couverture télévisuelle en direct, il existe à présent des équipements très compacts dans lesquels sont appliquées des techniques de compression de l'image et du son conformes aux normes MPEG-2 (plus précisément ISO/CEI 13818-2). Pour avoir des dimensions et un poids raisonnables et pour pouvoir utiliser les satellites modernes à grande puissance, on fait fonctionner ces systèmes dans les bandes Ku attribuées aux télécommunications par satellite.

Les équipements sont répartis, en gros, entre une unité extérieure (ODU: *outdoor unit*) et une unité intérieure (IDU: *indoor unit*).

L'unité extérieure

L'unité ODU contient l'antenne qui, selon les caractéristiques du satellite utilisé, peut être une antenne de 75 ou 120 cm de diamètre, conçue pour fonctionner dans la bande d'émission 14,0-14,5 GHz et dans la bande de réception 12,25-12,75 GHz. Le sous-système amplificateur/convertisseur d'entrée de la station est un ensemble transistorisé à faible bruit dont la température de bruit nominale est de 120 K. Une station avec antenne de 75 cm a un rapport G/T d'environ 15,25 dB/K à un angle d'élévation de 40 degrés.

L'équipement d'émission comprend un amplificateur/convertisseur TOP à grande puissance qui, selon les caractéristiques du satellite, a une puissance de sortie nominale de 50 ou 100 watts. Avec l'antenne de 75 cm et l'amplificateur de 50 watts, la station donne une puissance d'émission maximale (p.i.r.e. à la saturation) d'environ 54 dBW.

La poursuite des satellites se fait manuellement. La station peut se déplacer librement de 360 degrés en azimut et entre 25 et 55 degrés en élévation. Elle est opérationnelle dans des vents pouvant atteindre 20 mètres/seconde. L'unité extérieure pèse environ 50 kg.

L'unité intérieure

L'équipement de l'unité IDU est aussi logé dans un conteneur étanche pesant 60 kg et mesurant 52,2 cm (largeur) × 49,4 cm (hauteur) × 50,2 cm (profondeur). Il est alimenté sous 115 ou 200 volts en alternatif et consomme environ 1 kVA (avec l'équipement de l'unité extérieure). Il accepte les signaux vidéo et audio composites normalisés des systèmes NTSC ou PAL, aux niveaux de 1 volt crête à crête ou 0 dBm, respectivement. Ces signaux sont compressés pour donner un débit de codage vidéo, qui peut être sélectionné par l'opérateur dans un ensemble de quatre valeurs.

Le débit de codage vidéo sélectionné dépend principalement de la puissance et de la largeur de bande disponible du satellite. Le Tableau 2.4.5 indique les paramètres utilisés dans les quatre modes de transmission différents. Le mode «Normal» correspond à peu près à la qualité de l'image et du son d'un récepteur grand public type. Dans ce mode, le débit du codage vidéo est de 7 Mbit/s et le débit de la transmission par le satellite de 11,3 Mbit/s. En appliquant une correction d'erreur directe (CED), avec convolution, au débit 3/4, on obtient 8 MHz pour la valeur requise de la bande passante du répéteur du satellite. Il est donc possible de loger trois porteuses de télévision supplémentaires similaires dans un répéteur standard de 36 MHz, à condition que celui-ci soit suffisamment puissant. Le démodulateur donnera un train de données de sortie avec un taux d'erreur binaire (TEB) de 10^{-8} ou mieux, pour un rapport porteuse/bruit (C/N) de 6,8 dB à l'entrée.

Tableau 2.4.5 – Principaux paramètres d'émission des stations terriennes transportables pour RAS numériques

	Mode d'émission			
	Normal	Abaissement du seuil	Qualité moyenne	Haute qualité
Débit du codage vidéo (Mbit/s)	7	5	10	13
Débit de transmission (Mbit/s)	11,3	13,3	13,3	17,7
Largeur de bande de modulation de la porteuse (MHz)	8	7	8	10,6
Débit de la CED avec convolution	3/4	1/2	7/8	7/8
Nombre de porteuses/répéteur de 36 MHz	4	4	4	3
Seuil de C/N pour TEB = 10^{-8} (dB)	6,8	3,6	8,8	8,8

Dans les systèmes de transmission fonctionnant avec limitation stricte de la puissance du répéteur de satellite, l'opérateur peut choisir le mode «seuil», dans lequel le débit de codage vidéo est plus petit et le débit de transmission plus grand que dans le mode «Normal». L'augmentation s'explique par l'utilisation d'un débit de CED égal à 1/2, et le démodulateur peut fonctionner avec un rapport C/N de 3,6 dB seulement, pour le même TEB que dans le mode «Normal».

Si la puissance et la bande passante du répéteur sont suffisantes, l'opérateur peut choisir les modes de transmission «Qualité moyenne» ou «Haute qualité», dont les paramètres de transmission sont donnés dans le tableau. Le mode «Qualité moyenne» équivaut approximativement à la qualité d'image que

donnent aujourd'hui les transmissions de télévision MF analogiques avec répéteur complet. Le mode «Haute qualité» donnera des images et des sons qui, sans être comparables à ceux de la télévision à haute définition (TVHD), satisferont néanmoins la majorité des usagers.

Le son est fourni au débit binaire de 384 kbit/s, dans deux canaux monophoniques ou dans un seul canal stéréophonique. Il est prévu des communications de service, avec quatre voies téléphoniques à 32 kbit/s et une voie de données à 64 kbit/s.

Station terrienne mobile transportable

L'équipement décrit ci-dessus peut être modifié et installé sur un véhicule automobile, par exemple un véhicule du type jeep long d'environ 5 mètres et large de 1,8 mètre. Dans ce cas, l'antenne peut être montée sur le toit du véhicule et l'unité IDU à l'arrière. Le diamètre de l'antenne est en général de 1,2 mètre. Le convertisseur à grande puissance est le plus souvent réalisé par un tube à ondes progressives de 100 watts et le convertisseur à faible bruit a typiquement une température de bruit de 80 K. L'équipement de l'unité intérieure est, pour l'essentiel, identique à celui de l'unité intérieure utilisée dans la station terrienne portable.

2.4.2 Technologie pour les systèmes à satellites géostationnaires (OSG) du service mobile

Dès les premiers temps des communications commerciales par satellite (1965), les avantages de l'utilisation des satellites géostationnaires l'ont emporté sur les inconvénients. Un de ces inconvénients est l'énorme affaiblissement de propagation en espace libre entre la station terrienne et le satellite. La conséquence a été que l'on avait toujours des stations terriennes de grande taille. C'est seulement au cours des dernières années que la technologie des communications par satellite a atteint un niveau de maturité tel qu'il est possible à présent d'utiliser des terminaux portatifs avec les satellites géostationnaires.

Inmarsat, l'organisation internationale regroupant 79 pays membres et chargée de mettre en œuvre des communications maritimes par satellite, a ouvert la voie en matière de communications mobiles terrestres et aéronautiques. Les normes d'équipement établies par Inmarsat pour réaliser l'accès à ses satellites traduisent en grande partie les avancées technologiques, notamment en ce qui concerne les dimensions des terminaux. L'objectif ultime, qui sera atteint avec les satellites géostationnaires et les satellites non géostationnaires, est la mise au point d'un terminal portable pour communications mondiales pouvant être glissé dans une poche.

Le terminal Inmarsat-A demeure le terminal le plus répandu pour les communications mobiles. Il fonctionne en analogique et peut assurer des services de haute qualité: téléphone, télex, télécopie et communication de données (9,6 et 64 kbit/s) par numérotation directe. Des versions portables de ce matériel normalisé, équipées d'antennes repliables, tiennent dans une ou deux mallettes.

Le terminal Inmarsat-B, qui a succédé au terminal A, fournit les mêmes services. Fonctionnant en numérique, il est par conséquent moins encombrant, plus léger et moins coûteux. Son utilisation entraîne une diminution des taxes pour les usagers. Ce terminal assure des transmissions de données à des débits pouvant aller jusqu'à 64 kbit/s.

Le terminal Inmarsat-C est un appareil de petites dimensions (quelques kilogrammes) pour la transmission bidirectionnelle de données; c'est le seul terminal équipé d'une antenne équidirective. Il en existe des versions fixe, mobile, transportable, maritime et aéronautique. Les services assurés sont la messagerie avec enregistrement et retransmission, et les communications de textes et de données au débit de 600 bit/s.

Le système Inmarsat-M, numérique lui aussi, fournit des services de téléphonie à numérotation directe, de télécopie et de communication de données à 2,4 kbit/s. Les dimensions des terminaux Standard-M ont déjà été réduites, passant de la taille d'une petite valise (11 kg) à celle d'un ordinateur bloc-notes (environ 2,6 kg). On trouvera dans l'Annexe B des renseignements complémentaires sur les matériels utilisés dans le système Inmarsat-M.

2.4.3 Systèmes à satellites non géostationnaires (non OSG)

Les systèmes non OSG doivent comporter un grand nombre de satellites pour assurer un service ininterrompu: de nouveaux satellites apparaissent constamment à l'horizon pour prendre la place de ceux qui «se couchent» dans leur révolution autour du globe. Les orbites des divers satellites d'une constellation sont calculées pour fournir une couverture mondiale complète. Les systèmes non OSG peuvent occuper des orbites terrestres basses ou des orbites moyennes à intermédiaires.

Les constellations de satellites sont calculées pour fournir une couverture spécifique, régionale ou mondiale. Le système Globalstar donne l'exemple d'une constellation dans laquelle on applique des données géométriques et astrodynamiques qui permettent d'obtenir une zone de service couvrant la totalité de la surface terrestre.

Les satellites non géostationnaires étant plus proches de la Terre que les géostationnaires, ils peuvent fonctionner avec des antennes de plus petites dimensions et avec une puissance moindre par cellule de communication. Les délais sont aussi plus courts avec ces engins car les signaux ont des temps de propagation moins longs sur leur trajet à partir du sol et retour.

Il faut cependant signaler un certain nombre de problèmes complexes, par exemple la durée de visibilité limitée par rapport à une station terrienne de poursuite, télémessure et télécommande. Les installations au sol, notamment les systèmes de télécommande des engins spatiaux et de télémessure, doivent être programmées pour certaines durées de contact correspondant à la période de visibilité de ces satellites à défilement par rapport à une antenne de station terrienne.

Les progrès techniques accomplis dans tous les domaines des télécommunications par satellite ont permis de réaliser des satellites de plus en plus puissants et sensibles, ainsi que des stations terriennes dont la taille n'a cessé de diminuer. L'évolution conduira peut-être à une «station terrienne» dont la taille ne dépassera pas, en définitive, celle d'un appareil téléphonique portable. Cela n'est pas encore possible de nos jours avec les satellites géostationnaires, car les trajets de propagation sont extrêmement longs, d'où affaiblissement des signaux et longue durée de propagation.

Afin de remédier aux inconvénients des satellites géostationnaires, on pourrait mettre en place des systèmes de communications avec des constellations dont les satellites gravitent sur des orbites terrestres basses (LEO: *low earth orbit*) ou sur orbites moyennes (MEO: *medium earth orbit*). A la fin du XX^e siècle, la technologie a suffisamment avancé pour qu'il soit possible de mettre en œuvre des systèmes de ce type avec de petites «stations terriennes» portables. En fait, il y aura des appareils portables destinés à la fois aux systèmes de Terre et aux systèmes à satellites, avec commutation automatique entre les deux.

Constellations orbitales

Dans une constellation de type LEO, on choisit des altitudes beaucoup plus basses pour les satellites, généralement comprises entre 700 et 2 000 km. La durée de la révolution orbitale se situe alors entre 100 et 120 minutes.

Du fait de l'altitude réduite, le satellite a un champ de vision assez étroit sur la surface terrestre. Il faudra alors porter à 6 ou 8 le nombre des plans orbitaux nécessaires pour couvrir la totalité du globe et les satellites doivent être au nombre de 6 à 12. On aboutit ainsi à une constellation comportant un assez grand nombre de satellites en orbites.

Secteurs spatiaux

Deux solutions sont possibles pour la réalisation des satellites: il peut s'agir de simples répéteurs amplificateurs avec conversion de fréquences ou d'engins dotés de moyens embarqués pour le traitement des signaux.

Il va de soi que la durée de vie nominale des satellites influe sur les coûts d'exploitation d'un système, quelle que soit sa forme de réalisation. Les satellites sur orbites basses (LEO) devront être remplacés plus fréquemment que ceux sur orbites moyennes (MEO). La durée de vie pourrait donc être de l'ordre de 5 à 15 ans.

Pour pouvoir obtenir une puissance suffisante au sol, on réalisera des satellites qui rayonneront un grand nombre de faisceaux ponctuels. Il faudra alors prévoir des procédures assez compliquées de synchronisation et de «transfert» qui seront mises en œuvre par les stations passerelles de commande: en effet, un abonné téléphonique pourrait se trouver «éclairé», en cours de conversation, par deux faisceaux de satellite baladeurs, ou davantage.

Plans de fréquences

Les liaisons de communication entre les stations passerelles et les satellites seront exploitées avec des fréquences prises dans les bandes C et Ku. Les bandes Ka seront aussi utilisées autour de 30 GHz pour les liaisons montantes et autour de 20 GHz pour les liaisons descendantes.

Certaines bandes de fréquences utilisées sont partagées avec des systèmes OSG. Il faut donc établir un équilibre entre la protection des services OSG existants et la possibilité pour les nouveaux systèmes non OSG de fonctionner sans être soumis à des contraintes excessives. Des arrangements ont été conclus lors de la Conférence mondiale des radiocommunications d'Istanbul (2000), notamment la fixation de limites applicables aux stations terriennes des réseaux OSG, et des limites de puissance pour les systèmes non OSG. Ces arrangements définissent les règles de partage de la bande Ku (10-18 GHz).

Terminaux des usagers

Les systèmes à satellites LEO/MEO seront équipés de terminaux d'utilisateur variés. La plupart seront des appareils téléphoniques portables qui, pour beaucoup d'entre eux, seront compatibles avec les normes appliquées dans les systèmes cellulaires de terre. Les premiers utilisateurs seront probablement des voyageurs internationaux qui peuvent recevoir une tonalité de numérotation en provenance de n'importe où dans le monde. D'autres abonnés, par exemple les usagers résidant dans des régions reculées complètement dépourvues pour l'heure d'infrastructures de télécommunications, ou avec des infrastructures très insuffisantes, leur emboîteront le pas.

D'autres terminaux seront aussi utilisés, par exemple des terminaux fixes installés dans des cabines téléphoniques de village, à bord d'aéronefs, de navires ou dans des résidences privées. On développera également des unités à lignes multiples qui permettront à plusieurs usagers d'utiliser un même terminal. La plupart des terminaux d'utilisateur assureront des communications interactives, qu'il s'agisse de téléphonie ou de données dans la bande vocale, par exemple la télécopie, les communications entre PC et, dans certains cas, la visioconférence.

Il y aura aussi des communications non interactives, par exemple les systèmes unidirectionnels de recherche de personne à couverture mondiale qui permettront d'appeler des usagers et d'afficher des messages alphanumériques.

2.4.3.1 Description des systèmes

On trouvera dans les annexes au Chapitre 2.4 la description détaillée de plusieurs systèmes de télécommunication par satellite des types LEO et MEO. D'autres systèmes sont à l'étude, et la présentation des systèmes décrits ne doit pas être considérée comme une recommandation; il s'agit plutôt d'un essai d'illustration de la structure de quelques systèmes représentatifs. La description et les renseignements donnés pour chaque système ne sont pas exhaustifs. Ainsi, le fait de mentionner certains équipements et certaines fonctions pour un des systèmes ne signifie pas que les mêmes équipements et fonctions n'existent pas dans les autres systèmes, même s'ils ne sont pas décrits.

2.4.4 Communications personnelles mobiles mondiales par satellite (GMPCS)

Le terme communications personnelles mobiles mondiales par satellite (GMPCS: *global mobile personal communications by satellite*) fait référence à tous les services de communication qui desservent directement les usagers à partir d'une constellation de satellites. Les GMPCS représentent la prochaine étape dans le développement de la téléphonie sans fil, associant la capacité de transmission à grande distance des satellites avec la mobilité de la téléphonie cellulaire. On obtient ce résultat en intégrant à des terminaux d'usager portables toutes les fonctions d'émission et de réception qui étaient traditionnellement confiées aux stations terriennes passerelles fixes et en remplaçant les réseaux hertziens de Terre par des satellites. Les GMPCS font appel à des systèmes à satellites géostationnaires et non géostationnaires, régionaux et mondiaux, des services fixe et mobile, pour assurer les liaisons entre les terminaux des usagers. Ce faisant, les systèmes GMPCS sont capables de réaliser tous les types de transmission par voie téléphonique: signaux vocaux, données, télécopie, appel de personne, vers des destinations partout dans le monde.

On voit que les communications GMPCS font intervenir nombre de systèmes et de services dont il a été question dans ce chapitre.

Des informations complémentaires sont données dans la publication de l'UIT intitulée GMPCS Reference Book, décembre 1999.

2.4.5 Systèmes mondiaux de repérage par satellite

Ces systèmes utilisent des satellites pour fournir des données de repérage de position de grande précision dans les applications les plus diverses: navigation sur terre, dans les airs, sur mer et dans l'espace, sécurité nationale et nouvelles applications de repérage de position pour le grand public.

La Conférence mondiale des radiocommunications 2000 a attribué des bandes de fréquences supplémentaires aux services de radionavigation par satellite. Grâce à ces nouvelles bandes, les deux systèmes actuels: le Système mondial de navigation par satellite (GLONASS) de la Fédération de Russie et le Système mondial de radiorepérage (GPS) des Etats-Unis d'Amérique, pourront évoluer vers des systèmes plus précis de deuxième génération, et il sera possible de mettre en place le nouveau système européen, Galileo.

2.4.6 Publications de l'UIT-R

L'UIT-R a publié des Manuels et Suppléments suivants sur le sujet des télécommunications par satellite:

- Communications par satellite (Service fixe par satellite), 2^e édition 1988
- Supplément N° 1 au Manuel sur les communications par satellite: «Service fixe par satellite», 1995
- Supplément N° 2 au Manuel sur les communications par satellite: Logiciels pour les télécommunications par satellite
- Supplément N° 3 au Manuel sur les communications par satellite: Systèmes à microstations et stations terriennes associées, 1995
- Données sur la propagation des ondes radioélectriques pour la prévision des communications sur le trajet Terre vers espace, 1996.

2.4.7 Abréviations

AC	Voie d'assignation (<i>assignment channel</i>)
ACU	Unité de commande d'antenne (<i>antenna control unit</i>)
AFB	Amplificateur à faible bruit
AGP	Amplificateur à grande puissance; Amplificateur de puissance
AMAD	Accès multiple à la demande (ou en fonction de la demande)
AMRT	Accès multiple par répartition dans le temps

AOR	Région de l'Océan atlantique (<i>atlantic ocean region</i>)
AsGa	Arséniure de gallium
C/N	Rapport porteuse/bruit (<i>carrier-to-noise</i>)
CA	Courant alternatif
CAF	Commande automatique de fréquence
CAG	Commande automatique de gain
CC	Courant continu
CCI	Centre de commutation international
CED	Correction d'erreur directe
CFB	Convertisseur à faible bruit
CFD	Codage à faible débit
CNC	Concentration numérique des conversations
CSMS	Système informationnel de gestion des stations (<i>computerized station management system</i>)
DOMSAT	Satellite national (<i>domestic satellite</i>)
DTMF	Multifréquence bitonalité (<i>dual tone multi-frequency</i>)
EMCN	Équipement de multiplication de circuit numérique
ESC	Voie de service technique (<i>engineering service channel</i>)
FI	Fréquence intermédiaire
HIC	Circuit intégré hybride (<i>hybride integrated circuit</i>)
IDR	Débit binaire intermédiaire (<i>intermediate data rate</i>)
IDU	Unité interne (<i>indoor unit</i>)
IOR	Région de l'océan Indien (<i>indian ocean region</i>)
LCD	Écran à cristaux liquides (<i>liquid crystal display</i>)
LEO	Orbite terrestre basse (<i>low earth orbit</i>)
LES	Station terrienne terrestre (<i>land earth station</i>)
LSI	Intégration à grande échelle (<i>large scale integration</i>)
M&C	Supervision et commande (<i>monitoring and control</i>)
MA	Modulation d'amplitude
MC	Multiclique
MD	Multidestination
MDP	Modulation par déplacement de phase
MDPQ	Modulation par déplacement de phase quadrivalente
MEO	Orbite terrestre moyenne (<i>medium earth orbit</i>)
MF	Modulation de fréquence
MHIC	Circuit intégré hybride pour micro-ondes (<i>microwave hybrid integrated circuit</i>)
MIC	Circuit intégré pour micro-ondes (<i>microwave integrated circuit</i>)
MIC	Modulation par impulsions et codage
MP	Modulation de phase
MPEG	Groupe d'experts en images animées (<i>moving picture expert group</i>) (ISO)
MRT	Multiplexage par répartition dans le temps

MTBF	Moyenne des temps de bon fonctionnement
NMS	Système de gestion du réseau (<i>network management system</i>)
ODU	Unité extérieure (<i>outdoor unit</i>)
OSG	Orbite des satellites géostationnaires
PC	Ordinateur personnel (<i>personal computer</i>)
PDH	Hiérarchie numérique plésiochrone (<i>plesiochronous data hierarchy</i>)
PIN	Numéro d'identification personnel (<i>personnel identification number</i>)
POR	Région de l'océan Pacifique (<i>pacific ocean region</i>)
RNIS	Réseau numérique à intégration de services
SD	Diversité simple (<i>single diversity</i>) (ou) Diversité d'espace (<i>space diversity</i>)
SDH	Hiérarchie numérique synchrone (<i>synchronous data hierarchy</i>)
SIM	Module d'identification de l'abonné (<i>subscriber identity module</i>)
SSPA	Amplificateur de puissance à semi-conducteurs (<i>solid state power amplifier</i>)
TEB	Taux d'erreur binaire
TEC	Transistor à effet de champ
TOP	Tube à ondes progressives
TSI	Echange des intervalles de temps (<i>time slot interchange</i>)
TV	Télévision
TVHD	Télévision à haute définition
VSAT	Microstations (<i>very small aperture terminal</i>)

ANNEXE 2A

Système à microstations

On trouvera ci-après la description détaillée d'une forme de réalisation particulière d'un système à microstations.

Station centrale ou de commande

L'équipement de la station centrale du système à microstations peut être installé en tant que nouvelle station terrienne, ou intégré à l'équipement d'une station terrienne existante au niveau de l'équipement de communication au sol (ECS). Par exemple, l'équipement existant de la station terrienne peut comporter une antenne de 13 mètres, des amplificateurs à faible bruit (AFB), des amplificateurs à grande puissance (AGP), des convertisseurs élévateurs et des convertisseurs abaisseurs de fréquence, des multiplexeurs (MUX), des combineurs RF, des diviseurs RF et une liaison radioélectrique à 140 Mbit/s vers le Centre international de maintenance de la transmission (CIMT).

Les équipements suivants doivent être ajoutés à la station centrale pour l'exploitation avec microstations:

- Elévateurs et abaisseurs de fréquence pour les bandes qui entrent en jeu (bandes C ou Ku).
- Modems pour les voies de téléphonie et de transmission de données. Il peut s'agir de cartes enfichables pour communications continues de téléphonie et de données avec différents débits de transmission. Par exemple, les modems vocaux sont capables, en général, de fonctionner avec des débits de codage d'information de 16 et 32 kbit/s, et les modems de données à différents débits compris entre 9,6 et 2 048 kbit/s. Chaque modem peut être réglé sur le débit de transmission souhaité (fonction «largeur de bande à la demande»). A noter que la durée d'utilisation d'une voie de communication de type continu – à la différence de communications interactives – ne signifie pas forcément qu'une voie de communication est assignée en permanence. Cette assignation peut être faite soit pour la durée d'une communication téléphonique, soit sans limitation de durée, soit encore pour une durée quelconque à la demande.
- Le sous-système AMAD, dans lequel les circuits du répéteur de satellite sont assignés à la demande, pour des communications de téléphonie ou de données, soit entre la station centrale et les microstations (configuration en étoile), soit entre les microstations (configuration maillée). Le sous-système AMAD communique avec les microstations distantes par l'intermédiaire d'un canal sémaphore (CSC: *common signalling channel*) transmettant en MRT (multiplexage par répartition dans le temps) (communications centrifuges ou d'émission), et par des salves de signaux d'accès multiple par répartition dans le temps (AMRT) provenant des microstations (communications centripètes ou de réception). Les équipements AMAD modernes sont capables de commander des milliers de microstations.
- Le sous-système AA/AMRT (accès multiple par répartition dans le temps et assignation adaptative), dans lequel des communications rapides et fréquentes sont établies avec les microstations distantes. Les modes de ces communications sont les mêmes qu'en exploitation AMAD, à savoir: MRT dans le sens centrifuge et AMRT dans le sens centripète.
- L'équipement multiplex données-signaux vocaux (DVM: *data voice multiplex*), dans lequel les voies de communication des microstations sont mises en interface avec les multiplexeurs numériques. Cet interfaçage se fait à 2 048 kbit/s vers les MUX existants, mais à différents débits binaires vers l'équipement central des microstations.
- Le système de gestion du réseau (NMS: *network management system*), à partir duquel il est possible de gérer, superviser et commander l'ensemble du réseau de microstations. Le NMS est constitué par un puissant ordinateur qui utilise des logiciels pour les opérations suivantes: supervision et commande des systèmes des microstations, supervision et contrôle des utilisateurs des microstations et gestion de la facturation.

Voies téléphoniques dans la station centrale

Les voies téléphoniques peuvent être configurées à partir du système NMS pour le débit d'information 16 ou 32 kbit/s, lequel pourra d'ailleurs être ramené à 8 kbit/s, dans l'avenir, sans modification du matériel. Le fonctionnement à 8 kbit/s se fera simplement par téléchargement d'information du NMS vers les équipements de la station centrale et les différentes microstations. Les voies téléphoniques à 16 ou 32 kbit/s, dans la station centrale, aboutissent aux modems des voies téléphoniques du type BOD (largeur de bande à la demande), et partent de ces modems, sous la forme de voies analogiques.

Dans le centre international de maintenance de la transmission (CIMT), un équipement DVM semblable à celui de la station centrale effectue la conversion analogique/numérique entre les voies téléphoniques analogiques venant du commutateur téléphonique et le multiplexeur radioélectrique numérique existant. Ici également, l'interfaçage se fait à 2 Mbit/s. Dans le mode vocal, une unité d'équipement DVM est capable normalement de traiter un maximum de 30 voies téléphoniques.

Voies de communication de données dans la station centrale

Les voies de données du type BOD peuvent aussi être configurées par le système NMS, pour des débits compris entre 9,6 et 2 048 kbit/s. L'interfaçage, dans la station centrale, vers le multiplexeur radioélectrique numérique existant se fait à 2 Mbit/s, d'où nécessité d'une conversion de débit. Cette conversion s'effectue dans le multiplexeur données-signaux vocaux (DVM) dont il a été question plus haut.

Le DVM fonctionne avec cinq cartes enfichables. En exploitation téléphonie, chaque carte peut traiter 6 voies sur un total de 30 voies. En exploitation données, chaque carte peut traiter de 2 à 4 voies, selon le débit. Le DVM peut fonctionner avec un mélange de voies de téléphonie et de voies de données, mais le débit binaire combiné de toutes les voies d'entrée ne doit jamais dépasser 2 048 kbit/s, qui est le débit binaire de sortie.

Voies de données interactives à exploitation AA/AMRT dans la station centrale

Les salves d'information interactive qui doivent être transmises fréquemment aux microstations distantes viennent d'un ordinateur hôte principal installé dans les locaux de l'utilisateur ou du propriétaire du système de microstations. La voie de données MRT servant aux communications «centrifuges» transmet généralement à 64 ou 128 kbit/s, et les salves d'information envoyées en retour par les microstations sont généralement au débit de 64 kbit/s. Comme l'ordinateur hôte n'est pas situé dans la station terrienne (ni même dans le centre de maintenance CIMT), il faut aussi prévoir un multiplexeur dans cette station et dans ce centre pour transmettre la voie interactive AA/AMRT.

Microstations

Selon les bandes de fréquences et la capacité de transmission requises dans les microstations distantes, on utilise en général des antennes de 1,2, 1,8, 2,4 et 3,7 mètres de diamètre. Les convertisseurs à faible bruit (CFB) peuvent avoir une température de bruit de 60 K dans la bande C et de 140 K dans la bande Ku. Les convertisseurs à grande puissance (CGP) en bande C peuvent être équipés d'amplificateurs de puissance à semi-conducteurs (SSPA) ayant une puissance de sortie nominale de 3,10 ou 20 watts, les valeurs correspondantes pour la bande Ku pouvant être de 1, 2 ou 6,6 watts. La taille de l'antenne et les puissances nominales des convertisseurs CFB et des amplificateurs SSPA, pour une microstation donnée, ne dépendent pas seulement du nombre de porteuses transmises: ces caractéristiques varient aussi selon que les porteuses sont transmises vers la station centrale (configuration en étoile) ou vers d'autres microstations (configuration maillée). Si la plupart des porteuses sont transmises à destination de la station centrale, on peut soit réduire à un minimum la taille de la microstation, soit augmenter le nombre des porteuses. Cela influera également sur la consommation d'énergie et sur le prix de la microstation.

Les microstations, surtout dans les communications rurales, sont souvent équipées d'une installation d'énergie solaire. Le Tableau 1 donne les caractéristiques d'émission et la consommation d'énergie, en bande C, de plusieurs terminaux fonctionnant en liaison avec un satellite du type Intelsat-7.

Tableau 1 – Caractéristiques d'émission et consommation d'énergie en bande C

Antenne	ODE (équipement extérieur)	Nombre de voies	Consommation d'énergie primaire
1,8 M	5 W	5	337 W
1,8 M	20 W	5	500 W
2,4 M	5 W	5	337 W
2,4 M	20 W	10	700 W
3,7 M	5 W	5	337 W
3,7 M	20 W	10	700 W

Dans un premier temps, les microstations peuvent être équipées seulement de l'antenne, de l'équipement extérieur (ODE: *outdoor equipment*) et de l'unité intérieure (IDU) principale. L'IDU est un conteneur qui peut être placé sur une table et pour lequel il n'y a pas d'exigences d'installation particulières. Elle contient cinq modems de téléphonie/données enfichables, un de ces modems étant utilisé comme canal sémaphore (CSC: *common signalling channel*) pour les communications avec la station centrale. L'unité IDU principale peut être complétée par un total de deux sous IDU, ce qui donne un total de 15 modems enfichables (dont le modem du canal CSC).

L'IDU principale peut aussi être complétée par l'unité intérieure AA/AMRT pour des communications interactives avec la station centrale. Les principaux éléments de cette IDU sont l'interface de la voie de transmission par le satellite (SCI: *satellite channel interface*) (modem, synthétiseur de fréquence), une interface de processeur de bande de base (BBP: *baseband processor*), un tableau de fonctionnement (OPP: *operations panel*) et un module d'alimentation en énergie.

Les microstations sont généralement considérées comme des stations terriennes de faible capacité. Toutefois, la capacité de chaque microstation est limitée moins par l'équipement que par la puissance émise, ou par la sensibilité du récepteur de satellite à la réception. Si les 15 voies de transmission d'une microstation sont équipées de modems de données, chacun de ceux-ci étant réglé sur le débit 2 048 kbit/s, il est possible théoriquement de transmettre 450 voies de 64 kbit/s. Si ces voies de 64 kbit/s étaient utilisées avec des codeurs à faible débit (CFD), dont il existe actuellement des versions qui fonctionnent avec une qualité acceptable à 16 kbit/s, chaque microstation pourrait théoriquement transmettre 1 800 voies.

Distribution de télévision analogique ou numérique à partir de la station centrale

Il est possible d'émettre la télévision analogique ou numérique à partir de la station centrale en utilisant le même équipement radioélectrique que celui des voies des microstations, dans la station centrale et dans les microstations distantes. Toutefois, dans le cas de la télévision analogique, il peut être nécessaire d'augmenter les dimensions de l'antenne des microstations. Il existe une autre solution intéressante: la possibilité d'inclure économiquement des services de télévision numérique, car les dimensions d'antenne indiquées dans cet exemple peuvent être adaptées pour les microstations, sans que l'on soit obligé de modifier ces dernières. Un récepteur de télévision est relié directement à l'unité IDU, à la fréquence intermédiaire de 1 GHz.

Système de gestion du réseau (NMS)

Le réseau de microstations est commandé à partir de la station terrienne principale, sur le plan technique et sur le plan de la gestion, mais les fonctions du système NMS peuvent être exercées à distance à partir d'une autre installation (par exemple, le centre de maintenance CIMT).

Les principales fonctions du NMS sont les suivantes:

- 1) Surveillance de l'état de fonctionnement du réseau.
- 2) Gestion de la configuration du réseau.
- 3) Commande du réseau.
- 4) Fiabilité du réseau (fonctions de commutation).
- 5) Gestion des alarmes.
- 6) Gestion des statistiques.
- 7) Gestion des enregistrements.

Equipement d'alimentation en énergie

L'équipement d'une microstation est extrêmement compact et il est inutile de prévoir des dispositions spéciales pour l'abriter. L'équipement extérieur (ODE) est installé directement sur la structure d'antenne et les conteneurs de l'unité IDU peuvent être placés à tout endroit convenable dans un rayon de 80 mètres autour de l'antenne. Il est possible d'augmenter cette distance si on utilise des câbles à faible résistance.

L'IDU fonctionne normalement jusqu'à une température de 40 °C; il est donc inutile de prévoir une climatisation, sauf dans des cas extrêmes. Si la source d'énergie primaire n'est pas fiable, ou en l'absence d'une telle source, les microstations peuvent être alimentées par une installation d'énergie solaire. Les valeurs types de la consommation d'énergie des équipements des microstations ont été données dans le tableau précédent. L'alimentation en énergie peut aussi être assurée par un petit générateur mobile à moteur diesel.

ANNEXE 2B

Le système Inmarsat

Les normes Inmarsat A, B, C et M sont appliquées dans les services maritimes et les services terrestres. Pour les services aéronautiques, on dispose des normes additionnelles suivantes applicables aux équipements:

- Aero-C pour les messages (texte et données) émis et reçus par les aéronefs en mode enregistrement et retransmission, dans le monde entier.
- Aero-L pour le service de communications de données seulement, en temps réel et à faible gain, pour le pilotage à bord et l'exploitation des lignes aériennes.
- Aero-H pour un service à gain élevé: téléphonie multivoie pour le poste de pilotage et les passagers.

Deux autres normes Inmarsat sont en préparation: Inmarsat-D, système de recherche de personnes, et Aero-I, service mobile de téléphonie et communication de données qui sera doté d'équipements avioniques plus petits, plus légers et moins coûteux, et d'antennes conçues pour des aéronefs long et moyen courrier.

Les appels en provenance de tout équipement normalisé du système Inmarsat doivent être acheminés par l'intermédiaire d'une station terrienne terrestre (LES: *land earth station*), appelée parfois station terrienne côtière ou station terrienne au sol aéronautique. De nombreuses stations LES sont installées dans le monde entier, dans la Région de l'océan Atlantique (AOR), la Région de l'océan Indien (IOR) et la Région de l'océan Pacifique (POR).

On notera que le système Inmarsat n'a pas vocation à fournir un service entre un terminal mobile et un autre. Il est plutôt conçu pour permettre à un terminal mobile de communiquer, par l'intermédiaire d'une station LES, avec des abonnés rattachés à un réseau téléphonique public commuté ou à un réseau pour données. Par conséquent, si une liaison de communication est établie entre deux terminaux mobiles, il y aura un temps de propagation correspondant à deux bonds par satellite. Cela est dommageable pour les connexions téléphoniques mais peu important pour les liaisons de communication de données.

Si le but des télécommunications rurales est d'établir des liaisons de téléphonie et/ou de données avec des centres urbains déjà reliés à une station LES, le système Inmarsat-M pourrait être actuellement le moyen le plus rapide et le plus économique pour intégrer les collectivités rurales à un réseau public existant, aux fins des échanges commerciaux, de la télémédecine, des relations personnelles et d'une multitude d'autres besoins de communication. En revanche, si le but est surtout l'intercommunication entre des sites à l'intérieur de ces collectivités, ou entre celles-ci, d'autres architectures de communication pourraient être plus appropriées.

Un terminal portable pour le système Inmarsat-M

A son stade ultime, la série de satellites Inmarsat-3 comprendra cinq engins spatiaux qui couvriront toutes les zones océaniques. Lorsqu'ils sont utilisés avec des faisceaux ponctuels, les répéteurs de ces satellites sont suffisamment puissants pour permettre à de petits terminaux, de la taille d'un carnet de notes, de communiquer avec une station LES et d'être ainsi connectés au réseau de télécommunication public international.

Le terminal utilise la bande de fréquences d'émission standard d'Inmarsat 1 626,5-1 660,5 MHz et la bande de réception 1 525,0-1 559,0 MHz. Les voies téléphoniques disponibles sont codées à 4,8 kbit/s par application de techniques modernes d'excitation multibande. L'émission et la réception de télécopie peuvent se faire selon la norme G3 à 2,4 kbit/s et la transmission de données asynchrone est possible à des débits pouvant aller, ici aussi, jusqu'à 2,4 kbit/s.

L'équipement est alimenté par une batterie aux ions lithium rechargeable incorporée. A pleine charge, cette batterie alimente le terminal pendant 4,5 heures en mode réception et pendant environ 1,2 heure en émission. Elle peut être rechargée à partir d'une source de 90-260 volts en alternatif ou de 12 volts en continu.

Le mode opératoire du terminal est assez simple. L'antenne, de type plan, est pointée sur le satellite qui dessert la zone océanique dans laquelle se trouve le terminal. Lorsqu'on appuie sur le bouton Menu du combiné, l'écran incorporé à cristaux liquides affiche l'intensité des signaux en provenance du satellite. En réorientant l'antenne, on peut régler le terminal pour la réception de l'intensité de signal maximale. Si la direction du satellite n'est pas connue, une boussole permet à l'utilisateur de faire la première orientation. Une icône indique que le terminal est calé sur un satellite.

L'unité de base du terminal portable

L'unité de base se compose des éléments suivants: l'électronique d'émission et de réception, l'antenne, la batterie rechargeable et le support du combiné. Ce support peut être séparé et relié à l'unité de base par un câble dont la longueur peut aller jusqu'à 4,5 mètres. L'utilisateur du terminal peut ainsi se tenir à son poste de travail, avec l'unité de base et l'antenne placées près d'une fenêtre. L'antenne peut, elle aussi, être séparée et placée à une distance maximum de 10 mètres de l'unité de base.

Le support du combiné sert aussi de point de branchement pour un télécopieur, un appareil téléphonique extérieur ou un ordinateur personnel.

L'unité de base contient également un lecteur de carte SIM (mode d'identification d'abonné). La carte SIM est une carte à puce (de la taille approximative d'une carte de crédit) à laquelle est incorporé un microprocesseur électronique qui améliore la sécurité et qui possède un grand nombre de fonctions à valeur ajoutée, par exemple:

- 1) un annuaire téléphonique électronique personnalisé, facile à éditer et utilisable pour la numérotation abrégée et d'autres services;
- 2) un code PIN (numéro d'identification personnel) qui permet de restreindre l'utilisation du terminal;
- 3) un identificateur personnel qui fournit un numéro unique quel que soit le lieu où se trouve le terminal;
- 4) une clé de sécurité et un algorithme secret d'authentification qui assurent la protection contre l'utilisation frauduleuse;
- 5) une préférence linguistique pour les messages affichés sur l'écran à cristaux liquides;
- 6) une fonction d'interdiction d'appel pour la numérotation restreinte;
- 7) des messages courts pour les communications bidirectionnelles.

La carte SIM est un facteur de mobilité et de commodité pour l'utilisateur. Lorsque cette carte est utilisée, le terminal détecte le numéro et débite automatiquement la taxe de communication sur un compte prédéterminé.

Le combiné du terminal portable

Hormis l'introduction de la carte SIM, le fonctionnement du terminal Inmarsat-M est déclenché à partir du combiné. En dépit de sa petite taille, ce combiné est doté d'un grand nombre de fonctions dont les plus importantes sont les suivantes:

- *Mémorisation des numéros téléphoniques*

Les usagers peuvent mettre en mémoire des noms et des numéros dans le combiné, et les consulter comme dans un annuaire électronique. Il est possible également d'avoir accès à des numéros stockés sur la carte SIM.

- *Indication de l'état de charge de la batterie*

Une icône à quatre éléments affichée sur l'écran à cristaux liquides renseigne sur la charge de la batterie. Une alarme et des messages sur l'écran alertent l'utilisateur en cas de charge insuffisante, avant la fin de la conversation.
- *Indication d'abonné absent*

Les appels restés sans réponse sont indiqués par une icône sur l'écran à cristaux liquides. Les dix derniers appels sont affichés avec l'identification du demandeur ainsi que la date et l'heure si les appels ont été transmis par l'intermédiaire du RNIS.
- *Appels sur carte de crédit*

Les usagers peuvent établir des appels sur carte de crédit, en composant un préfixe à deux chiffres, suivi du numéro de la carte de crédit.
- *Indication de la durée de la communication*

Cette durée est affichée à la fin de chaque communication. Le combiné affiche également la durée de la communication précédente.
- *Indicateur de l'intensité des signaux (image et son)*

Le niveau d'intensité des signaux est affiché sur l'écran à cristaux liquides. En appuyant sur le bouton Menu, on obtient l'intensité du signal actuel. Les usagers peuvent aussi régler le terminal pour que celui-ci émette des bips indiquant cette intensité.
- *Interdiction d'appel*

L'utilisateur peut régler le terminal de manière à empêcher la transmission des appels vers certains numéros ou certains pays.
- *Autres fonctions*

Mode d'économie d'énergie, rétroéclairage, renumérotation, affichage du numéro et de la région océanique de l'utilisateur, verrouillage du téléphone, numérotation abrégée, réglage silencieux.

ANNEXE 2C

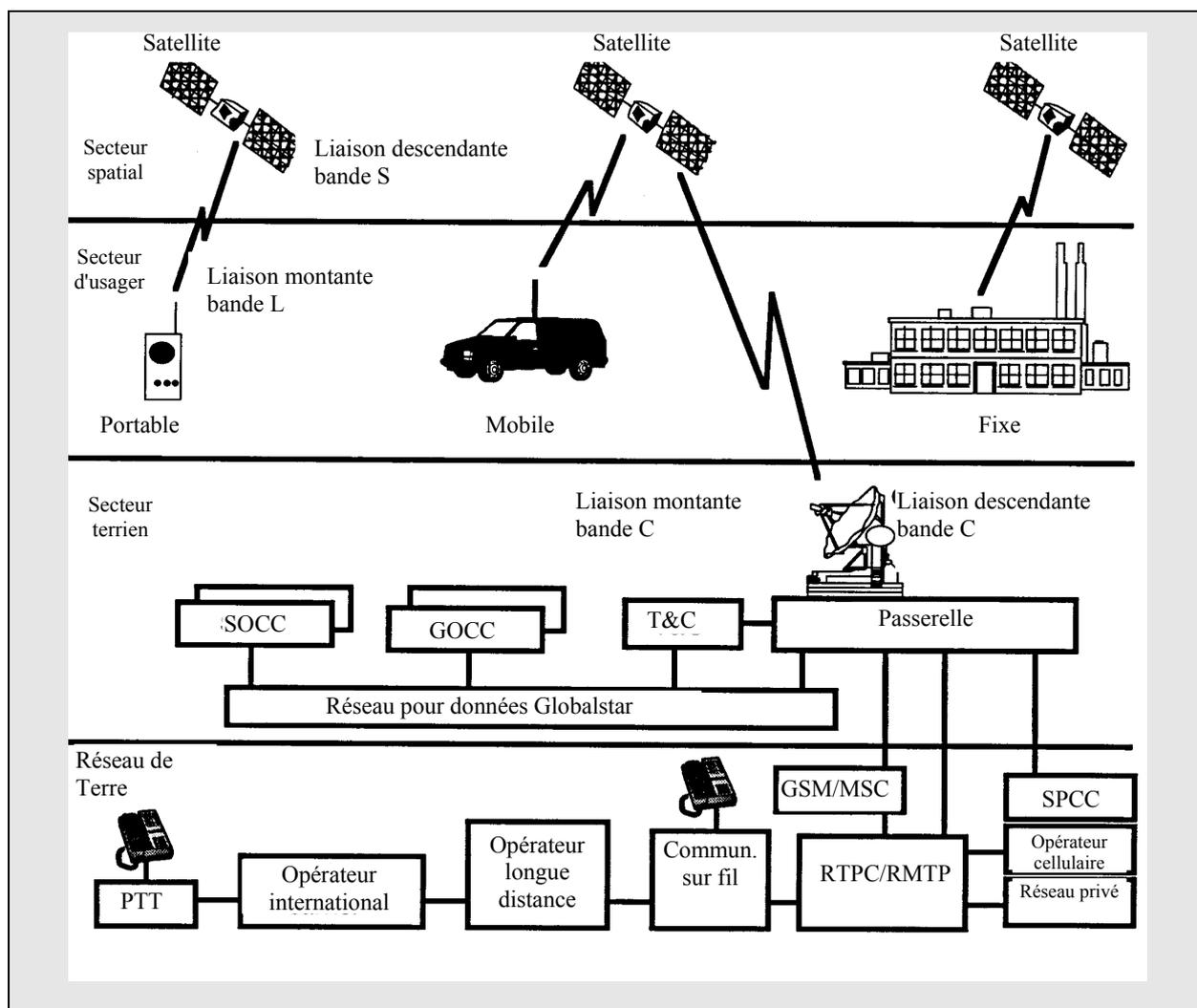
Le système Globalstar

Généralités

Les informations qui suivent sont tirées d'une documentation aimablement fournie par Globalstar L.P.:

Le système Globalstar se compose d'un secteur spatial, d'un secteur de l'utilisateur, d'un secteur terrien et d'un réseau de terre (voir la Figure 1). Il assure des communications entre un point quelconque de la surface terrestre et tout autre point de la surface terrestre, à l'exclusion des régions polaires. Les orbites des satellites sont optimisées pour fournir des liaisons à disponibilité maximale entre 70 degrés de latitude sud et 70 degrés de latitude nord. Le service est possible à des latitudes plus élevées, mais avec une disponibilité réduite des liaisons.

Figure 1 – Vue d'ensemble du système Globalstar Leo



Les terminaux des usagers peuvent être desservis par un satellite pendant une durée de 10 à 15 minutes sur chaque révolution orbitale. Les usagers bénéficient de communications ininterrompues, grâce à un transfert progressif des faisceaux dans un satellite et entre les satellites. Les plans orbitaux sont inclinés

à 52 degrés. La couverture est maximisée dans les zones à climat tempéré, avec au moins deux satellites en position de visibilité et diversité de trajet sur la majeure partie de ces zones. Il y a une petite perte de couverture par plusieurs satellites dans les régions équatoriales et au-dessus de 60 degrés de latitude.

Les stations passerelles assurant la connexion avec le réseau de Terre sont éclairées par un faisceau à couverture mondiale. La passerelle relie le terminal de l'utilisateur au réseau de Terre par l'intermédiaire d'un terminal terrien. Le réseau de Terre ne fait pas partie du système Globalstar.

Le système peut repérer la position d'un terminal d'utilisateur et fournir la position dans le cadre du service fourni. La précision de la localisation dépend de plusieurs variables: a) le nombre de satellites en position de visibilité,

- b) la précision de positionnement des satellites,
- c) les relations géométriques entre les terminaux des usagers, les satellites et les passerelles,
- d) la durée pendant laquelle le terminal de l'utilisateur est relié à la passerelle.

La passerelle fournit aussi un autre service, qui est un repérage plus précis de la position du terminal d'utilisateur. En visibilité directe avec au moins deux satellites séparés d'au moins 22 degrés (vus du terminal), la passerelle pourra calculer la position du terminal d'utilisateur à 300 mètres près avec une probabilité de 95%, cela en moins de 10 secondes.

Secteur spatial et constellation orbitale

Le secteur spatial du système Globalstar comprend 48 satellites gravitant sur des orbites terrestres basses (LEO, 1 410 km). Les orbites basses permettent l'utilisation de combinés à faible puissance, semblables aux téléphones cellulaires. Les satellites sont répartis entre 8 plans orbitaux, à raison de 6 satellites équidistants par plan orbital. Ils parcourent complètement une orbite en 114 minutes. Les terminaux d'utilisateur occupant une position donnée sur la surface terrestre sont éclairés par une antenne de satellite à 16 faisceaux au moment où le satellite survole la position.

Le satellite Globalstar est un engin simple, peu coûteux, conçu pour réduire à un minimum les coûts de construction du satellite et le coût du lancement. Un terminal émet vers le satellite dans la bande L. Le signal pénètre dans le satellite en passant par l'amplificateur à faible bruit bande L. Il est amplifié, converti en un signal bande C, puis à nouveau amplifié et rayonné à destination de la passerelle. Celle-ci reçoit le signal et abaisse sa fréquence jusqu'à une fréquence intermédiaire, dont un échantillon est envoyé à l'unité de contrôle de transmission pour traitement. Les signaux sont appliqués à l'équipement AMDC pour démodulation.

A l'émission, la passerelle combine les signaux AMDC avec le signal fourni par l'émetteur de commande et rayonne cet ensemble vers le satellite dans la bande C. Le satellite abaisse la fréquence du signal et rayonne vers les terminaux des usagers un signal de bande S sur la liaison descendante. Le Tableau 1 donne des bilans de liaison types pour toutes les fréquences utilisées par le système Globalstar.

Pour la télémesure et la télécommande (T&C: *telemetry and commanding*), on utilise en partage la bande C avec les liaisons de connexion des télécommunications. L'équipement T&C se connecte à l'antenne normale de communication en bande C pour les opérations à effectuer en orbite. On a aussi une antenne T&C sur la «face cachée» du satellite par rapport à la Terre. Cette antenne entre en fonctionnement lorsque le satellite est mal orienté ou lorsqu'il y a des problèmes. Elle a pour fonction d'assurer la télémesure et de transmettre les commandes dans toutes les situations critiques éventuelles auxquelles il est possible de remédier. A noter que cette antenne «court-circuite» l'amplificateur à faible bruit. Cela signifie que la puissance en provenance du terminal terrien qui envoie la commande doit être supérieure à la puissance normale nécessaire pour l'opération de commande. Cette condition peut être satisfaite parce qu'il n'y a pas de trafic de communication quand le satellite est mal orienté.

Le satellite est commandé autour de l'axe de lacet de manière que les panneaux solaires soient orientés vers le soleil, afin d'extraire le maximum d'énergie. Il en résulte un accroissement de la capacité de communication du système Globalstar. Il faut mentionner quelques petites imperfections qui ralentissent un peu l'acquisition et peuvent augmenter le nombre de transferts de trafic au-delà de ce qui serait nécessaire autrement.

Tableau 1 – Bilans de liaison types pour toutes les bandes de fréquences

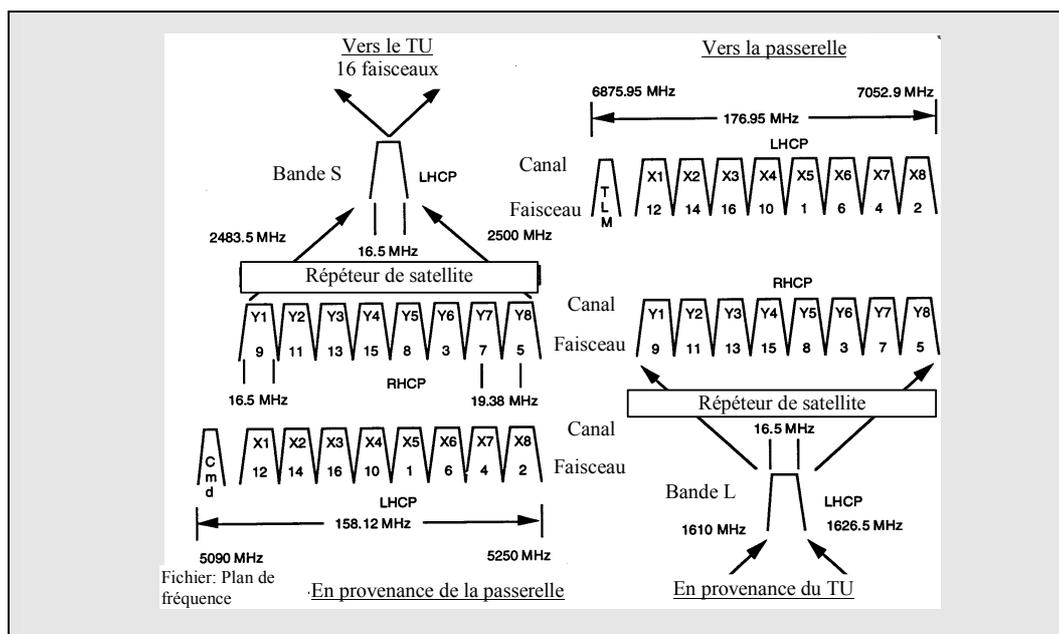
Caractéristiques	Liaison aller		Liaison retour		Unités
	Du satellite au terminal d'utilisateur	De la passerelle au satellite	Du terminal d'utilisateur au satellite	Du satellite à la passerelle	
Fréquence nominale	2,5	5	1,6	7	GHz
p.i.r.e. (nadir, temps clair)	1,1	36,4	-14,3	-33,3	dBW
Affaiblissement spatial (nadir, temps clair)	163,4	169,7	159,6	172,3	dB
Autres facteurs	1,4	7,90	2,10	1,60	dB
G/T (terminal portable)	-26	-29,6	-14,25	27,5	dB/K
Eb/No*	5,1	24	4,5	15,1	dB
Débit binaire moyen	2400	2400	2400	2400	bit/s
Avantage de diversité			2.2		dB
Eb/No composite	5		6,3		dB

* Les rapports Eb/No pour la liaison satellite-terminal et la liaison satellite-passerelle représentent la combinaison des résultats correspondant respectivement au trajet montant et au trajet descendant.

Plan de fréquences

La Figure 2 donne le plan de fréquences adopté pour le système Globalstar.

Figure 2 – Plan de fréquences du système Globalstar



- LHCP = Polarisation circulaire lévogyre
- RHCP = Polarisation circulaire dextrogyre
- UT = Terminal d'utilisateur

Secteur terrien

Passerelles

La passerelle relie le réseau hertzien du satellite Globalstar au RMTP, par exemple AMPS ou GSM, ou directement au commutateur téléphonique local (RTPC). C'est donc un point de terminaison pour la transmission dans le réseau et pour la signalisation dans le réseau. La passerelle peut être reliée au RTPC existant par un circuit E1/T1 normalisé qui accepte toute une série de protocoles de signalisation. Vue des réseaux GSM, la passerelle se présente comme un sous-système station de base GSM. Vue des commutateurs mobiles dans l'environnement EIA/TIA, elle apparaît comme un autre commutateur qui applique la Norme d'exploitation Intersystem IS-41. Dans tous les cas, l'interopérabilité est assurée entre Globalstar et les compagnies de téléphonie cellulaire, et l'abonné dispose d'un point central unique, commode pour la facturation.

La passerelle est de conception modulaire, ce qui lui confère la souplesse nécessaire pour se développer en même temps que la demande sur le marché. La passerelle Globalstar peut être utilisée en partage par plusieurs prestataires de service, qui peuvent se répartir l'investissement dans les équipements communs initiaux. Grâce à cette formule, on bénéficie de la sécurité à l'égard des autres prestataires parties prenantes dans le partage de la passerelle et l'extension est planifiée en même temps que les recettes s'accroissent.

Chaque passerelle contiendra jusqu'à quatre antennes de poursuite et étages d'entrée RF qui assurent la poursuite des satellites se trouvant en position de visibilité. Les passerelles devraient coûter entre 2 millions et 5 millions de dollars, selon le nombre des abonnés desservis, dans l'hypothèse où la passerelle serait installée sur le site d'un commutateur cellulaire existant ou d'un autre commutateur de télécommunication approprié. Chaque pays disposant d'une passerelle au moins à l'intérieur de ses frontières aura la maîtrise totale de l'accès de ses usagers au système, sur l'ensemble de son territoire. On prévoit qu'une seule passerelle pourra donner une couverture fixe sur une zone plus étendue que l'Arabie saoudite et une couverture mobile sur une zone presque aussi grande que l'Europe occidentale. Ainsi, il suffirait théoriquement de 100 passerelles pour assurer la couverture continentale totale de presque toutes les régions habitées de la planète. Toutefois, l'organisation Globalstar pense qu'il faudrait peut-être mettre en œuvre 210 passerelles pour réduire à un minimum les taxes des communications terrestres longue distance et pour respecter les frontières nationales.

Bien que Globalstar ait sous-traité la conception et la réalisation des passerelles à utiliser dans son système, la propriété et l'exploitation de ces passerelles relèveront de la responsabilité des prestataires de service qui opèrent dans chaque pays ou chaque région où les opérations Globalstar sont autorisées.

Commande des satellites

Les centres de contrôle des opérations des engins spatiaux (SOCC) assureront la poursuite et la commande de la constellation de satellites à l'aide d'unités de télécommande de télémétrie implantées dans plusieurs passerelles de part le monde et à l'aide de deux stations de télémétrie situées aux Etats-Unis. Les SOCC contrôleront le positionnement orbital des satellites, les manœuvres et le maintien en position, et surveilleront la «santé» des satellites ainsi que l'état de fonctionnement de tous les sous-systèmes.

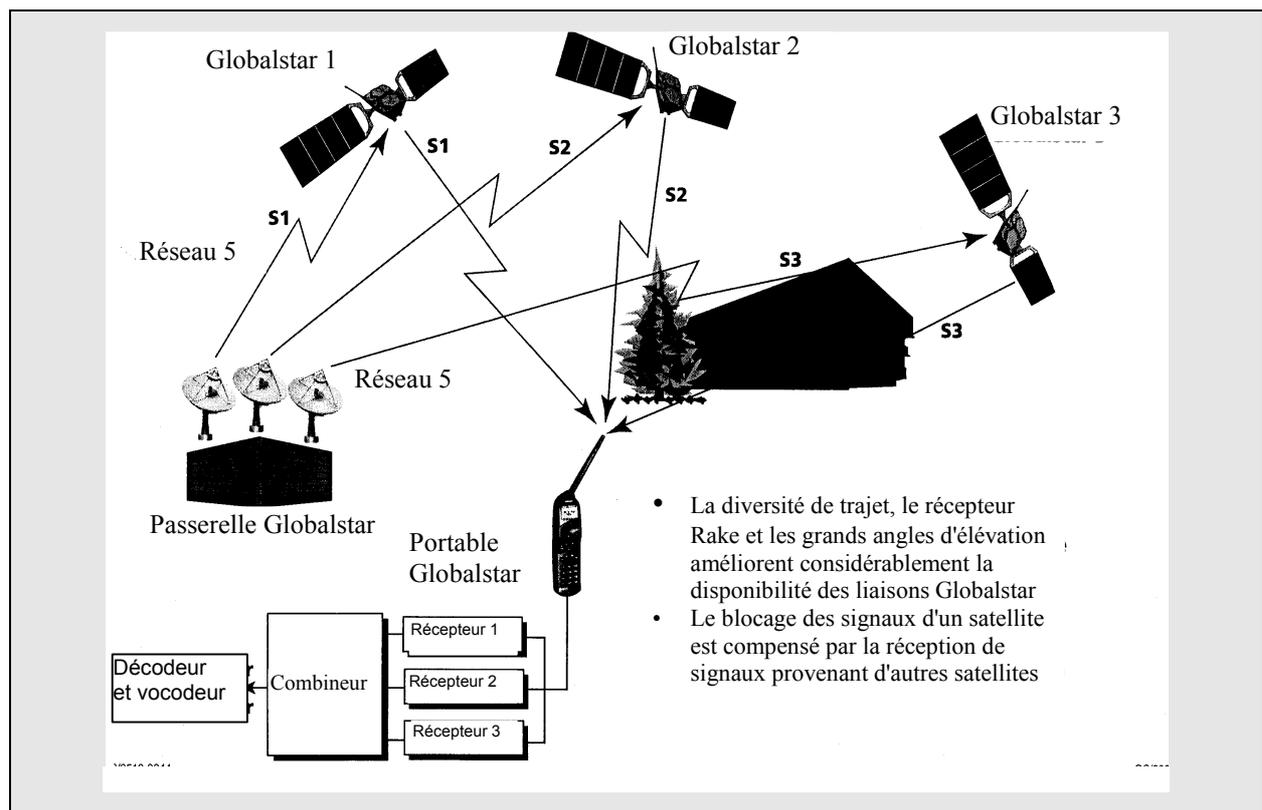
Par ailleurs, Globalstar a conclu avec Qualcomm Inc. un contrat pour la conception, le développement, la construction, l'installation, l'essai et la maintenance de deux centres de contrôle des opérations au sol (GOCC). Ces centres, qui fonctionneront 24 heures sur 24, seront chargés de planifier et de gérer l'utilisation des satellites par les passerelles et de coordonner les informations fournies par les SOCC. Outre ces tâches de planification, les GOCC devront surveiller la performance du système, recueillir l'information nécessaire pour la facturation des prestataires de service et veiller à ce que les passerelles ne dépassent pas la capacité système qui leur a été allouée. Les GOCC seront chargés de répartir dynamiquement la capacité système entre des régions limitrophes, le but étant de faire face de façon optimale à l'évolution de la demande.

Les terminaux d'utilisateur

- *Terminal d'utilisateur bimode*

Le terminal d'utilisateur bimode Globalstar/GSM offre une solution d'itinérance mondiale aux usagers de la téléphonie cellulaire GSM. Globalstar valorise les options de service hertziennes en proposant, à l'échelon mondial, des services du type cellulaire GSM dans des zones extérieures à la couverture GSM traditionnelle. A l'intérieur de la zone de service GSM, un abonné Globalstar peut continuer à utiliser les services GSM. A l'extérieur de cette zone de service, l'utilisateur peut se déplacer vers d'autres réseaux cellulaires GSM ou commuter sur le réseau Globalstar. Même dans les zones non desservies par les compagnies de téléphonie cellulaire, Globalstar garantit aux abonnés des communications mobiles mondiales fiables et d'un bon rapport coût-efficacité. La constellation Globalstar de satellites sur orbites terrestres basses fournira des services numériques fiables de téléphonie, communication de données et télécopie. Dans tous les cas, l'interopérabilité entre Globalstar et GSM est assurée et les abonnés disposent d'un point central unique, d'une grande commodité pour la facturation. Les abonnés du service mobile peuvent se procurer un kit à monter dans leur véhicule. Le téléphone portable Globalstar peut être installé sur un support qui fournit de l'énergie pour prolonger la durée de vie de la batterie. Il peut être utilisé comme téléphone mains libres, pour la commodité et la sécurité de conduite de l'automobiliste.

Figure 3 – Diversité de trajet dans le système Globalstar



- *Terminal d'utilisateur trimode*

Le terminal d'utilisateur trimode Globalstar/IS-95/AMPS offre une solution d'itinérance mondiale aux usagers de la téléphonie cellulaire AMPS/IS-95. Globalstar valorise les options de service hertziennes en proposant, à l'échelon mondial, des services du type cellulaire numérique dans des zones extérieures à la couverture cellulaire traditionnelle. A l'intérieur de la zone de couverture cellulaire numérique AMPS ou

IS-95, avec accès multiple par différence de code (AMDC), l'abonné Globalstar peut continuer à utiliser les services terrestres. Même dans les zones non desservies en téléphonie cellulaire, Globalstar garantit à l'abonné l'accès à des communications mobiles mondiales fiables et d'un bon rapport coût-efficacité. Le système Globalstar, avec ses satellites sur orbites terrestres basses, continuera à fournir des services numériques fiables de téléphonie, communications de données et télécopie, avec utilisation d'appareils portables, montés dans des véhicules ou fixes. Dans tous les cas, l'interopérabilité entre Globalstar et les compagnies de téléphonie cellulaire est assurée et l'abonné dispose d'un point central unique, d'une grande commodité, pour la facturation.

Les abonnés du service mobile peuvent se procurer un kit à monter dans leur véhicule. Le téléphone portable Globalstar peut être installé sur un support qui fournit de l'énergie pour prolonger la durée de vie de la batterie. Il peut être utilisé comme téléphone mains libres, pour la commodité et la sécurité de conduite de l'automobiliste.

Ligne unique fixe

La gamme d'équipements fixes Globalstar répond à la demande de communication immédiate (transmission de téléphonie, télécopie et informatiques) et garantit la souplesse, la capacité et la qualité requises pour l'accroissement futur de la demande. L'accès hertzien fournit une solution innovante pour l'installation rapide et efficace d'une liaison de communication avec les usagers «difficiles à atteindre», sans avoir à subir les dépenses et les délais nécessaires pour la connexion par les moyens filaires traditionnels. Globalstar fournit une solution hertzienne de proximité, à l'échelon mondial pour réaliser le «dernier kilomètre» de connectivité avec le réseau téléphonique.

Globalstar a conçu ses équipements fixes pour permettre la prise en charge du contenu local et réaliser une grande souplesse dans le service assuré aux abonnés. Globalstar fournit une antenne, une unité radioélectrique et un téléphone numérique optionnel. Ce téléphone a pour caractéristiques l'affichage sur écran des indicateurs de progression des appels, des icônes pour la messagerie vocale et une mémoire pour les numéros appelés fréquemment. L'installation de l'abonné peut être fournie sur place par le prestataire de service du pays. L'antenne est montée à l'extérieur en un endroit approprié d'où l'on peut voir le ciel sans obstacles, et reliée à l'installation de l'abonné. Globalstar fournit une connexion économique au commutateur téléphonique à l'intention des populations non desservies, «difficiles à atteindre», qui vivent dans les zones urbaines et rurales des pays industrialisés et des pays en développement.

Unité multiligne

Globalstar offre une solution hertzienne de proximité, à l'échelon mondial, pour réaliser le «dernier kilomètre» de connectivité avec le réseau téléphonique. La gamme d'équipements fixes Globalstar garantit aux opérateurs locaux la souplesse, la capacité et la qualité requises pour la croissance future. L'accès hertzien fournit une solution innovante pour l'installation rapide et efficace d'une liaison de communication avec les usagers «difficiles à atteindre», sans avoir à subir les dépenses et les délais nécessaires pour la connexion par les moyens filaires traditionnels.

L'unité multiligne de Globalstar équivaut à un circuit de jonction standard pour l'interconnexion avec des concentrateurs de commutation tels que les autocommutateurs privés (PABX). Les abonnés peuvent être reliés au PABX par les moyens traditionnels (câbles, radio ou fibres optiques) et communiquer les uns avec les autres à l'intérieur du PABX. L'accès à Globalstar se fait lorsque la communication est requise à l'extérieur du système de commutation: l'abonné au PABX compose le numéro d'accès à la ligne extérieure et Globalstar connecte le demandeur au central téléphonique public ou à tout autre centre de commutation distant.

ANNEXE 2D

Le système ICO

Le texte qui suit repose sur des informations fournies par ICO:

Généralités

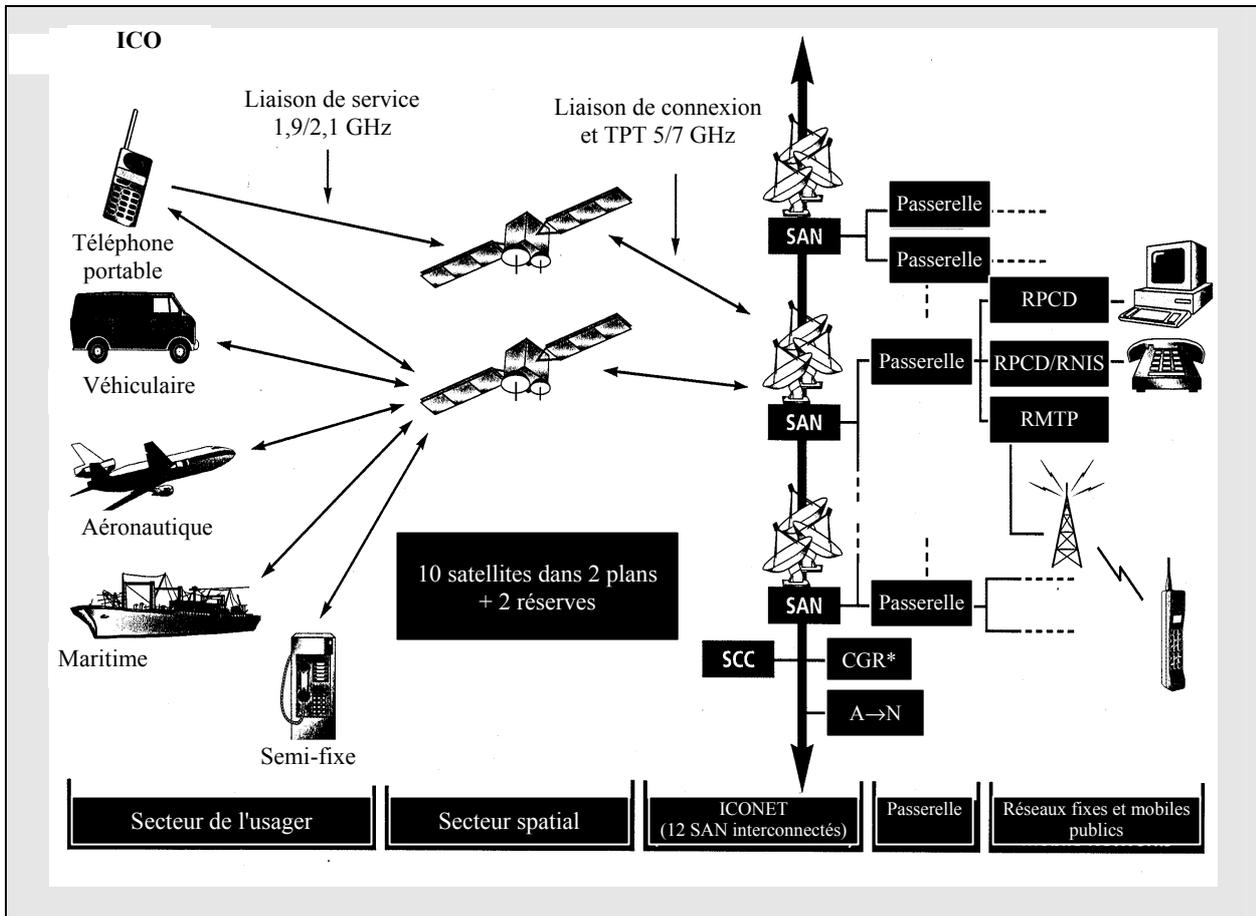
ICO est un système de télécommunications mobiles par satellite conçu essentiellement pour desservir des téléphones portables. Le système offrira des services numériques de téléphonie, communication de données, télécopie et un ensemble de services de messagerie, cela dans le monde entier. La Figure 1 représente schématiquement la configuration du système ICO.

Le système a une capacité de communications mobiles par satellite avec les réseaux mobiles terrestres publics (RMTP). Les communications se font avec des téléphones mobiles portables (les «portables») qui fournissent des services semblables à ceux des téléphones cellulaires classiques, à l'extérieur des bâtiments. Il acheminera les appels en provenance des RMTP et des réseaux téléphoniques publics commutés (RTCP) par l'intermédiaire de stations au sol (appelées nœud d'accès ou satellite ou SAN: *satellite access nodes*) qui choisiront un satellite par lequel transitera la communication. Les appels émanant d'un terminal mobile seront acheminés, *via* la constellation de satellites, jusqu'aux réseaux fixes ou mobiles appropriés ou jusqu'à un autre terminal mobile desservi par un satellite. Les combinés téléphoniques seront produits par de grands constructeurs de matériel de télécommunication et bénéficieront de la technologie cellulaire PCS (service de communication personnelle) des installations de terre. Il existera des versions monomodes (satellites seulement), mais la plupart pourront fonctionner en bimode, avec des systèmes à satellites et avec des systèmes cellulaires PCS de terre. Les combinés bimodes seront capables de choisir l'exploitation par satellite ou l'exploitation de Terre, automatiquement ou sous la commande de l'utilisateur, sous réserve de la disponibilité des deux types de système et sous réserve d'arrangements pour le service qui aura la préférence de l'utilisateur. Une caractéristique du système ICO sera la présence d'une série de fonctions de messagerie à grande pénétration qui permettront de délivrer des messages d'alerte courts.

En se plaçant dans une diversité d'environnements représentatifs (ruraux, suburbains et urbains), on a effectué un grand nombre de mesures de la propagation radioélectrique telle qu'elle existerait pour des téléphones portables communiquant avec des satellites, compte tenu des effets dus à l'occultation et aux réflexions parasites. Les résultats ont été combinés avec les données géométriques des mouvements de la constellation de satellites, pour évaluer la disponibilité du service, exprimée comme la probabilité pour que l'utilisateur d'un portable puisse envoyer ou recevoir un appel à un instant donné.

Il est possible de garantir une disponibilité de service moyenne de plus de 90%, à l'extérieur des bâtiments dans les zones rurales et suburbaines, en réalisant une marge de puissance d'environ 7 dB sur les liaisons et en ayant recours à la diversité de trajet. Dans ces mêmes zones, sans diversité de trajet, la marge devrait être d'environ 16 dB pour obtenir une disponibilité comparable. Ces résultats confirment les avantages de la diversité de trajet dans le cadre de la conception des systèmes: limitation de la puissance d'émission et de la sensibilité nécessaires pour les divers satellites de la constellation, d'où possibilité d'avoir des satellites moins complexes.

Figure 1 – Vue d'ensemble de la configuration du système ICO



Secteur spatial et constellation orbitale

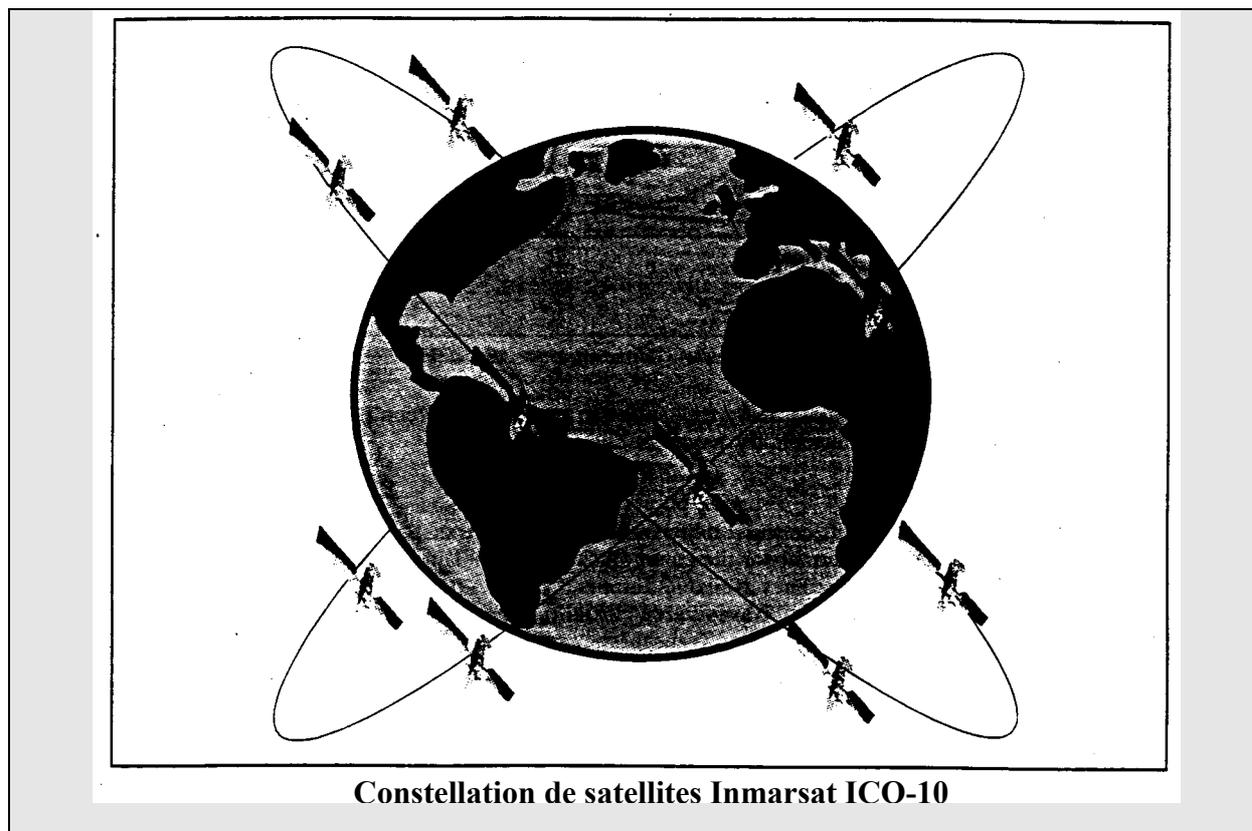
Une constellation de 10 satellites sur orbites terrestres moyennes (MEO), à 10 355 km au-dessus de la surface terrestre, sera répartie entre deux plans contenant chacun cinq satellites, avec un satellite en réserve dans chaque plan (12 satellites en orbite). Chaque plan orbital est incliné à 45 degrés sur le plan de l'équateur. La société Hughes Space & Communications International, Inc., construira les satellites aux termes d'un contrat signé en juillet 1995.

La configuration du système a été conçue de manière à donner en permanence une couverture de la totalité de la surface terrestre et de manière à maximiser la diversité de trajet du système. Cette diversité de trajet conditionne la disponibilité, pour un usager, de plusieurs satellites au même instant. L'utilisateur dispose ainsi d'un trajet de transmission de remplacement si un satellite devient inopérant, ce qui augmente la probabilité de non-interruption des communications.

La constellation de satellites

La structure orbitale est aussi conçue pour donner un important chevauchement de couverture: à un instant quelconque, on aura généralement deux satellites, mais parfois trois et jusqu'à quatre satellites, en position de visibilité par rapport à un usager et à un SAN. Chaque satellite couvrira environ 30% de la surface terrestre à un moment donné. Les orbites ont été choisies de manière à fournir en permanence une couverture de la totalité du globe, avec de grands angles d'élévation pour les usagers (en moyenne 40-50 degrés). La Figure 2 représente la constellation orbitale du système ICO.

Figure 2 – La constellation orbitale du système ICO



Caractéristiques des satellites

Les satellites sont conçus comme les satellites géostationnaires HS601 – conception largement répandue qui a fait ses preuves avec systèmes d'orientation et de commande modifiés pour satisfaire aux conditions de l'orbite MEO. La charge utile de télécommunication est de conception transparente, permettant une adaptation souple au format de transmission, avec utilisation intensive de la technologie numérique pour des fonctions telles que le découpage en canaux et la production des faisceaux, fonctions qui, jusqu'à présent, ont toujours été accomplies en analogique. Le numérique donne une configuration de satellite extrêmement souple (par exemple, allocation souple de la capacité sur la totalité des 30 MHz disponibles dans les bandes des 2 GHz attribuées aux liaisons de service); à cela s'ajoutent des avantages importants, par rapport à l'analogique, en ce qui concerne la production et la fabrication de séries relativement grandes par comparaison avec les séries de production plus classiques des satellites géostationnaires.

Les liaisons entre les usagers et les satellites seront établies à l'aide d'une antenne de service montée sur chaque satellite. Pour avoir des liaisons radioélectriques fiables avec des téléphones portables, il faut que l'ouverture de ces antennes soit supérieure à 2 mètres. La mise en œuvre, sur chaque satellite, de plusieurs faisceaux pour les liaisons de service permet la réutilisation des fréquences et améliore le rendement spectral.

Les nœuds d'accès aux satellites (SAN) constituent l'interface primaire pour la coordination et l'acheminement du trafic. Ils réalisent le routage des communications de manière à fournir la meilleure qualité de service aux usagers. Pour ce faire, chaque SAN poursuit les satellites dans sa ligne de visibilité directe et achemine le trafic vers le satellite optimal.

Chaque satellite est conçu pour transmettre au minimum 4 500 voies téléphoniques réparties entre quelque 750 ondes porteuses, par utilisation de la technique de l'accès multiple par répartition dans le

temps (AMRT), qui permet d'intégrer les voies multiples à chaque porteuse. Le choix s'est porté sur l'AMRT après examen approfondi d'autres techniques, notamment l'accès multiple AMDC. Des études internes et des études effectuées par l'industrie pour le système ICO ont montré que l'AMRT est supérieur à l'AMDC en ce qui concerne la capacité d'écoulement du trafic et les servitudes techniques, et qu'il subit moins d'interruptions des communications pour cause de brouillage. La capacité nominale des différents satellites est telle que cette constellation écoulera au moins 2 400 millions de minutes de communications téléphoniques par année, dans le cas de structures types de distribution du trafic avec des «points chauds» de trafic. De plus, on disposera d'un surcroît de capacité, en dehors de ces «points chauds», pour d'autres acheminements de trafic. On prévoit que la durée de vie des satellites ICO sera d'environ douze ans.

Technologie satellitaire

Liaison de service et nombre de faisceaux: Les performances du système seront très supérieures à ce qui est requis pour réaliser le niveau de service souhaité. Les 163 faisceaux d'émission et de réception sur les liaisons de service fourniront des liaisons sur lesquelles la marge de puissance dépassera 8 dB; la marge moyenne sera voisine de 10 dB et s'élèvera jusqu'à 10-11 dB pour un usager situé au point de projection d'un satellite.

Antennes des liaisons de connexion: Les antennes des liaisons de connexion prennent en charge les liaisons établies entre les satellites et les points nodaux SAN. A tout instant, chaque satellite est en contact direct avec deux, trois ou quatre SAN. Avant de sortir de la ligne de visibilité directe d'un SAN, un satellite établira le contact avec un autre SAN. Ce dernier SAN poursuivra alors le satellite tant que celui-ci se trouvera sur sa ligne de visibilité et dirigera les appels vers ce satellite ou vers tout autre satellite en position de visibilité directe, selon que l'un ou l'autre offrira la meilleure qualité de signal.

Estimations de la masse et de la puissance des satellites: Pour une «injection directe» dans l'orbite circulaire, la masse totale d'un satellite est d'environ 2 600 kg dans le cas d'une fusée capable de lancer plusieurs engins spatiaux. L'injection directe permet de simplifier quelque peu le module HS601, car il n'y a pas alors de moteur d'apogée pour la mise en orbite finale. Les panneaux solaires seront équipés des cellules solaires les plus modernes, à l'arséniure de gallium, qui donnent des puissances supérieures à 8 700 W en fin de durée de vie.

Choix de la configuration orbitale

Avant de choisir la configuration orbitale MEO, l'organisation Inmarsat, principal actionnaire et bailleur de fonds d'ICO, s'est livrée à une vaste analyse portant sur un large éventail des options techniques existant à l'époque. Ces études concernaient les propriétés du service, les coûts, les risques techniques et le potentiel commercial. La recherche a été menée par Inmarsat, avec la participation des signataires d'Inmarsat, et par le biais de plusieurs études commandées à de grandes entreprises industrielles de l'aérospatial et des télécommunications.

Les études d'Inmarsat ont évalué les avantages respectifs des options techniques réalisables, et bien connues, pour desservir des téléphones portables à partir de satellites placés sur:

- i) une orbite terrestre basse (LEO, jusqu'à 2 000 km d'altitude),
- ii) une orbite terrestre moyenne (MEO, de 8 000 à 20 000 km), ou
- iii) l'orbite des satellites géostationnaires (GEO).

Pour obtenir la couverture totale de la surface terrestre, il faut environ 40 à 70 satellites sur une orbite LEO, de 6 à 20 satellites sur une orbite MEO et de 3 à 6 satellites sur l'orbite GEO.

Inmarsat a conclu que c'est la configuration MEO qui pourrait donner la meilleure qualité de service globale pour le marché visé. Cela s'explique par les propriétés orbitales de cette configuration qui, avec un nombre raisonnable de satellites, procure les avantages suivants:

- i) Grand angle d'élévation moyen entre l'usager et les satellites, d'où probabilité de blocage réduite à un minimum.
- ii) Grande probabilité pour qu'un usager se trouve dans le champ de vision de plusieurs satellites, d'où diversité de trajet favorable des satellites.
- iii) Satellites à mouvement lent (environ 1 degré par minute, vu par l'usager).

Les études techniques sur les constellations de satellites LEO, MEO et GEO ont abouti à la conclusion que l'orbite MEO représente un compromis raisonnable pour la mise en œuvre et les délais d'exécution. Dans la formule LEO, il aurait fallu un grand nombre de satellites, qui auraient eu une durée de vie relativement courte dans le milieu de rayonnement où ils auraient évolué. Cette formule aurait donc posé des problèmes de logistique et de fabrication pour la maintenance de la constellation.

Caractéristiques de la qualité de service de la constellation

Il existe des compromis, dans chacune des configurations orbitales, en ce qui concerne les caractéristiques du service, les coûts, la complexité et les risques. La connectivité et le temps de propagation sont les caractéristiques auxquelles les usagers seront sans doute le plus sensibles.

Connectivité: Dans toutes configurations, il faut en principe qu'il y ait visibilité directe entre un usager et un satellite pour pouvoir établir et maintenir une connexion. La présence d'obstacles (bâtiments, sommets montagneux) entre un usager et un satellite peut empêcher l'établissement d'une liaison ou couper une liaison existante; des structures encaissées, naturelles (canyons) ou urbaines (bâtiments élevés) peuvent causer des difficultés.

Les systèmes MEO ou LEO permettent normalement d'obtenir un chevauchement de couverture de la surface terrestre à partir de plusieurs satellites. Cela accroît la probabilité d'avoir au moins un satellite en position de visibilité par rapport à l'utilisateur, pour l'établissement d'une liaison. Dans leur mouvement par rapport à la Terre, les satellites de ces systèmes quittent la ligne de visibilité directe de l'utilisateur ou du SAN: ils passent au-delà de l'horizon ou derrière un obstacle. Pour maintenir une liaison, les systèmes MEO et LEO doivent comporter un mécanisme de transfert du trafic.

Leur altitude étant plus grande, les satellites MEO traversent le champ de vision de l'utilisateur plus lentement que les satellites LEO. Il leur faut par conséquent des transferts de trafic moins fréquents.

Temps de propagation: Il s'agit du temps, proportionnel à la somme des distances entre le satellite et l'utilisateur et entre le satellite et le nœud d'accès SAN, pendant lequel le signal radioélectrique parcourt cette distance. Le temps de propagation est maximum dans les systèmes GEO et minimum dans les systèmes LEO. Un temps de propagation inférieur à 200 millisecondes est caractéristique des systèmes MEO, il se situe nettement en deçà des limites acceptables.

Plan de fréquences

Caractéristiques spectrales requises des liaisons de service pour la connexion entre les terminaux d'utilisateur et les satellites: Les bandes à choisir pour l'établissement de liaisons de service dans les systèmes du service mobile par satellite (SMS) sont les bandes 1,6/1,5 GHz, 1,6/2,4 GHz et des bandes autour de 2 GHz. ICO a décidé de fonctionner dans les bandes des 2 GHz: 1 985-2 015 MHz et 2 170-2 200 MHz.

Pour la répartition et le volume planifiés du trafic, les bandes requises pour les liaisons de service se situeront autour de 10 MHz sur les liaisons montantes et les liaisons descendantes. Les satellites ICO posséderont la souplesse de fonctionnement nécessaire pour maximiser l'utilisation du spectre disponible dans chaque sens, dans les bandes 1 985-2 015 MHz et 2 170-2 200 MHz.

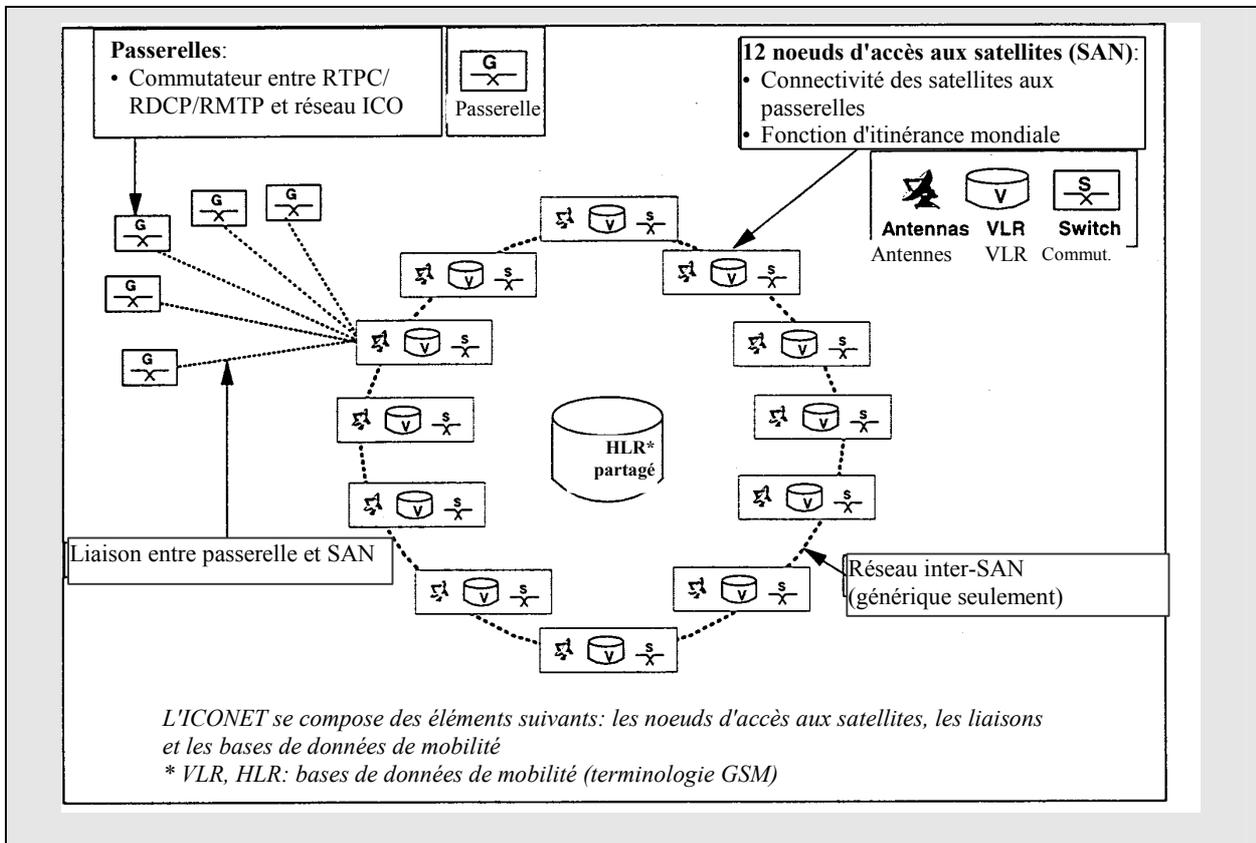
Caractéristiques spectrales requises des liaisons de connexion entre les satellites et les SAN: Pour les liaisons de connexion, ICO a décidé de fonctionner dans les bandes 5 150-5 250 MHz et 6 975-7 075 MHz. Ces bandes font partie de deux nouvelles attributions décidées par la CMR-95 pour les liaisons de connexion conduisant aux satellites non géostationnaires qui assurent le service mobile par satellite.

Secteur terrien

Les satellites seront reliés à un réseau terrien (l'ICONET) qui réalisera l'interconnexion de douze nœuds d'accès aux satellites (SAN) implantés de façon optimale sur l'ensemble de la surface terrestre. Les SAN se composent d'une station terrienne avec antennes multiples pour la communication avec les satellites, complétée par un équipement de commutation et des bases de données. L'ICONET et les SAN choisiront

des acheminements qui garantiront aux usagers la meilleure qualité et la meilleure disponibilité de service possibles. La Figure 3 donne le schéma de principe de l'ICONET.

Figure 3 – L'ICONET



Les passerelles installées dans le monde entier, seront connectées à l'ICONET, pour réaliser l'interface avec le RTPC et les RMTP. Elles seront la propriété d'opérateurs tiers qui seront autorisés à avoir accès au système ICO.

L'ICONET et les nœuds d'accès aux satellites

Les nœuds d'accès SAN constitueront l'interface primaire entre les satellites et les passerelles. Ils contiendront aussi l'équipement qui acheminera les signaux des satellites pour distribution aux passerelles appropriées. Un SAN se composera de trois éléments principaux:

- i) cinq antennes, avec l'équipement associé pour communiquer avec les satellites;
- ii) un commutateur pour acheminer le trafic à l'intérieur de l'ICONET et à destination des passerelles;
- iii) des bases de données, auxiliaires de la gestion de la mobilité.

Chaque SAN contiendra une base de données où se trouveront des renseignements sur les terminaux d'utilisateur enregistrés dans le SAN (dans la terminologie GSM, cela s'appelle un registre de localisation des visiteurs ou VLR: *visitor location register*). Il y aura au moins un SAN contenant une base de données où se trouveront des renseignements sur les usagers (registre de localisation et de rattachement ou HLR: *home location register*), mais cette fonction pourra être répartie entre plusieurs SAN ou dans le RMTP.

Chaque SAN poursuivra les satellites se trouvant en position de visibilité avec lui; dirigera le trafic vers le satellite «optimum» pour établir la liaison la plus fiable; puis, le cas échéant, effectuera des transferts de trafic du satellite se trouvant sur la liaison la moins fiable vers le satellite optimum qui est en position de visibilité directe avec le SAN, afin d'assurer la continuité de la communication.

ICO fournira douze SAN, implantés stratégiquement sur la surface de la planète (environ deux par continent); il sera le propriétaire de ces installations et passera commande de leur réalisation et leur acquisition, mais la mise en place et l'exploitation des SAN seront sous-traitées. Le réseau des SAN sera interconnecté par un réseau fédérateur de terre, l'ICONET, qui permettra d'acheminer les appels, *via* le secteur terrien du réseau, jusqu'au SAN le mieux à même de traiter ces appels. L'ICONET sera géré par le centre de contrôle du réseau.

Les passerelles

Les passerelles sont des commutateurs qui réaliseront la jonction entre les SAN et les réseaux de terre publics. Chaque passerelle sera reliée à l'ICONET, ce qui garantira la souplesse de la répartition du trafic et de l'acheminement de secours. Le commutateur pourra se présenter comme une entité autonome spécialisée ou être mis en œuvre comme une fonction supplémentaire sur un commutateur existant.

Les passerelles seront la propriété de tiers, qui en assureront l'exploitation. Il n'existe *a priori* aucune limite technique au nombre de passerelles pouvant être intégrées au système. Leur implantation sera déterminée par la proximité du marché et par l'accès aux commutateurs existants des réseaux RTPC, RDCP ou RMTP.

Gestion de la mobilité des usagers

Dans le but d'assurer l'itinérance mondiale, l'ICONET comprendra un système chargé de gérer la mobilité des usagers à l'échelon mondial, sur la base de la norme existante de téléphonie cellulaire numérique, GSM.

En coordination avec les VLR, les HLR vérifieront les informations relatives à l'utilisateur ainsi que le statut de l'utilisateur et localiseront celui-ci, où qu'il se trouve dans le monde. Lorsqu'un combiné sera en ligne, il enverra, par l'intermédiaire du satellite et du SAN, un signal au HLR de l'utilisateur; ce HLR vérifiera le statut de l'utilisateur et autorisera l'accès au système. Le système communiquera cette autorisation au SAN et l'enregistrera dans son VLR. L'autre fonction du HLR est de communiquer la position du VLR d'un utilisateur au SAN par l'intermédiaire duquel arrive un appel. Cela permettra d'acheminer l'appel jusqu'au SAN qui est le plus près de l'utilisateur demandé. La communication sera alors établie jusqu'à destination *via* la liaison par satellite.

Intégration dans les réseaux cellulaires

Un problème crucial de l'ICO sera celui de son intégration dans les réseaux RMTP existants. Dans la plupart des cas, le réseau à satellites sera considéré comme un service complémentaire pour les abonnés aux RMTP désireux de pouvoir émettre et recevoir des appels dans des zones non desservies par leur RMTP.

L'architecture du réseau ICO permettra de constituer deux grands groupes d'utilisateurs, avec des caractéristiques de service distinctives: les utilisateurs locaux ou régionaux et les utilisateurs dont les activités sont de portée mondiale.

ICO Global Communications étudie plusieurs approches possibles de l'intégration, notamment les spécifications systémiques pour un numérotage mondial et la logistique à mettre en place pour la localisation des utilisateurs et l'enchaînement des appels en deçà et au-delà de la portée des réseaux cellulaires. ICO mettra en œuvre un combiné bimode qui fournira l'accès au réseau à satellites et au RMTP à partir du même terminal.

Télémessure, poursuite et télécommande (TPT)

Les stations TPT gèreront le système à satellites ICO en suivant les mouvements des satellites et en corrigeant leurs orbites de manière à maintenir la constellation. Ces stations surveilleront aussi l'état de fonctionnement général des satellites en recueillant des données sur l'alimentation en énergie, la température, la stabilité et d'autres caractéristiques de fonctionnement, et en transmettant ces données aux stations pour traitement et suite à donner.

Contrôle du réseau à satellites

Les stations de contrôle du réseau (NCS), agissant par l'intermédiaire des stations TPT et des SAN, contrôleront les enchaînements des répéteurs entre les antennes des liaisons de connexion et les antennes de service installées sur les satellites. Ce processus imposera, entre autres choses, la reconfiguration des fréquences dans les faisceaux des liaisons de connexion et une répartition optimale des canaux entre faisceaux ponctuels transportant respectivement de forts volumes de trafic et de faibles volumes.

Terminaux d'utilisateur*Téléphones portables*

Dans leur grande majorité, les terminaux d'utilisateur du système ICO seront des téléphones portables pouvant fonctionner en bimode (satellite et cellulaire ou SCP) et très semblables aux appareils portables actuels cellulaires/SCP en ce qui concerne les dimensions, l'aspect et la qualité vocale. Le prix de ces appareils bimode ICO, dans une production en grande série, devrait se révéler compétitif par rapport à d'autres matériels comparables de systèmes à satellites lors de l'ouverture du service.

Le téléphone portable ICO possèdera un certain nombre de caractéristiques optionnelles: accès de données extérieures et mémoire tampon interne pour les communications de données, fonctions de messagerie, télécopie et utilisation de cartes à puce (SIM).

Sécurité

Le système ICO a été conçu de telle sorte que le téléphone portable satisfasse aux exigences de sécurité prévues en ce qui concerne le rayonnement radioélectrique. En règle générale, la puissance d'émission moyenne en exploitation ne dépassera pas 0,25 watt. Les téléphones cellulaires utilisés actuellement ont en général des puissances d'émission moyennes comprises entre 0,25 et 0,6 watt.

Autres types de terminaux d'utilisateur dérivés

On prévoit que la technologie appliquée dans les téléphones portables ICO trouvera aussi sa place dans beaucoup d'autres types de terminaux (terminaux mobiles véhiculaires, aéronautiques et maritimes, terminaux semi-fixes et fixes), par exemple cabines téléphoniques en milieu rural et téléphones collectifs. Pour beaucoup de ces terminaux, il sera possible d'utiliser des antennes à gain plus élevé et/ou de plus grandes puissances d'émission que pour les téléphones portables, ce qui permettra d'avoir des services à plus grand débit binaire.

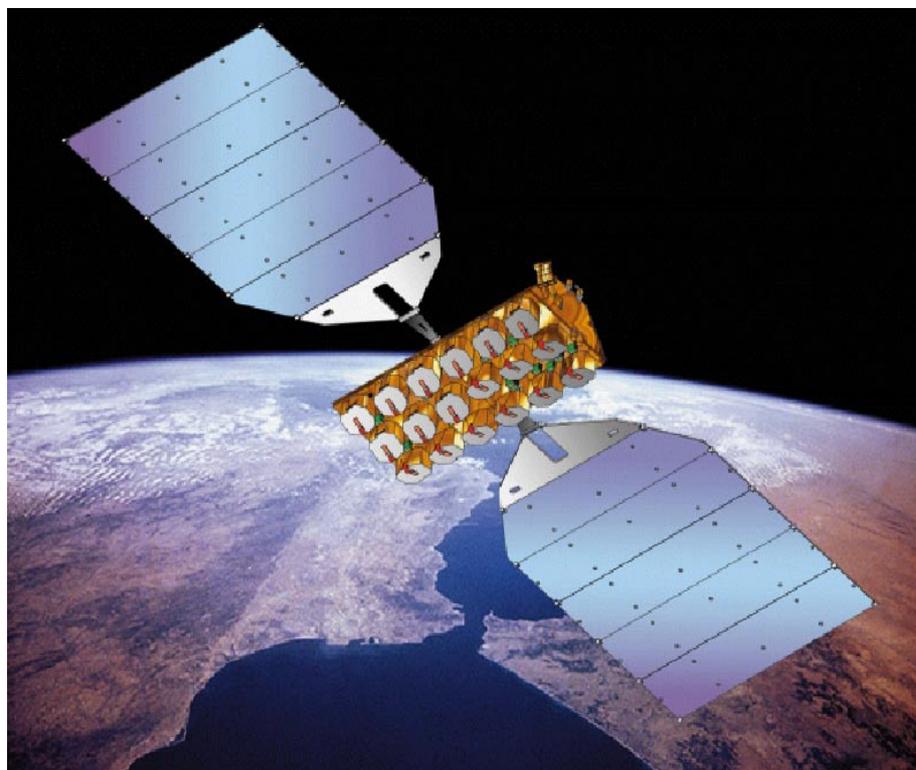
ANNEXE 2E

Le système Skibrige: accès mondial pour le multimédia

Le texte qui suit est basé sur des informations fournies par SkyBridge.

Introduction

Au cours des dernières années, les entreprises et les personnes privées se sont rapidement converties à l'Internet, conscientes de l'avantage qu'il y avait à pouvoir accéder, à peu de frais, à des informations en provenance du monde entier, conscientes aussi du potentiel que représentait le commerce électronique. Cependant, les puissants services multimédias interactifs qui caractérisent le nouvel âge de l'information ont besoin de capacités de circuits toujours plus grandes pour transporter les textes, les images, les signaux vidéo, le son et les données. En fait, nombre de ces services nécessitent des débits de transmission des dizaines, voire des milliers de fois supérieurs à ceux d'une simple communication téléphonique. On estime qu'en 2005 plus de 400 millions d'utilisateurs de part le monde auront recours à ces services à large bande.



Pour répondre à cette demande, les opérateurs de télécommunication ont consenti de lourds investissements dans la réalisation de réseaux fédérateurs en câbles à fibres optiques, capables de véhiculer l'information multimédia partout dans le monde à la vitesse de la lumière. Toutefois, les réseaux locaux qui amènent ces services jusqu'à l'utilisateur final ont pris beaucoup de retard, d'où des goulets d'étranglement que connaissent bien tous ceux qui ont dû attendre des éternités pour le téléchargement d'une page sur l'Internet. La raison en est évidemment le coût élevé du remplacement ou de l'amélioration de l'infrastructure d'accès locale, qui représente plus de 70% de l'investissement total dans un réseau. Il est impossible, financièrement et matériellement, de remplacer en quelques années les boucles locales existantes par des fibres optiques à grande vitesse de transmission.

Des techniques telles que la ligne d'abonné numérique asymétrique (ADSL) et les modems sur câble fournissent des solutions intéressantes dans lesquelles on utilise les réseaux téléphoniques existants à fil de cuivre et les réseaux existants en câbles. Toutefois, il existe des situations où ces techniques ne peuvent pas être mises en œuvre techniquement ou à un coût suffisamment bas; c'est le cas, par exemple, des régions à faible densité, où la qualité des réseaux existants est insuffisante. Beaucoup d'utilisateurs continueront donc à subir des engorgements du trafic. De ce fait, les opérateurs perdent les très importantes recettes qu'ils pourraient espérer engranger en proposant des services à large bande à tous leurs abonnés.

La question, dès lors, est la suivante: comment résoudre ce problème à un coût raisonnable? La réponse est SkyBridge, système d'accès à satellites qui remédie aux limitations imposées par les boucles locales en réalisant l'accès rapide aux réseaux de base à fibres optiques du monde entier. Le système SkyBridge, dont la mise en exploitation est programmée pour 2003, permettra aux opérateurs de télécommunication de mettre l'accès local à large bande à la disposition de plus de 20 millions d'utilisateurs de part le monde, grâce à une constellation de 80 satellites évoluant sur des orbites terrestres basses (LEO). Ce sera le premier système à satellites LEO à large bande et le seul spécialisé intégralement dans l'accès local. En interconnectant son réseau d'accès par satellites avec les réseaux fédérateurs à fibres optiques, le système SkyBridge réalisera la connectivité rapide de bout en bout à l'échelon mondial, et ce à un prix avantageux. Les opérateurs y trouveront les avantages d'un coût modique, de la souplesse d'exploitation, d'une mise en œuvre rapide et d'un service de haute qualité. Etant donné que SkyBridge fournit de la «largeur de bande à la demande», ils pourront allouer de la capacité là où ce sera nécessaire, et quand ce sera nécessaire, pour répondre aux besoins des usagers. Ces derniers bénéficieront d'un accès peu coûteux aux services multimédias, avec une petite antenne de prix modique.

Parce qu'il met en œuvre la technologie spatiale, SkyBridge ne subit pas de contraintes du fait du terrain ou des infrastructures locales existantes. Il permet par conséquent aux entreprises et aux particuliers situés dans des zones rurales et reculées, et dans des pays en développement, d'être parties prenantes dans l'âge de l'information, contribuant ainsi à dynamiser les économies locales.

Le système SkyBridge

SkyBridge utilise une constellation de 80 satellites en orbite autour de la Terre à l'altitude de 1 469 km. Fonctionnant dans la bande Ku (10-18 GHz), le système se caractérise par une grande disponibilité, qui repose sur l'utilisation d'une technologie satellitaire éprouvée. De plus, la bande Ku est beaucoup plus résistante à l'affaiblissement par la pluie que les bandes de fréquences plus élevées, d'où une qualité de service élevée même dans des conditions météorologiques médiocres. L'utilisation de cette bande, que SkyBridge partagera avec plusieurs systèmes à satellites géostationnaires et systèmes de faisceaux hertziens de terre, a été approuvée à l'unanimité par la Conférence mondiale des radiocommunications (CMR) de l'Union internationale des télécommunications (UIT).

Le trafic est acheminé depuis l'antenne de l'utilisateur, *via* les satellites LEO, jusqu'à une station passerelle qui constitue l'interface avec le réseau de terre. La commutation et l'acheminement peuvent être effectués dans la passerelle ou dans un commutateur distant faisant partie du réseau de l'opérateur.

SkyBridge se distingue par sa souplesse d'exploitation et par son aptitude à évoluer harmonieusement. Le système fonctionne en effet selon le principe simple de la «transparence», sans commutation à bord et sans liaisons de communication entre satellites. Les opérateurs peuvent ainsi gérer la capacité de leur

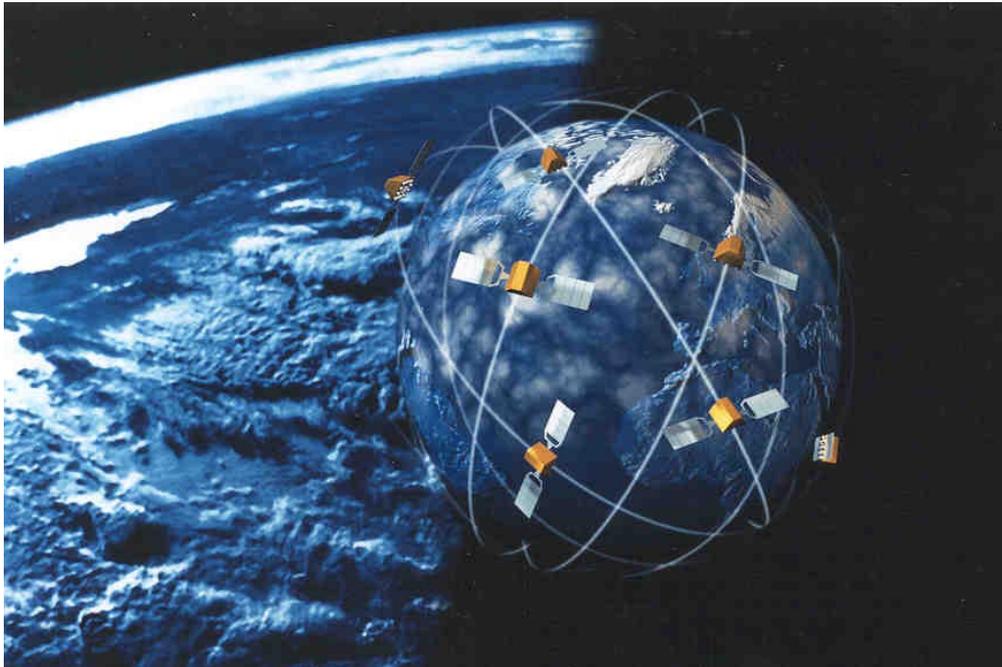
réseau en fonction des nécessités et développer des services qui répondront au fur et à mesure à la demande des usagers. Cette souplesse d'exploitation sera un atout des plus importants pour se maintenir sur le marché concurrentiel, loin dans le nouveau millénaire.

Architecture

L'architecture du système se compose d'un secteur spatial et d'un secteur télécommunication. Le secteur spatial comprend:

- une constellation de 80 satellites LEO, auxquels s'ajoutent des satellites en réserve;
- deux centres de contrôle des satellites (SCC: *satellite control centres*);
- des stations de télémétrie, poursuite et télécommande (TPT);
- deux centres de contrôle des missions.

Les satellites évoluent dans une constellation dite constellation de Walker, qui comprend 20 plans également inclinés à 53° sur le plan de l'équateur. Chaque plan contient quatre satellites qui gravitent à une altitude de 1 469 km.



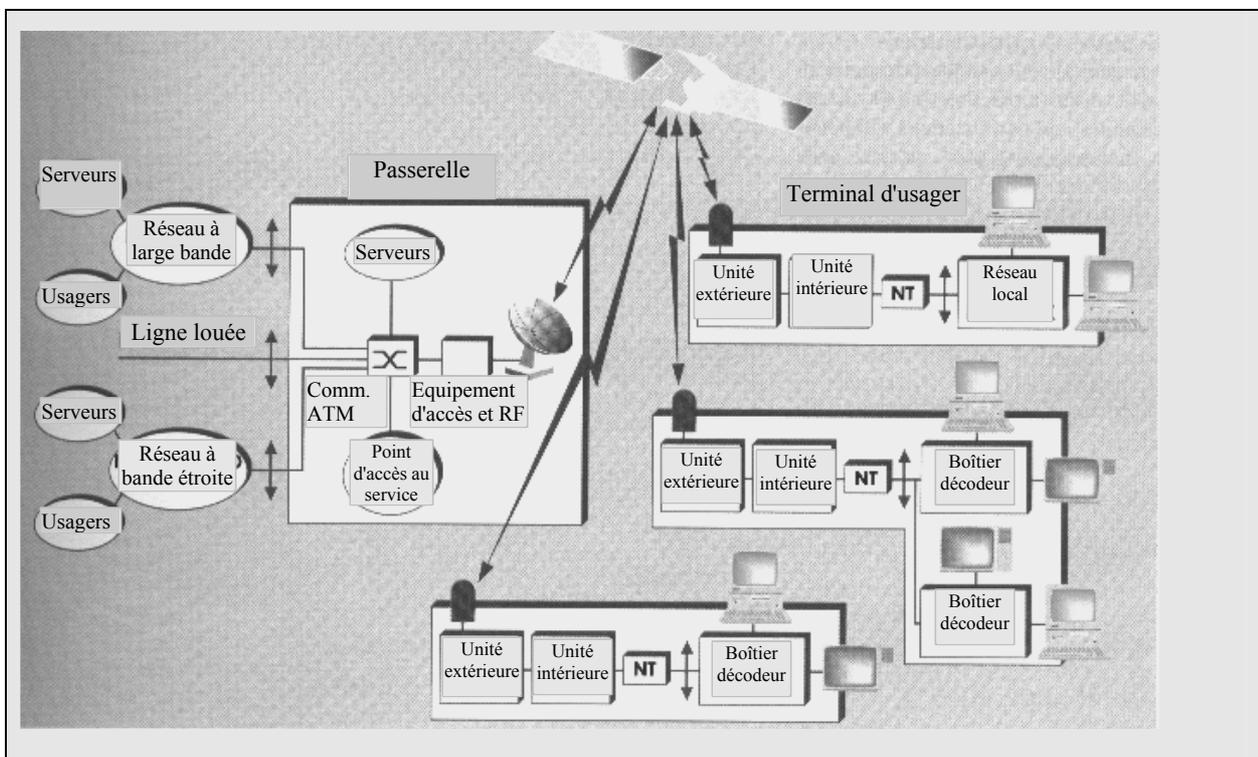
Une caractéristique clé des satellites est l'utilisation d'antennes actives qui produisent les faisceaux ponctuels et les maintiennent pointés sur les passerelles au sol correspondantes. Chacun de ces faisceaux éclaire une cellule de 700 km de diamètre et peut desservir des terminaux d'utilisateur sous un angle d'élévation supérieur à 10°.

La figure ci-dessous représente le secteur télécommunication. Ce secteur est constitué de terminaux d'utilisateur et de passerelles en interface avec des serveurs locaux, des réseaux de terre à bande étroite ou à large bande, ou des lignes louées. Les terminaux d'utilisateur comprennent l'équipement d'antenne et une interface pour la connexion à l'équipement de l'utilisateur, par exemple un PC multimédia. On prévoit l'installation d'un maximum de 200 passerelles, qui donneront une couverture mondiale. Dans les régions à faible densité de population, une passerelle peut desservir plusieurs cellules.

Les usagers privés (résidence) dotés de petites antennes de 50 cm montées sur le toit des bâtiments peuvent recevoir à des débits allant jusqu'à 20 Mbit/s (liaison aller) et émettre jusqu'à 2 Mbit/s (liaison retour). Les terminaux des usagers professionnels (catégorie affaires) peuvent recevoir et émettre à des débits binaires de 3 à 5 fois plus grands avec leurs antennes dont les diamètres s'échelonnent de 80 à 100 cm.

SkyBridge fonctionne en mode de transfert asynchrone normalisé (ATM: *asynchronous transfer mode*) et avec le protocole Internet/protocole de contrôle de transmission (IP/TCP). Cela permettra au système de fonctionner sans à-coups avec les réseaux de terre actuels et futurs.

Figure 1 – Secteur télécommunication du système SkyBridge



Transferts de trafic

Lorsqu'un satellite sort du champ de vision d'un terminal, le trafic qu'il échange avec ce terminal est transféré sur un autre satellite, ce qui assure la continuité du service; le premier satellite se cale ensuite sur d'autres terminaux. L'opération de transfert pour une cellule est gérée par la passerelle correspondante. Les liaisons avec le satellite sortant sont maintenues pendant un intervalle de temps suffisant pour permettre au terminal et à la passerelle de se pointer et de se synchroniser sur le satellite entrant. Les communications sont commutées dès que la synchronisation a été effectuée.

Services SkyBridge

En raison de la contrainte imposée par l'accusé de réception des données, la performance (débit, taille de la fenêtre) du transport des paquets IP dépend principalement du temps de propagation aller-retour par le satellite. Le faible temps de transmission des signaux dans la constellation SkyBridge (30 ms contre 500 ms pour les satellites géostationnaires) garantit un bon rendement de transport en faveur des services d'accès à l'Internet.

Par ailleurs, SkyBridge est conçu pour être compatible avec les actuelles et les prochaines normes de protocoles Internet (par exemple, Protocole de réservation de ressources/services différenciés, Protocole point à point sur l'Ethernet) qui sont en cours de définition pour assurer la qualité de service en temps réel sur l'Internet ou sur d'autres réseaux à large bande fonctionnant en transmission par paquets.

Services pour les utilisateurs finals

Le système SkyBridge assure une grande variété de services:

- Applications multimédias sur l'Internet: satisfaction de la demande de médias en temps réel (par exemple, conférences de presse télévisées en direct, radio en direct sur l'Internet), également des services émergents comme la téléphonie et la visioconférence sur l'Internet.
- Accès direct à des services en ligne et au contenu: le trafic SkyBridge peut être acheminé directement jusqu'à un serveur local qui fournit les services locaux et le contenu.
- Interconnexion des LAN et mise en réseau privée: ces services sont fournis par interconnexion de terminaux individuels et de réseaux locaux (LAN) au moyen de liaisons par satellite. De plus, le système donne aux opérateurs la possibilité de fournir des services de LAN virtuels, en facilitant l'accès à distance aux LAN (pour les télétravailleurs ou les employés sur le terrain) et au réseau étendu (WAN: *wide area network*).
- Connexion au réseau public à bande étroite: permet à un utilisateur final d'employer son poste téléphonique, standard ou numérique, ainsi que d'autres types de terminaux d'utilisateur final, par exemple visiophones ou boîtiers décodeurs de télévision.
- Visiophonie et visioconférence: ces services permettent à plusieurs usagers se trouvant en deux ou plusieurs endroits de communiquer en temps réel, par échange bidirectionnel ou multidirectionnel de signaux audio, vidéo et d'autres données (y compris des applications et des documents d'entreprise).
- Commerce électronique: commercialisation, commande, livraisons et paiement de marchandises et de services en ligne. On prévoit que l'e-commerce sera un moteur important de la demande de services à large bande sur l'Internet, les intranets et les extranets.
- Télétravail: permet à des personnes de travailler hors des bureaux traditionnels, grâce à des connexions à distance à des LAN et à des WAN. Le système SkyBridge donne aussi aux télétravailleurs l'accès à distance à des LAN.
- Télééducation: réalise la «salle de classe virtuelle», système dans lequel les enseignants et les étudiants se trouvent en des lieux différents desservis par SkyBridge.
- Télémédecine: combine la vidéo à la demande, l'extraction d'information multimédia et la visioconférence.

Services de transport à bande étroite et à large bande

SkyBridge fournit des services à bande étroite pour la mise en œuvre de services de téléphonie dans les zones suburbaines et les zones faiblement peuplées, et pour la mise en place rapide d'infrastructures publiques et de réseaux privés.

Par ailleurs, la fonction de transport de SkyBridge assure la connexion à des systèmes d'accès complémentaires à large bande (par exemple, ADSL), ainsi que l'interconnexion de groupes distants d'utilisateurs avec les passerelles de SkyBridge.

Les utilisateurs finals de SkyBridge

Le système SkyBridge dessert deux catégories d'utilisateurs:

- usagers professionnels, qui consultent des bases de données distantes et qui partagent des applications interactives avec des tiers situés hors de leur réseau interne;
- usagers privés, dont les domaines d'intérêt sont les programmes de divertissement, la communication vidéo, l'accès aux fournisseurs de services Internet, etc.

Usagers professionnels

Ces usagers peuvent avoir besoin d'une connectivité de point à point ou de point à multipoint pour des applications telles que la téléconférence, le travail en coopération, l'interconnexion LAN-LAN. Par l'intermédiaire de SkyBridge, un usager professionnel peut entrer en contact avec un de ses congénères rattaché à un autre réseau d'entreprise (par exemple, réseau WAN, Intranet, réseau privé virtuel (RPV)), ou tout autre usager équipé d'un terminal SkyBridge.

Usagers privés

Des communications peuvent être établies entre différents usagers privés locaux du système SkyBridge à l'intérieur de la zone de couverture du système, et également entre tout usager privé et les prestataires de services reliés aux passerelles SkyBridge.

Opérateurs

Dans certains cas, les opérateurs de réseau peuvent aussi être considérés comme des utilisateurs finals. En particulier, SkyBridge peut établir des liaisons E1 et T1 commutées ou transparentes.

Réutilisation des fréquences

Un des facteurs les plus importants d'une gestion efficace des fréquences est le partage entre différents services et systèmes de télécommunication. Des techniques de partage bien structurées permettent la mise en œuvre de technologies nouvelles; il est possible ainsi de mettre en ligne de nouveaux services extrêmement performants sans perturber les services existants. SkyBridge est un exemple de cet esprit de partage. L'innovation mise en pratique dans SkyBridge permet d'élargir considérablement l'accès aux télécommunications de haute technologie, grâce à la réutilisation de fréquences déjà employées dans d'autres systèmes, notamment les systèmes à satellites géostationnaires et les systèmes du service fixe.

SkyBridge joue un rôle de premier plan dans la création de l'environnement qui permettra de perpétuer cette tradition du partage et de l'utilisation efficace des fréquences dans les systèmes à satellites non géostationnaires du service fixe par satellite (non OSG SFS). La Conférence mondiale des radiocommunications de 1997 (CMR-97) a franchi un premier pas décisif lorsqu'elle a approuvé la notion de limites de puissance surfacique. Ces limites sont les paramètres techniques devant être respectés par une constellation de satellites non OSG pour garantir une protection efficace aux services à satellites géostationnaires et aux services de Terre. La CMR-97 a aussi créé un forum technique dans le cadre duquel des ingénieurs du monde entier déterminent les niveaux exacts de la protection à assurer aux systèmes à satellites géostationnaires (OSG) et aux services de terre, tout en introduisant les services fixes par satellites non OSG. Cet effort collectif est bien engagé et a permis des avancées significatives vers l'objectif.

La CMR-2000 a eu pour tâche de finaliser cet état de choses et d'entériner les travaux du groupe de travail de l'UIT-R qui a étudié cette question.

SkyBridge partage la bande Ku (10-18 GHz) avec des entités existantes: systèmes de radiodiffusion par satellites géostationnaires, réseaux de terre, projets de la science spatiale et services de radiolocalisation. Cela étant, un des principaux problèmes à résoudre au stade de la conception a été de faire en sorte que SkyBridge ne cause pas de brouillages préjudiciables à ces systèmes ni aux autres systèmes qui utiliseront cette bande de fréquences dans l'avenir.

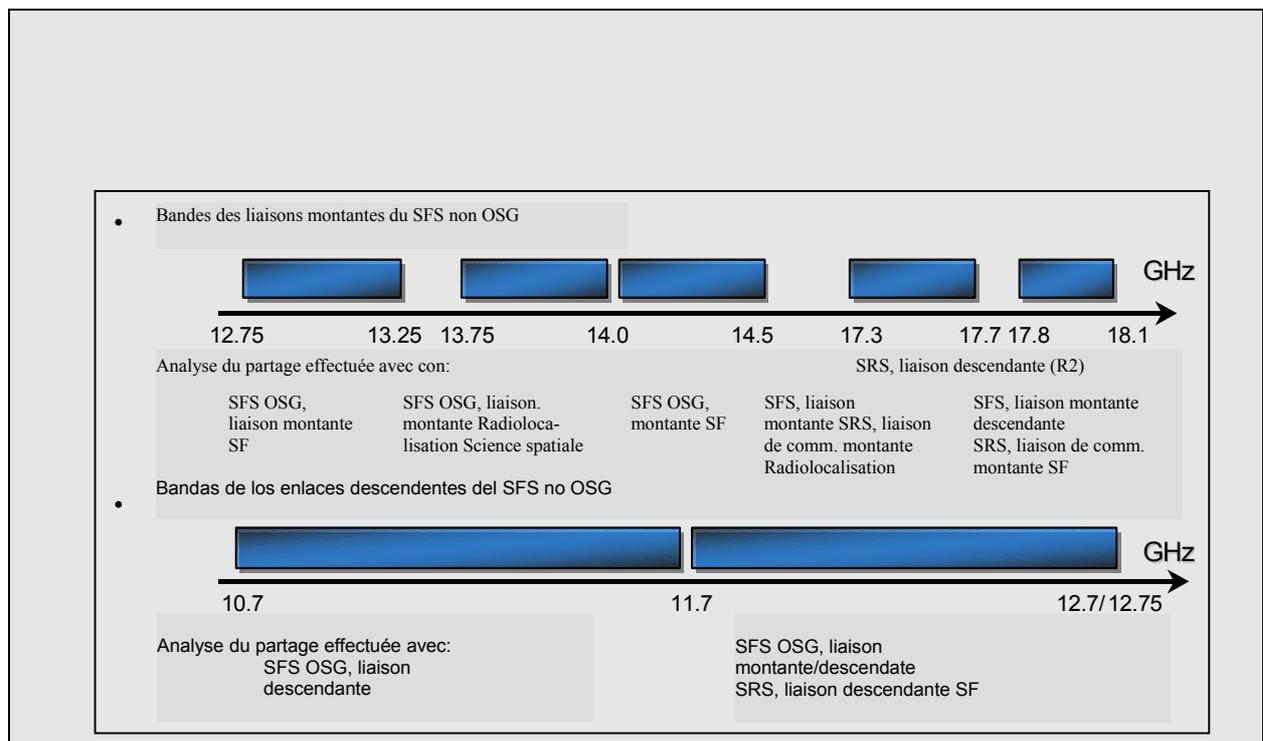
Pour obtenir ce résultat, les concepteurs de SkyBridge ont optimisé les diverses caractéristiques radioélectriques. D'une part, le plan de fréquences a été choisi avec soin, notamment l'assignation exclusive de certaines bandes à des stations passerelles non reliées à des terminaux d'utilisateur. D'autre part, les antennes des satellites ont été calculées pour avoir un fonctionnement optimum. Enfin, la forme d'onde a été conçue de manière que la puissance nécessaire soit minimale et que le système résiste bien aux brouillages causés par les autres utilisateurs de la bande Ku.

Protection des systèmes à satellites géostationnaires

Les systèmes à satellites géostationnaires actuels fonctionnent dans un cadre d'exploitation bien établi: le partage des fréquences avec ces systèmes dans la bande Ku est conditionné par la nécessité d'assurer une protection efficace contre trois formes possibles de brouillage:

- brouillage entre le faisceau principal d'un émetteur SkyBridge et le faisceau principal d'un récepteur de satellite géostationnaire;
- brouillage entre le faisceau principal d'un émetteur SkyBridge et le faisceau latéral d'un récepteur de satellite géostationnaire;
- brouillage entre le faisceau latéral d'un émetteur SkyBridge et le faisceau latéral d'un récepteur de satellite géostationnaire.

Figure 2 – Plan de fréquences et problèmes de partage



En mettant à profit la directivité des stations SkyBridge et celle des stations terriennes des systèmes géostationnaires (OSG), le système SkyBridge protège les systèmes à satellites existants contre ces trois formes de brouillage, de façon transparente pour les utilisateurs finals. Les antennes de toutes les stations terriennes OSG sont pointées sur l'orbite géostationnaire, offrant ainsi une importante discrimination angulaire d'antenne dans le reste de l'espace. En particulier, afin d'empêcher les brouillages avec les récepteurs des systèmes géostationnaires, les satellites SkyBridge interrompent l'émission vers une cellule donnée lorsqu'une station terrienne reconnaît que ces satellites sont très proches d'une direction de pointage vers l'orbite OSG.

Pour chaque station passerelle, on définit une «zone de non-fonctionnement» qui contient toutes les positions dans lesquelles les satellites pourraient brouiller un satellite géostationnaire et les stations terriennes correspondantes. Dès qu'un satellite SkyBridge pénètre dans cette zone, il cesse son émission vers la cellule de passerelle qui correspond à la zone d'exclusion; en même temps, la passerelle et tous les terminaux d'utilisateur opérant dans la cellule considérée cessent d'émettre vers le satellite. Le trafic présent dans la cellule est transféré, en transparence, sur d'autres satellites de la constellation, afin d'assurer la continuité du service.

A la suite d'une vaste analyse de l'environnement de brouillage, on a défini la zone de non-fonctionnement comme une ceinture de $\pm 10^\circ$ de part et d'autre de l'arc d'orbite géostationnaire, ou de toute station terrienne située dans une cellule de station passerelle. En conséquence, la zone de non-fonctionnement est plus large que $\pm 10^\circ$ pour la plupart des points de la zone, ce qui améliore la protection. Cela limite la puissance résiduelle des brouillages mutuels entre faisceau principal et lobe latéral.

Protection des services de Terre

La mesure fondamentale prise par SkyBridge pour protéger les services fixes de Terre contre les brouillages a été de choisir avec soin les bandes de fréquences utilisées par les petits terminaux d'utilisateur pour la réception et l'émission. Les passerelles sont les seules stations qui fonctionnent dans les bandes utilisées régulièrement par le service fixe. La coordination entre les deux systèmes est facilitée du fait de deux circonstances: la meilleure discrimination fournie par les grandes antennes des passerelles et le nombre limité des stations terriennes à coordonner. Cela impose des contraintes au système SkyBridge mais simplifie la protection des liaisons du service fixe qui fonctionnent dans la bande Ku.

En perfectionnant le plus possible les modèles de propagation utilisés dans les procédures de coordination, on a réduit à un minimum la distance entre station terrienne et liaison du service fixe au-dessous de laquelle les deux parties concernées doivent coordonner leurs opérations. Ces procédures ont recueilli l'accord général.

La réception dans le service fixe doit aussi être protégée contre les émissions des satellites non géostationnaires, par la définition de limites adéquates pour la puissance surfacique. Un accord général est également intervenu sur ces limites.

Protection des services de radiolocalisation et de la science spatiale

L'actuel Règlement des radiocommunications spécifie une valeur maximale de la puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) émise par les stations terriennes afin de protéger les systèmes de la science spatiale prévus pour fonctionner dans la bande Ku. Ce texte spécifie aussi la p.i.r.e. minimale avec laquelle les stations terriennes doivent fonctionner pour être protégées contre les émissions du service de radiolocalisation.

Les responsables du système SkyBridge ont entrepris une étude technique détaillée afin de déterminer l'influence que le système aura sur ces services. Grâce à son utilisation d'une forme d'onde qui résiste au brouillage, le système SkyBridge a prouvé qu'il peut fonctionner dans la bande Ku à côté des services de radiolocalisation.

De surcroît, SkyBridge propose de limiter la puissance émise par ses stations passerelles à une valeur inférieure au niveau défini actuellement dans le Règlement des radiocommunications. Cela garantira la protection des applications de la science spatiale contre le risque de brouillage par les stations terriennes du système à satellites non OSG.

ANNEXE 2F

Le système Teledesic

Le texte qui suit est basé sur des informations fournies par Teledesic.

A la suite de travaux de grande ampleur menés en coopération, Teledesic fournira, à un coût modique, l'accès à des services de télécommunication de qualité «fibre optique» dans toutes les régions du monde qu'il serait impossible de desservir économiquement par des réseaux de terre.

Aujourd'hui, des infrastructures modernes de télécommunication existent seulement dans les zones urbaines développées. De ce fait, la plus grande partie de la population mondiale n'a même pas accès à des services de communication de base. Même dans les régions où existe un service téléphonique de base, le niveau technique des installations date d'un siècle – technique analogique, réseaux en cuivre – et l'immense majorité de ces installations ne sera jamais modernisée pour permettre le fonctionnement de services numériques à large bande.

Teledesic construit un «Internet dans le ciel» d'envergure mondiale et à large bande. Avec sa constellation de plusieurs centaines de satellites sur orbites terrestres basses, Teledesic crée le premier réseau mondial permettant un accès peu coûteux, de qualité «fibre optique», à des services de télécommunication tels que l'accès à large bande à l'Internet, la visioconférence, la téléphonie de haute qualité, la transmission de données numériques, cela dans le monde entier. Le jour de la mise en service, Teledesic mettra cet accès à large bande à la disposition des entreprises, des établissements d'enseignement et des personnes privées partout dans le monde.

Teledesic a reçu le soutien du monde industrialisé, comme du monde en développement, avec comme conséquence la désignation de services par satellite internationaux et nationaux pour les fréquences à attribuer au réseau Teledesic. En mars 1997, la Federal Communications Commission des Etats-Unis a autorisé Teledesic à construire, lancer et exploiter le réseau Teledesic.

Le réseau Teledesic

Teledesic n'a pas l'intention de vendre des services directement aux utilisateurs finals. Il mettra plutôt à disposition un réseau ouvert pour permettre à des tiers de fournir ces services.

Le réseau Teledesic donnera aux prestataires de services des pays hôtes la possibilité d'élargir leurs réseaux, aussi bien géographiquement que du point de vue des types de services qu'ils peuvent proposer. Grâce à des stations passerelles au sol, ces prestataires de services pourront offrir des liaisons, sans solution de continuité, vers d'autres réseaux, en câble ou hertziens, par exemple l'Internet.

Le réseau Teledesic comprendra 288 satellites opérationnels répartis entre 12 plans orbitaux, soit 24 satellites par plan. Afin d'utiliser le spectre radioélectrique avec un bon rendement, les fréquences font l'objet d'une attribution dynamique et sont réutilisées à de nombreuses reprises à l'intérieur de chaque empreinte de satellite. Dans toute zone circulaire de 100 km de rayon, le réseau Teledesic peut transmettre des données à des débits supérieurs à 500 mégabits par seconde (Mbit/s), à destination et en provenance des terminaux des usagers. Le réseau applique la technique de la largeur de bande à la demande, qui permet à un usager de demander et de restituer de la capacité selon les besoins. Les usagers paient ainsi seulement la capacité qu'ils utilisent et le réseau est en mesure de desservir un nombre d'usagers beaucoup plus grand.

Teledesic fonctionnera dans une partie de la bande Ka (28,6-29,1 GHz pour les liaisons montantes et 18,8-19,3 GHz pour les liaisons descendantes). Avec les orbites basses du réseau Teledesic, on n'a plus les longs temps de propagation comme dans les communications passant par les satellites géostationnaires classiques; d'où la possibilité d'utiliser de petits terminaux à faible puissance et de petites antennes ayant à peu près la taille des paraboles de la radiodiffusion directe par satellite.

Le réseau Teledesic est conçu pour desservir simultanément des millions d'utilisateurs. La plupart d'entre eux auront des connexions bidirectionnelles, avec des débits pouvant aller jusqu'à 64 Mbit/s sur les liaisons descendantes et jusqu'à 2 Mbit/s sur les liaisons montantes. Avec les terminaux à large bande, on aura une capacité de 64 Mbit/s dans les deux sens. Cela représente des vitesses d'accès jusqu'à 2 000 fois plus grandes qu'avec les modems analogiques courants actuels. Par exemple, la transmission d'un groupe de clichés radioscopiques peut durer quatre heures avec un modem actuel. Les mêmes images peuvent être transmises en sept secondes par le réseau Teledesic.

Les études de conception, la construction et la mise en place du réseau Teledesic coûteront 9 milliards USD. Les taxes à acquitter par les utilisateurs finals seront fixées par les prestataires de services, mais Teledesic prévoit que ces taxes seront comparables à celles perçues pour l'accès à large bande aux futurs services urbains sur câbles.

Compatibilité absolue avec les réseaux de terre

Même si on ignore quels seront toutes les applications et tous les protocoles de données qu'un réseau à large bande devra prendre en charge au XXI^e siècle, on peut raisonnablement admettre que ces applications seront mises en œuvre dans les zones urbaines modernes des pays industrialisés – là où les fibres optiques sont la norme. Les systèmes à satellites permettent de fournir un accès à large bande avec commutation, quel que soit l'emplacement, ce qui étend la portée des réseaux et des applications partout dans le monde. Mais pour assurer une compatibilité absolue avec ces réseaux, un système à satellites doit être conçu et réalisé avec les mêmes caractéristiques de base que les réseaux à fibres optiques: canaux à large bande, faibles taux d'erreur et temps de propagation courts.

Les systèmes à satellites se rangent dans deux grandes catégories: systèmes utilisant l'orbite de satellites géostationnaires (GEO) et systèmes à satellites non géostationnaires, principalement avec orbites terrestres basses (LEO). Les satellites géostationnaires gravitent sur une orbite située à 36 000 km d'altitude, au-dessus de l'équateur; c'est la seule orbite qui permet au satellite d'avoir une position fixe par rapport à la Terre. A cette altitude, les communications par l'intermédiaire d'un satellite géostationnaire se font avec un temps de propagation aller et retour d'une demi-seconde au minimum. Avec un tel satellite, le temps de propagation ne peut par conséquent jamais se comparer à ceux des fibres optiques.

Ces temps de propagation sont gênants dans bien des communications téléphoniques intercontinentales. Ils empêchent une bonne compréhension et détruisent les nuances personnelles du discours. Qui plus est, ce qui peut être une gêne dans la transmission de la parole, peut se révéler insupportable dans les applications en temps réel telles que la visioconférence et pour beaucoup de protocoles de données normalisés, même pour les protocoles qui sous-tendent l'Internet.

Un des principes de base de l'Internet est l'idée que toutes applications évoluent vers une plate-forme de réseau commune-réseau ouvert reposant sur des normes et des protocoles communs. La notion de réseaux autonomes privés ou de réseaux spécialisés pour une application tombe rapidement en désuétude. Toutes les applications tourneront sur les mêmes réseaux et utiliseront les mêmes protocoles. Dans ces réseaux à commutation par paquets – où les signaux vocaux, vidéo et de données ne sont rien d'autre que des paquets d'éléments binaires – il n'est pas commode de traiter séparément les applications qui peuvent tolérer des délais et celles qui ne le peuvent pas. Le réseau doit donc être conçu pour l'application la plus contraignante. Le réseau Teledesic est conçu pour donner, de bout en bout, une qualité de service permettant une mise en réseau mondiale des entreprises, ce qui répond aux exigences de l'Internet du futur.

Architecture répartie et architecture centralisée

Les réseaux de terre ont suivi une évolution qui les a menés du système centralisé construit autour d'un ordinateur central en réseau à structure répartie constitué de PC interconnectés. De la même façon, les réseaux à satellites évoluent actuellement du réseau centralisé autour d'un seul satellite géostationnaire au réseau à structure répartie avec des satellites LEO interconnectés. Dans les systèmes géostationnaires, la perte ou la défaillance d'un seul satellite est catastrophique pour le système. Pour ramener ce risque à des niveaux acceptables, la fiabilité doit être réalisée le plus loin possible dans la direction du point où les

avantages commencent à diminuer et où de nouveaux gains de fiabilité ne peuvent être réalisés qu'en contrepartie de coûts très élevés.

Dans un réseau à architecture répartie, comme le réseau Teledesic, il est possible d'introduire la fiabilité dans le réseau plutôt que dans l'équipement individuel. Cela réduit la complexité et le prix des satellites et permet le recours à des processus de fabrication automatisés plus rationalisés et, par voie de conséquence, des perfectionnements au niveau de la conception. Avec son architecture répartie, son acheminement dynamique et sa solide échelonnabilité, le réseau Teledesic n'a rien à envier au plus célèbre des réseaux de cette espèce, l'Internet, avec en plus les avantages du fonctionnement en temps réel et d'un accès qui est toujours le même quel que soit l'emplacement.

Systèmes à satellites sur orbites terrestres basses

L'évolution qui a conduit des satellites géostationnaires aux satellites sur orbites terrestres basses (LEO) a débouché sur la spécification de systèmes mondiaux à satellites qui peuvent se ranger dans trois catégories. La meilleure façon de faire la distinction entre ces systèmes LEO est de se référer à leurs homologues de terre: la recherche de personnes, l'exploitation cellulaire et la fibre optique.

Les systèmes maxi LEO, par exemple, fournissent un service téléphonique mobile à bande étroite pour un prix avantageux, alors que Teledesic met à disposition essentiellement des connexions fixes à large bande pour un coût comparable à celui d'un service urbain sur câble. On considère généralement que l'exploitation cellulaire et la fibre optique ne sont pas compétitives; par analogie, la seule chose qui soit vraiment commune à Teledesic et aux systèmes maxi LEO est l'utilisation de satellites placés sur des orbites terrestres basses.

Angle d'élévation

Le réseau Teledesic est conçu de telle sorte que, en tout point de la surface terrestre, il soit toujours possible de voir un satellite Teledesic presque directement à la verticale. On obtient ce résultat grâce à un angle d'élévation d'au moins 40 degrés, à chaque instant et en tous points.

Cet angle d'élévation de 40° dans le système Teledesic permet aux usagers d'installer les terminaux dans la plupart des bureaux, des écoles et des foyers avec une vue complètement dégagée de la voûte céleste dans toutes les directions. Un angle d'élévation plus petit augmente considérablement la probabilité d'obstruction par les bâtiments, les arbres ou le terrain environnants, ce qui rend le service inopérant. En de nombreux endroits, un petit angle d'élévation peut rendre la prestation de n'importe quel service malcommode ou purement et simplement impossible.

Par ailleurs, les signaux à fréquence élevée peuvent être bloqués par la pluie, surtout s'ils sont transmis sous un petit angle d'élévation. Dans le système Teledesic, l'angle d'élévation de 40° est une condition indispensable pour que l'entreprise utilisatrice obtienne une bonne qualité de service et une disponibilité comparable à celle des réseaux de terre. Autres avantages de ces 40°: diminution des dimensions et du prix des terminaux d'utilisateur, et coordination plus facile de l'utilisation des fréquences radioélectriques avec les autres systèmes et les autres services.

Quel marché pour Teledesic?

Avec la convergence de l'informatique et des télécommunications, tous les éléments qui concourent à un niveau de vie élevé – depuis l'éducation et la santé jusqu'au développement économique et aux services publics – sont devenus tributaires d'un flux d'information sans cesse grandissant. Dans les zones fortement urbanisées, cette demande d'information est satisfaite par le recours aux connexions à large bande et de haute qualité rendues possibles par les fibres optiques. Les institutions et les usagers privés utilisent de plus en plus les connexions à large bande pour l'accès à l'Internet, le réseautage des ordinateurs, le groupage et la répartition des circuits téléphoniques, et pour le télétravail. Mais, dès qu'on sort des grandes villes, ces services de télécommunication reposant sur les fibres optiques sont d'un coût prohibitif, ou tout simplement inexistant quel que soit le prix que l'on consent à mettre.

Le réseau Teledesic aura pour résultat d'élargir, sans solution de continuité, l'infrastructure des réseaux de terre existants à fibres optiques, et de fournir ainsi des services d'information de pointe en tous lieux du globe. Il y aura une grande diversité de clients: informaticiens ne souhaitant pas vivre dans des villes de plus en plus encombrées; pouvoirs publics «inversant la direction» de lignes téléphoniques groupées, depuis des stations de cellules distantes; sociétés multinationales désireuses de connecter leurs succursales du monde entier à leurs réseaux mondiaux existants. Le réseau Teledesic est capable d'assurer une connectivité sans faille toutes les fois que des institutions ou des individus ont besoin d'accéder aux services de télécommunication de qualité «fibre optique» qui, de nos jours, existent seulement dans les zones urbaines les plus développées, et ce, partout dans le monde.

Qui plus est, puisque les satellites Teledesic se déplacent par rapport à la Terre, Teledesic apporte la même qualité et la même capacité de service en tous lieux sur le globe. En ce sens, l'«Internet dans le ciel» de Teledesic relève d'une technologie foncièrement égalitaire. Le jour de l'ouverture du service, Teledesic contribuera à la transformation de l'économie des télécommunications pour permettre l'accès à l'Internet et à l'âge de l'information.

ANNEXE 2G

Le système Final Analysis

Le texte qui suit est basé sur des informations fournies par Final Analysis:

L'industrie émergente des GMPCS représente aujourd'hui un des enjeux qui suscitent le plus de convoitises dans le monde, en matière d'investissement, de service et d'activités manufacturières. GMPCS est l'abréviation de *global mobile personal communications by satellite* (communications personnelles mobiles mondiales par satellite) – il s'agit des infrastructures des télécommunications spatiales pour le nouveau millénaire.

Les analystes industriels et les grands investisseurs prévoient un boom pour les nouveaux services de communication assurés par des constellations de satellites à couverture mondiale. Ces systèmes comprendront entre des dizaines et des centaines de petits satellites gravitant autour de la Terre et synchronisés de manière à fournir un service ininterrompu en tous lieux. On a là un nouveau domaine d'investissement, qui se remplit rapidement. Il ne reste plus qu'un petit nombre d'opportunités d'investissement initiales, car les différents acteurs s'empressent de boucler leur tour de table financier, de mettre en œuvre leurs systèmes, et ils commencent à proposer des services aux clients.

A l'intérieur de l'industrie des GMPCS, on note de grandes différences entre les technologies appliquées dans les systèmes, les coûts et les marchés cibles. Certains systèmes à satellites sont conçus pour fournir des services téléphoniques à l'intention de représentants commerciaux équipés de téléphones mobiles portables. D'autres systèmes ont vocation à mettre en œuvre des réseaux complexes de communication de données par satellites entre ordinateurs.

On peut citer un autre groupe, les systèmes mini LEO, qui excite l'imagination des investisseurs, des industriels et des marchés. Ces systèmes offrent des opportunités inégalées comme marché à forte marge bénéficiaire, ils mettent en œuvre une technologie éprouvée et fiable, ils fournissent des services à des conditions avantageuses – autant de raisons pour lesquelles la firme Final Analysis Communication Services Inc. («Final Analysis» ou «FACS») a décidé de porter ses activités dans ce secteur de l'industrie des GMPCS.

D'ores et déjà, Final Analysis se positionne comme le prestataire de services de coût modique et comme un des deux principaux acteurs industriels du secteur. Loin d'être une firme «sur le papier», Final Analysis a conçu, construit et lancé deux satellites; elle a construit, testé et mis en œuvre trois stations terriennes pleinement opérationnelles; construit, testé et mis en œuvre un centre de contrôle des satellites; mobilisé des services de lancement pour la constellation de satellites; et fabriqué des prototypes de terminaux d'utilisateur. Un certain nombre d'applications informatiques et des activités de développement commerciales sont en cours dans plusieurs secteurs clés du marché. Le coût des travaux de développement des services nationaux et internationaux représente plus de quatre fois le montant de l'investissement financier de Final Analysis.

Les systèmes à satellites mini LEO visent deux objectifs: la création de services de messagerie de coût modique destinés aux marchés insuffisamment desservis et la mise en place de messageries bidirectionnelles de coût modique, de suivi des produits financiers et d'applications de supervision de données. Ces nouveaux services seront disponibles à brève échéance, avec des grands volumes d'informations et des tarifs avantageux, à l'usage des populations et des entreprises dans les pays industrialisés comme dans les pays en développement. Un des avantages des services mini LEO est leur aptitude à desservir les régions peu développées et les régions reculées avec un bon rapport coût-efficacité, tout en dégagant des marges rémunératrices.

Le terme «mini LEO» a été forgé pour faire la distinction entre ces systèmes de communication de données numériques et les systèmes téléphoniques dits «maxi LEO». Dans ces deux types de système, les satellites des constellations sont placés sur des orbites terrestres basses, d'où le sigle LEO (*low-earth orbit*). Les systèmes mini LEO fonctionnent dans les bandes d'ondes décimétriques et métriques

au-dessous de 1 GHz, où les techniques de radiocommunication ont été développées, mises à l'essai et utilisées avec succès depuis les années 70. Les systèmes maxi LEO nécessiteront d'importants travaux de recherche et de développement pour la production d'émetteurs-récepteurs radioélectriques capables de fonctionner à des fréquences plus élevées pour un coût raisonnable. On a donc ici un risque technologique plus important que sur le marché des mini LEO.

D'ores et déjà, Final Analysis concentre ses efforts sur un gros portefeuille de services qui font l'objet d'une forte demande et qui promettent des marges confortables, notamment les services suivants:

Messagerie personnelle vocale: Le système à satellites de Final Analysis assurera la recherche de personnes bidirectionnelle et la messagerie variable (clavier et affichage alphanumériques), avec des messages plus longs que dans les systèmes actuels de recherche de personnes. La messagerie vocale de Final Analysis (microphone et numériseur/décodeur vocal) représente une solution idéale pour des personnes qui sont dans l'impossibilité de lire ou d'écrire, car le service retransmet la parole enregistrée après qu'elle a été numérisée pour permettre une transmission de données. Cette messagerie réalise un système de communication de coût modique, disponible instantanément, pour les zones rurales et les petits villages des pays en développement qui ne possèdent ni secteur électrique ni service téléphonique. Les satellites Final Analysis, à grande souplesse d'exploitation, sont capables aussi de transmettre des fichiers d'ordinateur et des fichiers de données.

Poursuite et gestion de marchandises: Les terminaux au sol du système Final Analysis (équipés de récepteurs GPS) fourniront rapidement, et pour une dépense modique, des renseignements précis sur la position des cargaisons, des conteneurs d'expédition, des wagons de trains de marchandises, des péniches et des camions. Le même équipement fournira sans problème des informations de contrôle. Un satellite pourra contrôler et transmettre le contrôle de diagnostic des véhicules automobiles. Des dispositifs antivols sont capables d'indiquer la position d'un véhicule volé partout dans le monde et d'immobiliser le véhicule en réponse à un ordre transmis par un satellite. Pour les camions transportant des marchandises, les contrôles douaniers peuvent être effectués par des télédéTECTEURS qui sont capables de vérifier qu'un conteneur n'a pas été ouvert. Tout ce qui bouge peut être suivi, donc protégé.

Supervision et contrôle des données: Les terminaux au sol du système Final Analysis (équipés de microprocesseurs) réaliseront des systèmes à mémoire opérationnels pour des activités de supervision dans les domaines suivants: distributeurs automatiques et machines à copier, conditions climatiques dans les zones des stations météorologiques, état des moissons et approvisionnements dans les grandes exploitations agricoles, utilisation des services publics chez les particuliers et dans les entreprises, caractéristiques de l'eau transmises par les bouées océaniques, comptes rendus des points de vente des commerces de distribution et une grande diversité de données de gestion d'inventaires. Quelques compagnies, par exemple des compagnies de services publics, tentent actuellement de mettre sur pied des systèmes hertziens, mais cela nécessite du personnel au sol, qui devra se déplacer par la route pour aller recueillir les données fournies par les divers sites. Les satellites peuvent «lire» des dizaines et des dizaines de milliers de sites en un seul passage, solution beaucoup plus efficace et moins coûteuse.

CHAPITRE 3

3 Systèmes de commutation numériques

3.1 Introduction

3.1.1 Notions de base

Le rôle fondamental des télécommunications est le transfert de messages. Le système de communication doit faire en sorte que les messages parviennent au récepteur voulu. Ce transfert de messages fait intervenir les opérations suivantes: transformation d'un message en unités de signal, transport de ces unités de signal et reconstitution du message à partir des unités de signal.

A proprement parler, le transfert des messages a une composante de commutation et une composante de transmission. La technologie de la transmission met à disposition des voies pour la transmission de l'information pendant de longues périodes. Mais cet élément de disponibilité, lui-même, est souple et il est possible de le faire varier. Dans les premiers temps de la technologie de la transmission, la souplesse de fonctionnement était garantie par le répartiteur. Aujourd'hui, on a recours à des ordres de gestion pour établir et gérer des trajets de transmission. Avec le développement des systèmes de commande, les systèmes de transmission ont commencé à se doter de caractéristiques qui ressemblent de plus en plus à celles de la technologie de la commutation. La principale différence subsistant encore réside dans le système de commande, qui utilise des mesures de la gestion des réseaux (technologie de la transmission) ou la signalisation pendant l'établissement des connexions (technologie de la commutation). Actuellement, les deux technologies sont en train de converger rapidement.

Réseau de commutation (ou de connexion)

La connexion d'équipements terminaux, entre lesquels se fait l'échange des messages, est effectuée par un réseau de commutation.

Ce réseau doit pouvoir réaliser les opérations de base suivantes:

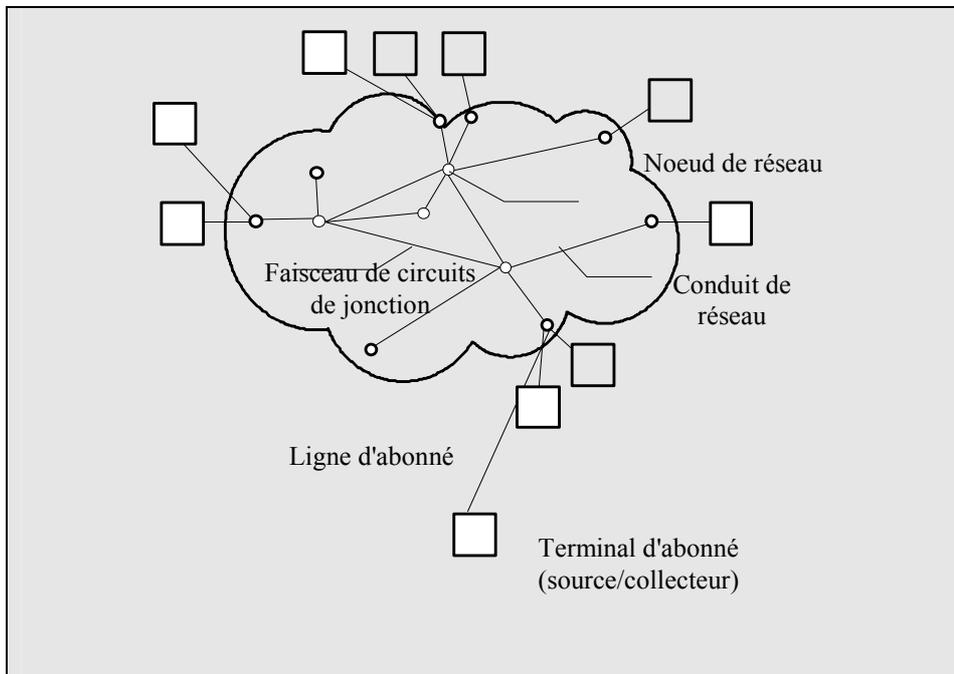
- A tout instant, et à partir de tout équipement terminal ou de tout point d'entrée, il doit être possible en principe d'établir une connexion avec tous les équipements terminaux du réseau, ou d'effectuer le transfert vers d'autres réseaux.
- Chaque connexion doit pouvoir être commandée par l'utilisateur.

D'une part, le réseau doit être capable de satisfaire les demandes de connexion prévisibles avec une probabilité suffisamment élevée et de fournir les paramètres de qualité garantis. D'autre part, l'effort à engager sur le plan technique pour satisfaire les demandes de connexion doit être raisonnablement limité.

La structuration du réseau de commutation dépend de plusieurs variables:

- les conditions imposées par le principe de commutation appliqué;
- le volume de trafic;
- les paramètres techniques et économiques de la technologie utilisée;
- les prescriptions de la réglementation.

Figure 3.1 – Réseau de commutation



Les éléments les plus importants du réseau sont les nœuds et les conduits. La charge utile qui circule entre les nœuds du réseau est transportée dans les conduits. Les frontières du réseau sont des lignes de connexion qui relient entre eux les équipements terminaux dans le réseau et des circuits de connexion entre les nœuds et les usagers. Des groupes de connexions ou de voies établies entre ces mêmes nœuds de réseau constituent des faisceaux de circuits de jonction. La nature de la charge utile est déterminée dans les nœuds du réseau.

Connexions

Une connexion est le couplage d'au moins deux équipements terminaux sur des interfaces d'accès au réseau, des conduits de réseau et des nœuds de réseau, pour les besoins de l'échange d'information.

Pour toutes les formes d'échange d'information, la règle est la suivante: il faut tout d'abord créer une connexion dans le réseau. Cette connexion peut exister en permanence ou elle peut être créée pour une certaine période. Dans ce dernier cas, la commutation est nécessaire. La connexion existe alors pour la durée de la transmission de toute l'information (par exemple, dans un réseau téléphonique) ou d'une partie de l'information (par exemple, dans les réseaux ATM). La commutation s'opère dans les nœuds du réseau.

Un processus de commutation s'effectue toujours en liaison avec une relation de communication définie.

Commutation

L'opération de commutation est la création de connexions pour une durée limitée dans un réseau, au moyen de voies de connexion qui constituent des tronçons partiels de la connexion. La commutation est la création de la connexion au moyen de la signalisation de commande.

Technologie de la commutation

Tous les équipements techniques utilisés pour la commutation dans un réseau peuvent être regroupés sous la désignation de technologie de la commutation.

Cette technologie vise à ce que l'information circulant dans un réseau – compte tenu des principes de commutation appliqués dans ce réseau – atteigne exactement les nœuds de réseau ou les abonnés auxquels ils ont été affectés.

Du point de vue de l'utilisateur d'un réseau, la commutation est un service qui peut être utilisé pour échanger de l'information avec un autre usager ou de nombreux autres usagers du réseau.

Un nœud de commutation est la partie d'un réseau dans laquelle, moyennant une évaluation de l'information technique relative à la commutation, des tronçons partiels du réseau sont réunis pour former une connexion. Simultanément, en fonction du volume de trafic, le trafic d'un grand nombre de terminaux du réseau est concentré, par commutation, sur quelques conduits du réseau.

L'installation qui abrite un nœud de commutation porte le nom de commutateur (ou central, ou centre de commutation).

Les nœuds de commutation se distinguent les uns des autres par leur position dans la hiérarchie du réseau et par leur structure technique.

3.1.2 Principes de la commutation

Le principe de commutation spécifie la manière dont s'effectue la commutation des connexions ou des messages.

Transmission en mode sans connexion

Ce mode de transmission convient aux réseaux dans lesquels il s'agit d'échanger de courtes séquences d'information sporadiques entre les terminaux, ce qui permet de réduire le temps d'établissement et de libération d'une connexion. C'est ce qui explique que ces réseaux se soient développés principalement pour les communications entre ordinateurs. Les réseaux de ce type présentent l'inconvénient que tous leurs nœuds supportent une charge de trafic, même si l'information ne leur est pas destinée.

Transmission en mode avec connexion

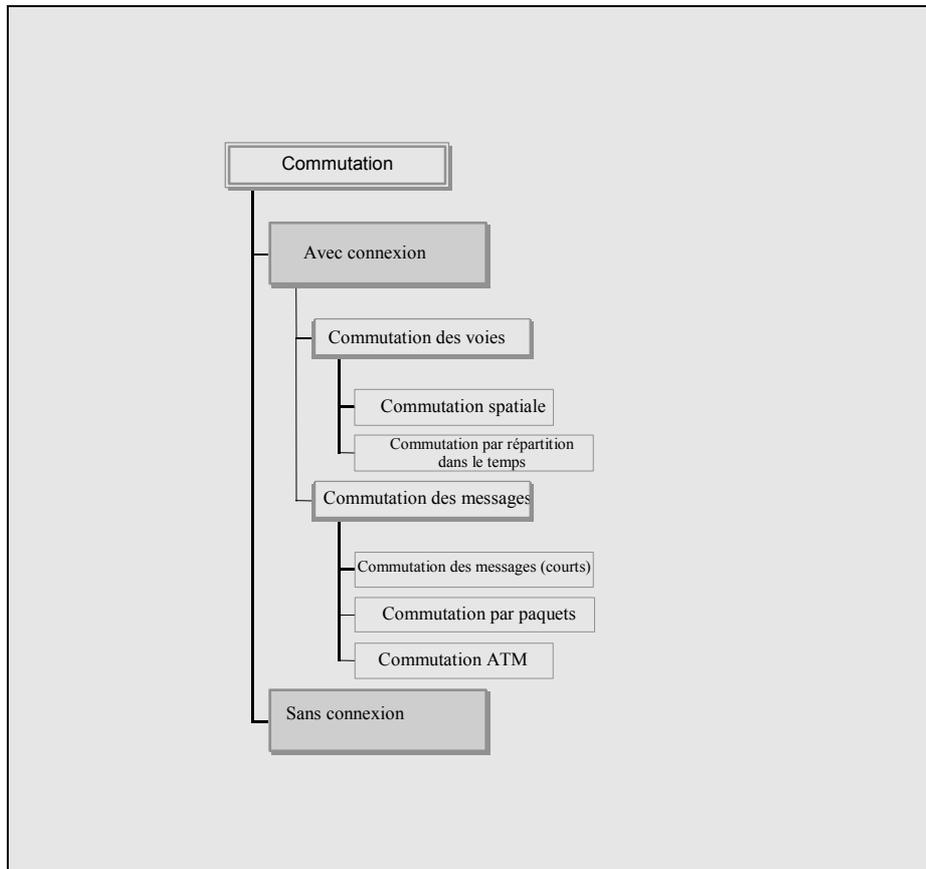
Si le temps nécessaire à l'établissement d'une connexion est court par rapport à la durée d'existence de la connexion, il est plus avantageux de recourir aux modes de service avec connexion. Ici, l'information est transportée exclusivement jusqu'aux nœuds qui interviennent obligatoirement dans la communication. Les réseaux téléphoniques ont évolué selon ce modèle. Les réseaux exploités en mode avec connexion peuvent fonctionner avec des voies commutées (commutation des voies) ou avec commutation des messages (commutation par paquets ou connexions virtuelles).

La commutation des voies en mode avec connexion comprend la commutation dans le domaine spatial (espacement des voies dans l'espace-commutation spatiale) et dans le domaine temporel (multiplexage des voies dans le temps).

La commutation des messages consiste en une commutation par paquets (plusieurs paquets par message) et en une commutation par expédition (un seul paquet par message).

Il convient de mentionner spécialement la commutation en mode ATM, dont l'importance s'accroît et qui sera décrite au § 3.3.3.

Figure 3.2 – Vue d'ensemble des principes de la commutation



3.1.3 Références

Walrand, J.: Communication Networks.– Boston: Irwin, 1991.

Schwartz, M.: Telecommunication Networks.– Reading: Addison-Wesley, 1988.

3.2 Commutation des voies

Pour la commutation des voies, la relation entre les intervenants dans la communication est mise en œuvre par une connexion de voies. Une fois que la relation a été créée, les abonnés sont connectés directement l'un avec l'autre pour toute la durée de la communication.

La voie à commutation spatiale représente la forme «classique» de la connexion. Dans les cas les plus simples, il s'agit de connexions électriques qui sont commutées à l'aide de contacts. Les voies commutées peuvent être des connexions commutées ou des connexions fixes. Dans le cas des connexions commutées, les terminaux participants sont connectés automatiquement entre eux pendant un certain intervalle de temps dont la durée dépend de l'information de destination de la source (avec utilisation de la technologie de commutation et de la signalisation). Des connexions spécialisées sont créées par des actions de gestion du réseau pour une certaine durée. Le réseau téléphonique est le réseau le plus ancien qui fonctionne en commutation avec connexion.

La commutation spatiale est la commutation de voies électriques qui présentent une séparation physique.

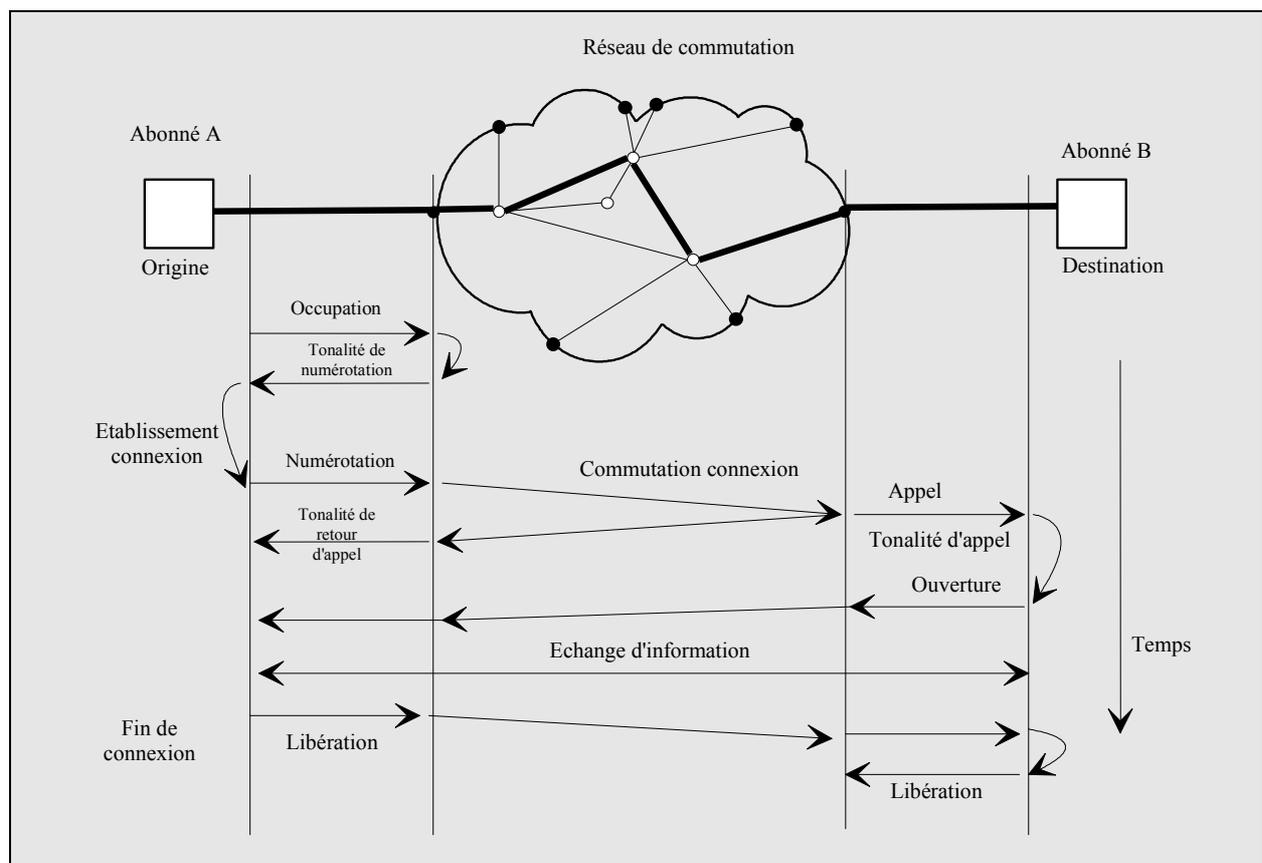
La commutation temporelle est la commutation (réaménagement) d'intervalles de temps dans des systèmes où l'information en provenance des diverses voies est transportée dans des intervalles de temps.

La commutation de voies porte aussi le nom de commutation de circuits. Pour la commutation de circuits, une connexion doit être créée avant l'établissement de la communication proprement dite; après la communication, il doit être mis fin à la connexion. Pour cette raison, la connexion est divisée en plusieurs phases.

3.2.1 Phases d'une connexion

Etablissement d'une connexion. L'établissement d'une connexion est le résultat d'un échange d'information de signalisation entre l'équipement terminal actif et le commutateur, et entre les commutateurs. L'initiative est prise par l'équipement terminal qui «veut» établir la relation de communication (en terminologie des télécommunications et dans l'exemple de la Figure 3.3: l'abonné A). Vient ensuite la réservation de l'équipement de commutation auquel l'abonné A est relié. Si cette réservation est acceptée – c'est-à-dire si un équipement est libre pour traiter la demande de connexion – l'équipement terminal en est informé (dans le réseau téléphonique: au moyen de la tonalité de numérotation). L'équipement terminal fait ensuite savoir, par numérotation, à quel autre terminal il «souhaite» se connecter (information de numérotation, information d'adresse). Intervient alors une tentative d'établissement d'un conduit vers le terminal de destination (abonné B). Si cette tentative réussit, l'abonné B est appelé et l'abonné A est informé de l'établissement de la connexion (affichage de l'appel, dans le réseau téléphonique: tonalité de retour d'appel). Après que l'abonné B a accusé réception de l'appel (*logon*, ouverture), la connexion entre dans la deuxième phase. Du point de vue de l'abonné A, l'occupation ainsi créée est un appel sortant et du point de vue de l'abonné B, un appel entrant.

Figure 3.3 – Représentation schématique des phases d'une connexion à commutation de circuits



En général, la connexion demandée couvre plusieurs configurations de commutation. Une signalisation est aussi nécessaire entre ces configurations.

Echange d'information. La deuxième phase de la connexion est celle de l'échange proprement dit d'information, qui peut aussi être accompagné d'une signalisation. Ainsi, au cours d'une connexion, des composantes du service peuvent être mises en et hors circuit par commutation et il peut s'opérer une gestion des téléservices.

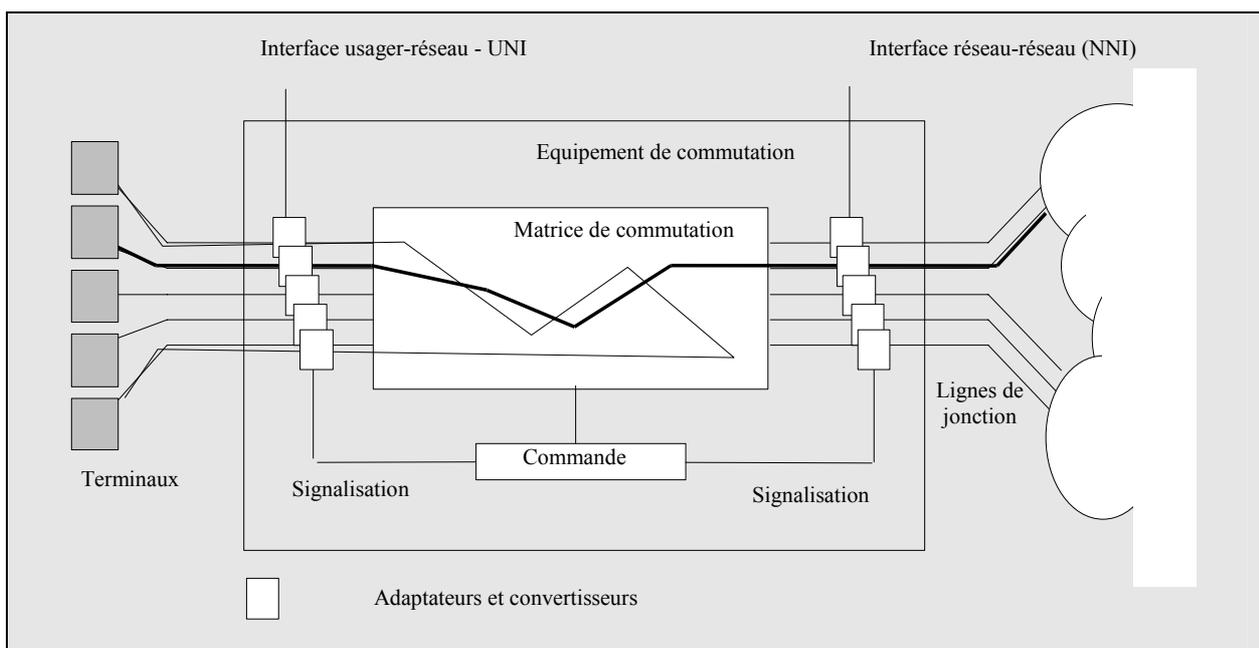
Libération de la connexion. La troisième phase de la connexion est la libération de la connexion, qui est déclenchée par un des terminaux au moyen d'une signalisation. Il y a alors libération des équipements de commutation mobilisés et des voies occupées. Des données sont recueillies pour l'enregistrement des taxes afférentes à la connexion.

3.2.2 Structure d'un système de commutation

Blocs fonctionnels. Une configuration de commutation englobe plusieurs blocs fonctionnels qui interviennent directement dans le processus de commutation, ou en tant qu'auxiliaires:

- **Commutation:** Connexion d'abonnés au moyen de lignes d'abonné et de lignes de liaison, afin de créer des relations de communication individuelles.
- **Administration:** Administration des lignes d'abonné, concernant le commutateur, les lignes de jonction, les équipements du commutateur et les processus qui se déroulent sur ces équipements. Sont également inclus le rassemblement et le traitement des données relatives aux taxes et au trafic.
- **Maintenance:** Fonction consistant à assurer la disponibilité des équipements de l'unité centrale.
- **Exploitation:** Communication entre les unités centrales et le personnel d'exploitation rattaché à ces unités.

Figure 3.4 – Principaux éléments d'une structure de commutation du point de vue du processus de commutation



La Figure 3.4 représente un commutateur local. On a ici le cas le plus général d'un système de commutation, car on y a fait figurer les connexions aux abonnés ainsi que les connexions à d'autres commutateurs. A gauche de la figure, on a les lignes d'abonné qui réalisent la connexion des équipements terminaux, à l'aide de l'interface usager-réseau (UNI, *user network interface*); à droite, les lignes de jonction entre les stations de commutation. Les commutateurs sont connectés par l'intermédiaire d'interfaces de réseaux (NNI: *network network interface*).

On appelle connexion interne une connexion établie entre deux terminaux rattachés à la même station de commutation (lignes tiretées dans la Figure 3.4). On appelle connexion externe une connexion en provenance ou à destination d'un abonné rattaché à un autre commutateur (lignes en trait plein dans la figure).

Commande. Élément important du système de commutation, le bloc de commande traite l'information de signalisation en provenance et à destination des équipements terminaux, et entre les commutateurs. Le système de commande reçoit des adaptateurs et des convertisseurs, ainsi que des lignes d'abonné et des lignes de jonction et l'information nécessaire pour l'adaptation.

Matrice de commutation. La création proprement dite des connexions a lieu dans la matrice de commutation, appelée également réseau de commutation. C'est l'élément de base d'un système de commutation, élaboré par le système de commande.

Périphérie. La périphérie du système de commutation doit fournir une fonctionnalité supplémentaire pour permettre au nœud de commutation de bien s'intégrer dans le reste de l'environnement. Les tâches les plus importantes exigées de cette périphérie sont les suivantes:

- fourniture de l'énergie à la ligne d'abonné (énergie électrique);
- protection du système de commutation contre les influences électriques s'exerçant sur les connexions (par exemple, influences dues aux imperfections des câbles, aux surtensions, aux coups de foudre, etc.);
- séparation des signaux de charge utile et des signaux de commande pour la signalisation dans la bande (par exemple, en provenance et à destination des abonnés dans un réseau téléphonique);
- suppression des perturbations qui affectent les signaux de charge utile et les signaux de commande;
- conversion de la forme des messages (par exemple, en version 2 fils-4 fils);
- reconnaissance de la signalisation entrante;
- création de la signalisation;
- reconnaissance des erreurs, aux fins de la maintenance.

Les fonctions ci-dessus sont mises en œuvre sur les circuits de jonction et les circuits des abonnés. Le circuit d'abonné est le siège de la fonction dite BORCHT, acronyme anglais désignant les fonctions suivantes:

- batterie (charge);
- protection contre les surtensions (*over voltage protection*);
- retour d'appel (*ringing*);
- signalisation (*signalling*);
- codage (*coding*) (par exemple, conversion analogique-numérique);
- hybride (conversion 2 fils-4 fils);
- test (détection d'erreurs).

3.2.3 Spécifications de l'unité fonctionnelle «commutation» d'un système de commutation

On trouvera ci-après la description des éléments du service «commutation» à la disposition de l'utilisateur, du point de vue de la spécification des actions des modules fonctionnels les plus importants d'une unité centrale de commutation. Les actions les plus importantes sont les suivantes:

- Recherche d'une unité libre pour l'accomplissement d'une fonction. Il peut s'agir d'une liaison libre dans une certaine direction (recherche d'un conduit), mais il peut s'agir aussi d'une instance de procédure de logiciel pour réaliser une caractéristique de service.
- Vérification des identifications et des privilèges d'accès.
- Occupation d'une unité grande distance, sur demande. Cette unité est affectée à une connexion à créer, et fermée à toutes autres tentatives d'occupation.
- Activation des tonalités de numérotation.
- Réception et évaluation de l'information de numérotation. Réception de cette information et évaluation aux points de vue de la direction choisie, de l'abonné et des caractéristiques du service.
- Transmission de la signalisation, à savoir: transmission d'un numéro téléphonique depuis le système de commutation jusqu'à un autre système de commutation ou à un équipement terminal.
- Connexion: création d'une connexion dans le réseau de commutation.
- Fin de connexion: détermination des taxes, signalisation de la fin de connexion, libération des équipements.
- Retrait du service d'un équipement en cas de dysfonctionnement, pendant une intervention de maintenance ou pour d'autres raisons (par exemple, pour empêcher une surcharge de trafic dans d'autres éléments de l'unité centrale ou du réseau).
- Libération d'équipements attribués ou neutralisés dans le commutateur.

3.2.4 Matrice de commutation

La matrice de commutation est un dispositif composé d'éléments de commutation servant à connecter, dans un système de commutation, les voies qui transmettent les signaux de charge utile.

Le réseau de commutation est l'élément central d'un système de commutation. Ces réseaux permettent de créer les connexions nécessaires des voies de transmission entre les commutateurs.

En utilisant l'information de signalisation et les voies disponibles, le système de commutation connecte les accès d'entrée aux accès de sortie. La matrice de commutation a pour tâches l'établissement et la libération des connexions, ainsi que la gestion des connexions existant simultanément.

En général, un réseau de commutation se compose de plusieurs étages de connexion. Il s'agit de couches individuelles comprenant une multiplicité d'éléments de commutation qui fonctionnent en parallèle.

Groupes fonctionnels

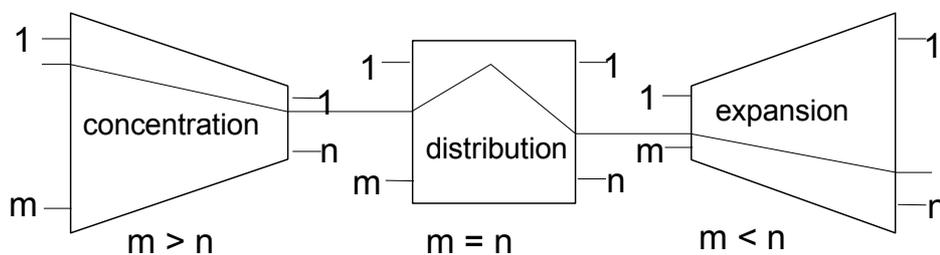
L'ensemble du réseau de commutation se divise en trois importants groupes fonctionnels dans lesquels le trafic à commuter est soumis à des opérations successives de concentration, de distribution et d'expansion. La fonction la plus importante est la distribution du trafic. En général, l'équipement technique nécessaire est très complexe; son utilisation optimale correspond à la concentration. La structure concentration/distribution/expansion est de nature fonctionnelle. Cette structure de base des systèmes de commutation est la même pour tous les principes pouvant être appliqués à la commutation, qu'il s'agisse d'une commutation entre des connexions spatiales, des intervalles de temps ou des paquets.

Concentration. On utilise des réseaux de commutation du type à concentration lorsque le nombre des entrées dépasse celui des sorties. La concentration est la commutation d'un certain nombre de lignes d'entrée sur un nombre plus petit de lignes de sortie. Le trafic des lignes d'entrée à utilisation peu intensive est concentré sur des lignes de sortie utilisées plus intensivement. Cela donne une meilleure utilisation des coûteux équipements qui sont affectés aux lignes de sortie.

Distribution. On utilise des réseaux de commutation linéaires lorsqu'on a le même nombre d'entrées et de sorties. Dans le processus de distribution, le trafic est réparti en fonction de sa direction.

Expansion. On utilise des réseaux de commutation du type à expansion lorsque le nombre des sorties dépasse celui des entrées. Après la distribution, le trafic doit être reconstitué et attribué aux diverses lignes d'abonné, dans le commutateur local de destination. Le trafic subit une opération d'expansion.

Figure 3.5 – Concentration, distribution et expansion dans un réseau de commutation



Dans un système de commutation, une connexion est traitée successivement par un dispositif de commutation à concentration, un dispositif à distribution et un dispositif à expansion. Cet agencement des différentes composantes du réseau de couplage est purement fonctionnel. Pour la réalisation pratique d'un réseau de commutation, un dispositif à concentration et un dispositif à expansion peuvent comprendre les mêmes éléments physiques.

Matrices de commutation à séparation spatiale

La commutation à séparation spatiale est la plus ancienne des formes de commutation. Une voie se compose d'un certain nombre de lignes (fils) connectées les unes aux autres par des contacts électriques. Ces contacts peuvent être réalisés sous la forme de:

- relais;
- sélecteurs (sélecteur rotatif pas à pas, sélecteur à moteur);
- commutateurs coordonnés;
- modules électroniques (transistors).

La Figure 3.6 représente une matrice de commutation à trois fils par voie et 4×4 voies, avec sélecteur Strowger. Un groupement de trois commutateurs mécaniques couplés représente un point de croisement (ou point de connexion).

Dispositif de commutation. Le dispositif de commutation lui-même est une matrice, les connexions pouvant être créées aux points de croisement. La Figure 3.7 donne une représentation «élargie» de ce type de matrice de couplage. Il faut un point de croisement pour connecter une entrée à une sortie, donc $m \cdot n$ points de croisement s'il y a m entrées et n sorties. Le réseau de commutation fonctionne sans blocage, c'est-à-dire que les connexions préexistantes ne peuvent pas bloquer les nouvelles connexions.

La partie a) du schéma montre tous les points de couplage. La représentation simplifiée de la partie b) symbolise uniquement le nombre des entrées et celui des sorties.

Figure 3.6 – Illustration des principes de fonctionnement d'une matrice de commutation mécanique

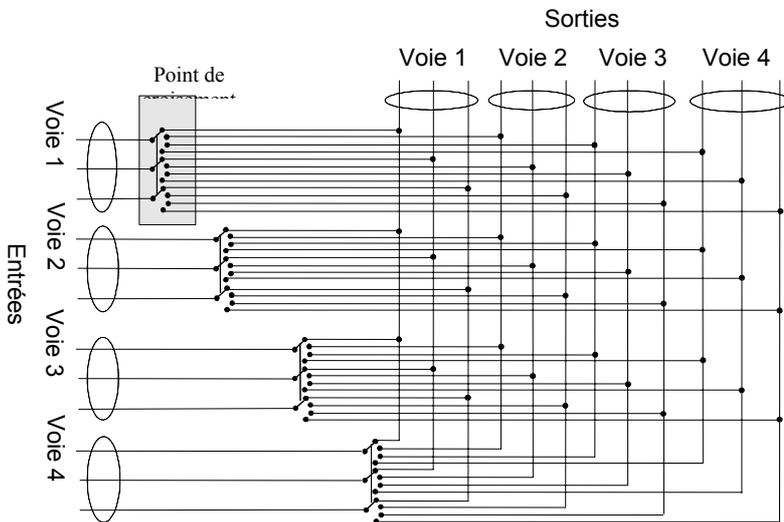
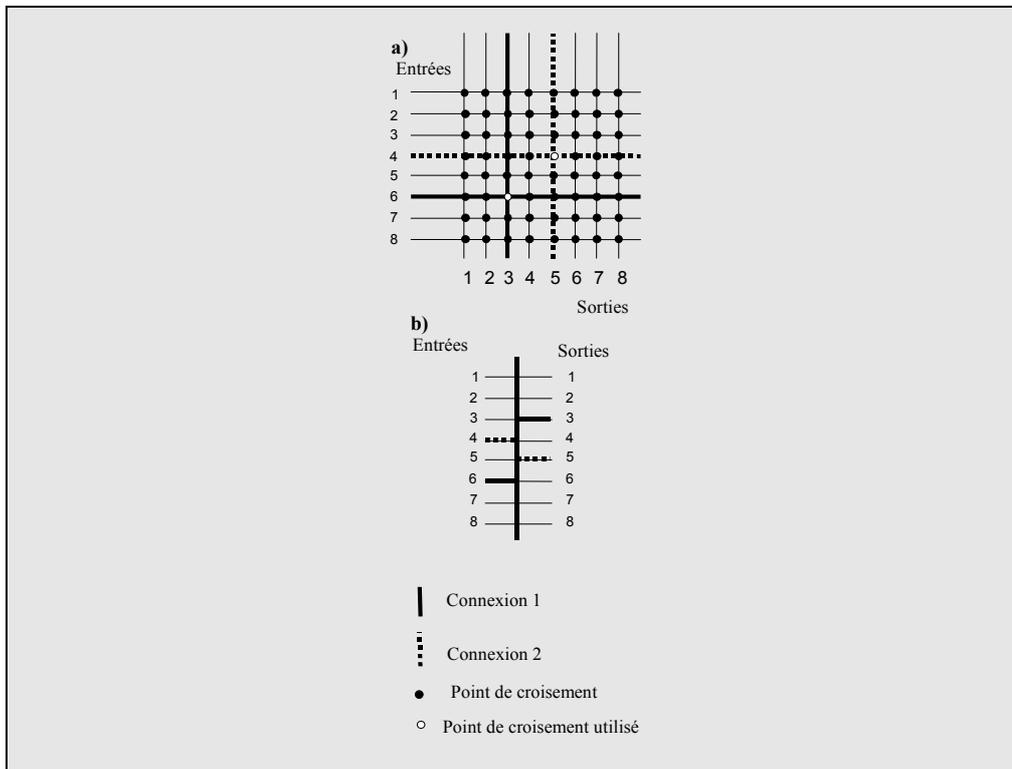


Figure 3.7 – Matrice de commutation à un seul niveau en disposition large:

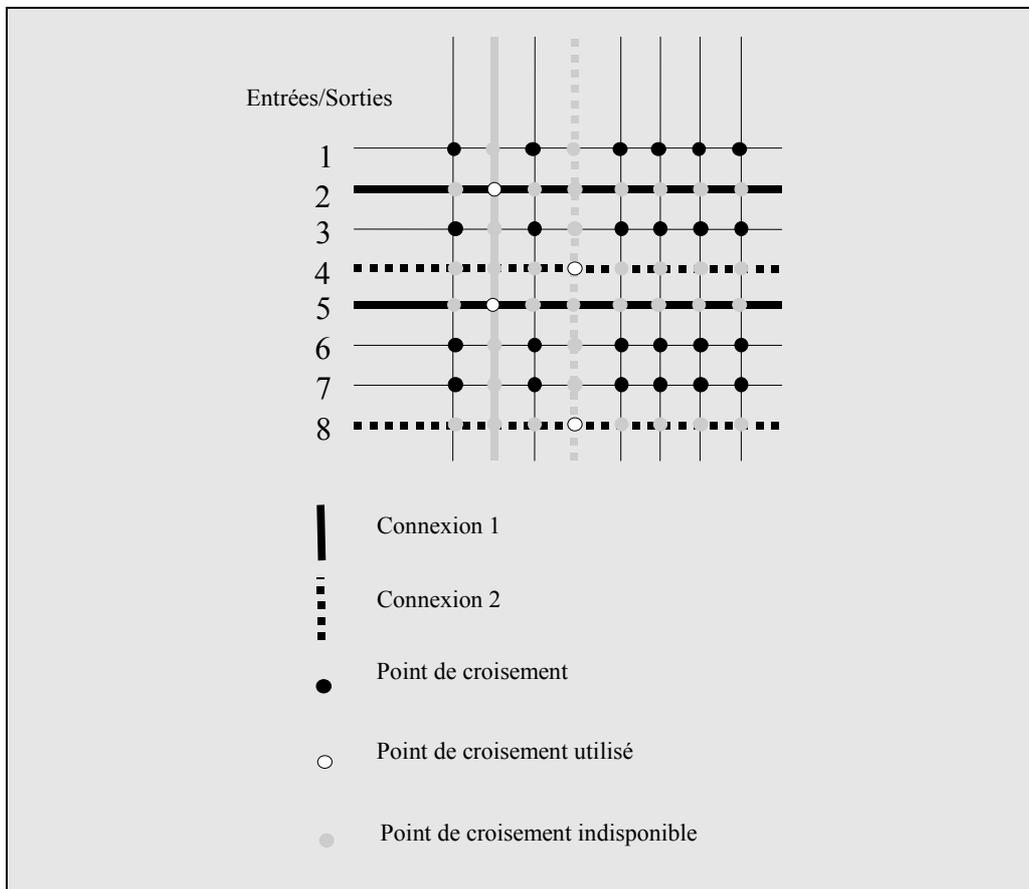
- a) représentation complète;
- b) représentation simplifiée



Exemple: Le dispositif de couplage de la Figure 3.7 présente $m = 8$ entrées et $n = 8$ sorties. Il faut par conséquent $m * n = 64$ points de croisement. Chaque entrée peut être connectée avec chaque sortie. Les connexions existantes n'empêchent pas la commutation d'autres connexions lorsque d'autres entrées et d'autres sorties entrent en jeu. Dans l'exemple représenté, des connexions existent entre l'entrée 4 et la sortie 5 et entre l'entrée 6 et la sortie 3.

Outre la disposition large, les matrices de commutation peuvent fonctionner dans la disposition dite inversée. Dans ce cas, les entrées et les sorties sont connectées du même côté (rangées) de la matrice. Les colonnes de la matrice servent à connecter les rangées. Pour une matrice à p colonnes, il faut $(m + n) * p$ points de couplage. Deux points de croisement sont nécessaires pour une connexion. Un maximum de p connexions peuvent exister simultanément. Cette matrice de couplage présente l'inconvénient suivant: il n'est pas possible de créer la connexion entre certaines entrées et certaines sorties dans certaines conditions, en raison de l'existence d'autres connexions antérieures (blocage interne).

Figure 3.8 – Matrice de commutation en disposition inversée



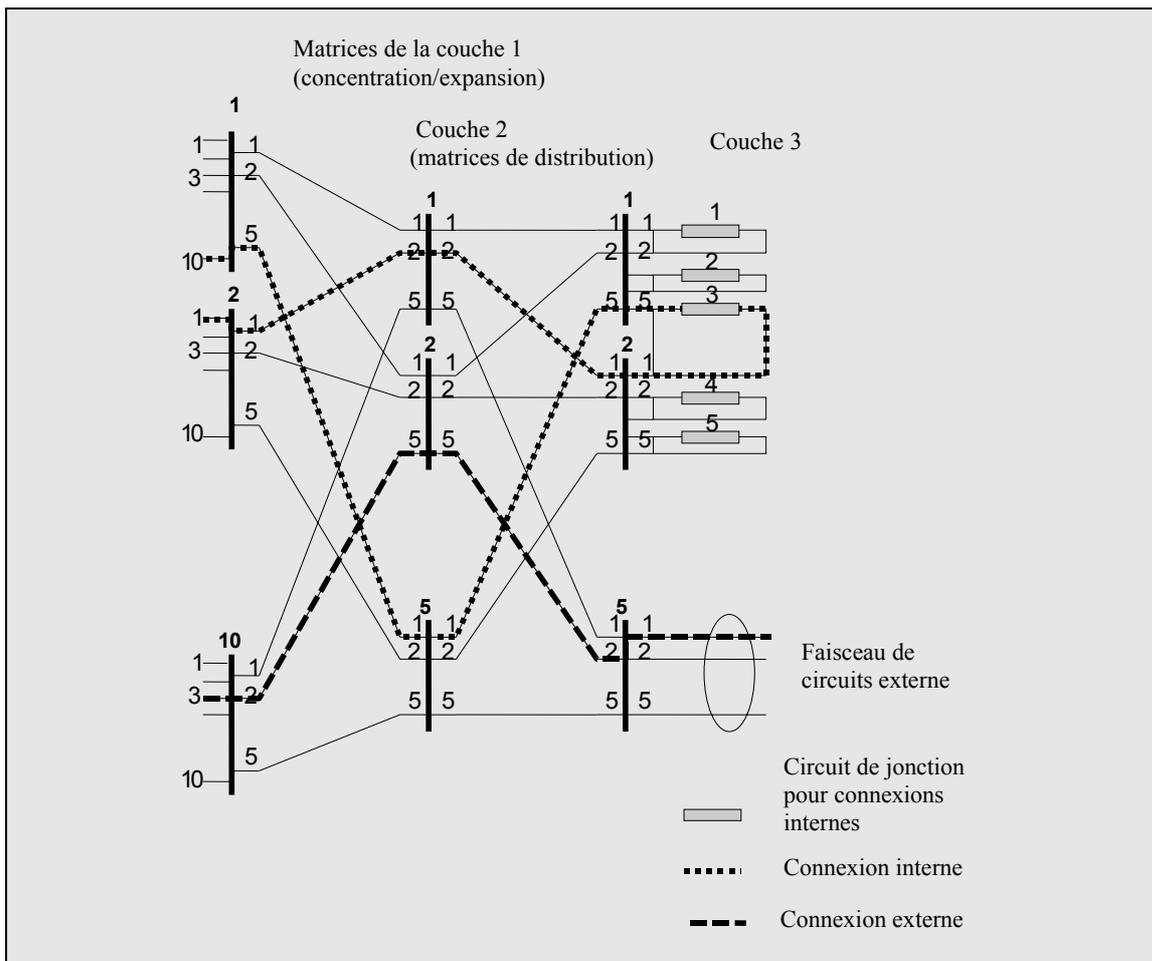
Exemple: Le dispositif de couplage de la Figure 3.8 comporte $m + n = 8$ connexions qui pourraient être des entrées ou des sorties. Avec cette matrice à $p = 8$ colonnes, il faut $p * (m + n) = 64$ points de croisement. Chaque connexion utilise une colonne de la matrice (représentée ici en gris) pour créer le circuit. Il est donc possible de commuter un maximum de p connexions. Du fait de chaque connexion commutée, il n'est pas possible d'utiliser, pour d'autres connexions, les points de couplage des rangées et des colonnes nécessaires pour la création du circuit. Les points de couplage qui ne sont plus utilisés sont aussi représentés en gris.

Cette configuration de la matrice de couplage satisfait à une exigence importante pour la configuration des matrices de commutation: le nombre des éléments techniques utilisés doit être approximativement proportionnel à la capacité en connexions. Cette exigence n'est pas satisfaite par une matrice de couplage en disposition large, dans laquelle la loi de dépendance est une loi quadratique.

Vu la nécessité d'une structure extensible, les réseaux de commutation doivent être de conception modulaire. On peut obtenir ce résultat en divisant des matrices de commutation de grande capacité en matrices plus petites, puis en associant ces dernières matrices sur plusieurs niveaux. Avec des réseaux de commutation à plusieurs niveaux et l'association de petites matrices, on a besoin d'un plus petit nombre de points de croisement que dans le cas de réseaux de commutation à un seul niveau. Toutefois, des blocages internes sont possibles dans les dispositifs de commutation à plusieurs niveaux. La probabilité de blocage interne augmente avec le facteur de concentration de la matrice de commutation et diminue avec la taille de la matrice de commutation individuelle.

Exemple: La matrice de commutation représentée Figure 3.9 permet de connecter jusqu'à 100 abonnés. Il est possible d'établir simultanément un maximum de cinq connexions internes, et jusqu'à trois faisceaux de circuits externes à raison d'un maximum de cinq connexions pour chacun.

Figure 3.9 – Réseau de commutation multicouche



Pour le cas $m = 10$ entrées et $n = 5$ sorties, il faut, dans la couche 1, $m * n * 10 = 500$ points de croisement pour chaque matrice en disposition large.

Dans la couche 2, les matrices de commutation ont aussi $m = 10$ entrées et $n = 5$ sorties. Les cinq matrices de commutation de ce niveau présentent par conséquent $10 * 5 * 5 = 250$ points de croisement au total.

Dans la couche 3, on calcule le nombre de points de croisement à partir de $m = 5$, $n = 5$ et du nombre de matrices (5 matrices). Ce calcul donne: $5 * 5 * 5 = 125$ points de croisement.

Au total, on aura besoin de 875 points de croisement.

En conséquence, en raison du blocage interne, il est impossible de créer plus de cinq connexions pour un groupe d'abonnés sur 10 abonnés rattachés à une même matrice de commutation de la première couche. Par ailleurs, il n'est pas possible de créer simultanément plus de cinq connexions internes et plus de cinq connexions avec le faisceau de circuits externe.

La figure représente deux connexions:

- la ligne 10 de la première matrice de la couche 1 est connectée à la ligne 1 de la deuxième matrice de la couche 1 (connexion interne); et
- la ligne 3 de la 10^e matrice de la couche 1 est connectée à la ligne 1 du faisceau de circuits externe (connexion externe).

Moyennant une conception adéquate des couches du réseau de commutation et des connexions entre les couches, il est possible de trouver un compromis entre le nombre de points de croisement et la probabilité de blocage. Cette information sur les réseaux de commutation concerne principalement la commutation de voies de transmission séparées dans l'espace, commutation qui peut être réalisée avec des sélecteurs Strowger ou des commutateurs coordonnés.

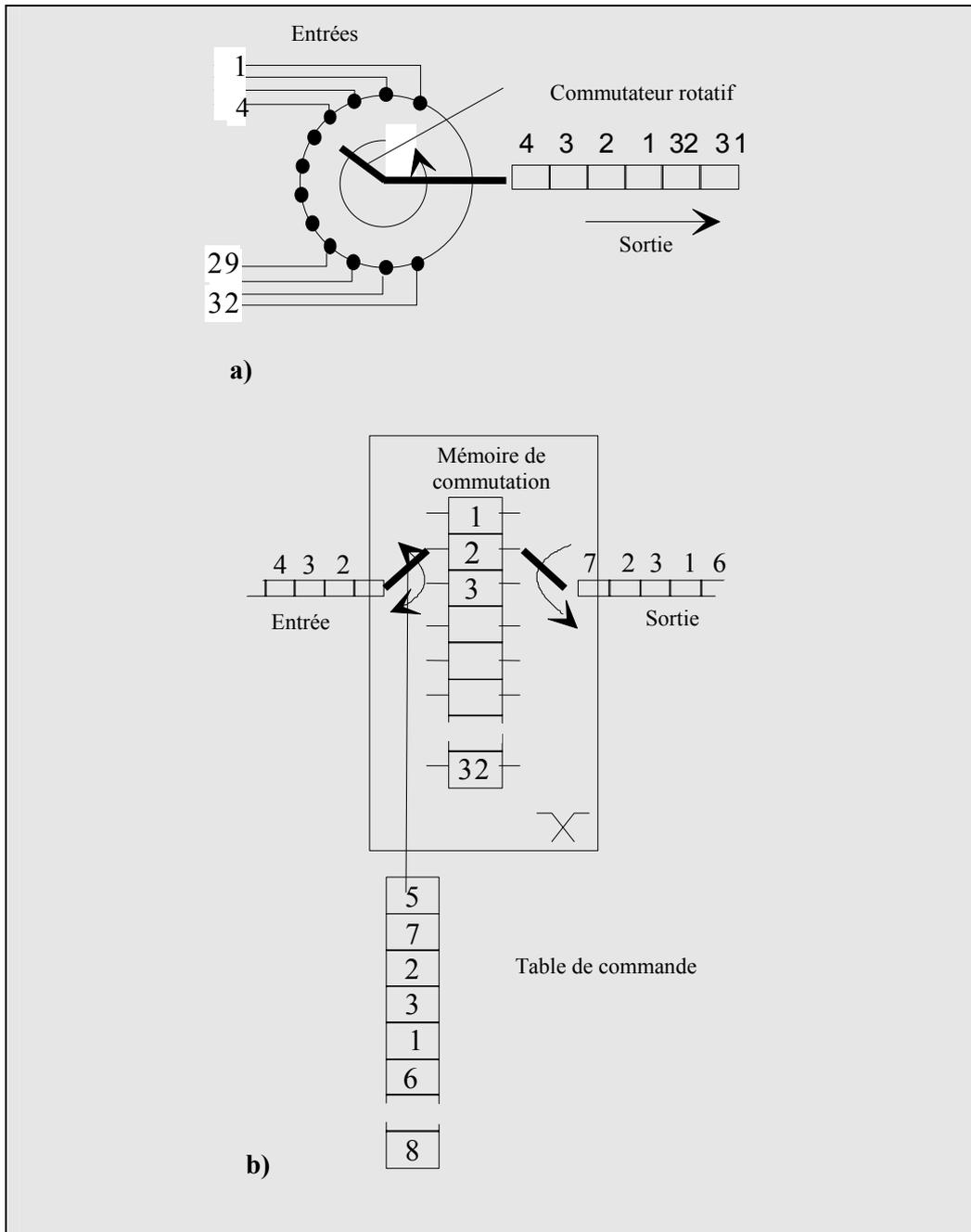
Les voies peuvent cependant se présenter aussi sous des formes différentes. Il est possible d'assigner à une voie une fréquence porteuse fixe et d'introduire cette porteuse dans le système de commutation. Autre possibilité: assigner un intervalle de temps à une voie. En commutation numérique, on utilise le domaine spatial et le domaine temporel. La commutation spatiale et la commutation temporelle sont souvent utilisées en combinaison dans les systèmes de commutation.

Réseaux de commutation à répartition dans le temps

Division synchrone des voies avec répartition dans le temps. Dans le cas de la division des voies avec répartition dans le temps, des intervalles de temps individuels sont assignés à l'information qui sera transmise dans les voies. Cette technique est appliquée, par exemple, pour la modulation par impulsions et codage (MIC). La Figure 3.10 illustre cette mise en correspondance entre les voies et les intervalles de temps. L'assignation est définie de façon stricte dans une structure en trames. La position des différents bits dans la trame détermine la relation d'information à laquelle ils appartiennent. La synchronisation effectuée pour une trame doit couvrir la durée d'un passage complet sur les trames. La Figure 3.10 a) montre qu'une trame temporelle correspond à un cycle complet du commutateur rotatif. Cette trame contient 32 voies et un cycle dure 125 ms.

Commutation temporelle. La Figure 3.10 b) illustre le principe de fonctionnement d'un dispositif simple pour la commutation de la position temporelle d'une voie. Dans ce cas, l'information qui arrive à l'entrée dans les différents intervalles de temps est inscrite par une unité de commande dans des champs déterminés de la mémoire de commutation, et stockée temporairement. Ce processus d'enregistrement est commandé par une table de commande. La lecture de l'information dans la mémoire se fait selon une séquence fixe. La table de commande contient le mappage entre les intervalles de temps des lignes de sortie et ceux des lignes d'entrée. On peut aussi imaginer un système dans lequel les données sont inscrites en séquence fixe et lues par une table de commande.

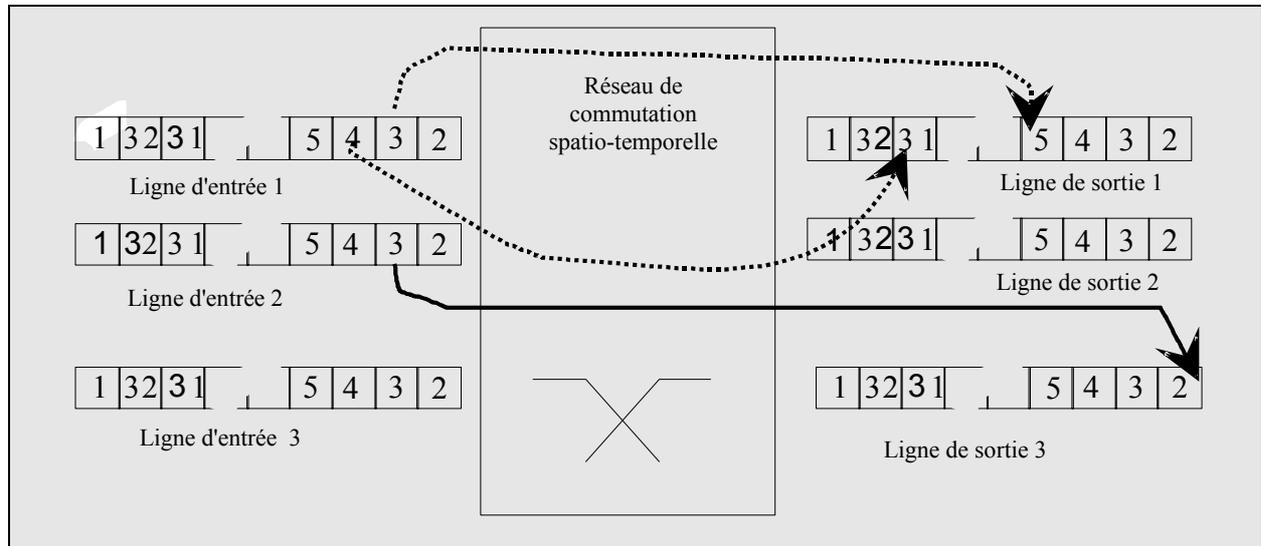
Figure 3.10 – a) Mappage voies-intervalles de temps
 b) Remaniement des intervalles de temps pour cause de mise en mémoire intermédiaire



Dans chaque cas, l'information relative aux intervalles de temps doit être mise en mémoire pour permettre leur réaménagement. Cette opération peut intervenir à l'entrée du champ de couplage, à la sortie de ce champ, en position centrale pour la totalité de la matrice de couplage ou selon un schéma réparti pour chaque position de couplage. Pour une représentation détaillée des types de mémorisation, on se reportera au paragraphe traitant de la commutation ATM, car les mêmes principes seront appliqués dans cette technique.

Commutation spatio-temporelle. En général, plusieurs lignes d'entrée MIC atteignent un réseau de commutation. Ce réseau a pour fonction de réaménager les intervalles de temps et de coordonner les connexions MIC. On a besoin pour cela d'un réseau de commutation du type spatio-temporel (Figure 3.11).

Figure 3.11 – Commutation spatio-temporelle



Exemple de la Figure 3.11: L'intervalle de temps 3 de la ligne d'entrée 2 doit être associé à l'intervalle de temps 2 de la ligne de sortie 3 (ligne en trait plein). Cette opération nécessite une commutation temporelle et une commutation spatiale. En revanche, les réaménagements figurés par des lignes en pointillé nécessitent seulement une commutation temporelle. Sur le plan technique, la commutation spatiale et la commutation temporelle peuvent s'effectuer simultanément. A cette fin, toutes les lignes d'entrée à séparation spatiale sur une ligne sont multiplexées (NOTE – Pour les entrées, cette ligne doit avoir une vitesse de traitement plus de n fois plus grande) et mises en mémoire; les diverses lignes de sortie à séparation spatiale soumises au couplage – lignes parallèles les unes aux autres – sont extraites des intervalles de temps corrects de la mémoire commune.

3.2.5 Commande des dispositifs de commutation

Le système de commande des dispositifs de commutation possède une caractéristique spécifique: une connexion traverse presque toujours plusieurs nœuds de réseau, donc plusieurs stations de commutation. Toutes ces stations sont incluses dans le système de commande de la connexion.

La transmission de l'information de commande entre les stations de commutation, ainsi qu'en provenance et à destination des équipements terminaux, se fait par signalisation.

Chaque connexion est construite tronçon par tronçon, par sélection de voies. Cette sélection est subdivisée comme suit:

- une sélection forcée, qui détermine la direction dans laquelle se poursuivra la construction de la connexion;
- une sélection libre, qui déclenche automatiquement la commutation d'une voie libre dans cette direction;
- la sélection forcée est toujours commandée par l'information de numérotation (de la commutation).

L'information de numérotation nécessaire au système de commande du dispositif de commutation participant est créée dans le terminal appelant. Si cette information est utilisée directement pour commander le système de commutation, on a affaire à une commande dite directe. Si l'information de numérotation est tout d'abord mémorisée temporairement, puis évaluée, la commande est indirecte.

Le système à commande directe a été introduit en même temps que le sélecteur rotatif pas à pas Strowger. Les impulsions d'un numéroteur commandent les pas. La sélection libre d'une voie dans la direction choisie peut se faire pendant la pause qui sépare deux chiffres de numérotation. Le chiffre suivant commandera directement un sélecteur au niveau de sélection suivant ou dans une autre station de commutation.

Le système à commande indirecte trouve ses principales applications dans la commutation SPC et dans les systèmes de commutation pilotés par ordinateur.

Le système à commande directe n'est plus utilisé de nos jours. La commande indirecte présente les avantages suivants:

- Avant que les divers tronçons d'une connexion ne soient occupés, il est possible de déterminer si un conduit peut être trouvé dans le réseau jusqu'à l'équipement terminal de destination. On évite ainsi l'occupation des voies par paliers successifs avant l'établissement effectif complet de la connexion.
- La commande indirecte permet d'appliquer, dans la recherche d'un conduit (routage) pour une connexion dans le réseau, des méthodes beaucoup plus élaborées que dans l'établissement des connexions par paliers successifs.

3.2.6 Références

Références UIT-T

Commutateurs – Introduction et champ d'application

[Q.511] (11/88) – Interfaces des commutateurs avec d'autres commutateurs

[Q.512] (02/95) – Interfaces des commutateurs numériques pour l'accès des abonnés

[Q.513] (03/93) – Interfaces des commutateurs numériques pour l'exploitation, l'administration et la maintenance

[Q.521] (03/93) – Fonctions des commutateurs numériques

[Q.522] (11/88) – Connexions, signalisation et fonctions auxiliaires de commutateur numérique

[Q.541] (03/93) – Objectifs nominaux des commutateurs numériques – Considérations générales

[Q.542] (03/93) – Objectifs nominaux des commutateurs numériques – Exploitation et maintenance

[Q.543] (03/93) – Objectifs nominaux de qualité de fonctionnement des commutateurs numériques

[Q.544] (11/88) – Mesures dans les commutateurs numériques

[Q.551] (11/96) – Caractéristiques de transmission des commutateurs numériques

[Q.552] (11/96) – Caractéristiques de transmission aux interfaces analogiques 2 fils d'un commutateur numérique

[Q.553] (11/96) – Caractéristiques de transmission aux interfaces analogiques 4 fils d'un commutateur numérique

[Q.554] (11/96) – Caractéristiques de transmission aux interfaces numériques d'un commutateur numérique

[Q.700] (03/93) – Introduction au Système de signalisation N° 7 du CCITT (série Q.700 – Q.788)

[Q.920] (03/93) – Système de signalisation d'abonné numérique N° 1 (DSS1) – Couche liaison de données à l'interface usager-réseau RNIS – Aspects généraux (série Q.920 – Q.957)

[Q.1200] (09/97) – Organisation générale de la série de Recommandations relatives au réseau intelligent

[Q.2010] (02/95) – Vue d'ensemble du RNIS à large bande – Ensemble de capacités de signalisation 1, version 1

3.3 Commutation de messages

Dans le cas de la commutation de messages, il n'y a pas établissement de voies pour l'échange d'information. Au lieu de cela, on a recours à la commutation d'unités de messages individuelles, le plus souvent des paquets, qui contiennent tout ou partie de l'information à transmettre.

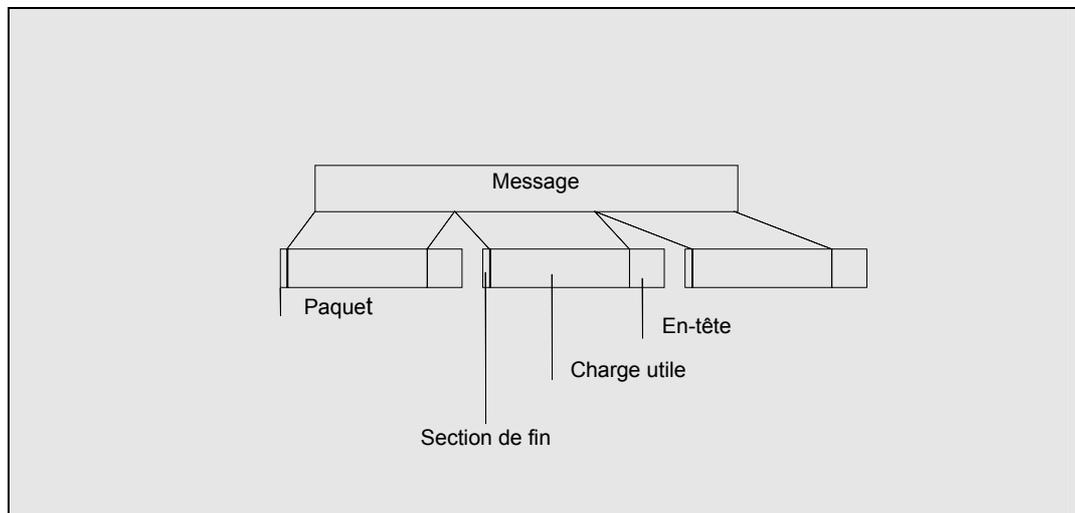
Ce processus est exactement identique à ce qu'on pourrait imaginer comme «commutation» de lettres dans un réseau de bureaux de poste: les paquets sont fournis avec des adresses qui donnent des informations concernant le destinataire. Dans chaque station de commutation, l'adresse est évaluée et le message est envoyé dans une direction qui le rapproche de sa destination. La commutation s'effectue séparément pour chaque unité de message individuelle. Il est donc inutile d'établir une connexion. Des paquets appartenant à la même relation d'information peuvent suivre des itinéraires différents dans le réseau.

Commutation avec enregistrement et retransmission. La commutation de messages est souvent appelée commutation avec enregistrement et retransmission. La caractéristique typique de cette configuration réside dans le fait que les paquets avancent pas à pas (d'un système de commutation à un autre) dans le réseau. Les paquets sont stockés temporairement dans chacun des nœuds du réseau.

3.3.1 Commutation par paquets

Ce procédé commute de l'information qui est divisée en un certain nombre de paquets. Un paquet, selon cette conception, a la structure fondamentale suivante:

Figure 3.12 – Structure des paquets dans la commutation par paquets

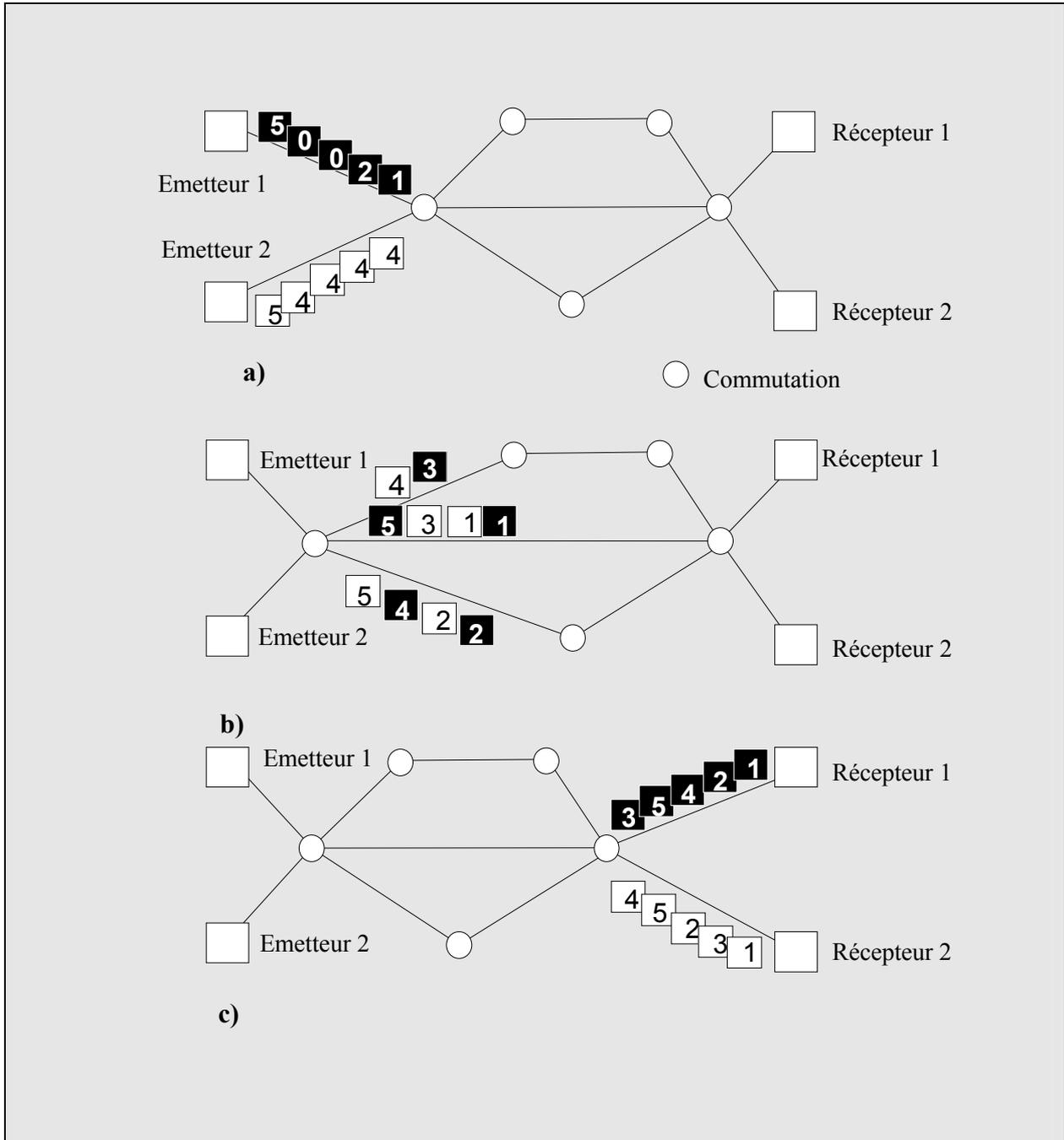


Paquet. Un message est divisé en plusieurs unités qui sont délivrées avec un en-tête et une section de fin. Un paquet se compose de l'en-tête, de la charge utile et de la section de fin. Les paquets peuvent être de longueur fixe ou variable. La section de fin n'est pas nécessaire pour certaines procédures de commutation.

Les paquets sont créés dans l'équipement terminal émetteur. Dans les nœuds du réseau, les adresses des paquets sont analysées et les paquets sont retransmis dans une direction qui les rapproche de leur destination. Dans cette opération, il n'est pas nécessaire que les paquets suivent le même itinéraire. Le processus de retransmission dépend de la charge de trafic actuelle du réseau.

Figure 3.13 – Commutation des paquets dans un réseau à commutation par paquets;

- a) Phase 1: transmission des paquets;
- b) Phase 2: commutation des paquets vers un nœud de réseau;
- c) Réception des paquets par le destinataire



Explication de la Figure 3.13: Cette figure décrit le transport simultané, mais indépendant, de deux unités de message. Dans un premier temps, les deux émetteurs répartissent l'information de transmission entre les paquets numérotés de 1 à 5. Ces paquets sont transmis au réseau dans l'ordre de leur numérotation (Figure 3.13 a)). Dans le premier nœud de commutation, une tentative est faite pour diriger les paquets, sur le trajet le plus court, vers le récepteur. Les deux récepteurs sont reliés au même nœud de

commutation. Dans l'exemple de la figure, l'expédition des paquets réussit pour les deux paquets numérotés 1. A ce stade, la capacité de transmission sur la connexion directe vers le récepteur est momentanément épuisée; en conséquence, les deuxièmes paquets respectifs sont envoyés sur la partie inférieure du réseau (trajet de substitution). Cette transmission sature aussi ce trajet. Le troisième paquet de la relation d'information 1 doit maintenant être envoyé sur un trajet plus long, à la partie supérieure du réseau, parce qu'il n'y a plus de capacité de transmission disponible sur le premier trajet de substitution. A présent, un paquet peut être accepté sur le trajet direct (paquet 3 de la relation d'information 2) et le paquet suivant (paquet 4 de la relation 1) est envoyé lui aussi sur le trajet de substitution le plus court. Le paquet 4 de la connexion 2 emprunte le trajet de substitution long. De nouveau, un paquet peut être envoyé sur le trajet direct et le dernier paquet (paquet 5 de la relation 2) peut prendre le trajet de substitution court (Figure 3.13 b). Les durées de transmission étant différentes selon les trajets, les paquets arrivent à leurs récepteurs respectifs dans l'ordre indiqué (Figure 3.13 c).

Avantages de la commutation par paquets:

- transmission rapide, sans temps d'établissement de connexions; convient particulièrement pour la transmission d'informations courtes et sporadiques, et pour un petit nombre de paquets;
- bonne utilisation spatio-temporelle de la capacité des ressources du réseau, particulièrement pour un trafic sporadique sous forme de salves.

Inconvénients de la commutation par paquets:

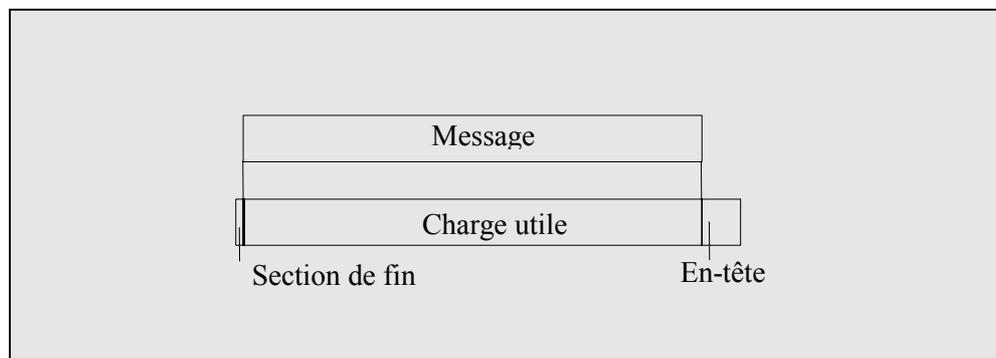
- le temps de transmission est variable et ne peut pas être garanti;
- les ressources ne peuvent pas être garanties (largeur de bande);
- un paquet peut en dépasser un autre sur le trajet (voir la Figure 3.13 c);
- l'acheminement des paquets nécessite une grande puissance de calcul électronique.

3.3.2 Commutation de messages

Dans la commutation de messages, il y a transport de paquets qui renferment le contenu total d'une relation d'information.

Un paquet de message transporté dans ce type de commutation est structuré comme suit:

Figure 3.14 – Structure d'un paquet pour la commutation de messages



Les paquets sont de longueur variable. Le contenu total d'un message remplit un paquet. En conséquence, à la différence de la commutation par paquets, il est inutile de diviser le message en blocs de données, avec l'en-tête de protocole correspondant. Du point de vue technique, le processus n'est pas différent de la commutation par paquets. Il est utilisé, par exemple, pour le service de message court (SMS: *short message service*) dans les réseaux GSM.

3.3.3 Commutation ATM

Dans la commutation ATM, les paquets d'information ont la même composition qu'en commutation par paquets. Ils ont tous la même longueur, soit 53 octets. Tous les paquets d'une connexion ATM suivent le même trajet dans le réseau, trajet pour lequel la capacité de transmission a été réservée au préalable.

La commutation ATM diffère de la commutation par paquets classique sous deux aspects: la longueur constante des paquets et la détermination d'un trajet de connexion. Cela simplifie la commutation des cellules ATM et facilite sa commande sur le plan du calcul électronique.

Principes de la mise en mémoire

Une des conditions à remplir pour la commutation des cellules ATM est la mise en mémoire temporaire de ces cellules dans chaque système de commutation. Pour ce faire, on peut appliquer les principes fondamentaux suivants:

- Mémoire d'entrée: Après leur entrée, les cellules sont mises en mémoire selon le principe «premier entré premier sorti (FIFO: *first-in-first-out*). Pour l'opération de commutation, on utilise une matrice interne non bloquante. L'inconvénient de cette méthode de mémorisation est une possibilité de blocage des cellules en position d'attente dans le module FIFO; de ce fait, même si sa sortie est libre, il est possible qu'une cellule doive attendre la commutation parce que des cellules précédentes, destinées à d'autres sorties, doivent être traitées d'abord.
- Mémoire de sortie: Immédiatement après leur arrivée, les cellules sont commutées sur un module FIFO sortie; elles en sont extraites avec les cycles de lignes de sortie. A l'entrée, il suffit de mettre en mémoire une seule cellule par fil. L'inconvénient de cette méthode de mémorisation est que la vitesse interne de la matrice de commutation doit être supérieure à la vitesse de toutes les cellules entrantes.
- Mémoire centrale: Toutes les cellules entrantes sont stockées dans une mémoire commune. La capacité de celle-ci peut être inférieure à la somme des capacités de toutes les mémoires composantes nécessaires. Toutefois, le système de commande pour l'accès à la mémoire est complexe et il faut un accès à très grande rapidité.

Mémoire répartie: Dans une matrice formée de lignes d'entrée et de sortie, la mémoire est allouée à chaque point de croisement, pour permettre le multiplexage des cellules sur les lignes de sortie. L'inconvénient de cette méthode est la nécessité d'avoir une grande capacité de mémoire.

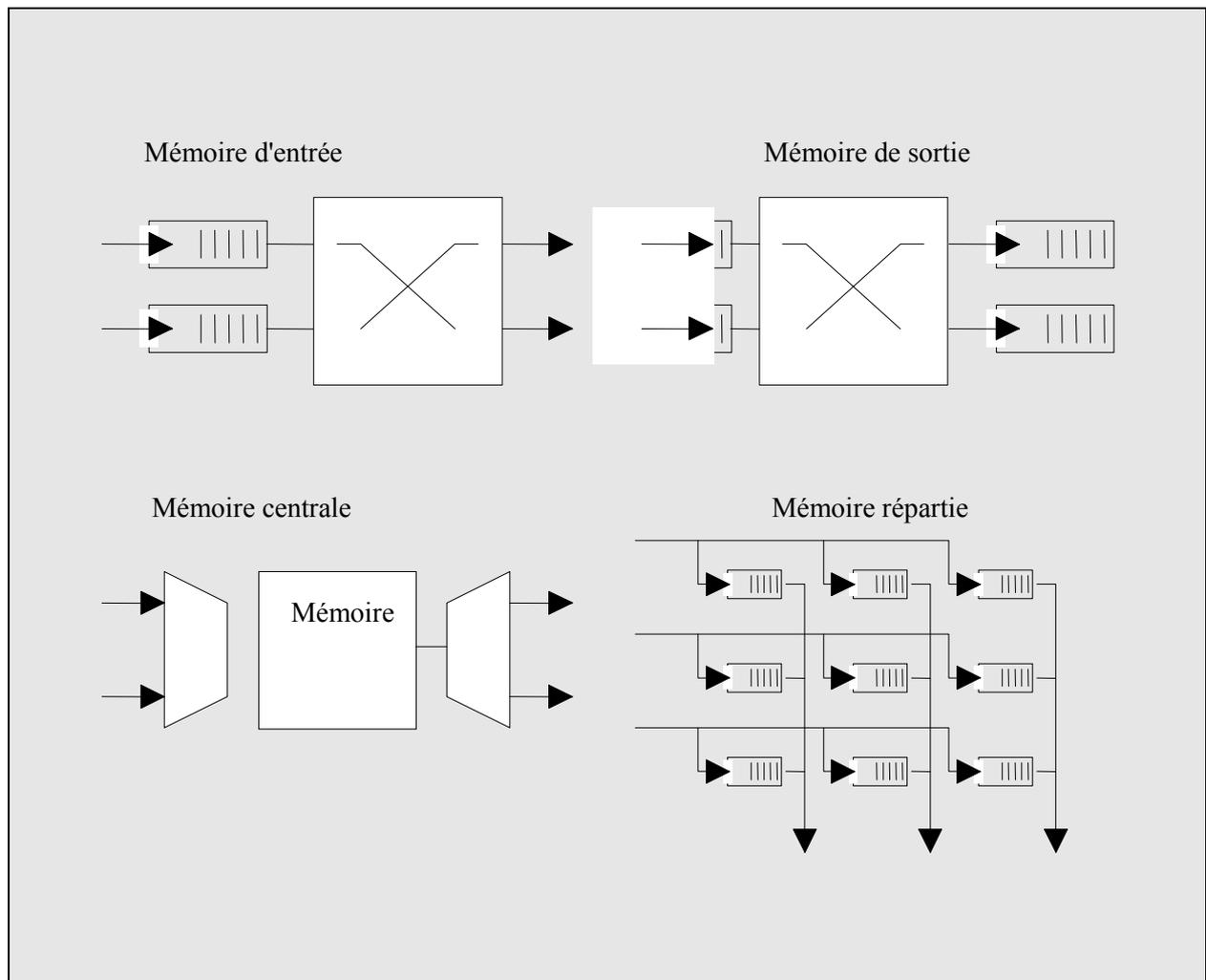
3.3.4 Connexions virtuelles

Dans le cas des connexions virtuelles, il y a commutation de certains paquets individuels mais tous les paquets d'une relation d'information sont transmis sur un seul trajet, qui est créé au moment de l'établissement de la connexion.

Orientation des connexions. Avant le début de l'échange d'information, il y a établissement d'une connexion qui détermine si un trajet possédant la capacité de transmission adéquate est disponible entre la source et le collecteur. Cette voie n'est pas occupée pendant toute la durée de la connexion, mais seulement lorsqu'on a besoin de la capacité de transmission. Si aucun paquet n'est disponible pendant une

certaine durée, la voie de transmission peut être utilisée pour d'autres connexions virtuelles. A l'intérieur de certaines limites, la capacité des sections de transmission peut même être surréservée (gain de multiplexage statistique). Néanmoins, toutes les connexions virtuelles ont accès à des ressources garanties et elles peuvent même parfois utiliser plus de largeur de bande que ce qui leur avait été garanti.

Figure 3.15 – Principes de la mise en mémoire dans la commutation ATM

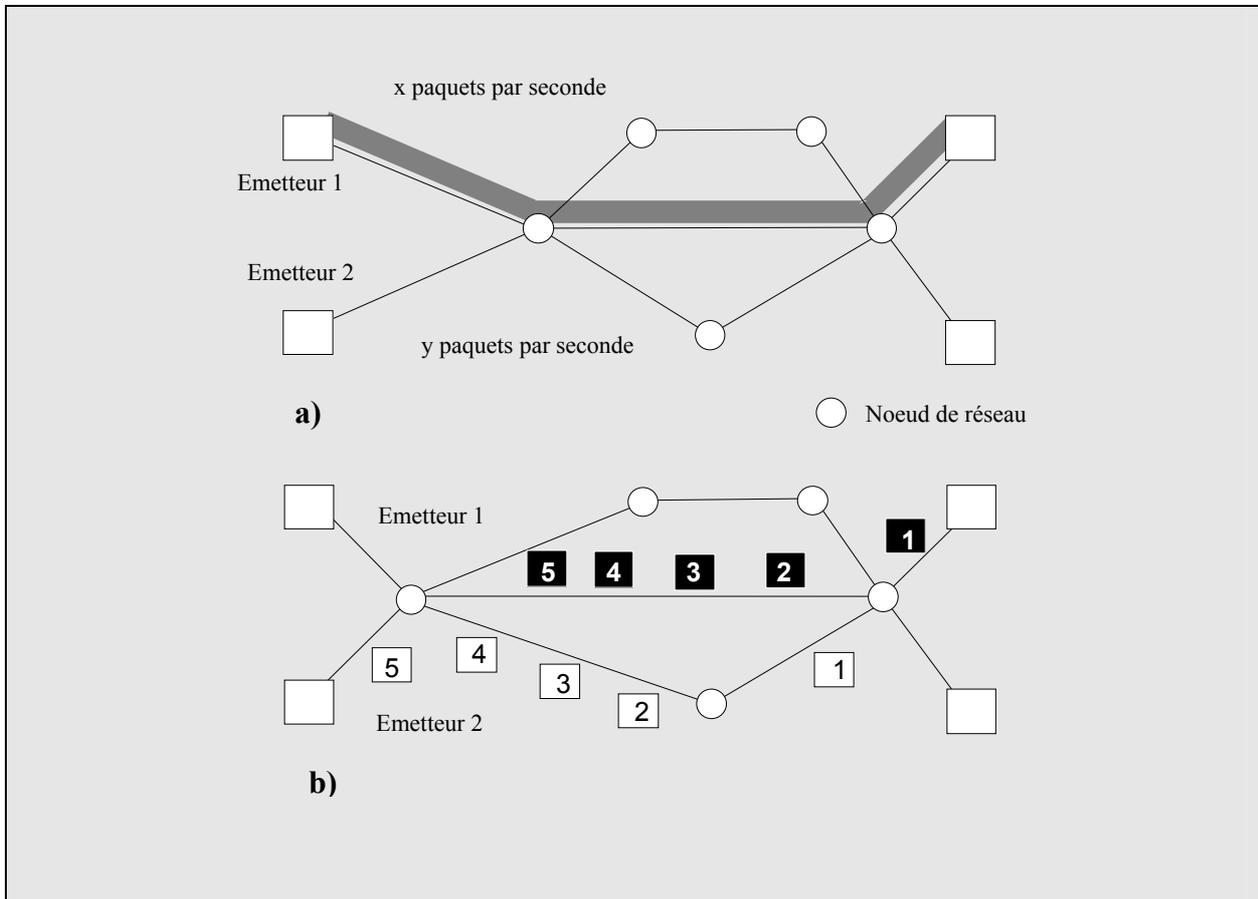


Les connexions virtuelles associent les avantages de la commutation par paquets et ceux de la commutation des voies:

- elles utilisent avec un bon rendement les ressources du réseau (avantage de la commutation par paquets);
- elles peuvent mettre rapidement à disposition de grandes capacités de transmission (avantage de la commutation par paquets);
- elles garantissent les ressources (avantage de la commutation des voies);
- elles sont dotées d'un système de commande qui est, par nature, moins complexe à réaliser que dans un système opérant strictement en commutation par paquets.

Figure 3.16 – Commutation des paquets dans un réseau de commutation avec connexions virtuelles;

- a) Phase 1: établissement des connexions;
- b) Phase 2: commutation des paquets sur les trajets établis



Dans la phase 1 (établissement de la connexion), la capacité de transmission est réservée sur les deux trajets désignés. Pour pouvoir garantir la largeur de bande souhaitée, comme dans l'exemple, les deux connexions doivent être établies sur des trajets différents. Pour le transport des paquets dans la phase 2 (échange d'information), la réservation du trajet et de la largeur de bande correspondant à la qualité de service (QoS) garantit que les paquets ne pourront pas se dépasser sur le trajet et qu'ils seront livrés dans les délais fixés.

3.3.5 Commutation et acheminement

Commutation

La commutation est la création de connexions dans un réseau de télécommunication classique, pour une durée limitée, par interconnexion de voies de transmission (commutation de voies ou de circuits). Pendant l'établissement d'une connexion, qui intervient avant la transmission proprement dite de l'information, la création de cette connexion est commandée par une signalisation. Les connexions peuvent aussi être virtuelles, comme c'est le cas en mode ATM.

La commutation s'effectue dans la couche 2 du modèle de référence OSI.

Acheminement (routage)

L'acheminement est le processus qui dirige les paquets de données – sur la base de l'adresse complète de la destination de l'émetteur, contenue dans l'en-tête des données – jusqu'au récepteur, en passant par un nombre variable de nœuds (routeurs) existant dans le réseau. La fonction de l'acheminement est, par exemple, de transporter des datagrammes dans un réseau pour données à partir d'un émetteur jusqu'à une seule destination (monodiffusion) ou jusqu'à de nombreuses destinations (diffusion, multidiffusion). Deux sous-tâches doivent être accomplies à cet effet:

- la construction de tables d'acheminement; et
- l'envoi de datagrammes à l'aide des tables d'acheminement.

Le processus d'acheminement décrit ici consiste dans l'envoi de paquets de données. Il est complètement distinct de la recherche de trajets pour des circuits commutés dans certaines conditions de fonctionnement du réseau (surcharge, erreurs), ou pour optimiser le coût d'une connexion (acheminement optimal).

Les datagrammes sont transférés depuis un routeur (bond suivant) jusqu'au routeur suivant (bond par bond). Un routeur donné sait quel est le routeur suivant qui se trouve dans la direction du point de destination. La décision à prendre au sujet du routeur suivant (bond suivant) dépend de l'adresse de destination du datagramme (acheminement basé sur la destination). Une entrée dans la table d'acheminement contient la destination et l'indication des bonds suivants qui correspondent à cette destination, ainsi que des données supplémentaires.

La table d'acheminement détermine le nœud suivant que le paquet de données doit atteindre pour parvenir à la destination voulue. Les tables d'acheminement peuvent être:

- statiques;
- dynamiques.

Dans le cas de l'acheminement statique, le bond suivant d'une voie est inscrit dans une position fixe des tables. L'acheminement statique convient bien pour les petits réseaux et les réseaux à topologie simple. Dans l'acheminement dynamique, le bond suivant est déterminé sur la base d'une information relative à l'état de fonctionnement du réseau. On a recours à cet acheminement pour les grands réseaux à topologie complexe et pour l'adaptation automatique des trajets en cas d'erreur (secours) et en cas de surcharge de certaines parties du réseau.

3.3.6 Références

Références UIT-T

- [I.232.1] (11/88) – Catégories des services supports en mode paquet. Communication virtuelle et circuit virtuel permanent.
- [I.232.2] (11/88) – Catégories des services supports en mode paquet. Catégorie de service support sans connexion.
- [I.232.3] (03/93) – Catégories des services supports en mode paquet. Catégorie de service support de signalisation d'utilisateur.
- [I.233] (10/91) – Services supports en mode trame. Service support à relais de trames sur RNIS et service support à commutation de trames sur RNIS.
- [I.233.1 Annexe] (07/96) – Services supports en mode trame. Service support à relais de trames sur RNIS – Annexe F: Multidiffusion à relais de trames.

Références générales

Schwartz, M.: Telecommunication Networks. – Reading: Addison-Wesley, 1988.

3.4 Technologie de la commutation téléphonique

La technologie de la commutation téléphonique constitue la base technique des opérations effectuées pour la commutation des connexions dans les réseaux analogiques et numériques pour le service téléphonique et dans le RNIS. Elle se caractérise par la commutation de voies à bande étroite.

Le réseau téléphonique est le plus ancien réseau de télécommunication du monde. C'est dans ce réseau qu'ont été introduites les premières fonctions de commutation.

Tableau 3.1A – Evolution de la technologie de la commutation téléphonique

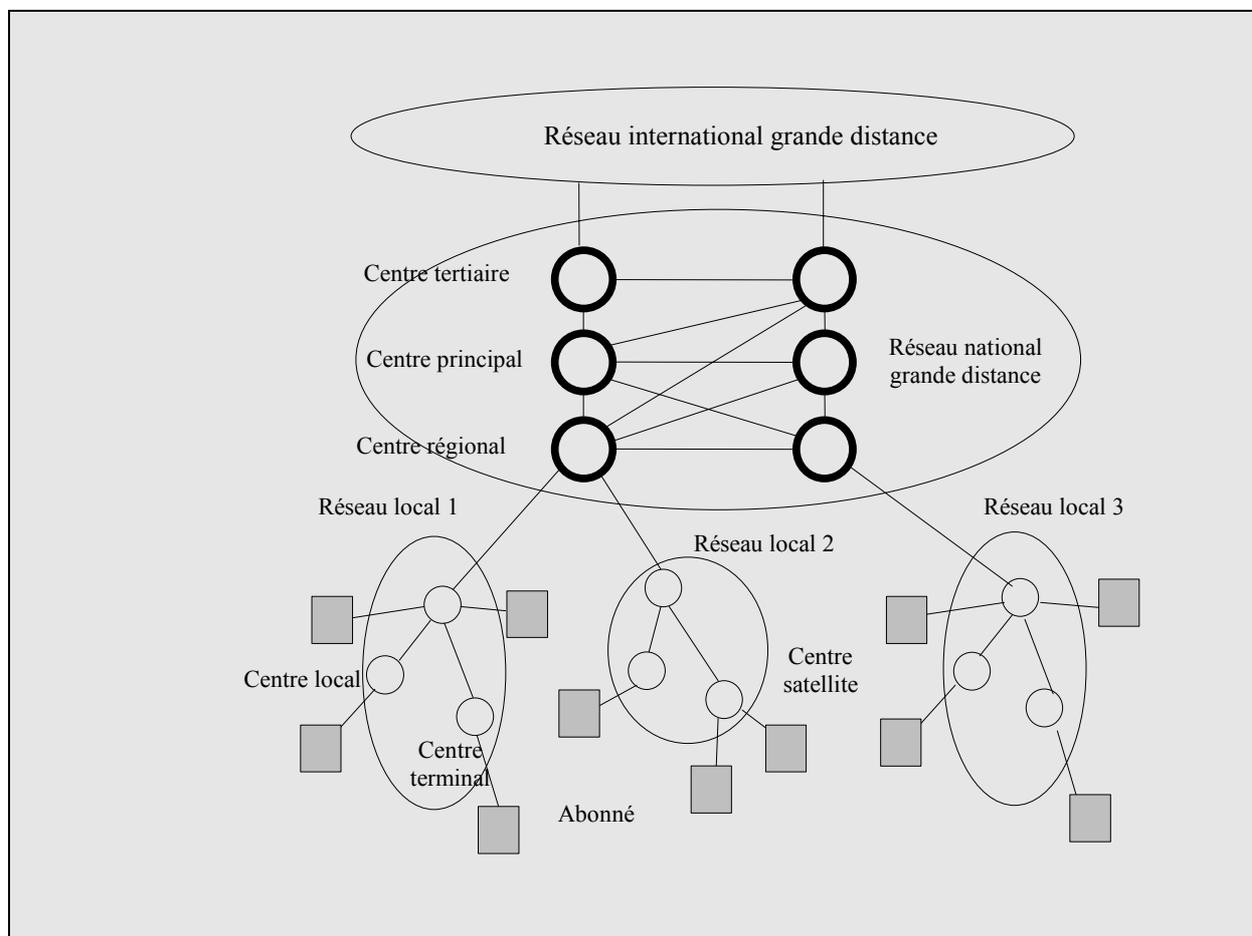
1877	Première commutation téléphonique (commutation manuelle, Etats-Unis)
1892	Première commutation automatique (Etats-Unis)
1965	Premier système de commutation locale entièrement électronique (Etats-Unis)

Tableau 3.1B – Evolution de la technologie de la commutation téléphonique en Allemagne

1881	Premier central téléphonique en Allemagne (Berlin, 8 abonnés)
1908	Première commutation automatique en Europe (Hildesheim, 900 abonnés)
1923	Première commutation entièrement automatique au-delà de la zone locale (Weilheim)
1970	Service automatique à couverture zonale totale en Allemagne
1975	Commutation locale commandée par ordinateur en Allemagne
1984	Première station de commutation numérique à distance en Allemagne
1985	Première station de commutation numérique locale en Allemagne
1998	Achèvement de la numérisation complète du réseau téléphonique en Allemagne

De nos jours, le réseau téléphonique mondial a la structure représentée Figure 3.17.

Figure 3.17 – Structure du réseau téléphonique international



3.4.1 Réseau local

Le niveau inférieur du réseau téléphonique est le niveau du réseau local, auquel l'abonné est raccordé. Le réseau local comprend des centres locaux, des centres terminaux et des centres satellites télécommandés à partir des centres locaux.

Les réseaux locaux sont de taille variée. On a, d'une part, de très petits centres locaux, desservant au maximum quelques centaines d'abonnés, pour lesquels on peut utiliser des concentrateurs numériques. D'autre part, si les abonnés sont au nombre de quelques milliers, on a recours à des stations de commutation télécommandées. Les très grands réseaux locaux peuvent desservir jusqu'à 100 000 abonnés. Ils sont dotés de commutateurs locaux indépendants.

L'abonné est relié au réseau local par une ligne d'abonné. Les commutateurs sont reliés les uns aux autres par des lignes de jonction locales.

3.4.2 Réseau grande distance

Les réseaux locaux sont connectés par l'intermédiaire de réseaux nationaux grande distance. Ces derniers comprennent des centres régionaux, des centres principaux et des centres tertiaires.

Cette structure se reflète aussi dans le numérotage des postes d'abonné: à l'intérieur d'un réseau local, seul le numéro de téléphone de l'abonné est sélectionné pour effectuer la connexion à un autre abonné dans le même réseau local. S'il se trouve à l'extérieur du réseau local, l'utilisateur doit composer l'indicatif de ce réseau et, s'il est dans un autre pays, il compose l'indicatif du pays de son correspondant.

Les réseaux locaux et les réseaux grande distance peuvent avoir un certain nombre de niveaux hiérarchiques internes. Dans certains pays, cependant, on ne fait pas de distinction entre le niveau local et le niveau grande distance.

Il est possible que le trajet suivi par une connexion dans le réseau ne respecte pas la hiérarchie fixée par le numérotage. Le procédé dit de routage du trafic permet d'avoir des trajets plus courts, donc plus efficaces. Les systèmes de télécommunication numériques informatisés fonctionnent avec des plans de numérotage qui sont indépendants de la structure hiérarchique du réseau.

Les réseaux nationaux grande distance des divers pays sont eux-mêmes reliés par l'intermédiaire du réseau international grande distance, qui se subdivise en deux niveaux: le réseau intercontinental grande distance possède des centres de commutation à New York, Londres, Sydney, Moscou et Tokyo. Le niveau inférieur est celui des réseaux continentaux grande distance, dont les indicatifs sont les suivants:

- 1) Amérique du Nord
- 2) Afrique
- 3) et 4) Europe
- 5) Amérique Centrale, Amérique du Sud
- 6) Australie, Océanie
- 7) Fédération de Russie
- 8) Asie, à l'exclusion de la Russie, de l'Inde et des pays arabes
- 9) Inde et pays arabes

3.5 Transfert des messages en mode sans connexion

3.5.1 Principes

Dans le transfert des messages en mode sans connexion, le transfert se fait dans des paquets qui contiennent l'adresse de la source et celle du collecteur. Tous les paquets atteignent tous les nœuds et tous les terminaux du réseau. Chaque récepteur recherche et extrait «ses propres» messages en se basant sur l'information d'adresse indiquée.

Cette forme de transfert des messages est utilisée en particulier dans les réseaux de transmission de données, par exemple pour les applications LAN ou WAN. L'avantage de la méthode réside dans la possibilité de transmettre de l'information sans établir une connexion au préalable. De plus, il n'est pas nécessaire d'avoir un mécanisme de routage. C'est là un avantage important dans le cas de relations d'information courtes et sporadiques.

La transmission est possible seulement par trames ou par paquets. Comme les paquets contiennent l'adresse de la source et celle du collecteur, il est inutile de procéder à l'établissement et à la fin d'une connexion. Les paquets sont transmis spontanément. Toutefois, il n'est pas possible de garantir que des ressources suffisantes seront disponibles dans l'ensemble du réseau, ni que le collecteur est capable d'accepter l'information transmise. Il faut par conséquent prendre des mesures pour s'assurer qu'un message a effectivement atteint le collecteur.

Cela met en œuvre des protocoles, à des niveaux élevés du modèle de référence OSI.

Un support partagé est un support de transmission utilisé par plusieurs relations de communication. La capacité de transmission pour une connexion donnée dépend du trafic écoulé dans toutes les autres relations de communication.

Accès au support. Etant donné qu'aucune connexion n'a été établie pour une quelconque relation d'information, toutes les relations existantes doivent utiliser le support de transmission en partage (support partagé). Il existe donc toujours un intervalle de temps et une régulation temporelle pour l'accès au support. On dispose pour cela de deux procédures possibles: soit l'accès stochastique et non coordonné, c'est-à-dire l'accès non convenu d'avance avec d'autres stations (accès aléatoire), soit l'octroi aux stations de droits de transmission dans des intervalles de temps prédéterminés (accès au jeton).

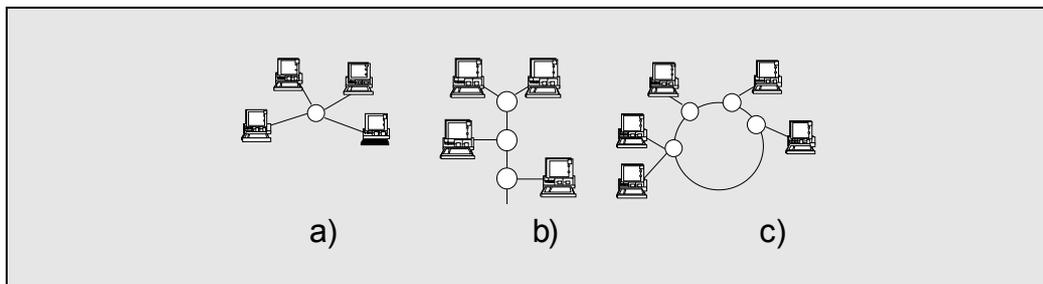
Topologie des réseaux. La Figure 3.18 représente les différentes topologies possibles des réseaux pour le transfert des messages sans connexion. On voit qu'il est impossible d'établir une structure hiérarchique du réseau, comme ce serait le cas avec des réseaux arborescents ou maillés.

L'interconnexion des réseaux fonctionnant en mode sans connexion – qui entraînerait la création de hiérarchies – oblige à faire une distinction sélective entre le trafic interne (source et collecteur contenus dans le même réseau) et le trafic externe (source et collecteur dans des réseaux différents). A cet effet, les ponts et les routeurs sont devenus des éléments de réseau typiques des LAN et des WAN. Ils analysent l'information d'adresse des paquets de données et filtrent le trafic externe pour le transfert au niveau immédiatement supérieur dans le réseau.

Si le service sans connexion est offert dans des réseaux fonctionnant avec établissement de connexions, il faut avoir recours à des nœuds de réseau spéciaux (serveurs) qui acceptent le trafic sans connexion et qui le retransmettent après avoir analysé l'information d'adresse. Cela crée un sous-réseau logique composé de connexions à adresse fixe pour le trafic sans connexion.

Figure 3.18 – Topologies de réseau pour le transfert de messages en mode sans connexion

- a) Réseau en étoile
- b) Réseau en bus
- c) Réseau en anneau



3.5.2 Techniques utilisées

CSMA/CD (accès multiple avec détection de porteuse et évitement de collision: *carrier sense multiple access/with collision detection*). Cette méthode applique l'accès probabiliste sur le support de transmission qui n'est pas synchronisé avec d'autres stations. Le support est interrogé pendant une courte période avant la transmission. S'il est libre, la station émet, sinon il faut laisser passer un intervalle d'attente, après quoi le support est interrogé une nouvelle fois. Une collision peut se produire si plusieurs stations ont «interrogé» le support en même temps et si elles ont commencé à émettre dès que le support s'est libéré. La technique CSMA/CD est normalisée dans la publication IEEE 802.3. La topologie du réseau est construite autour d'un bus (Figure 3.18 b)). L'Ethernet fournit un exemple type de réseaux CSMA/CD, avec une capacité de transmission pouvant dépasser 10 Mbit/s. On travaille actuellement à la normalisation d'un «Ethernet gigabit» qui devrait atteindre une capacité de transmission de 1 Gbit/s et qui pourra s'appliquer aussi aux réseaux étendus (WAN).

Anneaux à jeton. Le modèle à jeton est un processus d'accès déterministe aux supports, avec système de commande décentralisé. Une autorisation de transmission (jeton) circule de station à station. Une station qui est prête à transmettre occupe un jeton libre et envoie un message. Cela crée un nouveau jeton. Dans le processus, de l'anneau à jeton, le jeton circule sur un anneau physique. La topologie d'un tel réseau est représentée par la Figure 3.18 c). Le transfert du jeton se fait sur l'anneau physique. Dans ce domaine, un processus typique est celui de l'anneau à jeton IBM, décrit dans la publication IEEE 802.5.

Bus à jeton. Dans cette méthode, toutes les stations connectées sur un bus (voir la Figure 3.18 b) forment un anneau logique. Le transfert du jeton vers l'avant s'effectue avec les adresses des stations connectées. Les adresses de la station précédente et de la station suivante doivent être connues. La publication IEEE 802.4 décrit un exemple de processus avec bus à jeton.

FDDI (interface de données avec distribution par fibre: *fibre distributed data interface*). La méthode FDDI applique le processus avec bus à jeton dans une structure à double anneau, avec anneaux contradictirectionnels formés par des connexions sur fibres optiques. Les données sont transportées dans des paquets de longueur variable. Les systèmes FDDI sont conçus pour avoir une grande tolérance aux erreurs et une grande capacité de transmission dans un réseau LAN à grande rapidité (HSLAN), pouvant aller jusqu'à 100 Mbit/s. La procédure d'accès permet le service synchrone ainsi que la transmission de données asynchrone. Dans ce cas, une portion fixe de la largeur de bande est attribuée à chaque station.

DQDB (file d'attente répartie sur deux bus: *distributed queue dual bus*). Les processus FDDI, modèle à jeton et CSMA/CD ont été développés pour la transmission dans les réseaux locaux. De son côté, le processus DQDB est la procédure de transmission dans les réseaux métropolitains ou réseaux de zone urbaine (MAN, *metropolitan area networks*). On trouvera sa description dans la publication IEEE 802.6.

En DQDB, la transmission se fait avec une structure de trame sur deux bus transmettant dans des sens opposés. Selon la direction dans laquelle se trouve le collecteur qui recevra les messages émanant d'une station, une transmission est demandée sur le bus du sens opposé. Si un intervalle libre arrive dans le sens de transmission souhaité, cet intervalle est occupé. Avec ce processus, il se forme une file d'attente répartie dans chacune des stations. Celles-ci peuvent transmettre leur information avec égalité des droits et sans incompatibilités, en fonction de l'état général du réseau.

3.6 Abréviations

ATM	Mode de transfert asynchrone (<i>asynchronous transfer mode</i>)
BORSCHT	Batterie, protection contre les surtensions, retour d'appel, signalisation, codage, hybride, test (<i>battery, over voltage protection, ringing, signalling, coding, hybrid, test</i>)
CSMA/CD	Accès multiple avec détection de porteuse et évitement de collision (<i>carrier sense multiple access/with collision detection</i>)
DQDB	File d'attente répartie sur deux bus (<i>distributed queue dual bus</i>)
SAN1	Système de signalisation d'abonné numérique N° 1 (DSS1, <i>digital subscriber signaling system N° 1</i>)
ETSI	Institut européen des normes de télécommunication (<i>European Telecommunications Standards Institute</i>)
FDDI	Interface de données avec distribution par fibre (<i>fibre distributed data interface</i>).
FIFO	Premier entré, premier sorti (concerne normalement les mémoires tampons) (<i>first in first out (normally relating to buffers)</i>)
GSM	Groupe spécial mobile (Comité de l'ETSI pour les systèmes cellulaires de deuxième génération)
HSLAN	Réseau local à grande rapidité (<i>high speed local area network</i>)

IEEE	<i>Institute of electrical and electronic engineers</i>
RNIS	Réseau numérique à intégration de services
LAN	Réseau local (<i>local area network</i>)
MAN	Réseau métropolitain; Réseau de zone urbaine (<i>metropolitan area networks</i>)
NNI	Interface réseau-réseau (<i>network network interface</i>)
OSI	Interconnexion des systèmes ouverts (<i>open systems interconnection</i>)
MIC	Modulation par impulsions et codage
QoS	Qualité de service (<i>quality of service</i>)
SMS	Service de message court (<i>short message service</i>)
UNI	Interface usager-réseau (<i>user network interface</i>)
USBS	Service support de signalisation d'utilisateur (<i>user signalling bearer service</i>)
WAN	Réseau étendu (<i>wide area network</i>)

CHAPITRE 4

4 Nouveaux Systèmes de signalisation et SS N° 7

4.1 Introduction

Le terme «signalisation» est un terme générique qui recouvre la syntaxe et la sémantique des signaux échangés entre un utilisateur et un réseau ou entre les nœuds d'un réseau pour établir et libérer des communications ou, plus généralement, pour gérer la fourniture des services de télécommunication. A l'origine, ces signaux étaient rudimentaires (changement d'état et combinaisons de fréquence). Depuis lors, ils sont devenus de plus en plus complexes dans les réseaux numériques, en prenant la forme de messages et d'éléments d'information et en mettant à profit l'évolution parallèle de la technologie de la communication des données (par exemple, le modèle OSI).

Parallèlement à l'évolution des réseaux de télécommunication vers le RNI (réseau numérique intégré), puis vers le RNIS-LB (réseau numérique à intégration de services à large bande), on a vu apparaître les systèmes de signalisation à canal sémaphore dans le réseau (Système de signalisation N° 7 entre les nœuds de réseau) et dans la boucle d'abonné (Système de signalisation d'abonné numérique N° 1 entre l'équipement des locaux de l'abonné et le réseau).

Au cours des vingt années écoulées, ces systèmes sont devenus le véritable système nerveux des réseaux de télécommunication modernes et ils ont atteint les objectifs fixés par les premiers concepteurs dans les années 70: fiabilité et souplesse d'utilisation. On est ainsi passé de la mise en œuvre des capacités de signalisation pour les services de base du POT (service téléphonique traditionnel), à la mise en œuvre d'une «boîte à outils» complexe: ensemble de fonctions et de protocoles nécessaires aux opérateurs des réseaux pour mettre en place une diversité de services à l'intention de leurs clients (POTS, RNIS, réseaux cellulaires, réseaux à large bande, ...) et pour optimiser l'exploitation de leur réseau (par exemple, notion de réseau intelligent). Les travaux actuels portent sur la convergence ou l'interfonctionnement avec l'environnement protocole IP.

On trouvera dans les paragraphes qui suivent une vue d'ensemble de la situation actuelle.

4.2 Système de signalisation N° 7 (SS7)

Le Système de signalisation N° 7 est le deuxième système de signalisation à canal sémaphore recommandé par le CCITT en 1980, cela après huit ans d'études. Il a intégré dans l'environnement téléphonique les principes et les techniques des réseaux de communication de données, développés dans le cadre du modèle d'interconnexion des systèmes ouverts, tout en tenant compte des exigences spécifiques de la signalisation, par exemple les contraintes imposées par un niveau élevé de sécurité et par le temps réel.

Afin de garantir la souplesse de fonctionnement et l'aptitude à évoluer, on a adopté une conception modulaire et structurée pour le système, en séparant clairement les fonctions de base qui assurent le transport fiable des messages de signalisation (sous-système transfert de messages) et les fonctions en rapport avec les applications (sous-systèmes utilisateur). Certains sous-systèmes utilisateur peuvent aussi se partager des fonctions communes, par exemple le sous-système commande de connexions sémaphores (SCCP: *signalling connection control part*) et le sous-système application pour la gestion des transactions (TCAP: *transaction capability application part*). Cet effort continu pour introduire plus de structure et de communauté de conception entre les applications de la signalisation apparaît clairement dans les éditions successives des Recommandations relatives au SS7 qui ont paru depuis 1980. Les paragraphes qui suivent donnent une vue d'ensemble de la famille des protocoles SS7 appliqués aux services à bande étroite.

4.2.1 Sous-système transfert de messages (MTP)

4.2.1.1 Introduction

Le sous-système transfert de messages (MTP: *message transfert part*) fournit les fonctions grâce auxquelles l'information importante provenant du sous-système utilisateur peut-être transférée, via le MTP, à travers le réseau SS7 jusqu'à la destination voulue (points sémaphores). De plus, le sous-système MTP comprend des fonctions qui permettent de remédier aux défaillances du réseau et du système qui seraient de nature à influencer défavorablement sur le transfert de l'information de signalisation. Les procédures du MTP garantissent que les messages émanant d'un utilisateur en un point sémaphore seront délivrés au même utilisateur au point de destination indiqué par l'expéditeur, sans perte ni duplication des messages.

Le MTP est subdivisé en sous-niveaux:

- 1) le niveau physique (niveau 1) ou liaison sémaphore de données;
- 2) le niveau liaison de données (niveau 2) ou canal sémaphore;
- 3) le niveau réseau (niveau 3) ou gestion de réseau sémaphore.

Les fonctions de chaque niveau du sous-système MTP sont exécutées au moyen du protocole de niveau entre deux systèmes. Le protocole fournit un «service de niveau» aux niveaux supérieurs (niveau 1 liaison sémaphore de données, niveau 2 canal sémaphore et niveau 3 réseau sémaphore), ainsi qu'il est décrit respectivement dans les Recommandations UIT-T Q.702, Q.703 et Q.704.

Les objectifs globaux du sous-système transfert de messages sont la mise à disposition de moyens pour:

- a) assurer le transport et la remise fiable de l'information de signalisation du «sous-système utilisateur» à travers le réseau SS7;
- b) permettre de réagir aux défaillances du système et du réseau qui compromettent le transport, et mener les actions nécessaires pour assurer la permanence du service.

4.2.1.2 Description

Pour plus de détails, on se reportera aux Recommandations UIT-T Q.702 à Q.707.

Niveau 1 (liaison sémaphore de données)

Une liaison sémaphore de données constitue le niveau fonctionnel inférieur (niveau 1) dans la hiérarchie fonctionnelle du Système de signalisation N° 7. C'est un trajet de transmission bidirectionnel pour la signalisation, composé de deux voies de communication de données fonctionnant ensemble, en sens opposé, au même débit des données.

Une liaison sémaphore de données numérique se compose de voies de transmission numériques et de commutateurs numériques, ou de leurs équipements de terminaison, qui réalisent l'interface avec les terminaux sémaphores. Les voies de transmission numériques peuvent être dérivées d'un signal multiplex numérique à 1 544, 2 048 ou 8 448 kbit/s ayant une structure de trame telle que définie dans la Recommandation UIT-T G.704 [1].

Le Système de signalisation N° 7 peut fonctionner sur des liaisons de transmission de terre et sur des liaisons par satellite.

Niveau 2 (canal sémaphore)

Les fonctions d'un canal sémaphore, associé à une liaison sémaphore de données en tant que porteur, fournissent un canal sémaphore pour un transfert fiable de messages sémaphores entre deux points sémaphores reliés directement l'un à l'autre.

Les principales caractéristiques sont la délimitation des messages, la validation des séquences, le contrôle d'erreur et le contrôle de flux. Lorsqu'une erreur survient sur un canal sémaphore, le message (ou le jeu de messages) est retransmis. On définit deux méthodes de retransmission: la procédure de base pour les liaisons de terre sur lesquelles le temps de propagation aller-retour est inférieur à 30 ms; et la méthode de retransmission cyclique préventive, principalement pour les liaisons par satellite ou les liaisons de Terre sur lesquelles le temps de propagation aller-retour dépasse 250 ms. L'une ou l'autre méthode peut être utilisée pour les temps de propagation aller-retour compris entre ces deux valeurs limites.

Un message au niveau 2 du sous-système MTP s'appelle une trame sémaphore (SU: *signal unit*). Il en existe trois types: les trames sémaphores de remplissage (FISU), les trames sémaphores d'état du canal sémaphore (LSSU) et les trames sémaphores de message (MSU).

Les trames sémaphores de remplissage (FISU: *fill-in signal units*) sont transmises en permanence sur un canal sémaphore dans les deux sens, à moins que d'autres trames sémaphores (MSU ou LSSU) soient présentes.

Les FISU transportent uniquement de l'information de base de niveau 2 (par exemple, accusé de réception d'une trame sémaphore par le point sémaphore distant). Comme un total de contrôle est calculé pour chaque FISU, la qualité du canal sémaphore est contrôlée en permanence par les deux points sémaphores situés aux deux extrémités du canal.

Les trames sémaphores d'état du canal sémaphore (LSSU: *link status signal units*) transportent un ou deux octets d'information d'état du canal sémaphore entre les points sémaphores situés à chaque extrémité du canal sémaphore. Cette information sert à contrôler l'alignement du canal et à indiquer l'état du canal à l'extrémité distante.

Les trames sémaphores de message (MSU: *message signal units*) transportent toutes les données d'utilisateur fournies par le niveau supérieur (niveau 3 du sous-système MTP).

La différenciation entre FISU, LSSU et MSU se fait sur la base de la longueur de la SU. La valeur du champ de LI (indicateur de longueur: *length indicator*) détermine le type de trame sémaphore:

LI	Type de message
0	FISU
1 ou 2	LSSU
3 .. 63	MSU

La longueur des messages est limitée à 279 octets.

Pour plus de détails, voir la Recommandation UIT-T Q.703.

Niveau 3 (gestion du réseau sémaphore)

La gestion du réseau sémaphore se divise en deux catégories de base:

- le traitement des messages;
- la gestion du réseau.

Le niveau 3 du sous-système MTP équivaut fonctionnellement à la couche réseau du modèle OSI.

Traitement des messages

Le niveau 3 de MTP achemine les messages sur la base de l'étiquette d'acheminement des trames sémaphores de message. Cette étiquette se compose de trois champs: le code du point de destination (DPC: *destination point code*), le code du point d'origine (OPC: *originating point code*), et la sélection du canal sémaphore (SLS: *signalling link sélection*). Les codes des points de destination et d'origine sont identifiés de façon univoque par des adresses numériques dans le réseau SS 7. A la destination, le sous-système MTP remet le message à l'utilisateur approprié du MTP, qui est identifié dans l'octet d'information de service (SIO: *service information octet*) du message.

Gestion du réseau

Des groupes de procédures sont mis en œuvre pour gérer les défaillances et le rétablissement des éléments du réseau (canal sémaphore, faisceau de canaux sémaphores et nœud). Ces groupes sont les suivants:

- gestion des canaux sémaphores;
- gestion des routes sémaphores;
- gestion du trafic.

Chaque fois qu'un changement intervient dans l'état d'un canal sémaphore, d'une route sémaphore ou d'un nœud, les différentes procédures de ces groupes sont activées selon les besoins.

Gestion des canaux sémaphores

<i>Le contrôle des faisceaux de canaux sémaphores</i>	permet la gestion au niveau des faisceaux de canaux sémaphores.
<i>Contrôle de l'activité des canaux sémaphores</i>	pour la supervision de toutes les actions entreprises au niveau des canaux sémaphores.
<i>Le contrôle de l'activation des canaux</i>	est utilisé pour la première activation et pour l'introduction des canaux sémaphores dans la gestion du réseau.
<i>Rétablissement des canaux sémaphores</i>	utilisé pour rétablir un canal sémaphore défaillant après application de la procédure de gestion du trafic.
<i>Désactivation des canaux sémaphores</i>	pour interrompre le trafic sur un canal sémaphore et retirer le canal de la gestion du réseau.

Gestion des routes sémaphores

<i>Commande d'interdiction de transfert</i>	l'interdiction de transfert (CFP: <i>transfer prohibited</i>) est utilisée par un point de transfert sémaphore pour informer tous les nœuds adjacents qu'une destination donnée ne peut plus être atteinte par son intermédiaire.
---	--

La commande de test de faisceaux de routes sémaphores

est utilisée pour vérifier l'état des routes à partir d'un point de transfert sémaphore distant connu.

Commande d'autorisation de transfert

l'autorisation de transfert (TFA: *transfer allowed*) est utilisée par un point de transfert sémaphore pour informer tous les nœuds adjacents qu'une destination donnée peut de nouveau être atteinte par son intermédiaire.

La commande de transfert sous contrôle

est utilisée pour informer un nœud adjacent que l'itinéraire d'accès à une destination est encombré actuellement.

Gestion du trafic sémaphore

La commande de passage sur canal sémaphore de secours

détourne le trafic d'un canal sémaphore défaillant disponibles.

La commande de retour sur canal sémaphore normal

détourne le trafic d'un canal ou de plusieurs canaux sémaphores de secours vers un canal sémaphore disponible qui était précédemment défaillant.

Le contrôle de la disponibilité des canaux sémaphores

effectue la synchronisation des différents événements qui modifient la table d'acheminement sur un canal sémaphore.

La commande de passage sous contrainte sur route de secours

détourne le trafic d'une route sémaphore actuellement défaillante vers une ou plusieurs routes sémaphores disponibles.

La commande de retour sous contrôle sur route normale

détourne le trafic d'une ou plusieurs routes sémaphores de secours vers une route sémaphore disponible qui était précédemment défaillante.

Le redémarrage d'un point sémaphore

effectue l'introduction sans à coup du nœud dans le réseau SS7 au moment du redémarrage. Cette action est aussi utilisée lors du redémarrage d'un nœud adjacent.

Le contrôle de flux de trafic sémaphore

effectue la gestion d'une situation d'encombrement détectée localement ou à distance.

La commande des acheminements de la signalisation

effectue la synchronisation des différents événements qui modifient les tables d'acheminement pour une destination donnée.

Pour plus de détails, voir la Recommandation UIT-T Q.704.

4.2.1.3 Evolution future

Depuis 1996, la Recommandation UIT-T Q.704 fournit en tant qu'option nationale, la définition d'un canal sémaphore à haut débit permettant l'établissement d'un canal sémaphore au débit de 2 Mbit/s, sur la base de la modulation MIC sans division en voies. L'utilisation d'un tel canal est destinée aux pays qui ne pratiquent pas encore le transfert en mode ATM. Dans les pays où l'on dispose de ce mode de transport, il convient de donner la préférence à une solution MTP3, ATM plutôt qu'aux niveaux 1 et 2 du sous-système MTP.

4.2.2 Sous-système commande des connexions sémaphores (SCCP)

4.2.2.1 Introduction

Le sous-système commande des connexions sémaphores (SCCP: *signalling connection control part*) fournit au-dessus du ou des réseaux MTP, des services en mode sans connexion et en mode connexion pour transporter entre les nœuds de l'information de signalisation, relative aux circuits ou non relative aux circuits, ou d'autres types d'information, pour les besoins de la gestion et de la maintenance. L'ensemble constitué par l'association des sous-systèmes MTP et SCCP s'appelle le «sous-système service de réseau» (NSP: *network service part*). Le NSP du Système de signalisation N° 7 fournit un protocole pour le mode sans connexion et un protocole pour le mode avec connexion. Le sous-système NSP doit être considéré comme l'équivalent de la couche réseau du modèle de référence OSI.

Le SCCP fournit les moyens à mettre en œuvre pour les opérations suivantes:

- commande des connexions sémaphores logiques dans un réseau SS7;
- transport des unités de données de signalisation dans le réseau SS7, avec ou sans utilisation de connexions sémaphores logiques.

Le protocole qu'utilise le SCCP pour fournir les services réseau se divise en quatre classes de protocole:

- classe 0: classe de base sans connexion;
- classe 1: classe sans connexion avec séquençement des messages;
- classe 2: classe en mode connexion de base;
- classe 3: classe en mode connexion avec régulation de trafic.

4.2.2.2 Description

Le sous-système SCCP fournit une fonction de routage qui permet d'acheminer des messages de signalisation jusqu'à un point sémaphore sur la base, par exemple, de chiffres de numérotation. Cette opération fait intervenir une fonction de traduction qui convertit l'appellation globale (par exemple, les chiffres de numérotation) en un code de point sémaphore et, éventuellement, en un numéro de sous-système. La fonction de routage englobe des dispositions pour la gestion des encombrements afin de réduire le trafic en cas d'encombrement du MTP, du SCCP et des nœuds du SCCP.

Le sous-système SCCP fournit aussi une fonction de gestion qui commande la disponibilité des «sous-systèmes» et diffuse cette information à d'autres nœuds du réseau, qui ont besoin d'être renseignés sur l'état de fonctionnement du «sous-système». Un «sous-système» du SCCP est un utilisateur du SCCP.

Le SCCP est conçu pour fournir des fonctions de compatibilité visant à une utilisation transparente et optimale des diverses catégories de réseaux MTP (réseaux mettant en œuvre des liaisons à bande étroite ou à large bande, comme pour le mode ATM). Malheureusement, dans la version actuelle des textes cette fonction est fournie exclusivement aux services exploités en mode sans connexion. L'étude devra être poursuivie pour étendre la fonction aux services avec connexion.

Pour plus de détails, on se reportera aux Recommandations UIT-T Q.711 à Q.716.

Fonction d'acheminement

L'adressage est le premier aspect essentiel d'une communication, celui qui permet d'associer deux utilisateurs du sous-système SCCP. Grâce au SCCP, les utilisateurs peuvent employer l'adressage logique de l'entité distante. Dans un cas de ce genre, la traduction de l'appellation globale fournit une adresse dans le réseau SS7 (par exemple, l'adresse physique de l'utilisateur distant considéré). S'il n'est pas possible de réaliser localement l'association entre l'adresse logique et l'adresse physique finale, le SCCP délivre le message au nœud SCCP suivant, qui sera chargé de mener à bien cette association. Cette transmission se fait jusqu'à ce qu'une traduction dans un nœud SCCP le long du trajet fournisse l'association finale entre l'adresse considérée et un utilisateur local du sous-système SCCP.

La fonction d'acheminement du SCCP (SCRC: *SCCP routing function*) utilise trois éléments d'information d'adressage:

- 1) **Code de point sémaphore (PC: *point code*)**. Ce code identifie de façon univoque un nœud dans un réseau SS7 (sous-système MTP). Il identifie le nœud SCCP suivant.
- 2) **Appellation globale (GT: *global title*)**. Il s'agit d'une adresse utilisée par le sous-système SCCP, composée de chiffres de numérotation d'une autre forme d'adresse, qui ne sera pas reconnue par la couche réseau du SS7. Cette information doit donc être traduite en une adresse de réseau SS7.
- 3) **Numéro de sous-système (SSN: *sub-system number*)**. Le numéro identifie un sous-système auquel on accède via le SCCP à l'intérieur d'un nœud. Il peut s'agir d'un sous-système (par exemple, la gestion du SCCP ou une entité d'application qui contient la couche TCAP).

Selon le rang de priorité du message et le degré d'encombrement de la destination (le nœud suivant dans le SCCP) déterminé à partir de l'appellation globale GT, le message est envoyé ou rejeté.

Une segmentation est effectuée, ou non, selon les capacités du réseau tout le long du trajet.

Services en mode sans connexion

En appliquant les classes de protocole en mode sans connexion, on dispose des moyens nécessaires pour transmettre un message d'utilisateur après l'avoir mis dans le domaine «données» d'un message SCCP.

Lorsqu'un message en mode sans connexion n'est pas suffisant pour acheminer les données d'utilisateur utilisant des services MTP fournis par un réseau MTP à bande étroite qui admet une taille maximale de 272 octets pour le message MTP, y compris l'étiquette d'acheminement MTP, il est prévu une fonction de segmentation/réassemblage pour les classes de protocole 0 et 1. En pareil cas, le SCCP au nœud d'origine ou au nœud relais partage l'information en plusieurs segments avant de les transférer dans le domaine «données» des messages SCCP. Au nœud de destination, les segments sont réassemblés avant leur remise à l'utilisateur.

Si on a la certitude que seuls des services MTP transmettant des messages longs (conformes à la Recommandation Q.2210) sont utilisés dans le réseau, aucune segmentation de l'information n'est alors nécessaire.

Protocole de classe 0

C'est au nœud d'origine que les couches supérieures remettent au SCCP les données d'utilisation et c'est au nœud de destination que le SCCP les remet aux couches supérieures. Comme ces données sont transférées indépendamment les unes des autres, elles peuvent être remises dans un ordre quelconque à l'utilisateur du SCCP. Dans cette classe de protocole, le service réseau est donc bien sans connexion.

Protocole de classe 1

Les fonctions relevant de ce protocole ont, par rapport à celles de la classe 0, une caractéristique supplémentaire (le paramètre de séquençement contenu dans la primitive de demande), qui permet à la couche supérieure d'informer le SCCP que les données d'utilisateur comprises dans un certain train de données seront livrées dans l'ordre ou elles lui ont été remises. Le SCCP d'origine se fonde sur la valeur de paramètre de séquençement pour coder le paramètre de sélection du canal sémaphore (SLS: *signalling link selection*) utilisé pour l'acheminement dans le sous-système SCCP du MTP. Le code SLS est identique pour toutes les données d'utilisateur d'un train considéré ayant le même paramètre de séquençement. Le MTP code ensuite le domaine SLS qui figure dans l'étiquette d'acheminement des messages MTP véhiculant les données; ce codage est effectué de telle façon que le MTP et le SCCP maintiennent le séquençement des messages dans les conditions normales d'exploitation. Compte tenu des contraintes précitées, le SCCP et le MTP assurent ensemble une remise séquentielle à l'utilisateur. La classe de protocole 1 correspond donc à un service réseau en mode sans connexion d'une catégorie améliorée, l'amélioration consistant en une remise séquentielle.

Service en mode connexion

Les classes de protocole en mode connexion (classes 2 et 3) offrent le moyen d'établir des connexions sémaphores afin d'échanger un certain nombre de messages d'utilisateur. Elles offrent aussi des possibilités de segmentation et de réassemblage des messages. S'il se présente un message d'utilisateur plus long que 255 octets, au nœud d'origine de la connexion, le SCCP la fractionne en plusieurs segments et les transfère dans le domaine «données» des messages SCCP. Chaque segment a une longueur inférieure ou égale à 255 octets. Au nœud de destination, le SCCP correspondant réassemble ces segments pour reconstituer le message d'utilisateur avant sa remise à l'utilisateur.

Protocole de classe 2

Selon le protocole de la classe 2, pour transmettre des données d'utilisateur dans les deux sens entre l'utilisateur du SCCP au nœud d'origine et l'utilisateur du SCCP au nœud de destination, les SCCP concernés établissent une connexion sémaphore temporaire ou permanente comprenant une ou plusieurs sections de connexion. Il est possible de multiplexer des connexions sémaphores sur la même relation sémaphore. Dans un train multiplexé de ce type, on identifie chaque connexion sémaphore en utilisant une paire de numéros de «référence locale». Afin d'assurer le séquençement des messages qui empruntent une certaine connexion sémaphore, on inscrit le même code dans le domaine SLS de chacun d'eux comme indiqué dans le paragraphe relatif au mode sans connexion avec remise en séquence. Ainsi, la classe 2 correspond à un service réseau en mode connexion de base qui ne comporte pas de régulation de trafic, ni de détection de perte ou de mauvais séquençement.

Protocole de classe 3

Par rapport à la classe 2, les fonctions de la classe 3 sont complétées par la régulation de trafic, avec la possibilité corollaire de transfert de données exprès. Une possibilité supplémentaire est aussi la détection d'une perte ou d'une arrivée hors séquence des messages pour chaque section de connexion; si une telle éventualité se produit, le SCCP réinitialise la connexion sémaphore et notifie cet événement aux couches supérieures.

Gestion

Le but de la gestion du SCCP est de fournir des procédures pour maintenir les performances du réseau en réacheminant ou en régulant le trafic en cas de panne de réseau.

A cette fin, des procédures du SCCP sont basées sur:

- 1) l'information relative aux pannes, aux rétablissements et à l'encombrement fournie par les primitives d'indication de la gestion du MTP (indication MTP-PAUSE, indication MTP-RESUME et indication MTP-STATUS);
- 2) l'information de panne et de rétablissement d'un sous-système et d'encombrement du SCCP (SSN=1) reçue dans les messages de gestion du SCCP.

La fonction de gestion du SCCP tient à jour l'état des nœuds du SCCP distants et l'état des sous-systèmes distants ou locaux. Elle informe les usagers locaux par des diffusions locales, et les nœuds SCCP distants par des diffusions ou par des réponses aux messages reçus.

Cette fonction de gestion coopère avec la commande d'acheminement du SCCP (y compris la fonction de traduction) pour arrêter les trafics vers les destinations inaccessibles et assurer le réacheminement du trafic en choisissant des voies détournées ou des sous-systèmes distants de remplacement.

L'information de gestion SCCP est transportée dans le service SCCP en mode sans connexion.

4.2.2.3 Evolution future

On ne prévoit pas de perfectionnements majeurs.

4.2.3 Gestionnaire de transactions (TC)

4.2.3.1 Introduction

Le gestionnaire de transactions (TC: *transaction capabilities*) du Système de signalisation N° 7 fournit une assistance dans des applications de signalisation interactives non associées à un circuit support. Parmi les applications typiques, on peut citer les interactions entre un centre de commutation et une base de données extérieures, ou entre deux bases de données. Actuellement, les principaux utilisateurs relèvent du domaine des réseaux intelligents (sous-système application du réseau intelligent, INAP) et des réseaux mobiles (sous-système application mobile, MAP). Le gestionnaire TC peut être considéré comme une réalisation particulière du paradigme des opérations distantes défini dans la Recommandation UIT-T X.880 (ROS). Les interactions entre les utilisateurs du TC sont modélisées par des opérations. Une opération est appelée par une entité (origine); l'autre entité (destination) essaie d'exécuter l'opération et, éventuellement, signale le résultat de cette tentative.

4.2.3.2 Description

La meilleure façon de définir le gestionnaire TC est de le considérer comme un ensemble qui met en œuvre un mécanisme d'appel de procédure à l'extrémité éloignée (RPC: *remote procedure call*) sur les réseaux SS7. Dans l'analogie OSI, il peut être comparé à l'ensemble formé par l'élément de service des opérations distantes (ROSE – Voir les Recommandations UIT-T X.881 et X.882) et l'élément de service de contrôle d'association (ACSE – Voir les Recommandations X.217 et X.227) et, d'une certaine manière, la couche présentation (voir les Recommandations X.216 et X.226).

La modélisation du gestionnaire TC montre qu'il se compose de deux sous-couches:

- a) la sous-couche composant (CSL: *component sub-layer*), qui fournit le service d'opérations distantes proprement dit et qui permet à l'utilisateur du TC de contrôler l'association (éventuelle) sur laquelle s'effectue l'échange des demandes et des réponses;
- b) la sous-couche transaction (TSL: *transaction sub-layer*), qui fournit (si nécessaire) un service de connexion de bout en bout entre deux entités du gestionnaire TC.

Sous-couche transaction: La sous-couche transaction est en interface directe avec le sous-système commande des connexions sémaphores (SCCP), qui fournit le service de réseau en mode sans connexion dans le SS7. D'une certaine manière, cette sous-couche remplace une fonctionnalité (manquante) de couche transport. Par analogie avec la couche transport, la sous-couche TSL est utilisée soit en mode connexion, ce qui entraîne l'établissement d'une transaction, soit en mode sans connexion. La TSL utilise les messages suivants pour transporter les unités de données protocolaires qui sont échangées entre deux sous-couches composant:

- Le message «Begin» est utilisé pour ouvrir une transaction.
- Le message «Continue» est utilisé pour transférer de l'information pendant une transaction établie.
- Le message «End» (Fin) est utilisé pour fermer une transaction.
- Le message «Abort» (abandon) est utilisé pour refuser une transaction, ou pour abandonner une transaction établie, en cas d'erreurs de protocole.

Chaque message peut transporter une ou plusieurs unités de données protocolaires générées par la sous-couche composant.

Sous-couche composant: La sous-couche composant se subdivise en deux blocs fonctionnels:

- a) Le bloc de traitement de composant (CHA: *component handling*), qui fournit le service d'opérations distantes (noyau).
- b) Le bloc de traitement de dialogue (DHA: *dialogue handling*), qui fournit une simple fonction de commande d'association.

Les unités de données protocolaires générées par le CHA portent le nom de «composant». Ce sont:

- Le composant «Invoke» (Invocation, lancement d'opération), utilisé pour demander à un utilisateur distant d'entreprendre une action (exécution d'une opération).
- Les composants «Return Result Not Last» (résultat partiel) et «Return Result Last» (résultat complet), utilisés pour signaler le succès d'une opération.
- Le composant «Return Error» (résultat négatif), utilisé pour signaler l'échec d'une opération.
- Le composant «Return Reject» (rejet), utilisé pour signaler une erreur de protocole.

Les unités de données protocolaires (PDU: *protocol data units*) sont intégralement alignées sur celles définies dans la Recommandation UIT-T X.880, avec une extension. Cette unité ajoutée est une PDU spécifique, unité «résultat partiel», dont la seule fonction est de transporter des segments du résultat d'une opération effectuée avec succès, dont la longueur est supérieure à la longueur maximum des données d'utilisateur du sous-système SCCP en mode sans connexion.

Les services DHA ont pour fonction de commander l'établissement et la libération d'un dialogue (association). La commande de l'établissement d'un dialogue suppose l'aptitude à négocier un contexte d'application. Le dispositif DHA permet aussi à l'utilisateur du gestionnaire TC de commander la concaténation d'une ou de plusieurs unités PDU dans un même message TSL. Les unités de données protocolaires du DHA sont un sous-ensemble des PDU définies dans la Recommandation X.217 pour l'élément de service de contrôle d'association (ACSE: *association control service element*).

4.2.3.3 Evolution future

Il n'est pas prévu d'apporter dans l'avenir des modifications aux Recommandations relatives au gestionnaire TC. Il est possible que l'on définisse de nouveaux éléments communs de la couche application (par exemple, pour la gestion de la sécurité), à utiliser conjointement avec le TC. On pense néanmoins, que cela n'obligera pas à perfectionner le gestionnaire TC.

4.2.3.4 Synoptique

Les Recommandations suivantes de l'UIT-T définissent actuellement le gestionnaire de transactions du Système de signalisation N° 7:

- Recommandation Q.771 (06/97): Gestionnaire de transactions – Description fonctionnelle du gestionnaire de transactions.
- Recommandation Q.772 (06/97): Gestionnaire de transactions – Définition des éléments d'information du gestionnaire de transactions.
- Recommandation Q.773 (06/97): Gestionnaire de transactions – Formats et codes du gestionnaire de transactions.
- Recommandations Q.774 (06/97): Gestionnaire de transactions – Procédures du gestionnaire de transactions.
- Recommandations Q.775 (06/97): Gestionnaire de transactions – Guide d'utilisation du gestionnaire de transactions.

4.2.4 Sous-système utilisateur pour le RNIS (ISUP)

4.2.4.1 Introduction

Depuis les années 80, les communications téléphoniques ont évolué: on est passé de communications simples, consistant à établir un circuit entre deux usagers, pour aboutir à des communications de plus en plus compliquées, avec des services nouveaux pour les usagers et des fonctions nouvelles dans les réseaux. Cela a nécessité la définition d'un nouveau protocole de signalisation capable d'assurer le transport d'une grande quantité d'information, vers l'aval comme vers l'amont, pendant l'établissement de la communication et pendant la communication elle-même. Le sous-système utilisateur pour le RNIS (ISUP: ISDN *user part*) a été défini pour prendre en compte le RNIS, en l'occurrence pour que les services des abonnés du RNIS puissent être pris en compte tout en offrant de nouveaux services aux «abonnés analogiques» et tout en répondant à des besoins nouveaux découlant du concept de réseau intelligent (IN: *intelligent network*).

4.2.4.2 Description

4.2.4.2.1 Identification et acheminement des appels

L'information de signalisation est transmise sur des canaux sémaphores spécialisés, indépendants du circuit. De ce fait, chaque message contient une information qui permet à tous les commutateurs intervenant dans une communication de lier, à l'intérieur de cette communication, tous les messages qu'ils échangent entre eux, et aussi de lier ces messages au circuit qui a été pris pour la communication. Chaque message contient une étiquette d'acheminement, définie dans la Recommandation relative au sous-système transport de messages (code du point d'origine: code de point du commutateur émetteur; code du point de destination: code de point du commutateur adjacent) et le CIC (code d'identification de circuit: identité de circuit unique entre deux commutateurs adjacents). Le message initial d'adresse (IAM: *initial address message*), premier message dans l'établissement de la communication, contient l'adresse du demandé (adresse E.164 de l'utilisateur appelé), utilisée pour acheminer l'appel. De cette façon, tous les commutateurs situés sur l'itinéraire de l'appel reconnaissent que chaque message, quel que soit son sens de transmission, se rapporte à un appel unique.

4.2.4.2.2 Syntaxe du sous-système ISUP

La signalisation ISUP repose sur des messages. Chaque message ISUP est contenu dans le champ d'information d'un message MTP. Comme indiqué plus haut, chaque message contient l'étiquette d'acheminement, suivie du code CIC, du code de type de message et de l'information d'application. Cette information se compose des éléments suivants: des paramètres obligatoires de longueur fixe, des pointeurs pour chaque paramètre obligatoire de longueur variable et pour la partie facultative, les paramètres obligatoires de longueur variable, des paramètres facultatifs de longueur variable.

4.2.4.2.3 Fonctions du sous-système ISUP

L'objectif de l'ISUP est de fournir des services supports de base et des services complémentaires pour les applications dans un réseau numérique à intégration de services.

4.2.4.2.3.1 Services de base

L'ISUP fournit généralement trois services de base: transmission vocale, audio 3,1 kHz et 64 bits/s, mais il est capable de fournir un multidébit et $N \times 64$ kbit/s. Ce service support est initié par le commutateur local d'origine dans le cas où l'abonné demandeur est desservi en analogique (le plus souvent, 3,1 kHz), ou par le demandeur RNIS dans le message d'établissement DSS1.

S'agissant de l'acheminement, outre le numéro de l'utilisateur appelé, l'ISUP permet de demander la signalisation ISUP (préférentielle ou obligatoire) et d'indiquer vers l'amont si l'ISUP a été utilisé.

De plus, les messages ISUP transportent des éléments d'information fournis par les usagers du RNIS.

Le sous-système ISUP met aussi à disposition des procédures pour la supervision des circuits (blocage, déblocage, réinitialisation) et pour la limitation de l'écho.

4.2.4.2.3.2 Segmentation simple

La procédure de segmentation simple utilise le message de segmentation pour transmettre un segment additionnel afin de transporter certains messages dont le contenu dépasse 272 octets (limite du sous-système MTP) mais est inférieur à 544 octets.

4.2.4.2.3.3 Compatibilité

Un des principaux problèmes posés par le protocole ISUP réside dans le fait que deux commutateurs peuvent être interconnectés sans avoir exactement la même implémentation du sous-système ISUP. Avant la version ISUP 92, quand un commutateur recevait un message ou un paramètre qu'il ne reconnaissait pas, l'information non reconnue devait être rejetée. Dans ISUP 92, on a introduit le perfectionnement suivant: chaque nouveau message ou paramètre est accompagné d'une information de compatibilité indiquant aux commutateurs qui ne reconnaissent pas le message ou le paramètre ce qu'ils doivent faire (rejet, retransmission, libération de l'appel, ...). Cela permet d'apporter des améliorations à certains commutateurs du réseau (commutateurs locaux), sans être obligé d'apporter ces améliorations à d'autres commutateurs (commutateurs de transit).

4.2.4.2.3.4 Mécanisme de transport d'application (APM)

Dans la version ISUP 2000, on a introduit le mécanisme APM (*application transport mechanism*) pour le transport d'informations intégrées se rapportant à des applications spécifiques telles que le réseau privé virtuel (VPN: *virtual private network*). L'APM est un mécanisme appliqué par le sous-système ISUP, par l'intermédiaire d'un paramètre spécifique transporté par les messages de traitement des appels, ou par un message spécifique (partie de l'ISUP) lorsque des messages de traitement des appels ne sont pas disponibles au moment où l'information ISUP doit être envoyée.

4.2.4.2.3.5 Services complémentaires

Le sous-système ISUP fournit plusieurs services. La mise en œuvre de ces services est soit fondée sur l'ISUP lui-même, soit associée à des procédures génériques qui tiennent compte du niveau SCCP. Pour certains services complémentaires, l'ISUP transporte des informations qui doivent être traitées par des commutateurs. Pour d'autres services, l'ISUP n'est rien d'autre qu'un moyen de transmettre de l'information de notification, notamment lorsqu'un service complémentaire est fourni à l'échelon local, par exemple sur un accès au système DSS1.

Chaque «version» du sous-système ISUP donne la liste de services complémentaires pris en charge par l'ISUP. On trouvera ci-après quelques exemples de ces services complémentaires:

- Identification de la ligne appelante/Restriction d'identification de la ligne appelante (CLIP/CLIR: *calling line identification presentation/restriction*): le numéro du demandé est transmis dans le message initial d'adresse pour être affiché à l'accès de destination.
- Groupe fermé d'utilisateurs (CUG: *closed user group*): l'information CUG est transmise par le message initial d'adresse pour être analysée par l'application CUG dans les commutateurs concernés.
- Signalisation d'utilisateur à utilisateur (UUS: *user-to-user signalling*): ce service RNIS consiste en un échange d'information entre utilisateurs du RNIS.
- Renvoi d'appel inconditionnel, sur non-réponse, sur occupation (CFU, CFNR, CFB: *call forwarding unconditional, no reply, busy*): l'information relative au type de renvoi d'appel et à l'identité du demandé est transmise pour traitement (par exemple, aux fins de taxation) ou pour affichage dans les commutateurs locaux ou sur les accès au système DSS1.
- Rappel automatique sur occupation (CCBS: *completion of calls to busy subscriber*): ce service, initié par le message de libération ISUP, indique au commutateur local d'origine que le poste appelé occupé pourra être rappelé lorsqu'il sera libre. Le reste de la procédure est pris en charge par le sous-système SCCP.

4.2.4.3 Evolution future

On travaille actuellement au perfectionnement du protocole ISUP pour prendre en compte des besoins nouveaux. Dans ISUP 2000, par exemple, on considère la portabilité du numéro, c'est-à-dire des procédures nouvelles telles que le réacheminement et l'acheminement avec pivot, et de nouvelles informations ont été introduites. D'autres exigences découlent des réseaux intelligents (IN: *intelligent networks*). En effet, les services IN ont besoin d'échanges d'information de plus en plus fournis entre nœuds IN, ou entre ces nœuds et les commutateurs ou les utilisateurs.

Une autre évolution à signaler est l'utilisation du sous-système ISUP pour la prise en charge de nouveaux supports tels qu'ATM ou IP. Pour accélérer la mise en place des réseaux de base ATM/IP, on a lancé une étude qui vise la spécification d'un nouvel ISUP, basé sur l'ISUP à bande étroite (N-ISUP) et capable de traiter les appels indépendamment du support, le résultat de cette étude sera un nouveau protocole ISUP, qui interfonctionnera avec le N-ISUP.

4.2.4.4 Synoptique (Q.761 à Q.764 et série Q.730)

2000: ISUP 2000 (APM, VPN, portabilité du numéro IN CS2, nouveaux services complémentaires)

1997: ISUP 97 (nouvelles procédures, IN CS1, nouveaux services complémentaires)

1993: ISUP 92 Livre blanc (segmentation, compatibilité, nouveaux services complémentaires)

1991: ISUP, Q.767 (sous-ensemble d'ISUP pour une interface internationale)

1988: ISUP, Livre bleu

4.2.5 Sous-système application du réseau intelligent (INAP)

4.2.5.1 Introduction

Les télécommunications modernes offrent aujourd'hui un large éventail de services. Avec la libéralisation du marché, il est devenu possible d'élargir le choix des fonctions proposées aux usagers, tout en accroissant les recettes des opérateurs et des prestataires de services.

Pour s'engager avec succès dans la concurrence et profiter au maximum des nouvelles opportunités qui s'offrent, les opérateurs des réseaux doivent envisager sous un jour nouveau l'infrastructure, les coûts de revient et la souplesse d'exploitation de leurs réseaux, et adapter les services à l'évolution de la demande des usagers.

La mise en œuvre de la solution réseau intelligent (IN) est une réponse à ce défi de notre temps, solution applicable à tous les réseaux. Le grand avantage du réseau IN est son aptitude:

- à faciliter l'introduction de nouveaux services sans nuire à la structure du réseau;
- à personnaliser les services en fonction des besoins individuels;
- à permettre une évolution harmonieuse vers plus de qualité;
- à valoriser les sources de recettes et à rémunérer rapidement l'investissement;
- à abaisser le coût de l'exploitation des services dans le réseau;
- à garantir l'indépendance du fournisseur;
- à créer des interfaces ouvertes.

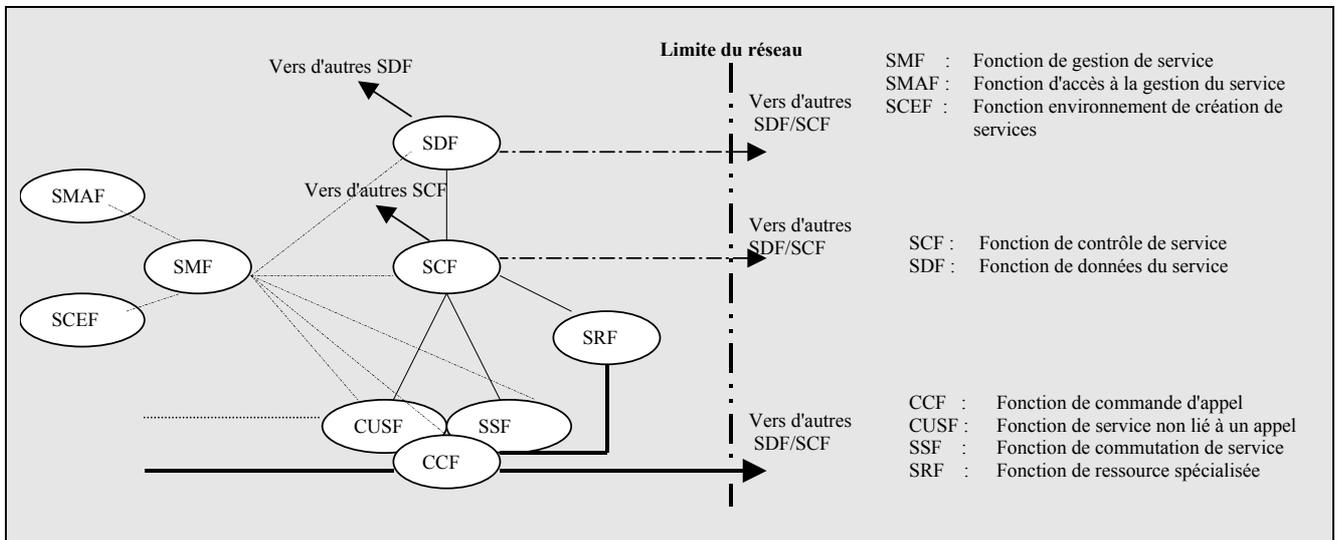
4.2.5.2 Description

Le réseau intelligent est un concept architectural destiné à être appliqué à divers types de réseaux (fixes, mobiles, Internet, données, etc.) ainsi qu'à des communications à bande étroite, de données en multimédias.

Un processus de normalisation par étapes a été lancé; il doit déboucher sur les Recommandations relatives à l'ensemble de capacités 3. Pour assurer une évolution régulière vers l'objectif visé, chaque ensemble de capacités du réseau intelligent spécifié dans les Recommandations permet la compatibilité vers l'amont et une structure ouverte vers le long terme.

Un réseau intelligent se compose d'un ensemble d'entités fonctionnelles qui s'articulent les unes aux autres comme le montre la Figure 4-1. Chacune de ces entités pourrait être prise en charge par un nœud physique indépendant, mais elles pourraient aussi être implantées sur la même plate-forme. La modularité de l'intégration permet à un opérateur d'entrer dans les services IN à un niveau bas, mais aussi d'évoluer par la suite vers des solutions IN plus globales.

Figure 4.1 – Entités fonctionnelles d'un réseau intelligent



La CCF est la fonction de commande d'appel (*call control function*) dans le réseau. Elle effectue la commande de traitement des appels et des connexions.

La SSF identifie un appel IN ainsi que les services demandés et exécute les ordres de la fonction SCF. Le plus souvent, la SSF est prise en charge par un commutateur, par exemple dans un réseau fixe ou mobile.

La CUSF est l'homologue de la SSF pour les appels qui ne nécessitent pas l'utilisation d'un support.

La SCF contient les fonctions temps réel des scénarios de service. Elle surveille les événements par l'intermédiaire de la SSF, demande le guide vocal et reçoit la commande de l'utilisateur par l'intermédiaire de ressources spécialisées gérées par la fonction SRF.

La SDF est la base de données qui contient toutes les données du service, par exemple le profil de l'utilisateur des services du réseau intelligent (IN).

La SMF centralise toutes les fonctions nécessaires à la gestion et à la personnalisation des services. Elle configure les alarmes, et d'autres fonctions connexes.

La SMAF fournit une interface entre les gestionnaires des services et la SMF.

La SCEF est l'outil logiciel qui permet la création et le développement des services.

Ces entités fonctionnelles échangent des informations via des interfaces normalisées, avec codage par la méthode ASN.1. Le transport s'effectue le plus souvent par le système TCAP/SCCP du SS7, mais rien n'empêche l'utilisation de la technologie TCP/IP.

Les Recommandations relatives à l'ensemble de capacités 1 (CS1) décrivent le premier ensemble de base des capacités du réseau intelligent applicables à une communication entre deux correspondants. Ces capacités permettent aux services de fournir:

- un déclenchement souple,
- un acheminement souple,
- une taxation souple,
- une interaction souple entre les utilisateurs.

Ces capacités ont permis de mettre en place une vaste gamme de services CS1 dans le réseau intelligent, par exemple toute la série des services sur télécarte (prépaiement et postpaiement), les services des réseaux privés virtuels, les services sur numéros 800, la mobilité des utilisateurs (télécommunications personnelles universelles).

Les Recommandations CS2 élargissent le champ d'application en ajoutant:

- la commande souple des connexions, qui permet de superviser les communications IN dans lesquelles interviennent plusieurs utilisateurs;
- l'interface entre opérateurs: voir SCF-SDF, SDF-SDF et autres fonctions, dans la Figure 4-1;
- le service pour appels sans utilisation d'un support: par exemple, pour la gestion de la mobilité, voir CUSF dans la Figure 4-1.

Les services CS2 n'existent pas encore. Il est certain qu'ils seront beaucoup plus orientés vers l'utilisateur que vers le réseau.

La spécification de l'ensemble CS3 est en cours de maturation. Cet ensemble pourrait être considéré comme un perfectionnement de CS2, car il n'ajoute pas vraiment d'importantes caractéristiques nouvelles.

On trouvera d'autres informations sur ces sujets, au § 2.3 du Fascicule 2.

4.2.5.3 Exploitation future

L'avenir du réseau intelligent est un avenir ouvert à l'innovation. Les problèmes les plus importants à l'ordre du jour sont l'intégration du réseau Internet, l'adaptation à la technologie de transmission de la voix par Internet et la question de la mobilité avec le concept de l'environnement virtuel d'origine applicable à la nouvelle génération de réseaux mobiles dans la famille des IMT-2000.

4.2.5.4 Synoptique

IN, ensemble de capacités 1: Q.1214 à Q.1219, mai 1995.

IN, ensemble de capacités 2: Q.1224 à Q.1229, septembre 1997.

IN, ensemble de capacités 3: Q.1231 et Q.1238, détermination: décembre 1999.

IN, ensemble de capacités 4: Q.1241 et Q.1248, détermination prévue pour 2001.

4.3 Système de signalisation d'abonné numérique N° 1 (DSS1)

4.3.1 Introduction

Les protocoles RNIS étendent la signalisation par canal sémaphore aux équipements terminaux situés dans les locaux des abonnés. Le canal D d'une ligne d'accès utilisateur-réseau transmet la signalisation pour les canaux appartenant à la même ligne. Ce canal D a essentiellement pour objet de mettre à disposition tous les services du RNIS, de façon intégrée. Il a vocation à être utilisé par de nombreux types d'équipements d'abonné susceptibles d'accéder à des réseaux publics et privés.

Le protocole du canal D est structuré en couches:

Le niveau physique (couche 1) de l'interface usager-réseau est défini à l'interface S (point à multipoint) ou à l'interface T (point à point) en accès au débit de base (2 B + D) ou au débit primaire (30 B + D).

Le niveau liaison (couche 2) prend en charge la transmission des trames entre les deux entités situées de part et d'autre de l'interface.

Le niveau réseau (couche 3) assure la commande et la supervision des appels ainsi que la fourniture des services complémentaires. On l'appelle le Système de signalisation d'abonné numérique N° 1 (DSS1: *digital subscriber signalling system number 1*).

4.3.2 Description

4.3.2.1 Commande de l'appel

Les fonctions du DSS1 pour la commande de l'appel prennent en charge le traitement des messages et la gestion des ressources affectées à l'appel, pour les modes circuit, paquet et sans connexion.

4.3.2.1.1 Structure du protocole

La communication entre l'utilisateur et le réseau aux fins de la commande de l'appel s'effectue au moyen de messages de longueur variable. Le système DSS1 contient une procédure qui réalise l'opération suivante: les messages dont la longueur est supérieure à celle des trames que la couche liaison de données peut tolérer sont divisés en plusieurs segments.

On a spécifié plusieurs types de messages, chacun d'eux déterminant une action côté usager ou côté réseau. Par exemple:

- SETUP pour une demande d'établissement de communication.
- CALL PROCEEDING, en réponse à SETUP, indique que l'information d'appel est complète et que la communication est en cours d'établissement.
- ALERTING indique qu'un avertissement est envoyé à l'abonné demandé.
- CONNECT est le message envoyé après la réponse du demandé.
- DISCONNECT, RELEASE et RELEASE COMPLETE: messages envoyés pour libérer la communication.

Chaque message contient des éléments d'information généralement de longueur variable, qui définissent le type de demande, les ressources à réserver, les caractéristiques de l'adressage ou le résultat d'une opération de traitement. Par exemple:

- «Capacité du support» indique le service support demandé qui devra être fourni par le réseau (mode circuit/mode paquet, parole/64 kbit/s, etc.)
- «Identification du canal» indique si le canal B ou le canal D doit être utilisé pour l'appel.
- «Compatibilité de couche supérieure» fournit un moyen que l'utilisateur distant devra utiliser pour le contrôle de compatibilité.
- «Numéro du demandeur» et «Numéro du demandé» fournissent une information d'adressage.

4.3.2.1.2 Commande des appels à commutation de circuit

Chaque appel est assorti d'une référence d'appel, choisie par le demandeur. Le canal B ou les canaux B à utiliser font l'objet d'une négociation lors de l'établissement de l'appel, entre l'utilisateur et le réseau.

Les indications et adresses de service sont fournies par le terminal appelant. Elles déterminent les fonctions à exécuter dans le réseau et permettent de choisir le terminal ou les terminaux appropriés dans les locaux de l'abonné demandé.

4.3.2.1.3 Commande des appels à commutation par paquets

Les usagers du RNIS peuvent accéder aux services à commutation par paquets fournis par un réseau public pour données à commutation par paquets (RPDCP), ou par une fonction de traitement de paquets dans le RNIS.

Lorsque le transfert de l'information se fait par un canal B, la procédure du canal D pour l'établissement de la connexion est la même que pour un appel à commutation de circuit. Le paquet de demande d'appel est envoyé après que la liaison physique a été établie.

Le canal D peut aussi être utilisé pour le transfert des paquets.

4.3.2.2 Commande des services complémentaires

Trois méthodes sont spécifiées pour la commande des services complémentaires: la procédure avec stimuli, la procédure de gestion des touches de fonction et la procédure fonctionnelle.

Dans le protocole avec stimuli, l'utilisateur émet sa demande en pressant une touche de fonction ou des touches numériques. La demande n'est pas interprétée par le terminal, qui l'insère dans le ou les éléments d'information «clavier» du ou des messages SETUP ou INFORMATION, et qui ne tient pas compte du type de la demande.

Dans le sens de transmission de l'utilisateur vers le réseau, l'information est donnée dans l'élément d'information «Affichage» et visualisée sur le terminal sans interprétation.

Seul le réseau analyse l'information, pour déterminer les actions nécessaires à entreprendre, ce qui n'oblige pas à normaliser les services complémentaires sur l'interface utilisateur-réseau. La procédure avec stimuli permet de simplifier le terminal et facilite l'introduction de nouveaux services complémentaires.

La procédure de gestion de touches de fonction est aussi une procédure avec stimuli, en ce sens que l'équipement terminal de l'utilisateur n'a pas besoin de savoir quel service complémentaire est demandé.

Cette procédure repose sur l'utilisation de deux éléments d'information. L'élément d'information «Activation de fonction» peut-être inclus dans les messages SETUP et INFORMATION, dans le sens de transmission de l'utilisateur vers le réseau. L'élément d'information «Indication de fonction» peut être incluse dans les messages de commande de base de l'appel, dans le sens du réseau vers l'utilisateur.

Le service complémentaire associé à l'identificateur de fonction dépend du prestataire de service. Il doit faire l'objet d'une coordination entre l'utilisateur et le prestataire de service au moment de la conclusion de l'abonnement.

Dans la procédure fonctionnelle, le terminal analyse l'information d'entrée de l'utilisateur et insère la demande dans un élément d'information spécialisé ou dans l'élément d'information «Fonctionnalité» qui est commun à plusieurs services complémentaires et qui figure dans le message de commande d'appel ou dans le message FACILITY.

Le terminal et le réseau analysent l'information, de sorte que la procédure fonctionnelle doit être définie avec précision pour tous les services complémentaires. Le protocole fonctionnel permet de spécifier des services complémentaires puissants.

4.3.2.3 Evolution future

On ne cesse de définir de nouveaux services complémentaires dans la procédure fonctionnelle.

Le système DSS1 a aussi été étendu récemment au traitement des appels échangés entre les utilisateurs dans un réseau de télécommunication d'entreprise.

On apporte actuellement des perfectionnements au protocole DSS1 pour tenir compte de besoins nouveaux liés au traitement des services complémentaires par les serveurs des réseaux intelligents, traitement transparent pour le commutateur d'origine.

4.4 Signalisation à large bande

4.4.1 Couches inférieures prenant en charge la signalisation du RNIS-LB

Interface utilisateur-réseau (UNI)

Le transfert de l'information de signalisation DSS2 à l'interface UNI (user-network interface) met en œuvre la pile de protocole suivante:

DSS2
SAAL
ATM (I.361)
PH (I.432)

Les couches PH et ATM ne sont pas spécifiques à la signalisation, elles sont les mêmes pour le plan utilisateur et pour le plan commande (UNI et NNI). La couche physique peut être l'un quelconque des systèmes de transmission capables de transporter les cellules ATM. La couche ATM permet le multiplexage de l'information de signalisation avec l'information du plan utilisateur sur la même couche physique. Comme pour VPI, VCI = 5 est réservé exclusivement au transport de l'information de signalisation. A l'interface UNI, le VPI utilisé dépend de la configuration de l'accès à l'interface UNI. Par défaut, on utilise VPI = 0.

Interface réseau-réseau (NNI)

A l'interface NNI (*network-network interface*), il est possible d'utiliser le réseau ATM ou, à titre d'option nationale, le Système de signalisation N° 7 pour transférer l'information de signalisation. Dans le cas du réseau ATM, la pile de protocole mise en œuvre est la suivante:

B-ISUP
B-MTP 3 (Q.2210)
SAAL
ATM (I.361)
PH (I.432)

B-MTP 3 est une extrapolation du sous-système MTP 3 du RNIS-BE, incluant des modifications à appliquer au-dessus de la couche SAAL. Ces modifications sont les suivantes:

- Primitives du sous-système B-MTP 3 dans la couche SAAL.
- Nouvelles valeurs de code pour identifier le sous-système B-ISUP (par exemple, nouvel indicateur de service).
- La taille maximale de l'unité de données de service est portée de 272 octets à 4 091 octets.
- Adaptation de la procédure de passage sur canal sémaphore de secours.

Lorsque le réseau du système de signalisation est utilisé, à titre d'option nationale, la pile de protocole est la suivante:

B-ISUP
MTP 3 (Q.704)
MTP 2 (Q.703)
MTP 1 (Q.702)

On notera que dans ce cas, il convient d'utiliser la fonction de segmentation définie dans le sous-système B-ISUP.

Couche d'adaptation ATM de signalisation (SAAL)

La couche d'adaptation ATM (AAL) valorise les services fournis par la couche ATM en ce qui concerne la prise en charge des fonctions nécessaires pour la couche supérieure. La couche SAAL (*signalling ATM adaptation layer*) est un cas particulier d'AAL utilisé pour la signalisation. Comme indiqué dans les figures précédentes, la couche SAAL est utilisée des deux côtés (interfaces UNI et NNI).

La couche SAAL se compose de deux sous-couches: une partie commune et une partie propre au service. La SAAL utilise la partie commune et la partie propre au service de l'AAL de type 5 telle que définie dans la Recommandation UIT-T I.363.5. Pour la couche SAAL, les fonctions propres au service sont mises en œuvre par une combinaison de protocole en mode de connexion propre au service (SSCOP: *service specific connection oriented protocol*) et de deux types de fonction de coordination propre au service (SSCF: *service specific coordination function*), l'un pour le mappage entre les spécifications particulières de l'interface UNI (protocole de la couche 3 du système DSS2) et les services SSCOP, l'autre pour le mappage entre les spécifications particulières de l'interface NNI et les services SSCOP.

Le SSCOP est un protocole qui fournit des mécanismes pour l'établissement et la libération des connexions et pour l'échange fiable d'information. Les fonctions SSCF ne sont pas des protocoles, elles assurent seulement des mappages entre d'une part, le protocole SSCOP et, d'autre part, le système DSS2 ou l'ensemble B-MTP 3 + B-ISUP.

Annexe: Forum ATM

Pour les deux extrémités, interfaces UNI et NNI, le forum ATM utilise exclusivement les couches ATM inférieures pour signaler le transfert de l'information. La pile de protocole du Forum ATM est la suivante:

UNI 4.0 ou PNNI 1.0
SAAL
ATM (Recommandation I.361)
PH (Recommandation I.432)

Les interfaces UNI 4.0 et PNNI 1.0 sont fondées l'une et l'autre sur la norme de l'UIT-T pour le système DSS2. Il en résulte que la même couche SAAL est utilisée dans les interfaces UNI et NNI: la couche qui est définie par l'UIT, mais qui met en œuvre une seule fonction de coordination propre au service (SSCF), celle qui est définie par l'UIT-T pour l'interface UNI (voir la Recommandation UIT-T Q.2130).

Recommandations UIT-T pertinentes

- Q.2010 (1995): Vue d'ensemble du RNIS à large bande. Ensemble de capacités de signalisation 1, version 1;
- Q.2100 (1994): Vue d'ensemble de la couche SAAL;
- Q.2110 (1994): Couche d'adaptation ATM du RNIS-LB – Protocole en mode Connexion propre au service (SSCOP);

- Q.2130 (1994): Couche d'adaptation SAAL dans le RNIS à large bande – Fonction de coordination propre au service pour la signalisation à l'interface utilisateur-réseau (fonction SSCF à l'interface UNI);
- Q.2140 (1995): Couche d'adaptation ATM du RNIS-LB – Fonction de coordination propre au service pour la signalisation de nœud de réseau (fonction SSCF à l'interface NNI);
- Q.2210 (1996): Fonctions et messages du niveau 3 du sous-système transport de messages utilisant les services de la Recommandation UIT-T Q.2140.

4.4.2 Sous-système utilisateur du RNIS à large bande (B-ISUP)

4.4.2.1 Introduction

On trouvera ici un aperçu général sur l'interface NNI pour les réseaux publics fonctionnant en mode ATM, spécifiés par l'UIT-T, à savoir le sous-système utilisateur du RNIS à large bande (B-ISUP: *broadband ISDN user part*). Cette description n'entend pas être exhaustive, elle se concentre spécialement sur les caractéristiques qui confèrent leur intérêt aux réseaux ATM, par exemple l'écoulement du trafic et la qualité de service, ainsi que le traitement des paramètres du trafic pendant la phase active des communications. On trouvera enfin une liste complète des Recommandations relatives au sous-système B-ISUP, et une description succincte des systèmes de signalisation spécifiés par le Forum ATM.

4.4.2.2 Protocoles de signalisation du sous-système B-ISUP

Les protocoles de signalisation du sous-système B-ISUP sont spécifiés dans la série de Recommandations UIT-T Q.27xx. Le présent paragraphe traite principalement des capacités décrites dans le groupe de Recommandations Q.2761-4. L'Annexe A contient la liste complète des Recommandations relatives au sous-système B-ISUP.

4.4.2.2.1 Voies virtuelles point à point commutées

Les Recommandations UIT-T Q.2761-4 décrivent le traitement (établissement et libération) des connexions par voie virtuelle commutées fonctionnant en mode ATM point à point. La version la plus récente de ces Recommandations à savoir B-ISUP 2000 (07/99), fait état des capacités suivantes:

- prise en charge de la qualité de service, telle que spécifiée dans la Recommandation I.356;
- prise en charge des paramètres individuels de qualité de service;
- prise en charge des capacités de transfert en ATM (ATC: *ATM transfer capability*), telles que spécifiées dans la Recommandation I.371.
- prise en charge de la négociation pendant l'établissement de la connexion;
- procédures de modification;
- prise en charge du relais de trame;
- acheminement sur la base des formats d'adresse E.164 et AESA;
- procédures de retour en arrière;
- négociation des paramètres de la couche AAL.

Deux autres types de connexions virtuelles sont encore définis dans le sous-système B-ISUP:

- connexion de voie virtuelle permanente commutable (PVCC commutable);
- connexion de conduit virtuel permanent commutable (PVPC commutable).

Ces capacités permettent le rétablissement d'une connexion PVCC ou PVPC par utilisation de la procédure d'appel de base mentionnée plus haut en cas de panne. Cette opération est spécifiée dans la Recommandation UIT-T Q.2767.1.

4.4.2.2.2 Signalisation des capacités de transfert en mode ATM et paramètres de trafic associés

Les systèmes de terminaison connectés à des réseaux ATM génèrent des comportements extrêmement variés en matière de trafic. En conséquence, une connexion de voie virtuelle en ATM doit être établie avec la capacité de transfert en ATM (ATC: *ATM transfer capability*) qui est adaptée au comportement de trafic du système de terminaison concerné.

Les capacités ATC prises en charge par le sous-système B-ISUP et définies dans la Recommandation UIT-T I.371 sont les suivantes: le débit binaire déterministe (DBR), le débit binaire disponible (ABR), le transfert de bloc ATM (ABT DT/IT), le débit binaire statistique (SBR1, SBR2, SBR3).

Ces capacités ATC sont signalées dans la capacité support à large bande.

Chaque ATC est décrite par un ensemble de paramètres de trafic:

- DBR: PCR (*peak cell rate*: débit cellulaire crête).
- ABR: PCR, MCR (*minimum cell rate*: débit cellulaire minimal), ECR (*explicit cell rate*: débit cellulaire explicite), CI (*congestion indication*: indication d'encombrement), NI (*no increase indication*: indication de non-augmentation);
- ABT DT/IT: PCR, SCR (*sustainable cell rate*: débit cellulaire soutenable), BCR (*block cell rate*: débit cellulaire de bloc);
- SBR: PCR, SCR et MBS (*maximum burst size*: taille maximale des rafales).

Ces paramètres de trafic sont signalés dans les paramètres suivants du sous-système B-ISUP: débit cellulaire ATM, débit cellulaire ATM additionnel, paramètres ABR, débit cellulaire ATM minimal.

Une connexion point à point établie avec succès signifie qu'une connexion par voie virtuelle (VC) a été réalisée, avec les caractéristiques de trafic demandées, entre l'utilisateur appelant et l'utilisateur appelé, à travers le réseau ATM. La conformité du trafic généré par la source est vérifiée par la commande de paramètre d'utilisation/commande de paramètre de réseau (UPC/NPC: *usage parameter control/network parameter control*), par application de l'algorithme GCRA.

Le paramètre tolérance de variation du temps de propagation des cellules (CDVT: *cell delay variation tolerance*) utilisé par l'algorithme GCRA peut aussi être indiqué par signalisation. Cela permet de faire varier les paramètres GCRA appel par appel et connexion VC par connexion VC.

4.4.2.3 Négociation des paramètres de trafic

La procédure de négociation fournit à l'utilisateur le moyen d'établir une connexion par voie virtuelle (VC), pour laquelle deux ensembles de paramètres de trafic peuvent être spécifiés. Deux types de négociation sont proposés à l'utilisateur:

- 1) sur la base d'un débit cellulaire maximal et d'un débit cellulaire minimal indiqués par l'utilisateur dans sa demande d'établissement de la connexion, le réseau attribue à la connexion un des débits cellulaires possibles autorisés par la fonction de contrôle d'admission de connexion (CAC) et compris entre ces débits cellulaires extrêmes;
- 2) le débit cellulaire spécifié comme débit cellulaire initial ou comme débit cellulaire de substitution est attribué à la connexion.

Cette procédure peut être appliquée, dans le sens vers l'aval et vers l'amont, aux paramètres de trafic suivants: le débit cellulaire crête, le débit cellulaire soutenable et la taille maximale des rafales.

4.4.2.4 Modification des paramètres de trafic

Pendant la phase active d'une communication, le demandeur, en tant que propriétaire de la connexion par voie virtuelle, a la possibilité de modifier les ressources liées au trafic qui ont été attribuées à la connexion.

Les paramètres de trafic susceptibles d'être modifiés sont le débit cellulaire crête, le débit cellulaire soutenable et la taille maximale des rafales.

Il existe deux options différentes de la procédure de modification:

- 1) modification simple: la demande de l'utilisateur indique une seule valeur à prendre en considération pour la modification du débit PCR de la connexion virtuelle;
- 2) modification associée à une négociation: l'utilisateur est autorisé à spécifier soit une valeur de débit cellulaire maximale et une valeur minimale, soit une valeur de substitution pour ce débit. Dans le premier cas, les caractéristiques de trafic de la connexion active sont modifiées et fixées à toute valeur possible (admise par la fonction CAC) entre le débit cellulaire minimal et le débit maximal. Dans le second cas, les caractéristiques de trafic sont modifiées par utilisation de la valeur du débit cellulaire de substitution.

La procédure associée permet de modifier un plus grand nombre de paramètres de trafic, à savoir le débit cellulaire crête, le débit cellulaire soutenable et la taille maximale des rafales. A noter que le débit binaire ABR et le transfert de bloc ABT possèdent aussi leurs propres capacités de modification spécifiques.

4.4.2.5 Indication de la classe de qualité de service (QS) et prise en charge des divers paramètres de QS

Les réseaux ATM ont pour fonction d'écouler des flux d'information avec différentes classes de qualité de service. Un utilisateur qui demande une connexion VC en mode ATM doit donc avoir la possibilité d'indiquer la QS qu'il souhaite avoir. Le sous-système B-ISUP met à disposition un tel mécanisme, en conformité avec la définition de la qualité de service qui est donnée dans la Recommandation UIT-T I.356.

Un utilisateur qui établit une connexion signale une certaine classe de qualité de service, prise dans un ensemble de classes autorisées. Cette classe est liée à l'acheminement et aux attributions de ressources dans le réseau. Si la connexion est établie avec succès, cela signifie que le réseau garantit, de bout en bout, une qualité de service correspondant à la classe indiquée.

Le sous-système B-ISUP fournit les quatre classes de QS recommandées dans I.356 (1995). Une classe de QS est un ensemble de paramètres de qualité de fonctionnement: la variation du temps de propagation des cellules (CDV: *cell delay variation*), le temps de transfert de cellules (CTD: *cell transfer delay*) et le taux de perte de cellules (CLR: *cell loss ratio*). Une classe de QS est un ensemble de limites imposées aux valeurs de ces paramètres de qualité de fonctionnement.

Par ailleurs, le sous-système B-ISUP assure aussi la signalisation de chacun de ces paramètres. Cette fonction est fournie pour l'interfonctionnement avec les réseaux ATM privés. Ces paramètres sont donc sans rapport avec l'acheminement ou avec l'attribution des ressources. Ils sont actualisés par chaque nœud du sous-système B-ISUP dans le réseau et remis à la destination.

4.4.2.6 Voies virtuelles commutées (SVC) point à multipoint

Le sous-système B-ISUP spécifie également des procédures de signalisation pour l'établissement de connexions unidirectionnelles par voie virtuelle, du type point à multipoint. Une connexion de cette espèce est formée d'une partie racine et de plusieurs parties feuilles.

La partie racine qui établit une connexion émet vers une partie feuille une demande d'établissement, avec une capacité support à large bande indiquant une connexion point à multipoint. Les informations telles que débit cellulaire ATM et capacité support à large bande sont stockées par la partie feuille. L'adjonction d'une partie feuille ultérieure est effectuée par la racine, à la demande des parties feuilles ou de la racine elle-même.

Pendant la phase active de la connexion point à multipoint, l'abandon d'une feuille peut être opéré par la feuille elle-même ou par la racine. Une procédure commune est utilisée.

4.4.2.7 Services complémentaires

Les services complémentaires assurés par le sous-système B-ISUP, décrits dans la Recommandation UIT-T Q.2730, sont les suivants:

- signalisation d'utilisateur à utilisateur;
- présentation/restriction d'identification de la ligne appelante;
- sélection directe à l'arrivée;
- présentation/restriction d'identification de la ligne appelée;
- sous-adressage;
- numéro multiple d'abonné;
- groupe fermé d'utilisateurs.

Etant donné que le sous-système B-ISUP fournit deux formats d'adresse différents (E.164 et AESA), des services tels que présentation/restriction d'identification de la ligne appelante ont été étendus au format AESA.

4.4.2.8 Recommandations UIT-T

Tableau 4.1 – Recommandations UIT-T relatives au sous-système B-ISUP

Fonction de signalisation	B-ISUP
Commande d'appel/de connexion point à point	Q.2761 (07/99) + Q.2762 (07/99) + Q.2763 (07/99) + Q.2764 (07/99)
Capacité de connexion virtuelle permanente reconfigurable	Q.2767.1
Protocole fonctionnel générique: fonctions noyau	TCAP
Spécification de signalisation pour le service de relais de trames	Q.2727 (07/99)
Capacité de conduit virtuel commuté	Q.2766.1 (05/98)
Capacité de connexion virtuelle permanente commutable	Q.2767.1 (05/98)
Identificateur de session généré par le réseau	Q.2726.3 (07/96)
Transport d'identificateurs génériques	Q.2726.4 (09/97)
Services complémentaires (CLIP, CLIR, MSN, DDI, SUB, COLP, COLR)	Q.2730 (07/99)
Groupe fermé d'utilisateurs (CUG)	Q.2735.1 (06/97)
Signalisation d'utilisateur à utilisateur (UUS)	Q.2730 (02/95)
Priorité d'appel	Q.2726.2 (07/96)
Jeu de paramètres de débit cellulaire acceptable et option d'étiquetage	Q.2723.1 (07/99)
Prise en charge de la capacité de transfert ATM	Q.2723.2 (09/97)
Capacités de signalisation pour la prise en charge de l'ABR	Q.2764 (07/99)
Capacités de signalisation pour la prise en charge de l'ABT	Q.2723.4 (07/99)
Indication de tolérance de gigue cellulaire	Q.2723.5 (07/99)
Prise en charge des capacités SBR2 et SBR3	Q.2723.6 (07/99)
Négociation des caractéristiques de la connexion	Q.2761-4 (07/99)
Modification du débit cellulaire crête par le propriétaire de la connexion	Q.2761-4 (07/96)
Procédures de modification des paramètres de débit cellulaire soutenu	Q.2761-4 (07/99)
Modification avec négociation	Q.2761-4 (07/99)
Reconnaissance de base	Q.2724.1 (07/96)
Prise en charge des classes de QS	Q.2761-4 (07/99)
Commande d'appel/connexion point à multipoint	Q.2722.1 (07/96)

n.s.: non spécifié.

4.4.3 Système de signalisation d'abonné numérique N° 2 (DSS2)

4.4.3.1 Introduction

On trouvera ici un aperçu général du Système de signalisation d'abonné numérique N° 2 (DSS2), spécifié par la Commission d'études 11 de l'UIT-T. Ce système permet la commande des connexions ATM commutées à l'interface utilisateur-réseau (UNI) du réseau numérique à intégration de services (voir la Recommandation UIT-T I.413).

L'Annexe A contient la liste des Recommandations en vigueur concernant le Système de signalisation DSS2. L'Annexe B donne un aperçu général des différences entre le système DSS2 de l'UIT-T et les spécifications adoptées par le forum UNI pour la signalisation à l'interface UNI (UNI 3.1/4.0)

4.4.3.2 Protocoles de signalisation DSS2

Ces protocoles de signalisation font l'objet des Recommandations UIT-T de la série Q.29xx. On trouvera dans la présente section une description des principales capacités prises en charge actuellement par le système DSS2.

4.4.3.2.1 Canaux virtuels ATM commutés en mode point à point (Recommandation Q.2931)

La Recommandation Q.2931, publiée en 1995, constitue la base du Système de signalisation DSS2. On lui a apporté des compléments qui traitent de la prise en charge de capacités de signalisation additionnelles, par exemple la commande des connexions point à multipoint, la négociation/modification des caractéristiques de trafic ATM, comme indiqué dans les paragraphes qui suivent. Cette Recommandation repose sur la Recommandation homologue Q.931 relative au système DSS1 à bande étroite; elle a été adaptée pour s'appliquer aux canaux virtuels ATM en lieu et place des circuits à 64 kbit/s.

La Recommandation Q.2931 spécifie le protocole de signalisation pour l'établissement, le maintien et la libération des canaux virtuels commutés (SVC: *switched virtual channels*) ATM à l'interface utilisateur-réseau (UNI) du RNIS-LB. Les capacités de base spécifiées par cette Recommandation sont les suivantes:

- prise en charge de connexions bidirectionnelles point à point avec largeur de bande symétrique ou asymétrique;
- prise en charge d'une, et une seule, connexion par appel;
- signalisation des caractéristiques de trafic ATM demandées pour le canal SVC. Cette signalisation consiste en une indication de la capacité de transfert ATM (ATC: *ATM transfer capability*) et des paramètres de trafic ATM correspondants. La Recommandation Q.2931 (1995) permet l'établissement de supports ATM à débit binaire constant (CBR: *constant bit rate*) avec caractéristiques symétriques ou asymétriques pour le débit cellulaire crête. Depuis la publication de la Recommandation Q.2931 (1995), on a défini de nouvelles capacités de transfert ATM, qui peuvent être signalées comme indiqué dans la série de Recommandations Q.2961 (voir le § 2.3 pour plus de détails);
- signalisation des caractéristiques de qualité de service (QS) demandées pour le canal SVC. Cette signalisation consiste en une indication de la classe de QS et, facultativement, en une indication du temps de propagation de transit de bout en bout. La Recommandation Q.2931 (1995) prévoit seulement la signalisation de la classe de QS implicite associée à la capacité ATC demandée. Depuis la publication de la Recommandation Q.2931 (1995), la signalisation explicite de la classe de QS demandée est prévue dans le système DSS2 (voir le § 2.6 de la Recommandation Q.2965.1);
- prise en charge des systèmes d'adressage E.164 et de l'adresse de système de terminaison ATM (AESA: *ATM end system address*), comme spécifié dans la Recommandation UIT-T E.191;
- prise en charge de la signalisation des caractéristiques qui dépendent de l'application de l'utilisateur. Cette fonction consiste à signaler les caractéristiques des couches situées au dessus de la couche ATM, par exemple la couche d'adaptation ATM, ou les couches situées plus haut.

NOTE – La Recommandation Q.2933 élargit la portée de la Recommandation Q.2931 en définissant un service support RNIS-LB de relais de trame qui permet d'établir une connexion unique de relais de trame sur un canal SVC ATM, avec utilisation de la couche AAL type 5 et de la sous-couche de convergence spécifique au service (I.365.1).

4.4.3.2.2 Conduits virtuels ATM commutés en mode point à point (Recommandation Q.2934)

Cette Recommandation apporte des compléments à la Recommandation Q.2931 pour permettre la commande des conduits virtuels commutés (SVP: *switched virtual paths*).

4.4.3.2.3 Signalisation des capacités de trafic ATM (Recommandation Q.2961)

Cette Recommandation, composée de plusieurs parties, complète la Recommandation Q.2931 pour permettre la signalisation des capacités de transfert ATM selon I.371, par exemple DBR, SBR, ABR ou ABT. De plus, une partie spécifique de Q.2961 apporte des compléments pour permettre la signalisation (facultative) des valeurs associées de la tolérance de variation du temps de propagation des cellules (CDVT: *cell delay variation tolerance*) selon I.371.

4.4.3.2.4 Négociation des paramètres de trafic ATM (Recommandation Q.2962)

Cette fonction de signalisation apporte des compléments à la Recommandation Q.2931 pour permettre à un utilisateur demandeur de négocier avec le réseau et avec le demandé sur les caractéristiques de trafic d'une connexion pendant la phase d'établissement de l'appel/de la connexion.

Deux modes de négociation exclusifs sont définis dans Q.2962:

- la négociation entre un ensemble de valeurs des paramètres de trafic et un ensemble de valeurs de substitution des paramètres de trafic ATM;
- la négociation de paramètres de trafic ATM individuels entre leur valeur nominale demandée respective et leur valeur minimale acceptable respective de paramètre de trafic.

4.4.3.2.5 Modification des paramètres de trafic ATM (Recommandation Q.2963)

Cette Recommandation en plusieurs parties définit des compléments à la Recommandation Q.2931 pour permettre au demandeur de solliciter une modification des paramètres de trafic ATM d'une connexion point à point déjà établie (pendant la phase active de l'appel/de la connexion).

La Partie 1 de la Recommandation se limite à la modification des valeurs du débit cellulaire crête. La Partie 2 étend la modification au jeu de paramètres du débit cellulaire soutenu. La Partie 3 complète les deux parties précédentes en permettant le déroulement de la négociation pendant la modification des paramètres de trafic.

4.4.3.2.6 Signalisation des caractéristiques de qualité de service (QS) (Recommandation Q.2965)

La Recommandation Q.2965.1 modifie la Recommandation Q.2931, en spécifiant la signalisation des classes de qualité de service définies dans la Recommandation I.356. La Recommandation Q.2965.2 (approuvée en décembre 1999) apporte des compléments à Q.2965.1 pour permettre la signalisation des paramètres individuels de QS (temps de transfert de cellules (CTD), variation du temps de propagation des cellules (CDV) et taux de perte de cellules (CLR)).

4.4.3.2.7 Canaux virtuels commandés en mode point à multipoint (Recommandation Q.2971)

Cette Recommandation relative à la signalisation dans le système DSS2 décrit la commande des connexions commutées en point à multipoint qui, une fois établies, permettent à une source (appelée «racine» dans Q.2971) de diffuser de l'information vers plusieurs destinations choisies par la racine (appelées «feuilles» dans Q.2971). Une connexion par canaux virtuels en mode point à multipoint est un ensemble de liaisons par canal virtuel ATM associées qui relient deux ou plusieurs points de terminaison. Cette capacité permet d'effectuer seulement le transport unidirectionnel de la racine vers les feuilles. Des participants peuvent être ajoutés et retirés pendant la durée de la connexion.

Cette Recommandation contient des compléments à la Recommandation Q.2931 concernant l'étape initiale de l'établissement de la connexion entre la source et une feuille.

Après que cette demande d'établissement a progressé jusqu'à l'état d'alerte ou état actif, des feuilles supplémentaires peuvent être ajoutées à la connexion en réponse à des demandes d'établissement émanant de la racine, permettant à la racine d'élargir la diffusion de l'information. Une feuille peut être ajoutée à l'appel ou retirée de l'appel à tout instant pendant que l'appel est dans l'état actif. Une nouvelle feuille peut être ajoutée lorsque la racine envoie une demande d'établissement, comme indiqué plus haut. Une feuille peut être retirée de l'appel par la racine ou par la feuille.

La présence simultanée de plusieurs demandes d'établissement en instance est autorisée (par exemple, il n'est pas nécessaire que le nœud racine attende une réponse à une demande d'établissement avant d'émettre la demande suivante). La présence simultanée de plusieurs demandes de suppression de participant en instance est autorisée (par exemple, il n'est pas nécessaire que la racine attende une réponse à une demande de suppression de participant avant d'émettre la demande suivante). Chaque demande d'établissement ou de suppression de participant concerne exclusivement un seul participant. Si, après application de la procédure de suppression de participant, il ne reste plus de feuilles dans la communication, cette dernière est libérée en totalité.

La racine peut aussi libérer, à tout instant, la totalité de la connexion et les feuilles qui s'y rattachent.

4.4.3.2.8 Transport des identificateurs génériques (Recommandation Q.2941)

Cette fonction de signalisation permet le transport, entre systèmes de terminaison, d'identificateurs dépendant de l'application, lors de l'établissement ou de la libération d'une connexion. L'information est transportée en transparence par les réseaux dans lesquels la connexion est établie. Ce transfert d'identificateurs de signalisation de bout en bout est utile pour corrélérer, au niveau application, des appels multiples faisant partie de la même session. Cette fonction de signalisation est utilisée dans de nombreuses applications réparties entre des systèmes de terminaison dans les cas d'utilisation de la signalisation ATM, par exemple H.321/H.310, DSMCC et H.323 sur ATM.

4.4.3.2.9 Services complémentaires (série Q.295x)

Les services complémentaires du Système DSS2 sont définis dans la série de Recommandations UIT-T Q.295x. Ces services fournissent les capacités suivantes:

- capacités d'adressage supplémentaires, par exemple sélection directe à l'arrivée (SDA), numéro d'abonné multiple (MSN) ou sous-adressage (SUB);
- identification de la ligne appelante (CLIP) et service de restriction connexe (CLIR);
- identification de la ligne connectée (COLP) et service de restriction connexe (COLR);
- signalisation d'utilisateur à utilisateur type 1, qui permet l'échange d'information entre systèmes de terminaison pendant la phase d'établissement ou la phase de libération (voir Q.2957.1);
- groupe fermé d'utilisateurs (CUG), spécifié dans la Recommandation Q.2955.1;
- traitement des niveaux de priorité multiples pendant un appel/une connexion (Q.2959).

4.4.3.2.10 Protocole fonctionnel générique (Recommandation Q.2932.1)

La Recommandation Q.2932.1 est une adaptation de la Recommandation Q.932 relative au système DSS1, pour permettre l'application de fonctions similaires dans le contexte de la signalisation ATM. Ce protocole permet le transport d'opérations distantes, localement, à travers l'interface UNI. On définit trois modes de transport des opérations ROSE, qui peuvent être utilisés en fonction des exigences de la signalisation et des applications de l'utilisateur. Le mode de transport lié au support définit le transfert des opérations ROSE en relation avec les supports existants commandés par signalisation ATM. Le mode de transport avec connexion indépendant du support (COBI: *connection oriented bearer independent*) et bande de transport sans connexion indépendant du support (CLBI: *connectionless bearer independent*) permettent le transfert des opérations ROSE quel que soit le support existant. Ils diffèrent par la manière dont ces opérations sont effectuées à l'interface UNI.

4.4.3.3 Recommandations UIT-T

**Tableau 4.2 – Recommandations UIT-T relatives au Système de signalisation DSS2
(en vigueur en mars 1999)**

Fonction de signalisation	DSS2
Commande d'appel/de connexion point à point	Q.2931 (02/95) + Amd.1 (06/97) + Amd.2 (03/99) + Amd.3 (03/99)
Protocole fonctionnel générique: fonctions noyau	Q.2932.1 (07/96)
Spécification de signalisation pour le service de relais de trames	Q.2933 (07/96)
Capacité de conduit virtuel commuté	Q.2934 (05/98)
Transport d'identificateurs génériques	Q.2941.1 (09/97)
Services complémentaires (CLIP, CLIR, MSN, DDI, SUB, COLP, COLR)	Q.2951.x (02/95)
Groupe fermé d'utilisateurs (CUG)	Q.2955.1 (06/97)
Signalisation d'utilisateur à utilisateur (UUS)	Q.2957.1 (02/95)
Priorité d'appel	Q.2959 (07/96)
Jeu de paramètres de débit cellulaire acceptable et option d'étiquetage	Q.2961.1 (10/95)
Prise en charge de la capacité de transfert ATM	Q.2961.2 (06/97)
Capacités de signalisation pour la prise en charge de l'ABR	Q.2961.3 (09/97)
Capacités de signalisation pour la prise en charge de l'ABT	Q.2961.4 (09/97)
Indication de tolérance de gigue cellulaire	Q.2961.5 (03/99)
Prise en charge des capacités SBR2 et SBR3	Q.2961.6 (05/98)
Négociation des caractéristiques de la connexion	Q.2962 (05/98)
Modification du débit cellulaire crête par le propriétaire de la connexion	Q.2963.1 (07/96)
Procédures de modification des paramètres de débit cellulaire soutenu	Q.2963.2 (09/97)
Modification avec négociation	Q.2963.3 (05/98)
Reconnaissance de base	Q.2964.1 (07/96)
Prise en charge des classes de QS	Q.2965.1 (03/99)
Commande d'appel/connexion point à multipoint	Q.2971 (10/95)

n.s.: non spécifié.

4.5 Abréviations

ABR	Débit binaire disponible (<i>available bit rate</i>)
ABT	Transfert de bloc ATM (<i>ATM block transfer</i>)
ACSE	Élément de service de contrôle d'association (<i>association control service element</i>)
AESA	Adresse de système de terminaison ATM (<i>ATM end system address</i>)
AINI	Interface ATM entre réseaux (<i>ATM inter network interface</i>)

APM	Mécanisme de transport d'application (<i>application transport mechanism</i>)
ASN1	Notation de syntaxe abstraite numéro 1 (<i>abstract syntax notation No.1</i>)
ATC	Capacité de transfert ATM (<i>ATM transfer capability</i>)
ATM	Mode de transfert asynchrone (<i>asynchronous transfer mode</i>)
BCR	Débit cellulaire de bloc (<i>block cell rate</i>)
B-ISUP	Sous-système utilisateur du RNIS à large bande (<i>broadband ISDN user part</i>)
CAC	Contrôle d'admission de connexion
CBR	Débit binaire constant (<i>constant bit rate</i>)
CCBS	Rappel automatique sur occupation (<i>completion of calls to busy subscriber</i>)
CCF	Fonction de commande d'appel (<i>call control function</i>)
CDV	Variation du temps de propagation des cellules (<i>cell delay variation</i>)
CDVT	Tolérance de variation du temps de propagation des cellules (<i>cell delay variation tolerance</i>)
CFB	Renvoi d'appel sur occupation (<i>call forwarding busy</i>)
CFNR	Renvoi d'appel sur non-réponse (<i>call forwarding no reply</i>)
CFU	Renvoi d'appel inconditionnel (<i>call forwarding unconditional</i>)
CHA	Traitement de composant (<i>component handling</i>)
CI	Indication d'encombrement (<i>congestion indication</i>)
CIC	Code d'identification de circuit
CLBI	Mode sans connexion indépendant du support (<i>connectionless bearer independent</i>)
CLIP	Identification de la ligne appelante (<i>calling line identification presentation</i>)
CLIR	Restriction d'identification de la ligne appelante (<i>calling line identification restriction</i>)
CLR	Taux de perte de cellules (<i>cell loss ratio</i>)
COBI	Mode avec connexion indépendant du support (<i>connection oriented bearer independent</i>)
COLP	Identification de la ligne connectée (<i>connected line identification presentation</i>)
COLR	Restriction d'identification de la ligne connectée (<i>connected line identification restriction</i>)
CS 1, 2, 3, 4	Ensemble de capacités 1, 2, 3, 4 (<i>capability set No. 1, 2, 3, 4</i>)
CSL	Sous-couche composant (<i>component sub-layer</i>)
CTD	Temps de transfert de cellules (<i>cell transfer delay</i>)
CUG	Groupe fermé d'utilisateurs (<i>closed user group</i>)
CUSF	Fonction de service indépendant de l'appel (<i>call unrelated service function</i>)

DBR	Débit binaire déterministe (<i>deterministic bit rate</i>)
DHA	Traitement de dialogue (<i>dialogue handling</i>)
DPC	Code du point de destination (<i>destination point code</i>)
DSMCC	Moyens d'enregistrement numérique/commandes et indications (<i>digital storage media/command and control</i>)
DSS1, 2	Système de signalisation d'abonné numérique N° 1, N° 2 (<i>digital subscriber signalling system N°. 1, 2</i>)
ECR	Débit cellulaire explicite (<i>explicit cell rate</i>)
FISU	Trame sémaphore de remplissage (<i>fill-in signal unit</i>)
GCRA	Algorithme de débit cellulaire générique (<i>generic cell rate algorithm</i>)
GT	Appellation globale (<i>global title</i>)
IAM	Message initial d'adresse (<i>initial address message</i>)
IMT-2000	Télécommunications mobiles internationales 2000 (<i>international mobile telecommunications-year 2000</i>)
INAP	Sous-système application du réseau intelligent (<i>intelligent network application part</i>)
IP	Protocole Internet (<i>Internet protocol</i>)
ISUP	Sous-système utilisateur pour le RNIS (<i>ISDN user part</i>)
LI	Indicateur de longueur (<i>length indicator</i>)
LSSU	Trame sémaphore d'état du canal sémaphore (<i>link status signal unit</i>)
MBS	Taille maximale des rafales (<i>maximum burst size</i>)
MCR	Débit cellulaire minimal (<i>minimum cell rate</i>)
MIC	Modulation par impulsions et codage
MSN	Numéro d'abonné multiple (<i>multiple subscriber number</i>)
MSU	Trame sémaphore de message (<i>message signal unit</i>)
MTP	Sous-système transport de messages, SSTM (<i>message transfer part</i>)
NI	Indication d'absence d'augmentation (<i>no-increase indication</i>)
N-ISUP	Sous-système utilisateur du RNIS à bande étroite (<i>narrowband-ISDN user part</i>)
NNI	Interface réseau-réseau (<i>network network interface</i>)
NPC	Commande de paramètre de réseau (<i>network parameter control</i>)
NSP	Sous-système service de réseau, SSSR (<i>network service part</i>)
OPC	Code du point d'origine (<i>originating point code</i>)
OSI	Interconnexion des systèmes ouverts (<i>open systems interconnection</i>)

PC	Code de point (sémaphore) (<i>point code</i>)
PCR	Débit cellulaire crête (<i>peak cell rate</i>)
PDU	Unité de données protocolaire (<i>protocol data unit</i>)
PH	En-tête physique (<i>physical header</i>)
PNNI	Interface réseau-réseau privée (<i>private network network interface</i>)
POTS	Service téléphonique traditionnel; ... ordinaire; ... classique (<i>plain old telephone service</i>)
PVC	Canal (connexion) virtuel(le) permanent(e)
PVPC	Connexion de conduit virtuel permanent (<i>permanent virtual channel (connection)</i>)
RI	Réseau intelligent
RNI	Réseau numérique intégré
RNIS	Réseau numérique à intégration de services
RNIS-BE	Réseau numérique à intégration de services à bande étroite
RNIS-LB	Réseau numérique à intégration de services à large bande
ROS	Service d'opérations distantes (<i>remote operations service</i>)
ROSE	Élément du service d'opérations distantes (<i>remote operations service element</i>)
RPC	Appel de procédure à l'extrémité éloignée (<i>remote procedure call</i>)
RPDCP	Réseau public de données à commutation de paquets
SAAL	Couche d'adaptation ATM de signalisation (<i>signalling asynchronous adaptation layer</i>)
SBR	Débit binaire statistique (<i>statistical bit rate</i>)
SCCP	Sous-systèmes commande de connexions sémaphores, SSCS (<i>signalling connection control part</i>)
SCEF	Fonction environnement de création de services (<i>service creation environment function</i>)
SCF	Fonction de contrôle du service; ... de commande de service (<i>service control function</i>)
SCR	Débit cellulaire soutenable (<i>sustainable cell rate</i>)
SDA	Sélection directe à l'arrivée
SDF	Fonction données de service (<i>service data function</i>)
SLS	Sélection du canal sémaphore (<i>signalling link selection</i>)
SMAF	Fonction d'accès à la gestion du service (<i>service management access function</i>)
SMF	Fonction de gestion de service (<i>service management function</i>)
SRF	Fonction de ressource spécialisée (<i>specialised resource function</i>)

SS7	Système de signalisation N° 7
SSCF	Fonction de coordination propre au service (<i>service specific coordination function</i>)
SSCOP	Protocole en mode connexion spécifique au service (<i>service specific connection oriented protocol</i>)
SSF	Fonction de commutation du service (<i>service switching function</i>)
SSN	Numéro de sous-système (<i>sub-system number</i>)
STP	Point de transfert sémaphore, PTS (<i>signalling transfer point</i>)
SU	Trame sémaphore, TS (<i>signal unit</i>)
SUB	Sous-adressage (<i>sub-addressing</i>)
SVC	Canal virtuel commuté (<i>switched virtual channel</i>)
TC	Gestionnaire de transactions, GT (<i>transaction capability</i>)
TCAP	Sous-système application pour la gestion des transactions, SSGT (<i>transaction capability application part</i>)
TCP/IP	Protocole de commande de transport/Protocole Internet (<i>transport control protocol/Internet protocol</i>)
TFA	Transfert autorisé (<i>transfer allowed</i>)
TFP	Transfert interdit (<i>transfer prohibited</i>)
TPU	Télécommunications personnelles universelles
TSL	Sous-couche transaction (<i>transaction sub-layer</i>)
UBR	Débit binaire non disponible (<i>unavailable bit rate</i>)
UNI	Interface utilisateur-réseau (<i>user network interface</i>)
UPC	Commande de paramètre d'utilisation (<i>usage parameter control</i>)
UUS	Signalisation d'utilisateur à utilisateur (<i>user to user signalling</i>)
VBR	Débit binaire variable (<i>variable bit rate</i>)
VC	Voie virtuelle; canal virtuel (<i>virtual channel</i>)
VCI	Identification de voie virtuelle, de canal virtuel (<i>virtual channel identification</i>)
VPI	Identification de conduit virtuel (<i>virtual path identifier</i>)
VPN	Réseau privé virtuel (<i>virtual private network</i>)

ANNEXE A

Autres protocoles de signalisation ATM

Le Forum ATM a développé sa propre suite de protocoles de signalisation NNI:

- interface réseau-réseau privée v1.0 (PNNI v1.0);
- interface large bande entre opérateurs (B-ICI), homologation par le Forum ATM de certaines Recommandations UIT-T de la série Q.27xx relatives au sous-système B-ISUP. L'UIT-T considère B-ISUP comme une interface intraréseau et comme une interface entre réseaux; en revanche, B-ICI est considéré seulement comme une interface entre réseaux (B-ICI doit être utilisé exclusivement sur les lignes de démarcation administratives);
- l'interface ATM entre réseaux (AINI), approuvée récemment, permet l'interfonctionnement de l'interface PNNI et le sous-système B-ISUP.

En fait, la spécification PNNI définit deux protocoles différents:

- **Acheminement PNNI** (*PNNI routing*) est un protocole d'acheminement pour un réseau ATM; des fonctions similaires existent dans les réseaux IP. *PNNI Routing* est un protocole d'acheminement lié à l'état de la liaison. Il donne aux nœuds PNNI l'information d'état et de topologie, et leur permet d'acheminer dynamiquement les canaux virtuels et les conduits virtuels ATM. *PNNI Routing* est extrêmement échelonnable; il a été conçu pour fonctionner aussi bien dans les petits réseaux que dans les réseaux très étendus;
- **Signalisation PNNI** (*PNNI signalling*) est le protocole de signalisation proprement dit. *PNNI signalling* est presque identique à la signalisation UNI4.0. Comme UNI 4.0 est basé sur les Recommandations relatives au Système DSS2, on peut considérer qu'il en est de même pour *PNNI signalling*. Il n'existe pas de spécification pour l'interfonctionnement UNI4.0/PNNI; en effet, vu la parenté étroite de deux systèmes, cet interfonctionnement ne présente aucune difficulté.

PNNI n'est pas un protocole de signalisation pour un réseau utilisant le Système SS7. Il est transporté sur des canaux virtuels ATM qui utilisent la signalisation AAL (S-AAL). Les services du RNIS ne sont pas pris en charge dans PNNI et il n'y a pas de spécification d'interfonctionnement ISUP/PNNI. Avec l'existence de *PNNI Routing*, c'est là la principale différence entre PNNI et B-ISUP.

PNNI prend des connexions de voie virtuelle (VCC) commutées, les connexions de conduit virtuel (VPC) commutées et les connexions virtuelles permanentes (PVC) commutables. S'agissant de la gestion du trafic, PNNI n'applique pas telles quelles les Recommandations UIT-T comme I.371 et I.356. Au lieu de cela, il applique la spécification *Traffic Management v4.0* (TM4.0) du Forum ATM, de sorte qu'il met en œuvre le débit binaire constant (CBR), le débit binaire variable en temps réel (rt-VBR), le débit binaire variable en différé (nrt-VBR), le débit binaire disponible (ABR) et le débit binaire non défini (UBR).

Enfin, PNNI n'accepte pas les numéros natifs E.164. Il peut acheminer les appels uniquement sur la base des adresses de système de terminaison ATM.

Les spécifications PNNI, B-ICI et TM4.0 peuvent être consultées sur le site Internet du Forum ATM: <http://www.atmforum.com>.

ANNEXE B

Le système DSS2 et les spécifications de signalisation UNI du Forum ATM**B.1 Introduction**

Le Forum ATM travaille parallèlement avec l'UIT-T pour spécifier la signalisation ATM à l'interface UNI. Ces travaux ont débouché sur la publication des documents UNI 3.1 (septembre 1994) et UNI 4.0 (juillet 1996). La présente annexe a pour objet de donner un aperçu général des différences existantes, au niveau fonctionnel, entre le système de signalisation DSS2 et le système de signalisation UNI du Forum ATM. En particulier, il n'est pas question ici d'exposer dans le détail les différences entre les protocoles eux-mêmes, ni de mettre l'accent sur les problèmes d'interopérabilité éventuels; il s'agit plutôt de donner au lecteur la liste des fonctions de signalisation mises en œuvre dans UNI 3.1 et UNI 4.0.

B.2 Spécification de la signalisation UNI 3.1

Les fonctions suivantes existent dans UNI 3.1

- Connexions virtuelles commutées (SVC) point à point (voir DSS2 dans la Recommandation UIT-T Q.2931, avec quelques restrictions, notamment la non-prise en charge des fonctions suivantes: phase d'alerte, procédures de réception avec chevauchement et procédures d'envoi avec chevauchement, procédure de notification et attribution de canaux associée au conduit virtuel).
- SVC point à multipoint (voir DSS2 dans Q.2971, avec quelques restrictions, par exemple pour la phase d'alerte et la procédure de notification).
- Capacités de trafic ATM, par exemple: service de débit binaire constant (CBR, voir DSS2 dans Q.2931), service de débit binaire variable (VBR, voir DSS2 dans Q.2961.1), service de débit binaire non spécifié (UBR, ce service ne figure pas dans DSS2), et étiquetage (voir DSS2 dans Q.2961.1).
- Indication de classe de QS (UIT-T Q.2931/Q.2965.1, classe 0 de QS avec classes de QS spécifiques 1 à 4 du Forum ATM).

B.3 Signalisation UNI 4.0

La spécification de signalisation UNI 4.0 (voir af-sig-0061.000 et son addendum af-sig-0076.000) fournit les fonctions de signalisation suivantes:

- SVC point à point. Cette fonction est décrite comme une spécification delta de DSS2 dans Q.2931.
- SVC point à multipoint. Cette fonction est décrite dans la spécification delta de DSS2 dans Q.2971.
- Transport d'identificateur générique (DSS2, Q.2941.1). Cette fonction est décrite dans la spécification delta de Q.2931 (SVC point à point) et dans la spécification delta de Q.2971 (SVC point à multipoint).
- Capacités de trafic ATM telles que le service de débit binaire constant (CBR)/débit binaire déterministe (voir DSS2 dans Q.2931 et Q.2961.2), le service de débit binaire variable (VBR)/débit binaire statistique (voir DSS2 dans Q.2961.1 et Q.2961.2), le service de débit binaire non spécifié (ce service ne figure pas dans DSS2), l'étiquetage (voir DSS2 dans Q.2961.1), le service de débit binaire disponible (voir DSS2 dans Q.2961.3, avec de petits compléments) et le rejet de trame (ne figure pas dans DSS2).
- Indication de classe de QS (voir classe 0 de QS dans DSS2, Q.2931/Q.2965.1 avec classes de QS spécifiques 1 à 4 du Forum ATM).
- Conduits virtuels commutés (voir DSS2 dans Q.2934). Cette fonction est décrite dans la spécification delta de Q.2931.

- Signalisation de quelques paramètres de QS (CTD, CDV, CLR) (voir la Recommandation UIT-T Q.2965.2, en cours de définition).
- Négociation des caractéristiques de la connexion (voir DSS2 dans Q.2962).
- Services complémentaires (basés sur DSS2: SDA, MSN, SUB, CLIP, CLIR, COLP, COLR et UUS).
- Jonction créée par une feuille (LIJ) (non défini dans DSS2).
- Unidiffusion ATM (non défini dans DSS2).

Les fonctions de signalisation UIT-T suivantes du système DSS2 ne sont pas spécifiées dans UNI 4.0:

- Signalisation pour le service ABT (voir DSS2 dans Q.2961.4), capacités SBR2/SBR3 de l'UIT-T (voir DSS2 dans Q.2961.6).
- Signalisation des valeurs de CDVT (voir DSS2 dans Q.2961.5).
- Modification des caractéristiques de la connexion (voir DSS2 dans Q.2963.1, Q.2963.2 et Q.2963.3).
- Signalisation explicite des classes de QS de la Recommandation UIT-T I.356 (voir DSS2 dans Q.2965.1 et Amendement 3 de Q.2931).
- Service support de relais de trame dans le RNIS-LB (voir DSS2 dans Q.2933).
- Priorité d'appel (voir DSS2 dans Q.2959) et groupe fermé d'utilisateurs (voir DSS2 dans Q.2955.1).
- Protocole fonctionnel générique (voir DSS2 dans Q.2932.1).
- Reconnaissance (voir DSS2 dans Q.2964.1).
- Signalisation de AAL type 2 et paramètres associés (voir DSS2 dans Q.2931, Amendement 2).

CHAPITRE 5

5 Techniques et méthodes de synchronisation

5.1 Introduction

La synchronisation remplit un rôle crucial dans les télécommunications modernes. Les aspects particuliers de la synchronisation (rythme) constituent un volet important de la formation des ingénieurs des télécommunications. Depuis l'invention de la modulation MIC et son introduction dans les réseaux mondiaux de télécommunication, la synchronisation est un des facteurs les plus importants dans la conception et la maintenance des systèmes.

Dans un système à transmission numérique, la synchronisation est une fonction essentielle des récepteurs. Dans ces appareils, l'information binaire est convertie, à l'aide d'un modulateur, en un signal continu dans le temps, qui est transporté par le canal de transmission. Un récepteur numérique extrait la séquence d'information d'un signal à structure temporelle discontinue, obtenu après échantillonnage et quantification du signal affecté de distorsion qui était appliqué au démodulateur. Dans le récepteur, une récupération précise du rythme est indispensable si l'on veut obtenir une qualité de fonctionnement très voisine de celle du récepteur optimum [1]. De nos jours, la synchronisation est devenue un sujet de recherche à part entière qui a donné lieu à des études approfondies au cours des dernières décennies.

La synchronisation des réseaux de télécommunication a pour but de créer deux conditions nécessaires pour l'échange d'information numérique en temps réel entre les usagers:

- la *continuité*, ce qui signifie que les débits binaires doivent être les mêmes pour les terminaux interconnectés;
- l'*intégrité*, ce qui signifie que l'ordre dans lequel les éléments d'information (bits, octets ou blocs) sont reçus par le collecteur doit être le même que l'ordre dans lequel ils ont été émis par la source.

En d'autres termes, *synchronisme* est synonyme de référence temporelle commune pour l'émetteur et le récepteur. Le corollaire est que la synchronisation est une opération d'importance cruciale dans la réception des signaux de données. On distingue communément deux catégories [2, 3]:

- la synchronisation des signaux, dans laquelle le rythme des symboles, la phase de la porteuse et la fréquence de la porteuse d'un récepteur sont alignés sur un signal entrant;
- la synchronisation des trames, dans laquelle les limites des salves, des paquets, des mots, des codes ou des trames sont récupérées dans un train de données reçu.

Parallèlement, dans les applications pratiques, les opérations de synchronisation pour les communications se répartissent en trois niveaux, par exemple [4]:

- la synchronisation des porteuses;
- le rythme des éléments binaires (bits);
- le verrouillage de trame (ou de bloc).

La première de ces opérations concerne la poursuite de la fréquence porteuse (phase) en fonctionnement. La seconde, qui joue un rôle important dans les communications numériques modernes, s'applique aux séquences numériques (bits). On parle, dans ce contexte, de «*synchronisation du réseau*» ou «*réseau de synchronisation*», de «*rythme des éléments binaires*» ou de «*synchronisation des éléments binaires (bits)*». C'est surtout de ces techniques qu'il sera question dans le présent chapitre. Enfin, le verrouillage de trame (ou de bloc) est l'opération de synchronisation appliquée dans les systèmes de transmission par paquets.

S'agissant des synchroniseurs, on distingue deux types de structures:

- Les synchroniseurs avec assistance des données (DA: *data-aided*) utilisent les décisions du récepteur ou une séquence d'apprentissage pour calculer les estimations de rythme.
- Les structures sans assistance des données (NDA: *non-data-aided*) fonctionnent indépendamment de la séquence d'information transmise.

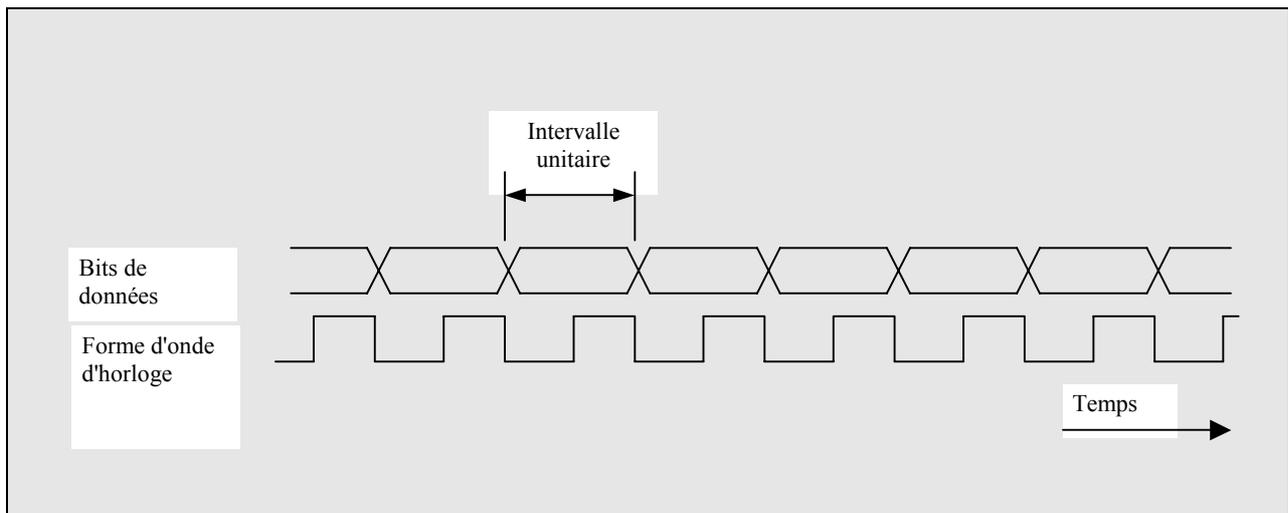
5.2 Synchronisation des systèmes de transmission

Dans les premiers temps du développement de la modulation MIC, le problème à résoudre était celui de la synchronisation locale de la communication de point à point. Un signal numérique se compose de deux éléments, tels que:

- un train de chiffres binaires (bits), qui constitue les données;
- les instants (repères temporels discrets) d'apparition des bits.

Dans la pratique, le second élément est un signal temporel (rythme) auquel on donne le nom d'*horloge*. La Figure 5.1 montre un exemple de signal de données accompagné de l'horloge associée. On voit que les intervalles unitaires sont répartis uniformément dans le temps, de façon telle que chaque intervalle unitaire contient un seul bit. Le front négatif de l'impulsion d'horloge est la frontière entre les bits dans un train binaire continu.

Figure 5.1 – Exemple de signal de données avec horloge associée



5.2.1 Extraction du signal d'horloge du train de données binaires

Le rythme (horloge) est nécessaire pour le traitement des données dans l'émetteur et pour l'échantillonnage des bits de données dans le récepteur. Il est inutile de transmettre la *forme d'onde d'horloge* en même temps que les données, car celles-ci contiennent l'information de *signal d'horloge* [5]. La Figure 5.2 illustre cette constatation dans le domaine temporel. Examinons cette figure en détail: la somme modulo 2 $\{D(t) \oplus D(t + t_D)\}$ du signal de données $D(t)$ et du signal retardé $D(t + t_D)$ donne une séquence d'impulsions séparées par des intervalles aléatoires en raison de la nature aléatoire des repères temporels des fronts des signaux. Dans la Figure 5.2, à titre d'exemple, le retard t_D est pris égal au quart d'un intervalle unitaire T . Le signal $d(t) = \{D(t) \oplus D(t + t_D)\}$ peut s'exprimer comme la somme algébrique d'une partie déterministe, $s(t)$, et d'une partie aléatoire, $r(t)$:

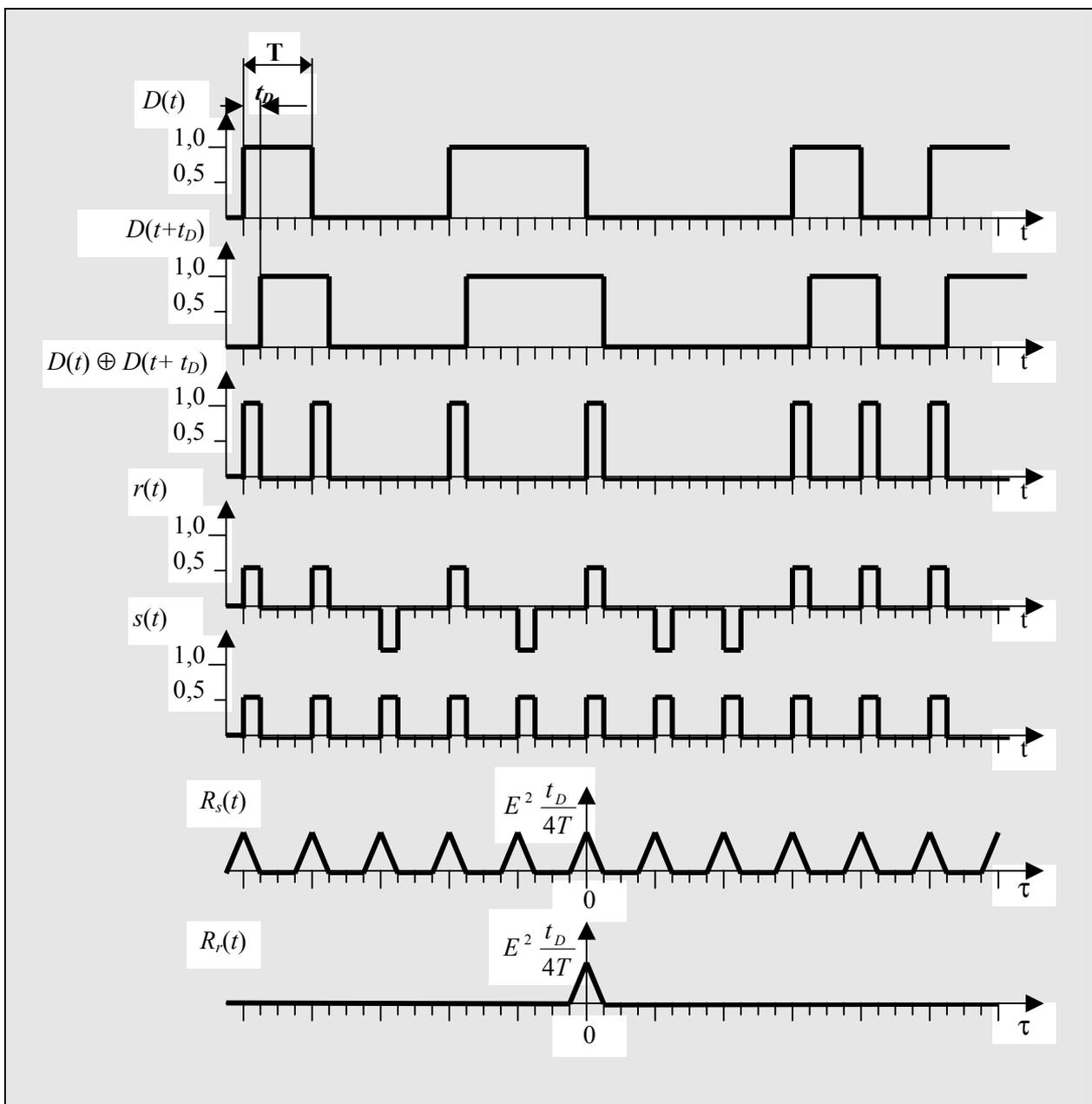
$$d(t) = s(t) + r(t)$$

A noter que la partie déterministe (systématique) $s(t)$ est la séquence utile de signaux d'horloge périodiques, les impulsions étant séparées par une distance égale d'unités de temps.

La Figure 5.2 montre que les signaux $s(t)$ et $r(t)$ sont des séquences d'impulsions rectangulaires. On sait que la variance de la séquence d'impulsions périodiques $s(t)$ est aussi une fonction périodique $R_s(\tau)$, avec la même période de répétitions, T . En revanche, la covariance du signal aléatoire $r(t)$ est la fonction non périodique $R_r(\tau)$, qui est de forme triangulaire dans l'intervalle de temps $-t_D \leq \tau \leq t_D$. La covariance totale du signal $d(t)$ est la superposition des covariances composantes:

$$R_D(\tau) = R_s(\tau) + R_r(\tau)$$

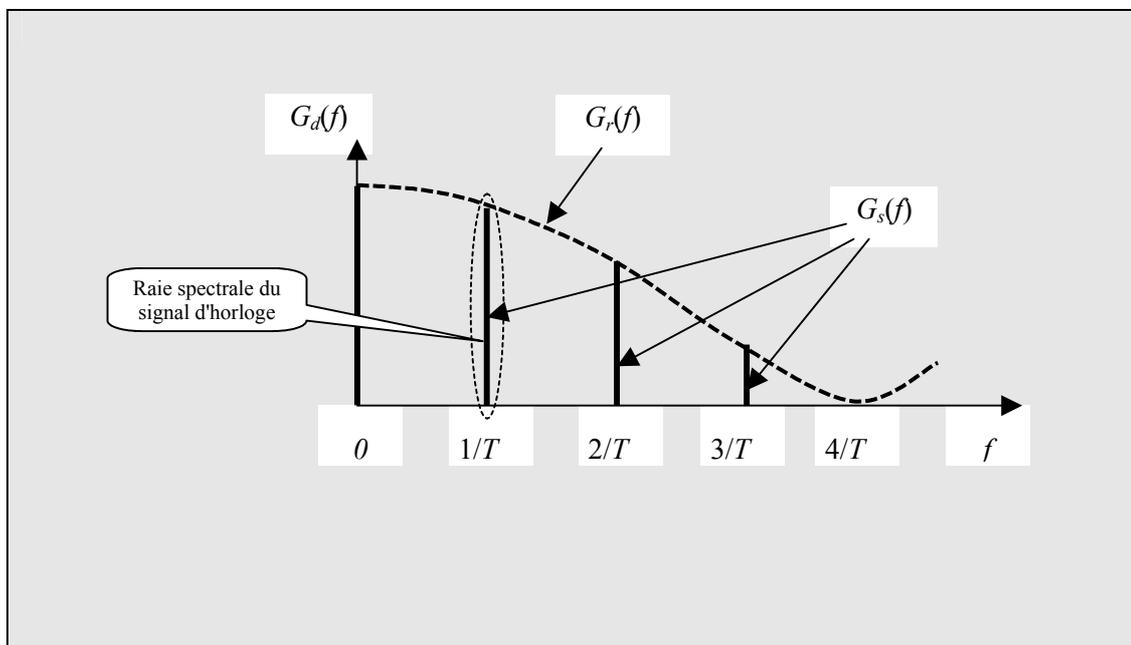
Figure 5.2 – Extraction de l'information de rythme des données



La densité spectrale de puissance, $G_d(f)$ du signal $d(t)$ est définie, à partir de la covariance $R_D(\tau)$, par la transformée de Fourier (transformée de Wiener-Khintchin), sur la base de laquelle on peut écrire: $G_d(f) = G_s(f) + G_r(f)$, dans cette relation, la densité spectrale de puissance $G_s(f)$ du signal $s(t)$ a une forme discontinue, du fait de sa nature périodique, et la densité spectrale de puissance $G_r(f)$ du signal de bruit $r(t)$ est une fonction continue du fait de son origine aléatoire. La Figure 5.3 représente, à titre d'exemple, le spectre total $G_D(f)$ et les spectres composants $G_s(f)$ et $G_r(f)$ du signal $d(t)$. Ici, la fonction $G_r(f)$ est considérée comme l'enveloppe du spectre total.

Les propriétés fondamentales du spectre sont les suivantes (Figure 5.3). La raie spectrale $n = 1$ représente la puissance du signal sinusoïdal de fréquence $1/T$, considéré comme le signal d'horloge. En extrayant ce signal sinusoïdal du signal total $d(t)$, on peut obtenir un signal d'horloge correspondant auquel s'appliquera la synchronisation.

Figure 5.3 – Densité spectrale de puissance



Il est donc inutile d'envoyer à la fois un signal de données et un signal d'horloge associé dans les systèmes de transmission. En effet, le signal de rythme peut être extrait du train de données, par les opérations suivantes: production de la séquence $\{D(t) \oplus D(t + t_D)\}$ et filtrage de la composante de fréquence d'horloge $f_0 = 1/T$ dans le spectre de cette séquence d'impulsions. Deux possibilités s'offrent pour cela, sur les bases suivantes:

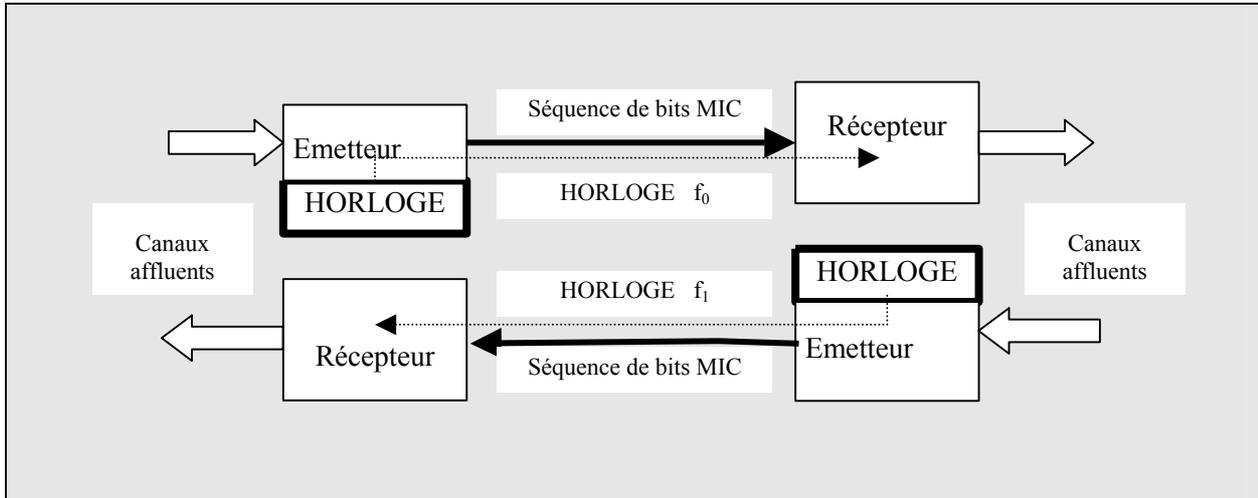
- filtre passe-bande (BP: *bandpass*) à bande étroite (éventuellement filtre optimum) de fréquence centrale égale à $f_0 = 1/T$;
- boucle à verrouillage de phase (BVP) avec filtre passe-bas (LP: *low pass*) ou filtre optimum.

5.2.2 Synchronisation point à point

En général, une ligne numérique bidirectionnelle assure la transmission pour des communications numériques s'effectuant par deux canaux de transmission numérique qui sont les supports d'une transmission unidirectionnelle de signaux numériques entre deux points. La Figure 5.4 illustre schématiquement la synchronisation point à point dans ce cas [6].

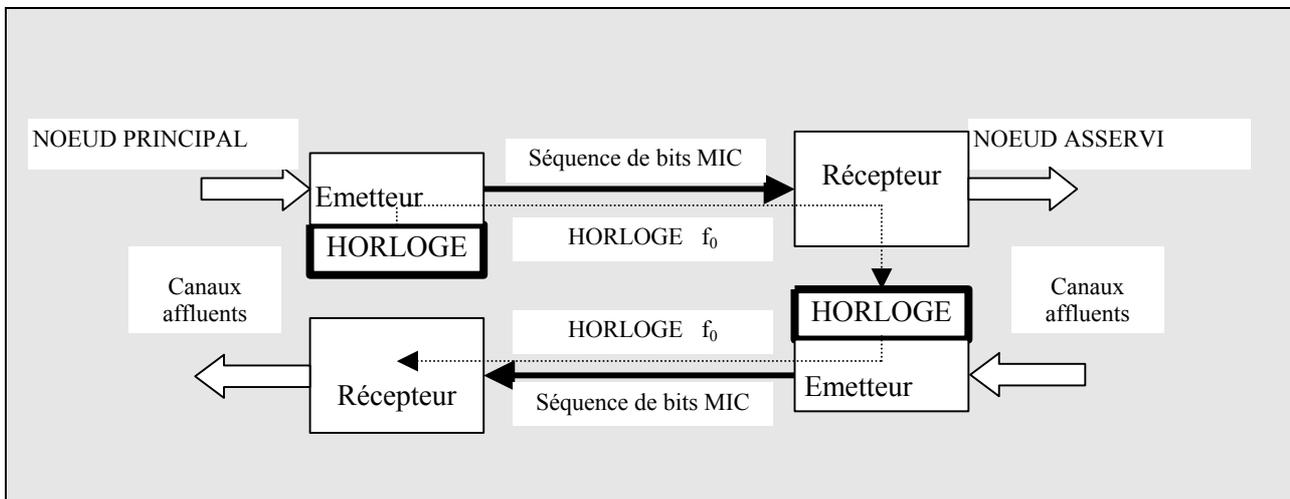
La technique de synchronisation la plus simple généralement utilisée est celle que l'on appliquerait dans le service téléphonique classique (POTS: *plain old telephone service*) dans les premiers temps de la modulation MIC. On applique ici une synchronisation indépendante pour chaque canal (fréquences d'horloge f_0 et f_1) dans la structure représentée par la Figure 5.4 a).

Figure 5.4 a) – Synchronisation indépendante



On sait que les méthodes numériques permettent d'améliorer de façon spectaculaire la qualité de fonctionnement des systèmes de télécommunication. Parallèlement, après la mise en œuvre de réseaux numériques, les nœuds de synchronisation principaux et asservis de ces réseaux nécessitent un rythme précis des données. Dans ce cas (Figure 5.4 b)), l'émetteur du nœud principal envoie au nœud asservi un train de données MIC à la fréquence d'horloge f_0 .

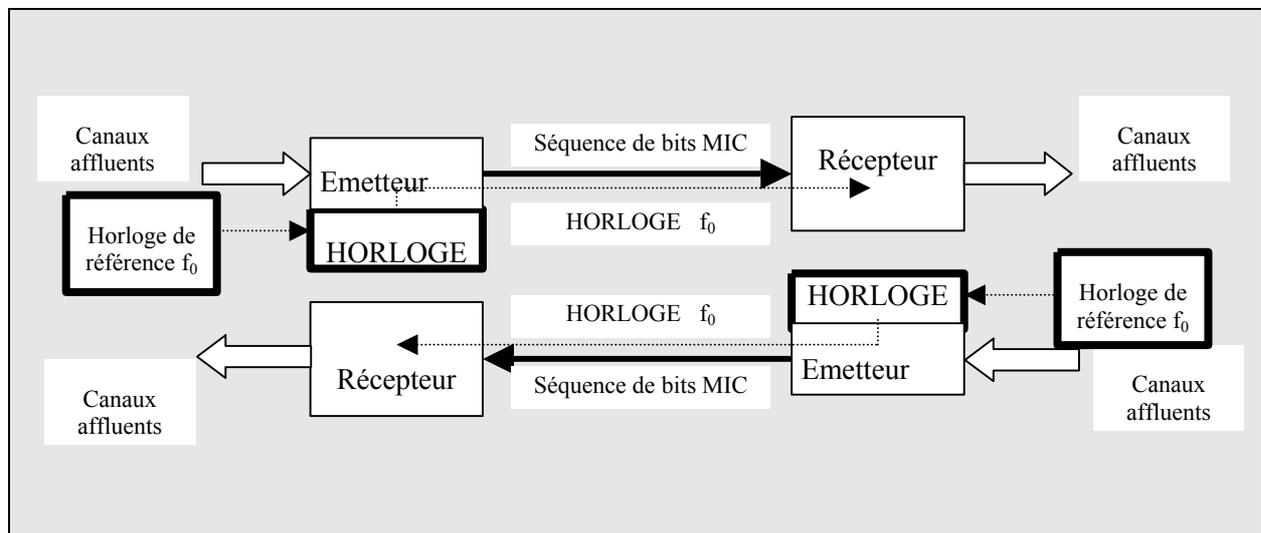
Figure 5.4 b) – Synchronisation asservie



Ici, le récepteur du nœud asservi extrait le signal d'horloge des données en appliquant les méthodes décrites plus haut. Le signal d'horloge extrait sert de référence pour régler l'horloge de l'émetteur d'un nœud asservi. Dans ces conditions, les deux trains de données MIC sont transmis avec la même fréquence d'horloge, f_0 .

Enfin, la Figure 5.4 c) montre la structure type d'un ou de plusieurs réseaux synchrones, synchronisés par une horloge maîtresse externe de haute précision. Ici, les séquences de bits MIC sont transmises dans le réseau avec une fréquence d'horloge f_0 , cela dans les deux canaux (dans les deux sens de transmission). Les deux horloges du premier et du second émetteur sont asservies à l'horloge maîtresse externe. Dans ce cas, le *signal de rythme de référence* doit être distribué à tous les nœuds du réseau de télécommunication qui sont pris en compte dans la planification du *réseau de synchronisation*. Cette question sera étudiée en détail plus loin.

Figure 5.4. c) – Réseau synchrone



5.3 Techniques basées sur la boucle à verrouillage de phase

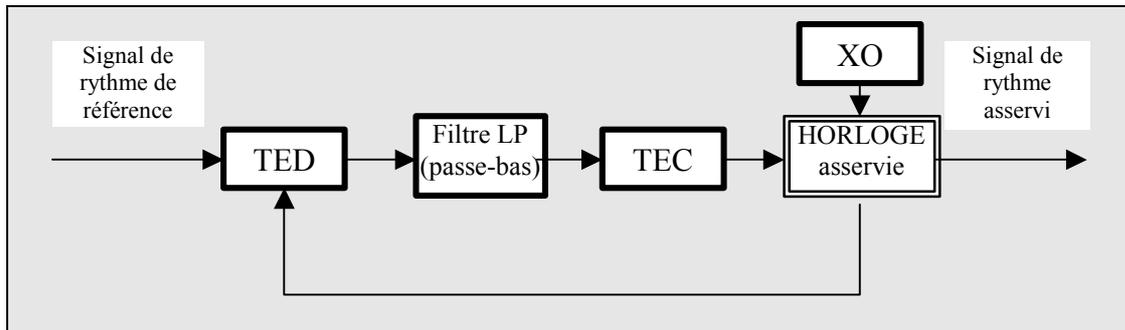
Dans les systèmes de télécommunication non synchronisés, un oscillateur libre détermine les instants d'échantillonnage dans le récepteur et la correction temporelle est assurée par un traitement numérique de la séquence d'échantillons. Dans les systèmes synchronisés, pour réaliser la synchronisation des données dans les nœuds asservis, il est nécessaire d'intégrer des circuits correspondants dans les équipements d'émission. Ces circuits, du type à contre-réaction, sont conçus comme des boucles à verrouillage de phase (BVP) qui ont pour fonction de réguler en phase (temps) une horloge asservie par l'intermédiaire d'un signal de référence externe provenant d'une horloge maîtresse. En règle générale, on distingue deux circuits BVP, utilisés respectivement pour:

- 1) la correction temporelle discontinue,
- 2) la correction temporelle continue.

5.3.1 Correction temporelle discontinue d'une horloge asservie

La Figure 5.5 représente la structure généralisée d'un circuit BVP à contre-réaction conçu pour la correction temporelle discontinue de l'horloge asservie, à l'aide d'un signal de référence discret fourni par l'horloge maîtresse.

Figure 5.5 – Circuit à contre-réaction avec boucle à verrouillage de phase, correction temporelle discontinue

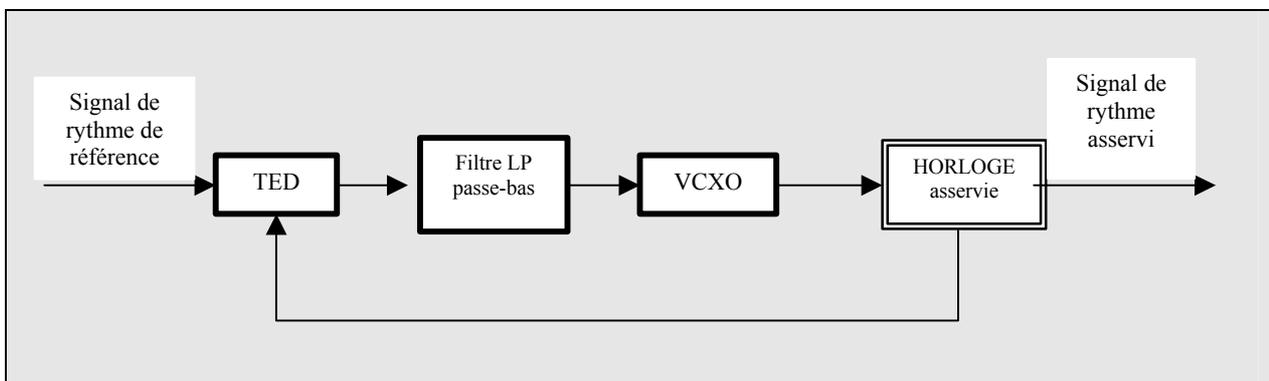


Les principaux éléments de ce circuit sont un détecteur d'erreur de rythme (TED: *timing error detector*) et un correcteur d'erreur de rythme (TEC: *timing error corrector*). Au départ, l'horloge asservie délivre un signal de rythme pour l'émetteur, à partir du signal fourni par l'oscillateur à quartz externe (XO). Bien entendu, le signal ainsi obtenu ne coïncide pas avec celui de la source de référence, en raison de la dérive de fréquence et du déphasage. Pour éliminer cette erreur de rythme, le détecteur TED compare les signaux de rythme fournis respectivement par la source de référence et par l'horloge asservie, et forme un signal d'erreur correspondant à l'écart temporel entre les sources de rythme. Ce signal d'erreur traverse le filtre LP (optimum) avant d'arriver au correcteur TEC, qui applique la correction au rythme de l'horloge asservie. L'oscillateur XO est d'un prix relativement modique et il fonctionne avec une faible gigue de bruit, ce qui explique que la correction de rythme discontinue soit largement utilisée actuellement pour de nombreuses applications pratiques.

5.3.2 Régulation par oscillateur en fonctionnement temporel continu

Dans le domaine temporel continu, il est possible de régler le rythme en commandant la phase d'échantillonnage de l'oscillateur. La Figure 5.6 représente la structure d'un circuit à contre-réaction avec boucle à verrouillage de phase (BVP) conçu pour suivre l'oscillateur asservi en fonctionnement temporel continu, à l'aide d'un signal de référence fourni par l'horloge maître.

Figure 5.6 – Circuit à contre-réaction avec boucle à verrouillage de phase, avec commande par signal de référence



Le fonctionnement du circuit est semblable à celui du circuit de la Figure 5.5. Ici, le signal continu de l'oscillateur à quartz commandé en tension (VCXO: *voltage controlled crystal oscillator*) est comparé avec le signal de référence, et une version erronée filtrée du signal de sortie du détecteur TED est appliquée au dispositif qui détermine les instants d'échantillonnage (par exemple, un oscillateur VCXO).

De cette façon, le signal d'erreur traverse un filtre passe-bas et commande directement la fréquence de l'oscillateur, pour éliminer le décalage de phase (décalage temporel) entre les deux signaux. En raison de son prix relativement élevé et de sa gigue de bruit, il convient d'éviter, si possible, l'utilisation d'un oscillateur VCXO en tant qu'élément de circuit «discret».

5.4 Correction du rythme

L'analyse de la Figure 5.4 montre qu'une restitution précise du rythme dans le récepteur est indispensable pour obtenir une qualité de fonctionnement voisine de celle du récepteur optimum. La synchronisation des récepteurs repose sur des méthodes statistiques d'estimation des signaux de rythme. Beaucoup d'algorithmes de synchronisation peuvent être reliés au critère de vraisemblance maximale (ML: *maximum likelihood*) [3], selon lequel les estimations des paramètres de rythme donnent un maximum de la fonction de vraisemblance. Parallèlement, la fonction de vraisemblance dépend du format de la modulation du signal et des propriétés statistiques du bruit ajouté au signal. Les estimations du rythme donnent un maximum de la fonction de vraisemblance, que l'on obtient en formant la moyenne des variables d'information aléatoires.

L'estimation du rythme peut être faite pour la modulation par plusieurs tonalités et pour les signaux à une seule porteuse.

Selon la norme ADSL [7], l'extraction du rythme exige la réception d'une seule porteuse non modulée. La fréquence de cette porteuse (appelée fréquence pilote) est fixe. La synchronisation au moyen d'une fréquence pilote présente quelques inconvénients par rapport au signal à plusieurs tonalités [1]:

- L'estimateur de rythme n'exploite qu'une fraction de la puissance du signal reçu. La variance de l'estimation d'erreur sur le rythme est donc supérieure à la variance obtenue dans la méthode à plusieurs porteuses.
- Pour obtenir la même variance d'erreur, il faut diminuer la bande passante en boucle fermée du synchroniseur BVP à contre-réaction. Cela influe défavorablement sur l'aptitude du synchroniseur à suivre les variations du décalage de fréquence.
- En cas d'utilisation d'une tonalité non modulée, l'estimation de l'erreur de rythme devient sensible à une perturbation systématique, invariable dans le temps, par exemple la température, le vieillissement, etc.
- Si le rapport signal/bruit est petit à la fréquence pilote, l'estimateur du rythme donne des résultats dénués de fiabilité, ou bien l'estimation du signal de rythme exige beaucoup plus de temps.

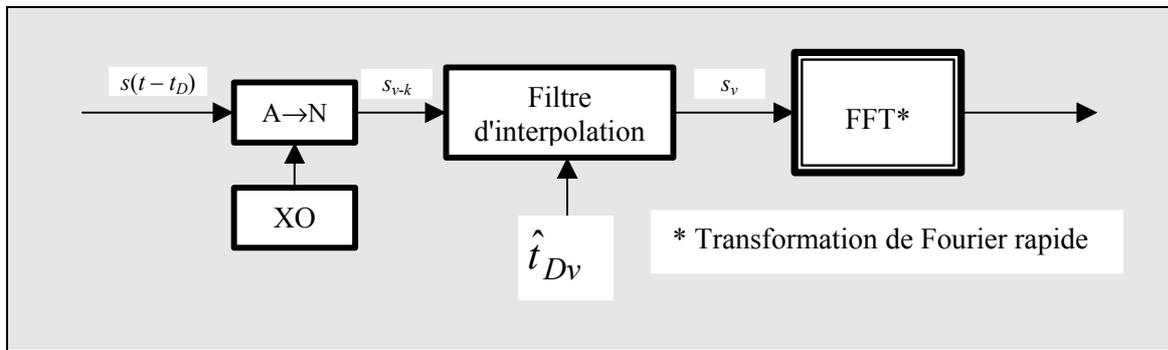
On trouvera ci-après la description des principales méthodes qui permettent de corriger le rythme dans les domaines temporel et fréquentiel sur la base des estimations d'erreur de rythme.

5.4.1 Correction d'erreur dans le domaine temporel discontinu

Beaucoup de méthodes ont été développées, pendant de nombreuses années, pour réaliser un retard fractionnaire dans le domaine temporel discontinu [8]. Le plus souvent, la correction de rythme fait appel à un filtre d'interpolation à réponse impulsionnelle finie (Figure 5.7).

Les coefficients du filtre dépendent de l'erreur temporelle, t_D , à corriger. Le convertisseur analogique numérique (A→N) transforme le signal d'entrée $s(t-t_D)$ et le numérise sous la forme S_{v-k} , où le coefficient k correspond au retard t_{Dv} . La régulation du signal correspondant à l'estimation de l'erreur temporelle \hat{t}_{Dv} influe sur le filtre d'interpolation en modifiant ses coefficients, le résultat de cette modification étant que le signal corrigé apparaît à la sortie du filtre. En conséquence, le spectre du signal à la sortie de l'étage FFT subit l'affaiblissement désiré des amplitudes spectrales et la rotation désirée des phases. Cette méthode est applicable dans le cas des lignes d'abonné ADSL [7]. Elle ne peut pas être utilisée dans les systèmes à très grand débit, par exemple les lignes d'abonné VDSL, car on a dans ce cas des fréquences d'échantillonnage élevées et les calculs se révèlent complexes. En VDSL, cependant, il est possible d'utiliser des circuits de synchroniseur qui exploitent la propriété retard-rotation [1].

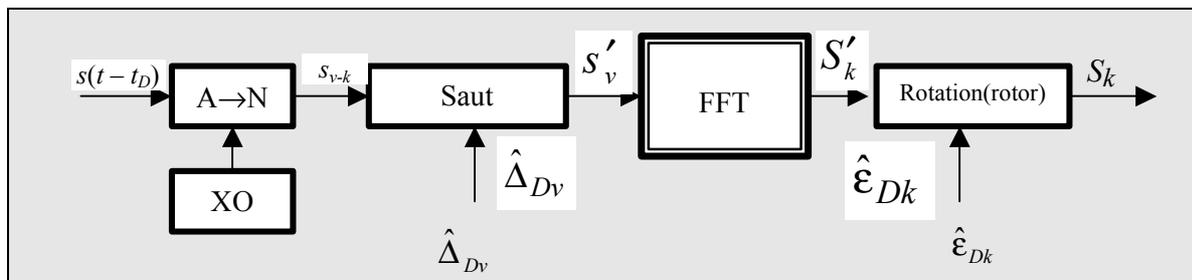
Figure 5.7 – Correction du rythme dans le domaine temporel discontinu



5.4.2 Correction d'erreur dans le domaine fréquentiel

Si le décalage de fréquence de l'horloge asservie est différent de zéro, l'erreur temporelle t_D croît proportionnellement au temps. En théorie, la correction d'erreur de rythme devrait être différente pour chaque échantillon de signal; cependant, le correcteur d'erreur TEC corrige le rythme pour chaque échantillon avec le même délai. En raison de la propriété retard-rotation, il est possible d'effectuer cette correction de rythme dans le domaine fréquentiel en faisant tourner les signaux de sortie de l'étage FFT, comme le montre la Figure 5.8 [1].

Figure 5.8 – Correction du rythme dans le domaine fréquentiel

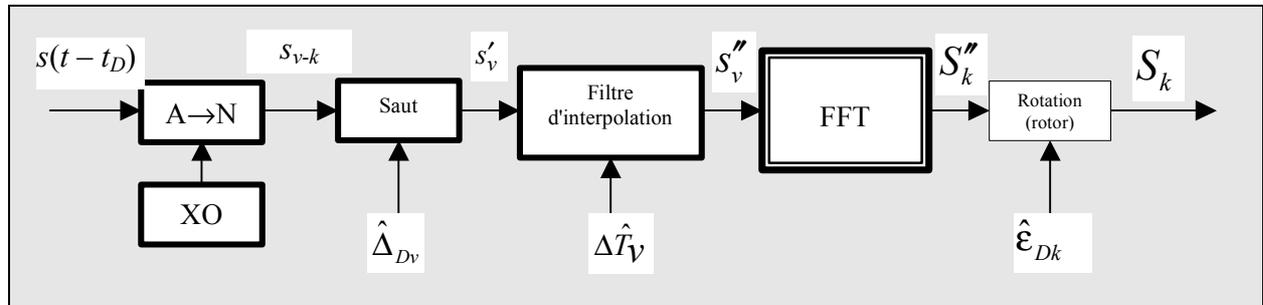


Le correcteur à sauts exerce une régulation discontinue du signal sur la partie entière, $\hat{\Delta}_{Dv}$, de l'estimation totale de l'erreur temporelle \hat{t}_{Dv} , de sorte que, dans le cas le plus simple, l'erreur à corriger est égale à ± 1 . La partie fractionnaire, $\hat{\epsilon}_{Dk}$, de \hat{t}_{Dv} est corrigée par rotation des composantes spectrales S'_k du signal, ce qui donne la forme spectrale désirée, S_k , à la sortie du rotor. L'intérêt de cette méthode réside dans sa simplicité. Il est inutile de pratiquer un suréchantillonnage à l'entrée du récepteur et, pour chaque porteuse, la correction est obtenue par simple multiplication de nombres complexes. La méthode fonctionne bien seulement si l'on peut garantir un petit décalage de fréquence. Il faut, pour cela, utiliser des oscillateurs à quartz de haute précision (XO), donc coûteux, dans l'émetteur et le récepteur. A titre de variante, on peut avoir recours à un oscillateur VCXO moins précis, et moins coûteux, pour réduire le décalage initial de l'échantillon de fréquence d'horloge. La correction du décalage résiduel se fait ensuite dans le domaine numérique [1].

5.4.3 Correction d'erreur dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel

La Figure 5.9 illustre la méthode de correction de l'erreur de rythme qui met en œuvre un filtre d'interpolation dans le domaine temporel et une rotation du spectre dans le domaine fréquentiel [1-3].

Figure 5.9 – Correction du rythme dans les domaines temporel et fréquentiel



Le filtre d'interpolation corrige l'incrément d'erreur, $\Delta \hat{T}_v$, de la même manière que dans la Figure 5.7, et le correcteur à sauts élimine l'erreur de rythme par échelons, comme indiqué dans la Figure 5.8. Enfin, le rotor fait tourner la phase du spectre pour donner la précision désirée de correction d'erreur de rythme, comme dans la Figure 5.8. Le principal avantage de cette méthode est que l'étage d'interpolation ne doit corriger que de petites erreurs de rythme. Par exemple, pour un décalage de fréquence de 100×10^{-6} et pour le code $N = 256$, l'interpolateur est appelé à corriger une erreur de rythme égale au maximum à $2,56 \times 10^{-2}$ échantillons. Un inconvénient de cette technique est l'utilisation de la propriété retard-rotation, qui ne se justifie que dans les conditions bien définies.

5.5 Synchronisation des réseaux

5.5.1 Synchronisation des centres de commutation téléphoniques dans le RTPC

Lors de leur mise en exploitation, les premiers systèmes de transmission numériques avec modulation MIC comportaient leurs propres sous-systèmes de synchronisation conçus pour les besoins internes de leurs équipements (Figure 5.4 a)). La Figure 5.4 b) décrit la situation au moment où les commutateurs numériques faisaient leur apparition dans les nœuds de réseau principaux. Avec le déploiement des centres numériques, le problème du fonctionnement synchrone s'est posé sur fond d'interaction efficacité-coût. Dans une approche pragmatique, la fréquence d'horloge doit être la même dans les canaux affluents à la sortie et à l'entrée du nœud principal. Cela étant, l'horloge interne de l'équipement MIC du nœud asservi doit être calée sur la fréquence f_0 de l'horloge interne de l'équipement MIC du nœud principal. De surcroît, ces deux horloges doivent être utilisées comme des sources de signaux de synchronisation pour les équipements numériques coopérants des nœuds correspondants. La Figure 5.4 c) montre ce qui suit: puisque des commutateurs numériques existent dans tous les nœuds des réseaux téléphoniques actuellement en service, on utilise une horloge de référence pour tous les équipements de chaque centre de commutation, les horloges internes des équipements MIC étant également calées sur cette horloge de référence. Cela pose le problème suivant: comment distribuer la fréquence de l'horloge de référence à des nœuds de commutation dispersés géographiquement? La solution de ce problème est fournie par la planification des réseaux de synchronisation. A cet égard, le système de synchronisation du réseau commuté de l'AT&T, réalisé dans les années 80, peut être considéré comme un exemple classique.

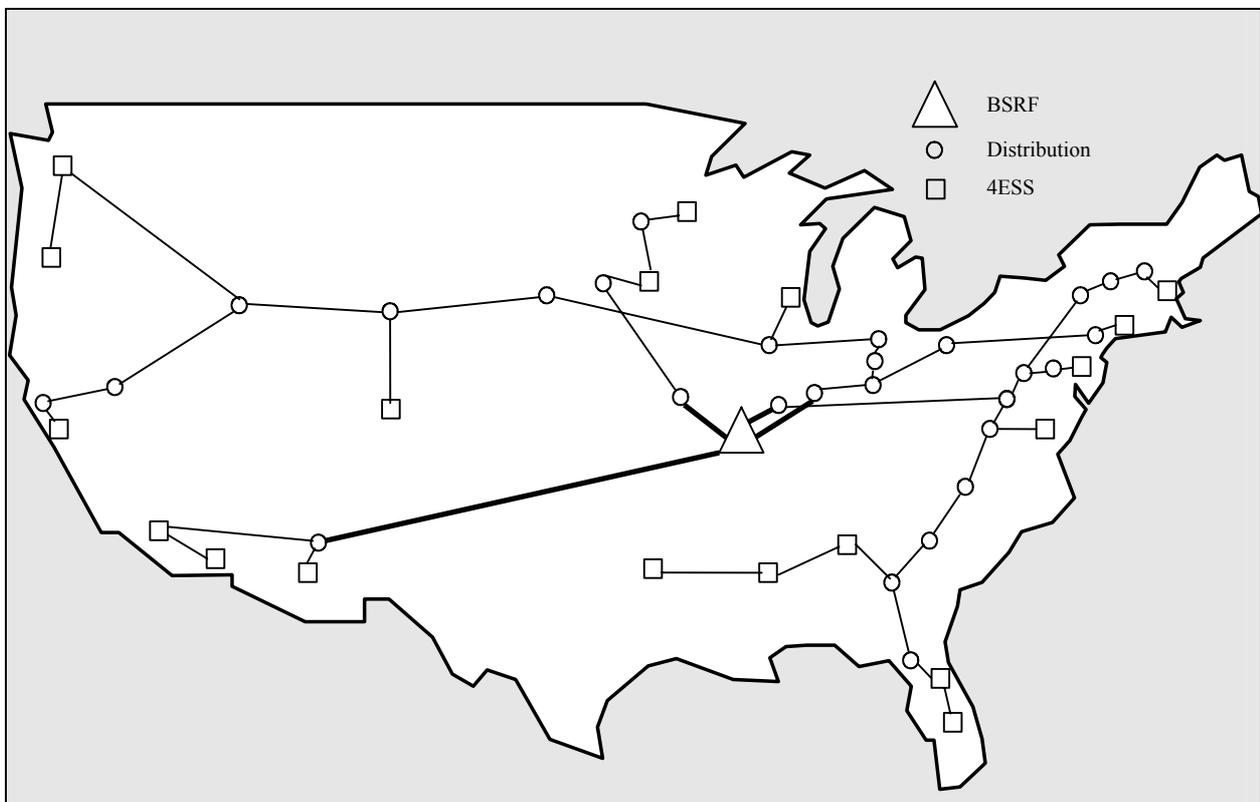
L'élément central du réseau de synchronisation de l'AT&T est un ensemble d'horloges au césium appelé BSRF, implanté au «centre de gravité» du pays. La fréquence de référence fournie par le BSRF est distribuée, par radiocommunications analogiques et câbles à paires coaxiales, aux centres de commutation

numériques type 4ESS; voir la Figure 5.10 [9]. Un tel réseau de distribution, hautement perfectionné mais coûteux, nécessite une maintenance qualifiée qui est source de dépenses supplémentaires. Il faut par conséquent donner quelques explications quant à la nécessité d'un réseau de synchronisation.

Dans un centre de commutation numérique, le système d'horloge gère le rythme sur des milliers de circuits de transmission de messages. Des mémoires tampons intermédiaires sont nécessaires pour absorber la «gigue» et le «dérapage» temporels qui se produisent dans les systèmes de transmission et pour réaliser le verrouillage de trame nécessaire à une commutation temporelle exempte d'erreurs. Le réseau contient de nombreuses horloges en interaction les unes avec les autres; il doit fonctionner avec une régulation fiable de la fréquence de toutes les sources de rythme (horloges), dans un intervalle limité de précision autorisée, pour donner une qualité de service acceptable. Dans ce contexte, les mémoires tampons intermédiaires se vident/débordent si le débit du train de bits à l'arrivée est lent/rapide par rapport à celui de l'horloge locale. Dans ces conditions, les données mémorisées sont soit lues deux fois, soit perdues. C'est la raison pour laquelle cette répétition ou ce retard de bits a reçu le nom de «glissement». Pour empêcher ce phénomène, la commande par mémoire tampon est mise en œuvre pour des glissements de mots de 8 bits uniquement dans les signaux numériques du type E1, et un taux moyen de glissements est considéré comme une caractéristique importante de la qualité de fonctionnement du réseau. Il va de soi qu'on s'efforce de faire en sorte que cette moyenne soit aussi petite que possible, compte tenu des effets suivants:

- l'introduction d'une tolérance plus stricte pour la précision de fréquence des horloges du réseau a pour corollaire une capacité relativement petite des mémoires tampons;
- inversement, un assouplissement de cette précision de fréquence entraîne une augmentation de la taille des mémoires.

Figure 5.10 – Distribution de la fréquence de référence des horloges dans le réseau de l'AT&T



L'augmentation de la taille des mémoires tampons entraîne une augmentation proportionnelle du temps de transmission dans le réseau. Il faut limiter cet important facteur de qualité de fonctionnement du réseau. Dans un certain nombre de services, l'accumulation des temps de transmission est préjudiciable à la qualité; en téléphonie, par exemple, un temps de transmission supérieur à 100 ms crée des difficultés en matière de suppression d'écho. On trouvera dans la référence [10] les recommandations nécessaires, au plan de l'exploitation, s'agissant des améliorations qui peuvent être apportées à la précision du rythme fourni par les horloges des réseaux (Tableau 5.1).

Tableau 5.1 – Objectifs de synchronisation et références

Élément à synchroniser	Objectifs	Références
Horloge interne de l'équipement MIC (précision absolue)	50×10^{-6}	Recommandation UIT-T G.703
Equipements les plus critiques du réseau POTS (précision absolue)	$\sim 1 \times 10^{-9}$	Données de l'AT&T [9]
Interface internationale des réseaux (précision par rapport au temps UTC)	1×10^{-11}	Recommandation UIT-T G.811
BSRF pour le réseau de transport (précision par rapport au temps UTC)	1×10^{-12}	Données de l'AT&T [9]
Nœud primaire du réseau de transport (stabilité)	$7 \times 10^{-13}/\text{jour}$ $1 \times 10^{-13}/\text{semaine}$	Objectifs de Bellcore [9]
Nœud secondaire du réseau de transport (stabilité)	$8 \times 10^{-13}/\text{jour}$ $3 \times 10^{-13}/\text{semaine}$	Objectifs de Bellcore [9]

5.5.2 Historique des travaux de l'UIT-T dans le domaine de la synchronisation des télécommunications

Dans le passé, les problèmes de synchronisation dans le RTPC étaient considérés comme des questions relevant de spécialistes sur le terrain; ils ne figuraient pas généralement dans les programmes de formation aux télécommunications. Après l'introduction de la hiérarchie numérique synchrone (SDH), les notions fondamentales relatives au temps et aux fréquences ont été reconsidérées et réduites à des formules recommandées pour éviter que les opérateurs des réseaux ne rencontrent des difficultés.

Avec l'important accroissement des réseaux (doublement du nombre de centres de commutation entre 1993 et 2000) et la création de nouvelles technologies (SDH/SONET, ATM, etc.) ayant leurs racines dans l'utilisation de services à valeur ajoutée (cartes de crédit, services avec numéros 800, etc.), il faut veiller à mettre en œuvre, dans un environnement favorable, de nouvelles technologies de réseau. La synchronisation est une condition nécessaire pour une exploitation et une gestion des réseaux avec une bonne qualité de service, à faible coût. Le dynamisme qui caractérise les activités des organismes internationaux de normalisation en matière de synchronisation des réseaux reflète le développement des technologies de réseau. L'expérience de l'AT&T (Figure 5.10) a trouvé son expression dans trois Recommandations du CCITT (Livre bleu, 1988):

G.810 «Considérations sur les problèmes de temps-fréquence et de synchronisation».

G.811 «Conditions sur le rythme de sortie des horloges de référence primaires destinées à l'exploitation en mode plésiochrone de liaisons numériques internationales».

G.812 «Conditions sur le rythme de sortie des horloges asservies destinées à l'exploitation en mode plésiochrone de liaisons numériques internationales».

Le fonctionnement en plésiochrone est un bon choix pour les interfaces internationales. Ce mode de fonctionnement permet d'évacuer un problème délicat: savoir qui doit synchroniser par rapport à qui, au niveau d'une passerelle transfrontière. En fonctionnement plésiochrone, on obtient nominalement le même débit dans tous les nœuds, mais sans réglages. La Figure 5.11 représente une chaîne de synchronisation type qui correspond aux Recommandations et aux spécifications relatives aux caractéristiques de rythme des horloges nodales (Tableau 5.2).

Tableau 5.2 – Caractéristiques de rythme des horloges nodales

CCITT, niveaux de strate (1988)	Précision de maintien	Précision en mode conservatoire		Référence normative
		Décalage de fréquence initial	Dérive de fréquence par jour	
PRC	$1,0 \times 10^{-11}$	–	–	G.811 (11/88)
TNC	–	$5,0 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-9}$	G.812 (11/88)
LNC	–	1.0×10^{-8}	2.0×10^{-8}	G.812 (11/88)
Horloge CPE	5.0×10^{-5}	–	–	I.431 (11/88)

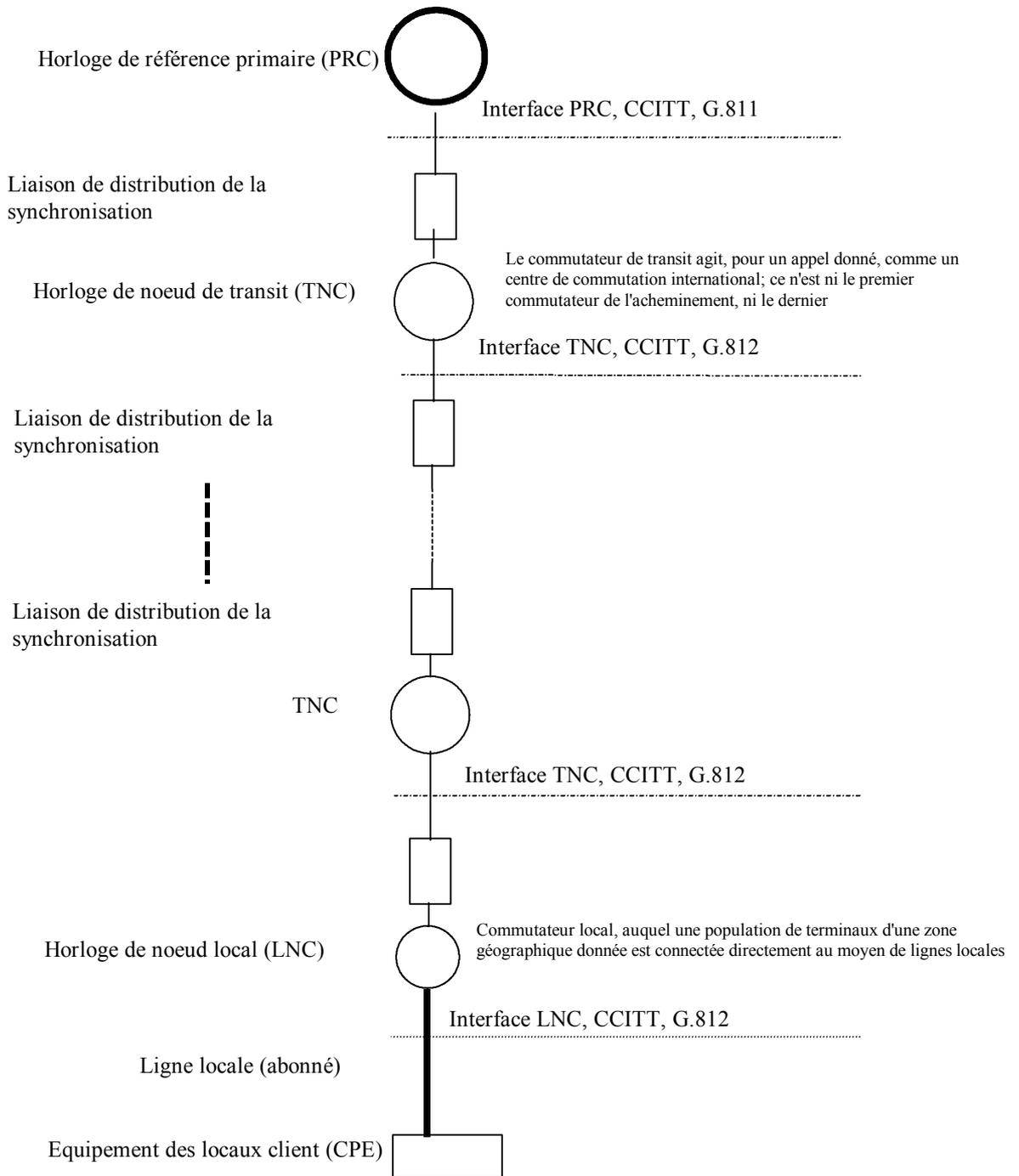
On notera que l'UIT-T ne détermine pas la précision de l'horloge nodale de transit (TNC). Au lieu de cette précision, on détermine la qualité de fonctionnement de l'horloge asservie dans le mode de fonctionnement conservatoire. Ce mode de fonctionnement démarre dès que le signal de référence n'est plus disponible (perte du signal de référence). Cela signifie qu'un signal de sortie de l'horloge asservie ne traduit plus une référence externe. En général, lorsqu'on est en fonctionnement conservatoire, la régulation des signaux de sortie de l'horloge est basée sur des données mémorisées qui ont été acquises pendant le fonctionnement avec verrouillage de maintien. Il est très utile alors de pouvoir prédire la variation temporelle de la fréquence de l'horloge asservie. Cette prédiction, pour laquelle on utilise le plus souvent un filtre de Kalman dans les boucles à verrouillage de phase, donne de bons résultats sur des heures ou des jours. La méthode moderne de modulation applicable aux horloges à quartz [11] donne de bons résultats sur des jours, des mois et des années. Elle est actuellement en cours de développement.

Les Recommandations spécifient la qualité de fonctionnement des horloges nodales à chaque niveau. En particulier, la Recommandation G.811 (11/88) fixe à 1×10^{-11} la limite à long terme pour l'horloge PRC par rapport au temps UTC, cette valeur étant celle des horloges au césium commerciales utilisées aux Etats-Unis en 1988.

NOTE – Les systèmes de distribution de la synchronisation (Figure 5.11) n'ont été traités que de façon isolée. Pour caractériser les liaisons qui relient entre elles les horloges nodales, il faut tout d'abord analyser leurs proportions. Des études sont en cours sur ce sujet. Enfin, pour obtenir des estimations globales de la performance des réseaux de synchronisation, on spécifie les définitions et les mesures normalisées relatives aux liaisons de distribution, qu'il est facile de combiner avec celle de l'horloge.

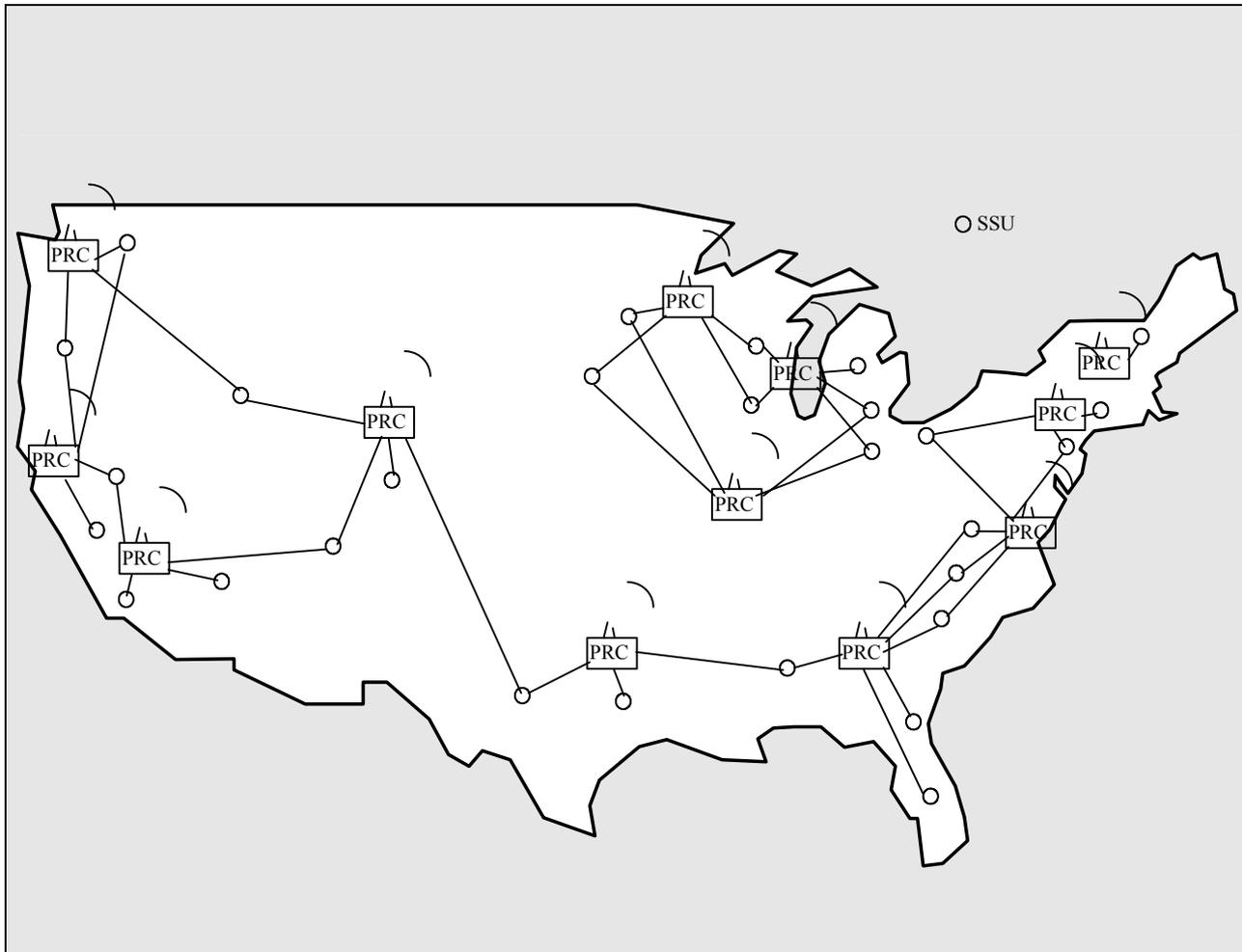
La synchronisation du RTPC garantit que tous les commutateurs numériques sont, en définitive, asservis à la même horloge maîtresse (voir la Figure 5.10). Néanmoins, dans la réalité des choses, le fonctionnement du réseau subit une contrainte quand les horloges asservies reçoivent un signal de synchronisation d'une horloge PRC par l'intermédiaire d'une liaison dégradée. En cas d'accumulation d'erreurs imputables à ces dégradations, l'imprécision sur la fréquence de la PRC peut augmenter de 10^{-12} à 10^{-10} [9, 12]. Autrement dit, les erreurs de rythme dans un réseau sont dues beaucoup plus à la distribution des signaux des horloges qu'aux horloges elles-mêmes. Ces dégradations de la qualité ne sont pas acceptables dans des réseaux de transport de haute technologie (SONET/SDH).

Figure 5.11 – Chaîne de synchronisation typique



Le nouveau plan de synchronisation de l'AT&T, mis en œuvre dans les années 90, améliore la précision dans un rapport de 10^2 . Il remédie aux défauts de la distribution de la synchronisation sur grandes distances. Ce plan est articulé avec le réseau de synchronisation à «PRC partiellement réparties» [13] (Figure 5.12).

Figure 5.12 – Synchronisation par PRC



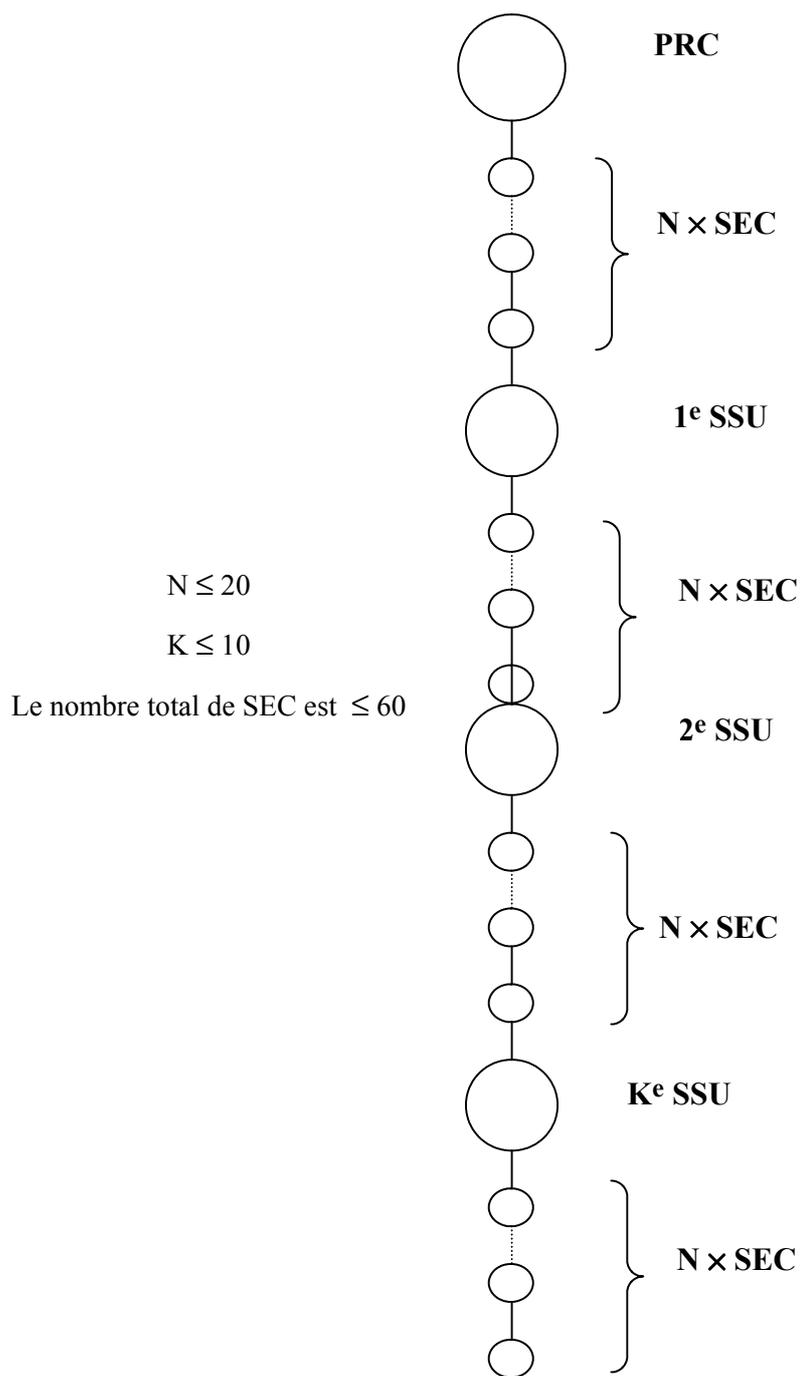
De nouveaux moyens de distribution des signaux d'horloge sont utilisés pour la nouvelle planification: le signal PRC de qualité optimale peut être reçu dans le monde entier grâce aux installations GPS/GLONASS, systèmes radioélectriques de repérage par satellite [14]. Au lieu d'une seule horloge PRC, on a seize PRC, fonctionnant en technologie GPS rubidium, dont les signaux sont distribués par un réseau de transport SONET entièrement numérique dans lequel les fonctions cruciales sont la transmission et la commutation par répartition dans le temps. Les horloges sont des dispositifs fiables, de conception simple et de coût modique, équipés du récepteur compact GPS. Elles satisfont aux spécifications des PRC, avec une précision de fréquence pouvant atteindre 3×10^{-12} (moyenne pour un jour) et une précision de temps de ± 150 ns par rapport au temps du système GPS [15]. Le réseau de PRC partiellement réparties est équipé de récepteurs GPS qui permettent aux nœuds de fonctionner avec une précision de rythme à long terme. Ce réseau, qui est abondamment interconnecté, possède de bonnes capacités de vérification à plusieurs niveaux, pour détecter les dégradations du rythme et remédier à ces dégradations avant qu'elles ne perturbent le service.

Ces spécifications sont à la base de plusieurs Recommandations récentes de l'UIT-T, par exemple:

- G.803 (06/97)** «Architecture des réseaux de transport à hiérarchie numérique synchrone» – Section 8: «Architecture des réseaux de synchronisation».
- G.810 (08/96)** «Définitions et terminologie des réseaux de synchronisation».
- G.811 (09/97)** «Caractéristiques de rythme des horloges de référence primaires».

- G.812 (09/97)** «Spécifications de rythme des horloges asservies utilisées comme horloges nodales dans les réseaux de synchronisation».
- G.813 (08/96)** «Caractéristiques de rythme des horloges asservies utilisées dans les équipements SDH».
- G.871 (02/99)** «Fonctions des couches de synchronisation».

Figure 5.13 – Nouveau réseau de synchronisation



La Figure 5.13 représente une chaîne symbolisant le nouveau système de synchronisation de réseau, dans lequel les horloges nodales sont interconnectées par l'intermédiaire de N éléments de réseau avec horloges du type G.813. A la différence du RTPC, on a représenté un seul type d'horloge asservie G.812, parce que la différence de comportement en mode conservatoire entre les horloges TNC et LNC est sans importance pour la synchronisation des réseaux SDH. Pour simplifier, on n'a pas indiqué dans la Figure 5.13 le système de distribution du signal de synchronisation. Il reste encore à effectuer des mesures pratiques pour vérifier ce modèle de référence «idéal». Par ailleurs, on n'a pas encore étudié les effets, dans cette connexion de référence, de la gigue et du dérapage temporels influencés par le réseau de transport. Quoi qu'il en soit, le bruit d'horloge est négligeable ici, comparé à celui de la ligne de transmission, car la longueur de la chaîne de référence peut être raccourcie dans la pratique.

On voit, par conséquent, que les nouvelles tendances en matière de synchronisation des réseaux reposent sur l'utilisation d'horloges PRC réparties et de chaînes de synchronisation plus courtes. Les horloges asservies présentent plusieurs entrées pour la réception des signaux de référence en provenance de PRC différentes. Une gestion de réseau est indispensable si l'on veut obtenir un fonctionnement fiable et stable avec ces réseaux de synchronisation. On trouvera dans la Recommandation UIT-T G.781 une description détaillée de l'organisation des chemins de synchronisation, avec la spécification des niveaux de qualité correspondants des signaux de synchronisation. Par exemple, à l'Option I du réseau de synchronisation SDH (pour le niveau hiérarchique 2 048 kbit/s), correspondent quatre niveaux de qualité de synchronisation (Tableau 5.3).

Tableau 5.3 – Niveaux de qualité de la synchronisation

Niveau de qualité (QL) [G.781, Option I]	Type d'horloge produisant le signal de synchronisation, avec spécification du QL correspondant
QL-PRC	Horloge de référence primaire, G.811 (09/97)
QL-SSU-A	Type I, G.812 (09/97) (ou horloge asservie Type V, identique à TNC de G.812 (11/88))
QL-SSU-B	Horloge asservie Type IV, G.812 (09/97), identique à TNC, G.812 (11/88)
QL-SEC	SEC Option I, G.813 (08/96)
QL-DNU (<i>do not use: ne pas utiliser</i>)	Ce signal ne doit pas être utilisé pour la synchronisation

La Recommandation UIT-T G.812 traite de trois types principaux de SSU:

- Type I est destiné à la mise en réseau au débit de 2 048 kbit/s (le dérapage et la largeur de bande des horloges sont limités à la mise en œuvre dans la chaîne de synchronisation de référence représentée Figure 5.13).
- Type II est destiné aux pivots de distribution – mise en réseau à 1 544 kbit/s.
- Type III est destiné aux commutateurs locaux – mise en réseau à 1 544 kbit/s.

Par ailleurs, la Recommandation UIT-T G.812 mentionne trois types supplémentaires de SSU pour les réseaux existants:

- Type IV doit être conforme à l'Option II de G.813 (mise en réseau à 1 544 kbit/s).
- Type V est identique à l'horloge TNC de G.812 (11/88).
- Type VI est identique à l'horloge LNC de G.812 (11/88).

5.6 Synchronisation en mode ATM

La principale caractéristique du mode de transfert asynchrone (ATM: *asynchronous transfer mode*) est la suivante: le transfert des données dans le réseau est asynchrone, mais cela est sans relation avec le service. Un réseau ATM doit écouler toutes les catégories de trafic, y compris celles qui sont intrinsèquement dépendantes du rythme. La synchronisation du réseau est donc un des problèmes les plus importants dans la conception d'un réseau ATM. Certaines catégories de trafic nécessitent une synchronisation entre la source et la destination. Ce sont par exemple [17]:

- Les services à débit binaire constant (CBR: *constant bit rate*);
- Les services vocaux (y compris avec compression);
- Les services vidéo (y compris avec compression);
- Le multimédia.

Les seuls réseaux ATM pour lesquels la synchronisation est inutile sont ceux qui ne fournissent pas ces types de service (par exemple, les réseaux pour données à débit binaire variable (VBR: *variable bit rate*).

5.7 Références

- [1] POLLET, Th. et PEETERS M. [1999] Synchronization with DMT Modulation. IEEE Communication Magazine. avril, p. 80-86.
- [2] MENDALI, U. et D'ANDREA, A.N. [1997] Synchronization Techniques for Digital Receivers. Plenum Press. 520p.
- [3] MEYR, H., MOENECLAEY, M. et FECHTEL, S. A. [1998] Digital Communication Receivers: Synchronization, Channel Estimation, and Signal Processing. Wiley. 827p.
- [4] SHOLTZ. R.A. [1980] IEEE Transactions COM-28, N° 8, août, p. 1204-1215.
- [5] BYLANSKI, P. et INGRAM, D.G.W. [1976] Digital Transmission System. Peregrinus Ltd. on behalf of the IEE.
- [6] COOPER, C.A. [1979] Synchronization for Telecommunications in a Switched Digital Network. IEEE Transactions COM-27, N° 7, juillet, p. 1028-1033.
- [7] ANSI. [1998] Network and Customer Installation Interfaces, Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL), Metallic Interface. T1.413-1998.
- [8] LAAKSO, et autres [1996] Splitting the Unit Delay: Tools for Fractional Delay Filter Design. IEEE Trans. on Signal Processing. janvier, p. 30-60.
- [9] ABATE, J.E. et autres [1989] AT&T New Approach to the Synchronization for Telecommunications Networks. IEEE Communications Magazine, Vol. 27, avril, p. 35-45.
- [10] KARTASHOFF, P. [1991] Synchronization in Digital Communication Networks. Proc. of the IEEE, Vol. 79, N° 7, juillet, p. 1019-1028.

- [11] SHMALIY, Yu.S. [1998] The Modulational Method of Quartz Crystal Oscillator Frequency Stabilization. IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 45, N° 6, p. 1476-1484.
- [12] Synchronization Telecommunications Networks: Fundamentals of Synchronization Planning. HP Application Note 1264-3.
- [13] WONG, S. [1997] How to Synchronize Telecommunication Networks. Proc. of 11th European Frequency and Time Forum. Neushatel, Oscilloquartz S.A., CH-2002, Suisse, mars.
- [14] LEWANDOWSKI, W. et THOMAS, C. [1991] GPS Time Transfer. Proc. of the IEEE, Vol. 79, N° 7, p. 991-1000.
- [15] GPS-I Integrated GPS Receiver for OSA5548. SyncTrack, Oscilloquartz, A Company of SMH. Edition 01/août 96/FECH.
- [16] Synchronization Telecommunications Networks: Synchronizing SDH/SONET. HP Application Note 1264-2.
- [17] DUTTEN, J.R. et LENHARD, P. [1995] Asynchronous Transfer Mode (ATM). Second Edition. Prentice Hall PTR, New Jersey.

5.8 Abréviations

A→N	Convertisseur analogique-numérique (<i>analogue-to-digital converter</i>)
ADSL	Ligne d'abonné numérique asymétrique (<i>asymmetric digital subscriber line</i>)
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ATM	Mode de transfert asynchrone (<i>asynchronous transfer mode</i>)
BP	(Filtre) passe-bande (<i>band pass (filter)</i>)
BSRF	Fréquence de référence de synchronisation de base (<i>basic synchronization reference frequency</i>)
BVP	Boucle à verrouillage de phase
CBR	Débit binaire constant (<i>constant bit rate</i>)
CCITT	Comité consultatif international télégraphique et téléphonique (prédécesseur de l'UIT-T)
CPE	Équipement des locaux client (<i>customer premises equipment</i>)
DA	Avec assistance des données (synchronisation) (<i>data-aided (synchronisation)</i>)
E1	Format européen de téléphonie numérique (spécifié par la Conférence des administrations européennes des postes et télécommunications): transport de données au débit de 2,048 Mbit/s
4ESS	Système de commutation électronique N° 4 (<i>No 4 electronic switching system</i>) – Système tandem du Bell System appliquant la commutation numérique temporelle
GLONASS	Système mondial de navigation par satellite (<i>global navigation satellite system (Russie)</i>)
GPS	Système mondial de radiopéage (<i>global positioning system (Etats-Unis)</i>)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
LNC	Horloge nodale locale (<i>local node clock</i>)
LP	(Filtre) passe-bas (<i>low pass (filter)</i>)

MIC	Modulation par impulsions et codage
ML	Vraisemblance maximale (<i>maximum likelihood</i>)
NDA	Sans assistance des données (synchronisation) (<i>non-data-aided (synchronisation)</i>)
POTS	Service téléphonique traditionnel (classique) (<i>plain old telephone service</i>)
PRC	Horloge de référence primaire (<i>primary reference clock</i>)
RTPC	Réseau téléphonique public commuté
SDH	Hierarchie numérique synchrone (<i>synchronous digital hierarchy</i>)
SEC	Horloge asservie d'équipement SDH (<i>SDH equipment slave clocks</i>)
SONET	Réseau optique synchrone (<i>synchronous optical NETWORK</i>)
SSU	Unité (de distribution) de synchronisation (<i>synchronization supply unit</i>)
TEC	Correcteur d'erreur de rythme (<i>timing error corrector</i>)
TED	Correcteur d'erreur de rythme (<i>timing error detector</i>)
TNC	Détecteur
UIT-T	Union internationale des télécommunications – Secteur de la normalisation des télécommunications
UTC	Temps universel coordonné (<i>coordinated universal time</i>)
VBR	Débit binaire variable (<i>variable bit rate</i>)
VCXO	Oscillateur à quartz commandé en tension (<i>voltage controlled crystal oscillator</i>)
VDSL	Ligne d'abonné numérique à très grand débit (<i>very-high-rate digital subscriber line</i>)
XO	Oscillateur à quartz (<i>crystal oscillator</i>)

CHAPITRE 6

6 Transmission numérique (PDH, SDH, DWDM, xDSL)

6.1 Hiérarchie numérique synchrone (PDH)

6.1.1 Principes

Le début de la décennie 1960 a vu apparaître des techniques de transmission nouvelles qui mettent en œuvre la modulation par impulsions et codage (MIC). Ces techniques associent la modulation par impulsions et codage avec la transmission en multiplexage par répartition dans le temps. Comme les techniques avec porteuses MRF, elles permettent l'utilisation d'un circuit de transmission unique pour plusieurs voies téléphoniques.

Le principe de base de la transmission en MIC est l'échantillonnage périodique de signaux à fréquences vocales. La fréquence d'échantillonnage est plésiochrone, c'est-à-dire qu'elle a une valeur nominale, avec une excursion admissible par rapport à cette valeur. L'amplitude analogique obtenue à chaque instant d'échantillonnage est convertie en plusieurs impulsions numériques qui sont disposées à l'intérieur d'un intervalle de temps (créneau temporel). Le signal transmis à la ligne se compose d'une série de ces intervalles de temps qui sont reconvertis, dans le terminal de réception, en une série de signaux analogiques. Cela permet de reconstituer l'information de parole analogique. Les intervalles de temps de parole sont placés dans des trames qui contiennent aussi des intervalles temps servant à la synchronisation des trames et à la signalisation.

Les signaux de ligne MIC se composent d'impulsions numériques qui peuvent être régénérées par des répéteurs numériques relativement simples, placés à intervalles réguliers. Le rapport signal/bruit, l'affaiblissement et la distorsion sont pratiquement indépendants du nombre de ces répéteurs. Les limites sont fixées par la gigue cumulée. Les exigences, moins strictes, en matière de qualité du support de transmissions ont une contrepartie, à savoir la nécessité d'augmenter la largeur de bande. Le codage-décodage MIC est un processus dans lequel une infinité d'amplitudes est représentée par un nombre fini d'échantillons quantifiés. Ce processus génère un bruit de quantification, que l'on peut réduire en appliquant des méthodes de codage non linéaire.

Un des avantages de la transmission numérique est la possibilité de traiter tous les types de signaux représentés en forme numérique, par exemple la parole, les données, le son et la vidéo.

6.1.2 Normes

L'UIT a défini les multiplexeurs MIC et numériques dans ses Recommandations de la série G.

On trouvera ci-après la référence de quelques-unes des Recommandations les plus importantes, avec leur titre abrégé:

- Débits binaires de la hiérarchie numérique (G.702);
- Caractéristiques des jonctions numériques (G.703);
- Principales caractéristiques des équipements de multiplexage (G.731 – G.755).

Trois hiérarchies de multiplexage sont utilisées dans le monde. Elles diffèrent par les débits binaires, le format des trames et les méthodes de codage. Voir le Tableau 6.1.

Tableau 6.1 – Niveaux PDH

Niveau PDH	Europe (loi A)		USA (loi μ)		Japon (loi μ)	
0	64 kbit/s	1 ch	64 bit/s	1 ch	64 kbit/s	1 ch
1	2048 kbit/s	30 ch	1544 kbit/s	24 ch	1544 kbit/s	24 ch
2	8448 kbit/s	120 ch	6312 kbit/s		6312 kbit/s	
3	34,368 Mbit/s	480 ch	44,736 Mbit/s		32,064 Mbit/s	
4	139,264 Mbit/s	1920 ch	139,264 Mbit/s		97,728 Mbit/s	

Les Recommandations décrivent les fonctions des équipements mais ne renseignent pas sur la mise en œuvre. Certaines des fonctions essentielles sont les suivantes:

Echantillonnage	L'amplitude du signal analogique (largeur de spectre 4 kHz) est mesurée (échantillonnée) 8 000 fois par seconde.
Quantification et codage	Chaque échantillon est représenté par un code à 8 bits qui permet d'obtenir 256 mots de code représentant 256 niveaux de signal analogique.
Voie	Chaque voie téléphonique est représentée par des mots de 8 bits se répétant 8 000 fois par seconde, ce qui donne un débit binaire de 64 kbit/s.
Verrouillage de trame	Les intervalles de temps représentant plusieurs voies sont multiplexés les uns avec les autres pour former une trame, laquelle est identifiée par un mot de verrouillage de trame. Les trames peuvent aussi contenir des informations de signalisation et de gestion.
Gestion	Les bits de gestion présents dans les trames déclenchent des actions spécifiques et les signaux correspondants. Cela simplifie l'identification de la source et la localisation des défauts.

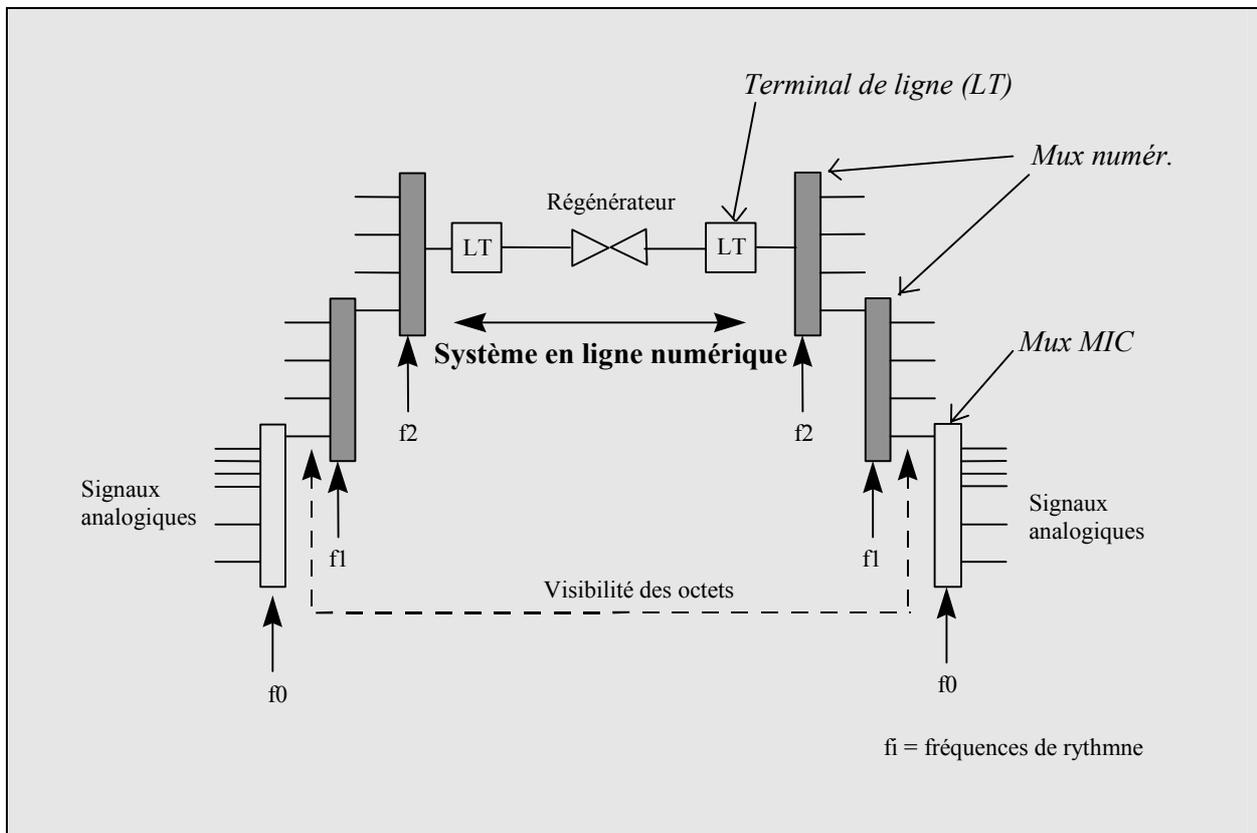
6.1.3 Mise en œuvre

La Figure 6.1 illustre la transmission plésiochrone, depuis un multiplexeur MIC jusqu'à un centre de commutation, avec utilisation de multiplexeurs numériques et de systèmes en lignes numériques. Chaque multiplexeur numérique possède sa propre source de rythme. En raison de l'entrelacement des éléments binaires (bits) à chaque niveau du multiplexeur, la structure à 8 éléments binaires (octet) de chaque voie n'est accessible qu'aux points d'extrémité de la connexion. Les sources de rythme des différents multiplexeurs interdisent l'extraction de telle ou telle voie (intervalle de temps) d'une trame de rang supérieur sans le recours à un muldex supplémentaire. Par ailleurs, chaque trame plésiochrone fournit très peu d'information de préfixe, qui serait nécessaire pour une gestion efficace du réseau. Malgré les avantages de la hiérarchie PDH par rapport à la transmission analogique (voir plus haut), la transmission plésiochrone ne conviendra pas pour les futurs réseaux intégrés.

Les systèmes plésiochrones sont utilisés, par exemple:

- dans les zones rurales, avec des câbles à paires aériens (niveaux de multiplexage 1 et 2);
- dans les zones locales, pour les connexions entre stations radioélectriques (niveau de multiplexage 1 et 2);
- dans les réseaux à grande distance, avec câbles à paires coaxiales et câbles à fibres optiques (niveaux de multiplexage 3, 4 et 5).

Figure 6.1 – Exemple de multiplexage plésiochrone



6.2 Hiérarchie numérique synchrone (SDH)

6.2.1 Principes

Au milieu des années 80, on a observé un accroissement de la demande pour des débits binaires plus élevés, pour un traitement plus souple des voies de transmission et pour une gestion plus élaborée, ce qui a conduit au concept de hiérarchie numérique synchrone (SDH: *synchronous digital hierarchy*). La SDH élargit les principes de la hiérarchie PDH en définissant de nouveaux niveaux administratifs qui découlent de l'entrelacement direct des octets. Il en résulte un certain nombre d'avantages:

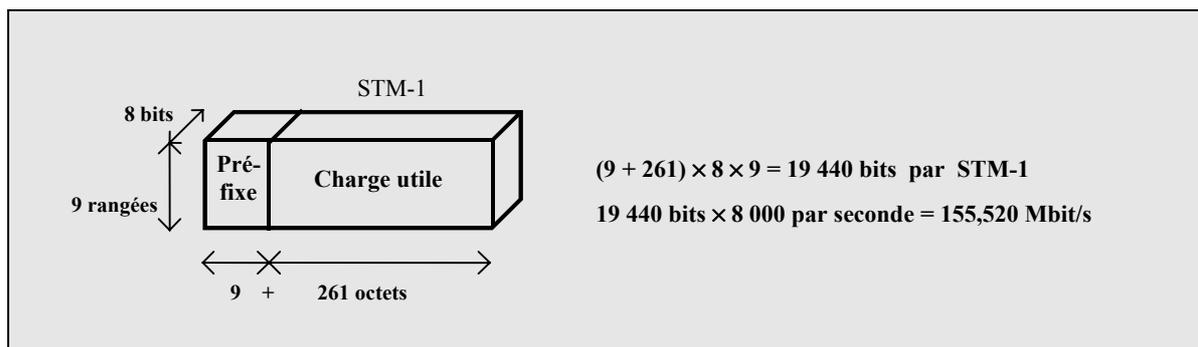
- Des voies numériques à 64 kbit/s ou des groupes de voies peuvent être ajoutés directement aux signaux SDH ou extraits directement de ces signaux. Cela permet d'utiliser des équipements d'insertion/extraction économiques.
- Des signaux plésiochrones appartenant à différents niveaux et à différentes hiérarchies (par exemple, CEPT, ANSI) peuvent être mappés sur SDH et transmis sur des signaux SDH.
- Des voies numériques appartenant à différents niveaux peuvent être commutées dans des équipements de brassage numériques synchrones (DXC: *digital cross connect*).
- L'acheminement dans les réseaux DXC peut être commandé et contrôlé. On peut ainsi obtenir, de manière souple, différentes configurations de réseau logique à des instants différents.

- Les équipements DXC permettent d'appliquer les traitements suivants à l'information transmise: tri (par exemple, séparation des signaux de données, des signaux vocaux et des signaux vidéo) et compactage (utilisation économique des supports de transmission).
- Dernier avantage et non le moindre: les équipements SDH et DXC ont été conçus pour une gestion des réseaux appliquant les principes des réseaux de gestion des télécommunications (RGT).

Les signaux SDH sont transmis sous la forme de modules de transport synchrones (STM: *synchronous transport modules*). Le module STM-1, représenté dans la Figure 6.2, contient 2 349 octets de données (charge utile STM) et 81 octets de préfixe (STM OH: *STM overhead*) qui sont transmis 8 000 fois par seconde, ce qui donne un débit binaire de transmission égal à 155,520 Mbits/s. On obtient des débits de transmission plus élevés $155,52 \times N$ au moyen des modules de transport synchrones STM-N, avec les niveaux de STM-N = 4, 16 et 64.

La charge utile des STM contient les informations indiquées dans le plan de multiplexage SDH, illustré par la Figure 6.3. Les signaux plésiochrones sont convertis (mappés) en signaux synchrones, introduits dans des conteneurs virtuels (VC: *virtual containers*), multiplexés et transmis sous la forme de modules de transport synchrones (STM) sur une ligne numérique. Les VC et les STM contiennent également une grande quantité d'information de préfixe, pour la gestion et l'alignement de phase des signaux numériques aux divers étages de multiplexage.

Figure 6.2 – Représentation du module de transport synchrone STM-N



6.2.2 Normes

L'UIT a spécifié les équipements SDH et leur gestion dans les Recommandations de la série G. On trouvera ci-après la référence de quelques-unes des Recommandations les plus importantes, avec leur titre abrégé et des renseignements plus détaillés:

- Réseaux numériques et leur architecture (G.801, G.802, G.803, G.805)
- Caractéristiques principales des équipements de multiplexage en SDH (G.781, G.782, G.783)
- Systèmes de ligne numérique (G.957, G.958)
- Gestion de la hiérarchie numérique synchrone (G.773, G.774, G.784).

Le Tableau 6.2 indique les niveaux de la hiérarchie SDH, les débits binaires correspondants et le nombre de voies à 64 kbit/s.

Le réseau optique synchrone (SONET: *synchronous optical network*) fonctionne au débit de 52 Mbit/s (norme des Etats-Unis), qui peut être multiplexé pour donner STM-1.

Tableau 6.2 – Niveau SDH

Niveaux SDH	Débit binaire (kbit/s)	Nombre de voies téléphoniques
STM-1	155 520	1 920
STM-4	622 080	7 680
STM-16	2 488 320	30 720
STM-64	9 953 280	122 880

La Figure 6.3 représente le plan de multiplexage accepté à l'échelon mondial et la Figure 6.4 donne un exemple de multiplexage qui applique ce plan.

Un signal affluent plésiochrone de 2 Mbit/s est mappé sur un conteneur synchrone (C-12), avec addition de bits de justification pour réaliser l'adaptation de fréquence. Après inclusion d'une information de préfixe de conduit (VC-12 POH: *VC-12 path overhead*) pour la gestion du conduit, on obtient le conteneur virtuel (VC-12). La différence de phase entre VC-12 et les unités d'affluents (TU: *tributary units*) est indiquée par un pointeur d'unité d'affluents; après inclusion du pointeur, on obtient l'unité d'affluents TU-12 (traitement du pointeur). Dans le premier étage de multiplexage, trois unités TU-12 sont insérées dans un groupe d'unités d'affluents (TUG-2: *tributary unit group-2*). Le deuxième étage de multiplexage combine sept TUG-2 avec l'information de préfixe de conduit (VC-3 POH) dans le conteneur virtuel VC-3. Après inclusion d'une information de pointeur pour l'alignement de phase, on obtient l'unité administrative AU-3 (traitement du pointeur). Dans le troisième étage de multiplexage, trois unités AU-3 sont multiplexées avec le groupe d'unités administratives (AUG: *administrative unit group*). Enfin, dans le quatrième étage de multiplexage, N groupes AUG sont entrelacés en octets. Le module STM-N est obtenu après addition du préfixe de section de régénération (RSOH: *repeater section overhead*), pour la gestion des sections de régénération, et du préfixe de section de multiplexage (MSOH: *multiplex section overhead*), pour la gestion des sections de multiplexage.

Avec ce dispositif, un module STM-1 peut transmettre soit $3 \times 7 \times 3 = 63$ affluents à 2 Mbit/s, soit 3 affluents à 34 Mbit/s, soit encore un affluent à 140 Mbit/s.

Les Recommandations relatives à la hiérarchie SDH décrivent en détail l'information de préfixe mise à disposition par le module STM-N pour la gestion des conduits des conteneurs virtuels et des sections de multiplexage et de régénération, ainsi que les nombreuses fonctions de gestion mises en œuvre à travers les interfaces Q3 du Réseau de gestion des télécommunications. Les terminaux SDH sont équipés d'une protection de section de multiplexage qui s'applique aux connexions de point à point. Des boucles de protection partagée de section de multiplexage (MSSP: *multiplex section shared protection rings*) – deux boucles bidirectionnelles reliées à des multiplexeurs du type insertion/extraction – offrent une protection efficace contre les pannes des points nodaux ou des boucles.

6.2.3 Mise en œuvre

Les réseaux SDH contiennent des multiplexeurs SDH (multiplexeurs terminaux et du type insertion/extraction), des brasseurs numériques (avec plusieurs niveaux de brassage) et des systèmes en ligne numérique (avec câbles à paires coaxiales ou fibres optiques). La Figure 6.5 représente un réseau SDH type pour la transmission d'affluents plésiochrones.

Figure 6.3 – Plan de multiplexage SDH

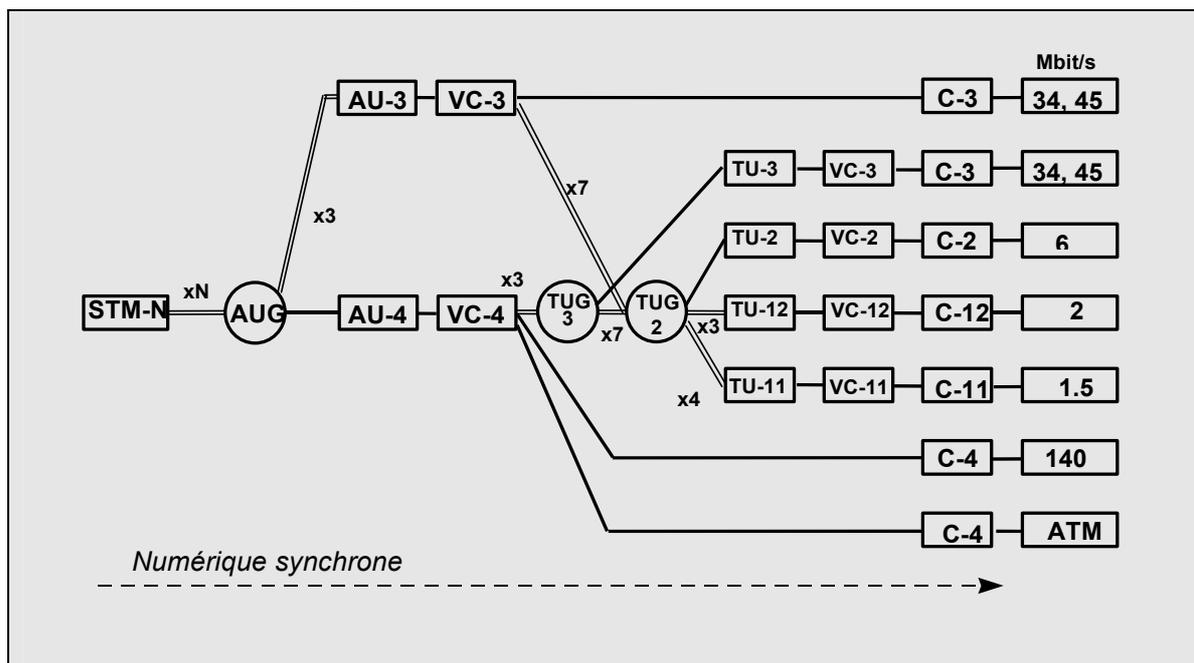


Figure 6.4 – Exemple de multiplexage à 2 Mbit/s

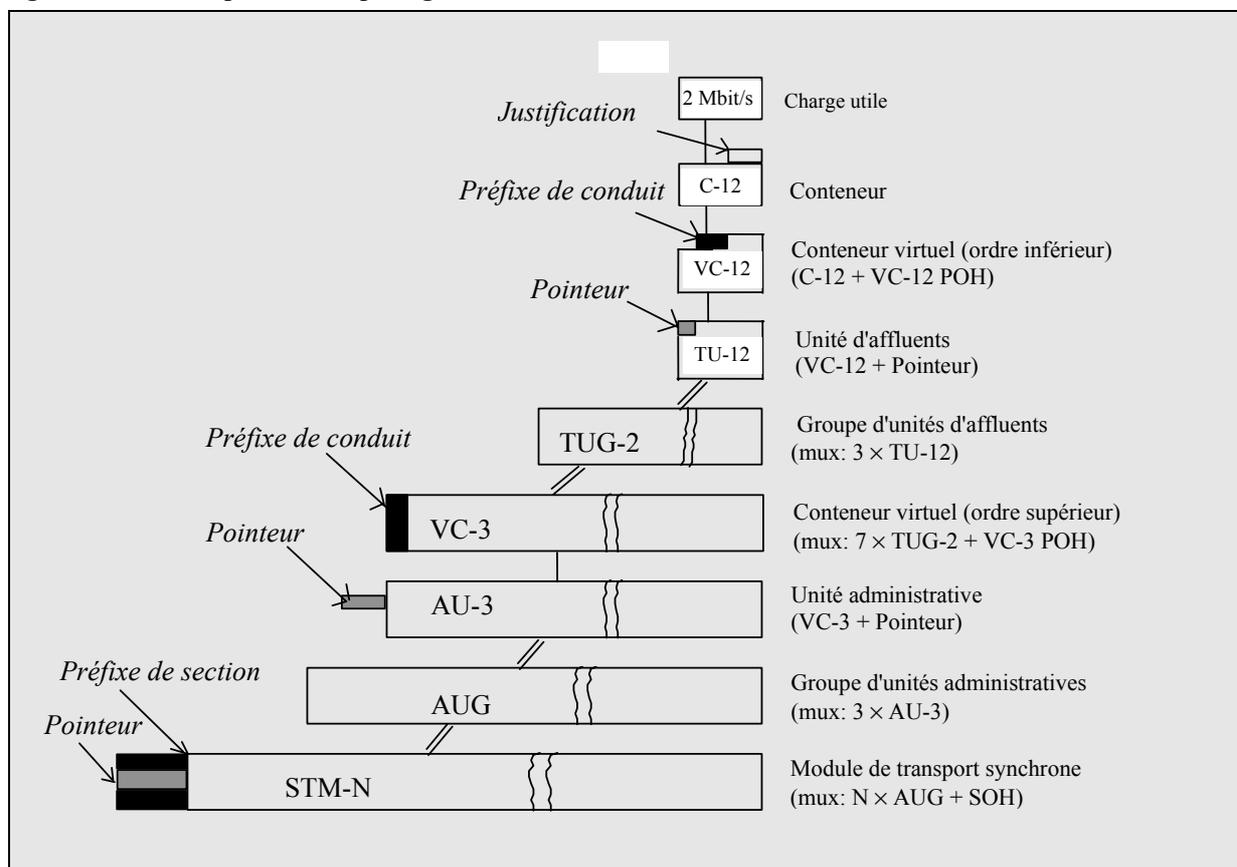
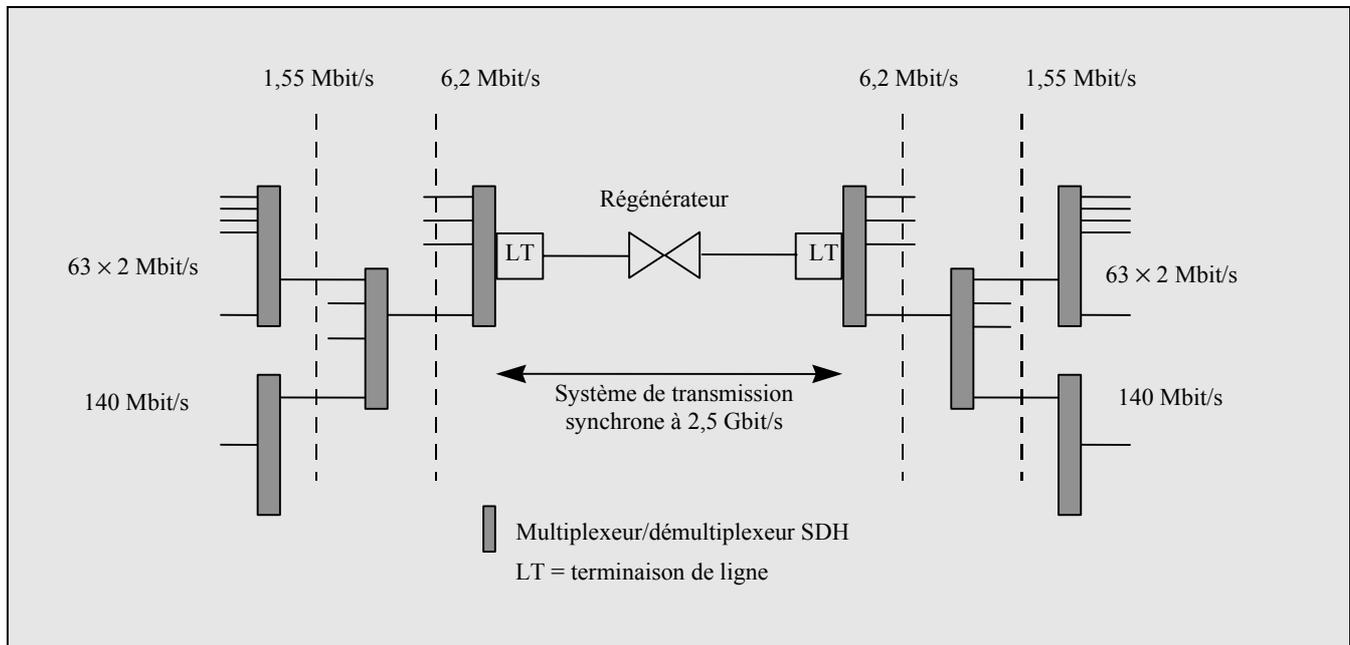


Figure 6.5 – Exemple de réseau de transmission SDH



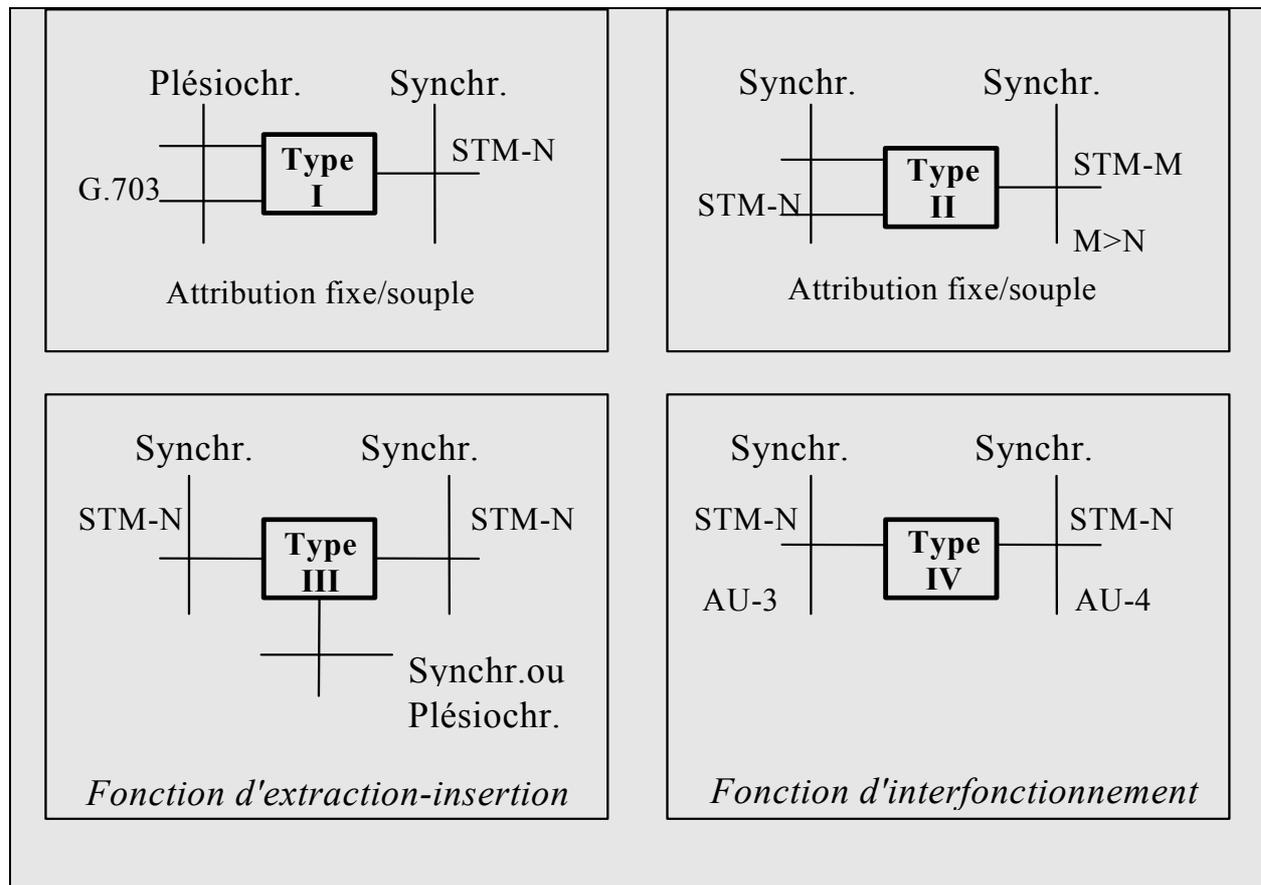
Plusieurs types de multiplexeurs ont été normalisés. Voir la Figure 6.6:

- Type I Pour la conversion des signaux plésiochrones en signaux synchrones STM-N. La transmission synchrone permet d'acheminer les signaux entre des terminaux plésiochrones ou des éléments du réseau.
- Type II Pour la conversion entre les différents signaux STM. Le multiplexage de plusieurs signaux STM-1 permet d'accéder à un débit binaire plus élevé et d'utiliser plus efficacement les câbles à fibres optiques.
- Type III Pour l'extraction/insertion de signaux plésiochrones et synchrones, afin d'obtenir des signaux STM-N. Des voies individuelles ou des groupes de voies peuvent être insérés dans un train de bits synchrone ou extraits d'un tel train binaire, par exemple pour des multiplexeurs à insertion/extraction en configuration annulaire.
- Type IV Pour l'interfonctionnement des unités administratives AU-4 (CEPT) et AU-3 (ANSI). Interfonctionnement entre des hiérarchies différentes, par exemple si des signaux SDH version CEPT doivent être transmis sur des installations ANSI, et inversement.

Les types I et II permettent une attribution souple des voies, ce qui correspond à une fonctionnalité de brassage limitée.

Les équipements de brassage numérique (DXC: *digital cross connect*) permettent de commuter divers affluents synchrones et, après mappage, divers affluents plésiochrones qui pénètrent dans ces équipements et en sortent au niveau des accès (ports). Le niveau utilisé pour la commutation (niveau de brassage) est égal ou inférieur au niveau des ports. Niveaux types des ports, 2, 34, 140 Mbit/s et signaux STM-1. Niveaux types de brassage: VC-12, VC-3, VC-4.

Figure 6.6 – Types de multiplexeur SDH



Les divers équipements de brassage numérique peuvent être caractérisés par ces niveaux, comme expliqué ci-après:

- DXC 1/0 par exemple, niveau de port 2,048 Mbit/s et niveau de brassage 64 kbit/s pour les réseaux de lignes louées à 64 kbit/s.
- DXC 4/1 par exemple, niveau de port 140 Mbit/s et niveau de brassage VC-12 pour les réseaux de lignes louées à 2 Mbit/s.
- DXC 4/4 par exemple, niveau de port 140 Mbit/s ou STM-1 et niveau de brassage VC-4 pour la protection du réseau, et DXC 4/1 pour l'administration du réseau.

Selon les besoins, on a envisagé plusieurs combinaisons d'équipement DXC, par exemple:

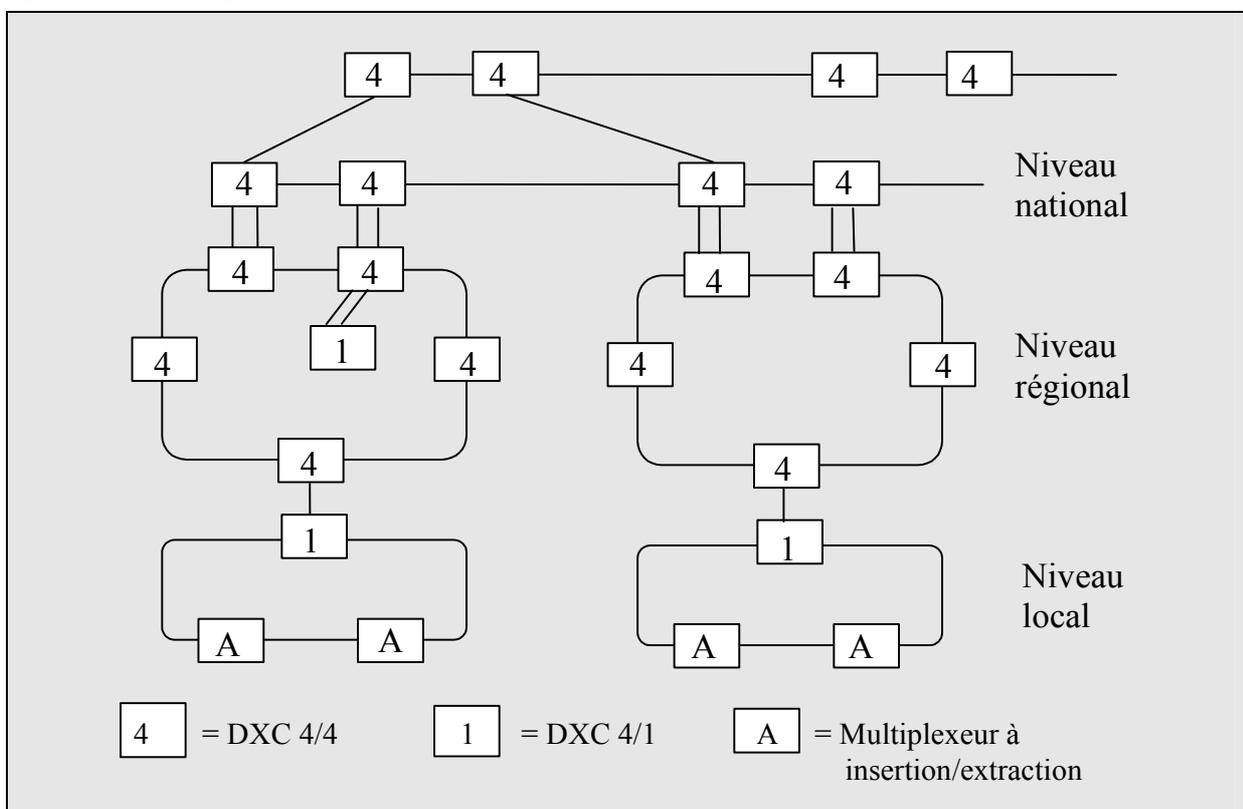
Tableau 6.3 – Types d'équipements de brassage numérique (DXC)

Type de DXC	Niveaux de port (plésiochrone et synchrone) et niveaux de brassage
Type I	140 Mbit/s/STM-N (VC-4)
Type II	2, 34, 140 Mbit/s/STM-N (VC-12)
Type III	2, 34, 140 Mbit/s (VC-12) et 34 Mbit/s (VC-3) et 140 Mbit/s (VC-4)/STM-N

Les systèmes de ligne numérique, les multiplexeurs SDH et les équipements DXC entrent dans la composition des nouveaux réseaux de transmission numériques. La Figure 6.7 en donne une configuration typique. Ce réseau se divise en trois couches (couches nationale, régionale et locale), avec une configuration essentiellement annulaire dans chaque couche. Cette structure s'explique par les considérations suivantes:

- la souplesse de fonctionnement des DXC permet d'accroître le degré d'utilisation et de simplifier la planification. Par exemple, pour les connexions entre les usagers dans différents secteurs du réseau d'accès, on utilise la couche régionale et on a recours à la couche nationale pour l'établissement de la connexion;
- on obtient une excellente fiabilité grâce aux boucles MSSP et grâce à l'utilisation de deux connexions nodales entre deux boucles adjacentes;
- la simplicité structurelle de ce réseau convient bien au RGT, d'où simplification de l'exploitation, de l'administration et de la maintenance et abaissement des dépenses de gestion.

Figure 6.7 – Exemple de réseau SDH



L'introduction de la hiérarchie SDH peut se faire selon trois stratégies différentes:

- La stratégie descendante, dans laquelle la SDH est mise en œuvre, pour commencer, dans le réseau interurbain et grande distance afin d'accroître la capacité de transmission et d'améliorer les conditions de la gestion.
- La stratégie ascendante, avec introduction initiale de la SDH dans le réseau local pour former des îlots SDH, par exemple à l'intention des usagers locaux qui ont besoin d'une interconnexion pour transmission de données à grand débit.
- La stratégie de recouvrement, qui conduit à la mise en place de réseaux SDH séparés, par exemple pour des usagers dispersés qui ont besoin d'une qualité améliorée et de débits de données comparables à ceux des réseaux existants.

6.3 Multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) à haute densité

6.3.1 Principes

Les usagers demandent sans cesse des largeurs de bande accrues, à un prix raisonnable. Cette demande, compte tenu également de l'évolution des fibres optiques et des composants à fibres optiques, a conduit à un regain d'intérêt pour les systèmes à répartition en fréquence (MRF). Toutefois, les systèmes MRF à fil de cuivre ne pouvaient transmettre qu'environ 10 000 voies téléphoniques analogiques. Avec la technologie moderne, les systèmes de multiplexage par répartition en longueur d'onde à haute densité (DWDM: *dense wavelength division multiplex*) sur fibres optiques pourront transmettre quelque 30 millions de voies téléphoniques numériques ou un nombre correspondant de voies à large bande.

La Figure 6.8 illustre l'évolution des systèmes de transmission à fibres optiques.

Au début des années 70, on avait des systèmes équipés d'émetteurs à diodes électroluminescentes (LED: *light emitting diode*) et de fibres multimodes transmettant dans la bande des 1,3 μm . Ces systèmes, dont les répéteurs étaient espacés de 10 km, transmettaient à un débit d'environ 300 Mbit/s.

A la fin des années 80, la situation avait évolué comme suit: systèmes avec émetteurs laser utilisant des fibre monomodes (bande des 1,55 μm) avec espacement de répéteurs de 100 km, capables d'atteindre un débit d'environ 2 500 Mbit/s.

Les systèmes de la fin des années 90 auront les caractéristiques suivantes: lasers à bande étroite fonctionnant en parallèle sur des fréquences différentes; amplificateurs à fibres dopées à l'erbium; fibres monomodes (bande des 1,55 μm); distance de 120 km entre amplificateurs. Ces systèmes fonctionneront à des débits pouvant aller jusqu'à environ 2 500 Gbit/s. Toutefois, la distance totale entre terminaux DWDM sera limitée à quelque 600 km.

Figure 6.8 – Evolution des systèmes de transmission à fibres optiques

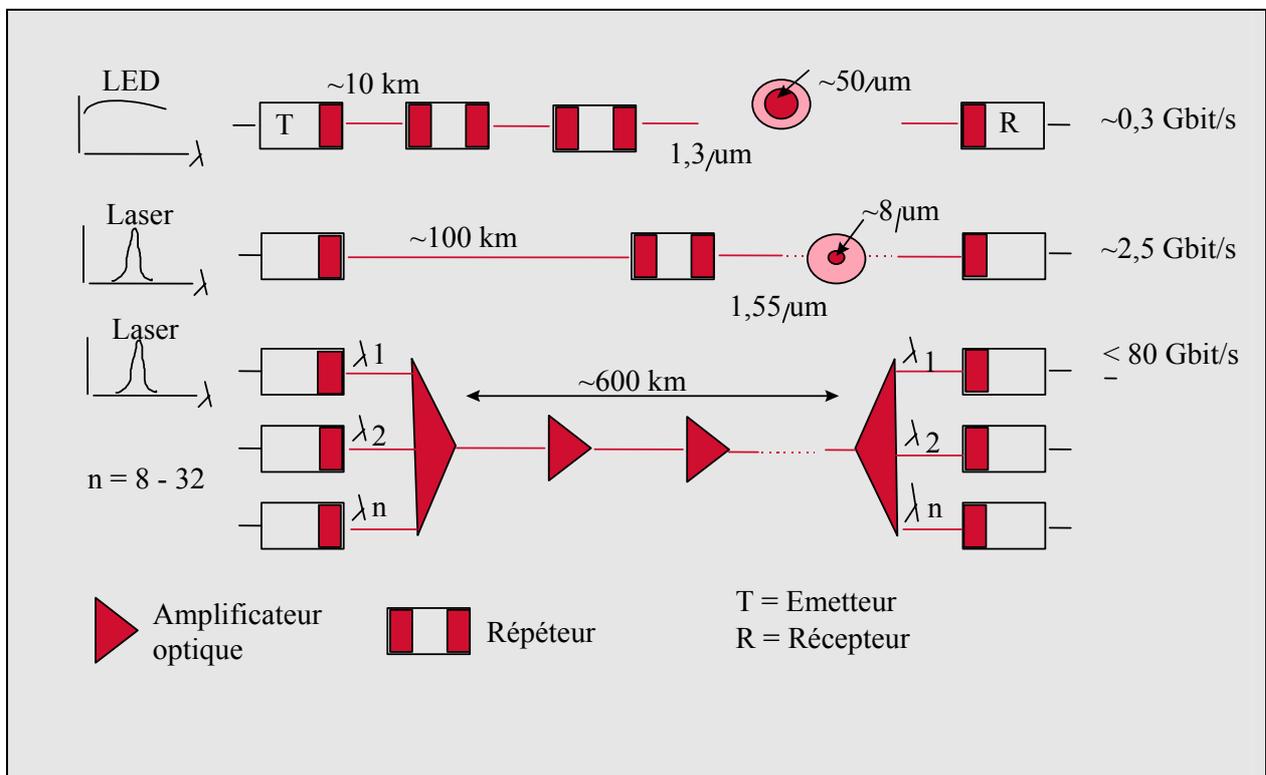


Tableau 6.4 – Avantages et inconvénients de multiplexage DWDM

Avantages du DWDM	Inconvénients du DWDM
<p>Le multiplexage DWDM permet de grands débits de transmission sur des paires de fibres. Il est possible d'augmenter la capacité sans pose de nouveaux câbles, car on peut utiliser les câbles existants.</p> <p>Cette augmentation de la capacité de transmission peut être réalisée de façon modulaire, par insertion de longueurs d'onde additionnelles, au fur et à mesure que les augmentations se révèlent nécessaires.</p> <p>Les systèmes DWDM sont de type transparent. Cela signifie que des longueurs d'onde différentes peuvent transporter des données différentes à des débits différents.</p> <p>La transmission DWDM bilatérale est possible sur une même fibre.</p>	<p>En raison des imperfections des actuels amplificateurs optiques, le nombre de ces amplificateurs et la distance totale entre terminaux DWDM sont limités.</p> <p>Les systèmes DWDM sont inférieurs aux systèmes de multiplexage par répartition dans le temps en ce qui concerne les capacités de supervision et de gestion.</p>

6.3.2 Normes

L'UIT a spécifié les réseaux optiques dans ses Recommandations de la série G. On trouvera ci-après l'indication de quelques-unes de ces Recommandations avec leur titre abrégé:

- systèmes en lignes optiques avec amplificateurs optiques et multiplexage optique (G.681);
- interfaces optiques pour systèmes multicanaux avec amplificateurs optiques (G.692);
- structures et organisation des trames pour le réseau de transport optique (G.709);
- caractéristiques fonctionnelles des équipements de mise en réseau optique (G.798);
- architecture, spécifications et gestion (G.871, G.872, G.873, G.874, G.875).

Les Recommandations décrivent:

- les attributions de fréquences;
- les interfaces d'accès et de ligne;
- les fonctions de gestion.

La Figure 6.9 montre la grille de longueurs d'onde recommandée par l'UIT, qui permet d'avoir jusqu'à 43 fréquences optiques dans la fenêtre des 1,55 μm .

Une fréquence additionnelle est utilisée comme canal de supervision optique (OSC: *optical supervisory channel*). La Figure 6.10 représente, à titre d'exemple, un canal OSC placé à 1,51 μm , c'est-à-dire à l'extérieur de la bande de fréquences occupée par les canaux «utiles». L'OSC peut transporter un signal à trames au débit de 2 Mbit/s, ce qui lui permet de transmettre une grande quantité d'informations de gestion, par exemple: trace et état de fonctionnement de la section optique, régulation de la puissance de sortie du laser, canaux de communication de données et ligne de service technique.

Figure 6.9 – Grille de longueurs d'onde de l'UIT

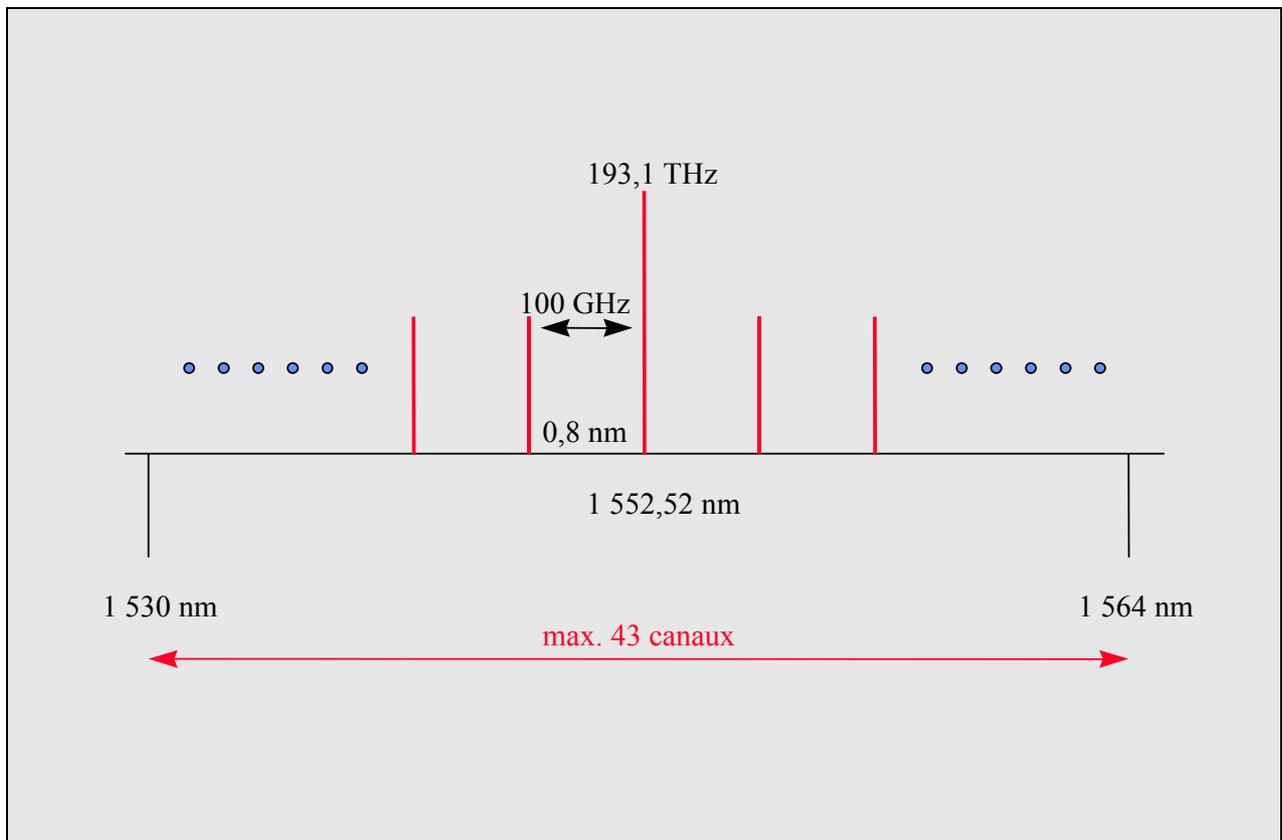
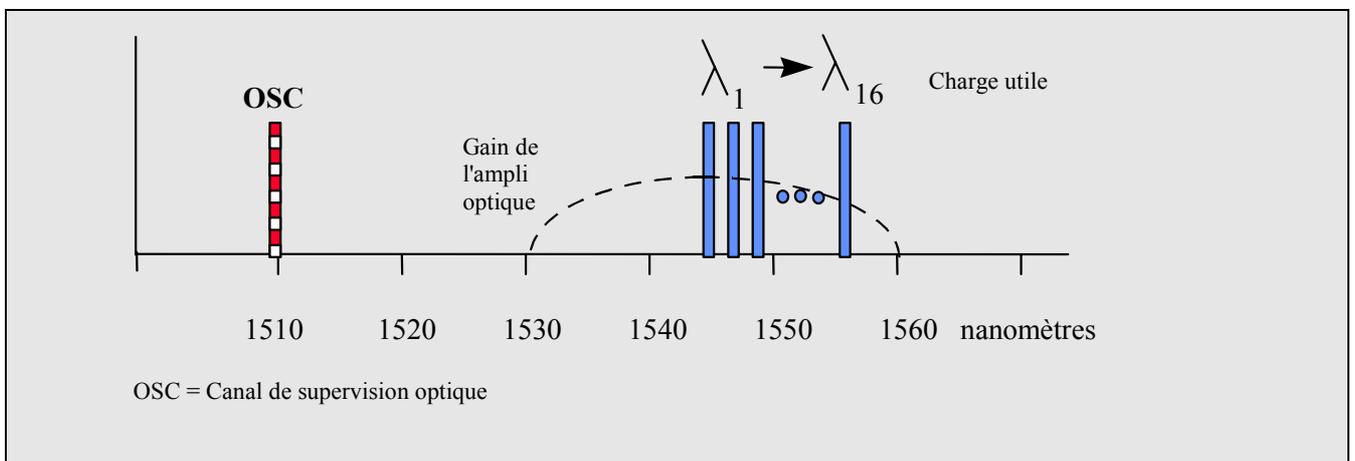


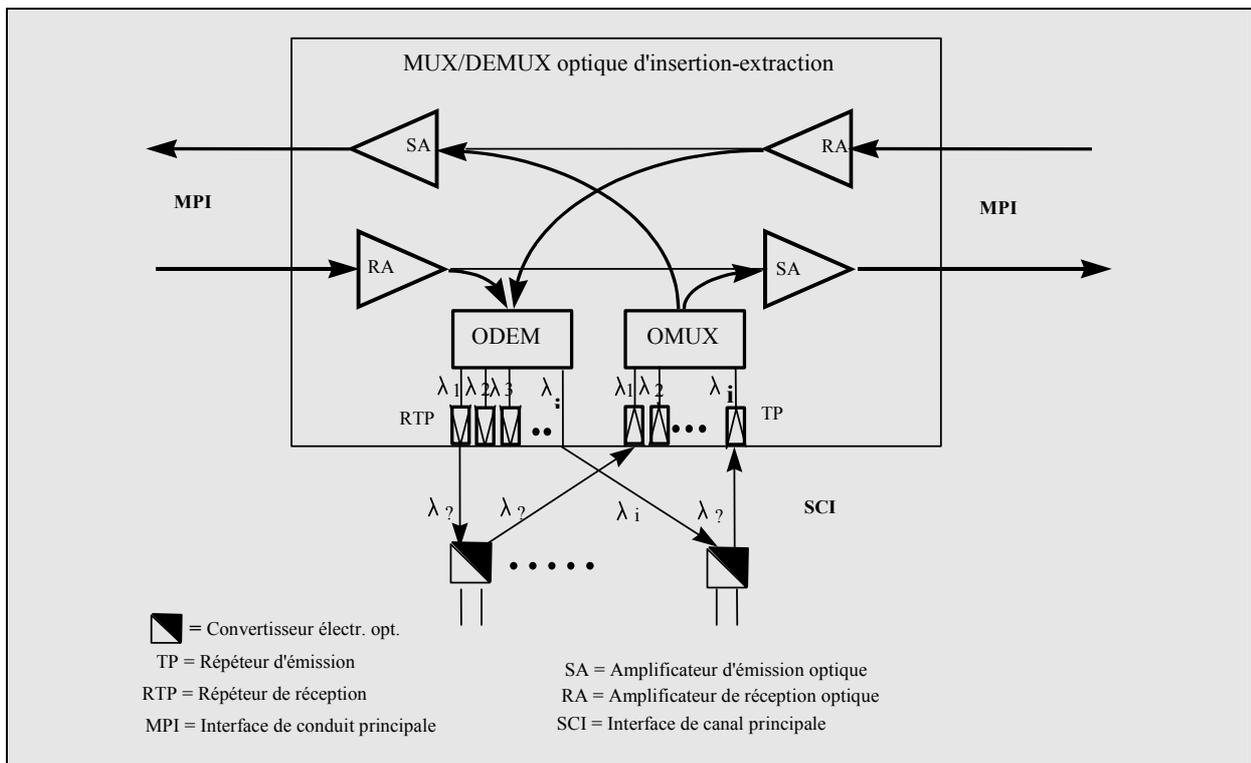
Figure 6.10 – Canal de supervision optique



6.3.3 Mise en œuvre

La Figure 6.11 illustre les fonctionnalités optiques de multiplexage/démultiplexage et d'insertion/extraction dans un multiplexeur/démultiplexeur optique d'insertion-extraction (OADM: *optical add-drop multiplexer/demultiplexer*). En général, les affluents optiques entrants qui arrivent sur l'interface de canal unique (SCI: *single channel interface*) ont des longueurs d'onde non spécifiées générées dans des convertisseurs électrique/optique. Elles sont converties en longueurs d'onde normalisées dans un répéteur d'émission (TP), multiplexées dans un coupleur à fibres et transmises à l'interface de conduit principal (MPI: *main path interface*) via un amplificateur d'émission (SA) optique. Dans le sens de la réception, les signaux de ligne entrants sont amplifiés dans un amplificateur de réception (RA) optique et démultiplexés dans des filtres à longueurs d'onde discrètes, par exemple dans des guides d'ondes montés en réseaux plans. Il faut avoir recours à des répéteurs de réception (RTP: *receive transponders*) si les signaux à 1,55 μm ne conviennent pas pour les convertisseurs subséquents. Outre les fréquences d'insertion/extraction, d'autres fréquences peuvent traverser le multiplexeur OADM. La fonction d'insertion/extraction du canal OSC n'est pas représentée dans la figure.

Figure 6.11 – Exemple de multiplexeur/démultiplexeur optique d'insertion/extraction



Les Figures 6.12 et 6.13 représentent des configurations types de réseau optique.

Le réseau point à point comprend des multiplexeurs/démultiplexeurs terminaux optiques (OTM: *optical terminal multiplexers/demultiplexers*) et des amplificateurs de ligne optiques (OLA: *optical line amplifiers*). Aux fins de la gestion, le canal OSC est relié à un poste de travail (WS: *work station*) par l'intermédiaire d'une unité de commande (CON) et d'une interface de gestion Q3.

Les multiplexeurs/démultiplexeurs OADM permettent de réaliser des réseaux de protection de type point à point. Le passage de la section d'exploitation à la section de protection est déclenché par une détection de signal et activé par les fonctions du canal OSC.

Il est possible de disposer plusieurs OADM en anneaux, ce qui donne des configurations souples de réseau et de trafic. En cas de défaillances des nœuds ou des lignes, le réacheminement dans l'anneau peut être activé par les fonctions du canal OSC. Dans l'exemple représenté, le trafic entre les nœuds A + B, A + C et C + D utilise la fréquence λ_1 et le trafic entre les nœuds A + D utilise la fréquence λ_2 . En cas de panne entre les nœuds A et C, il y a un réacheminement via les nœuds B et D.

Figure 6.12 – Canal de supervision optique

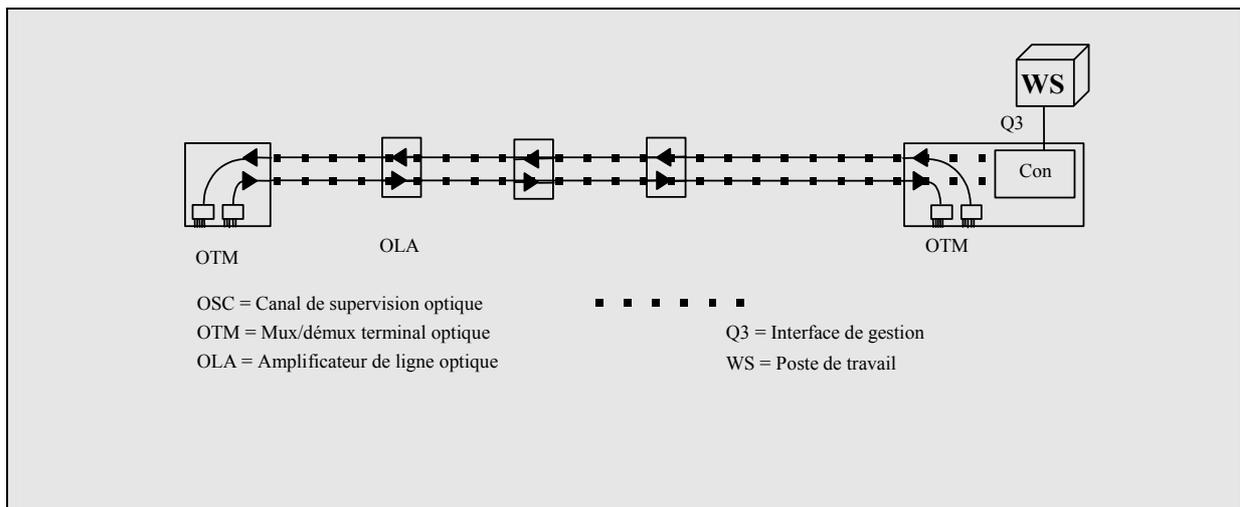
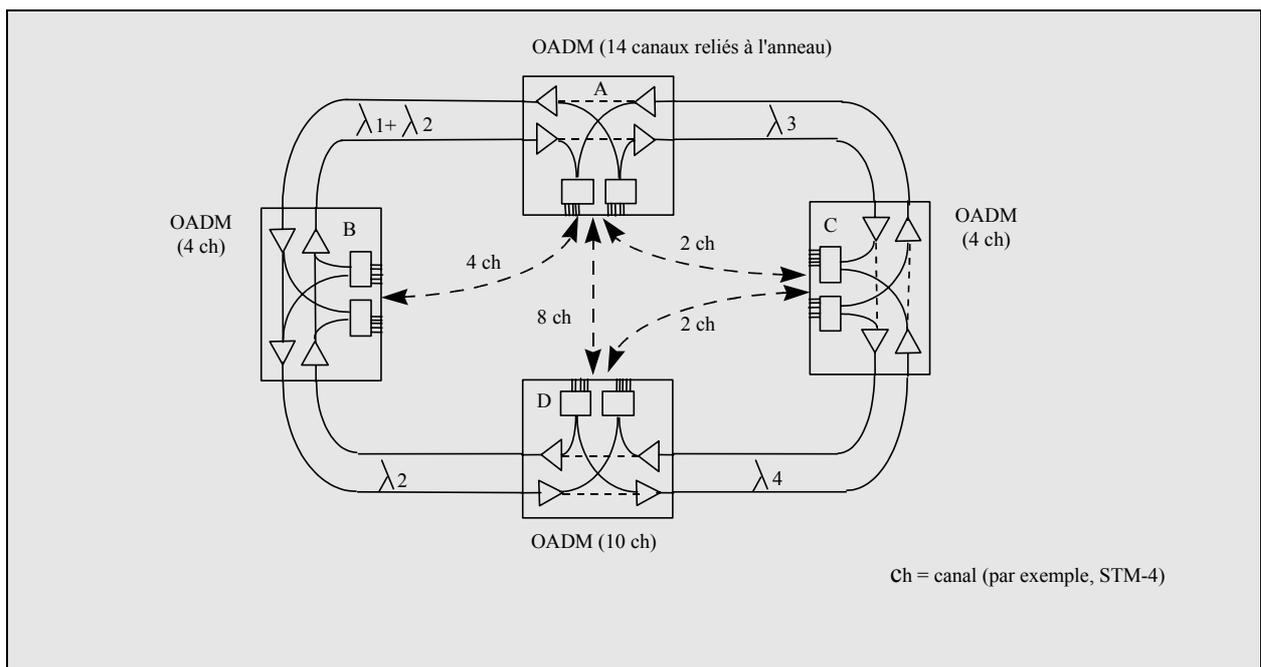
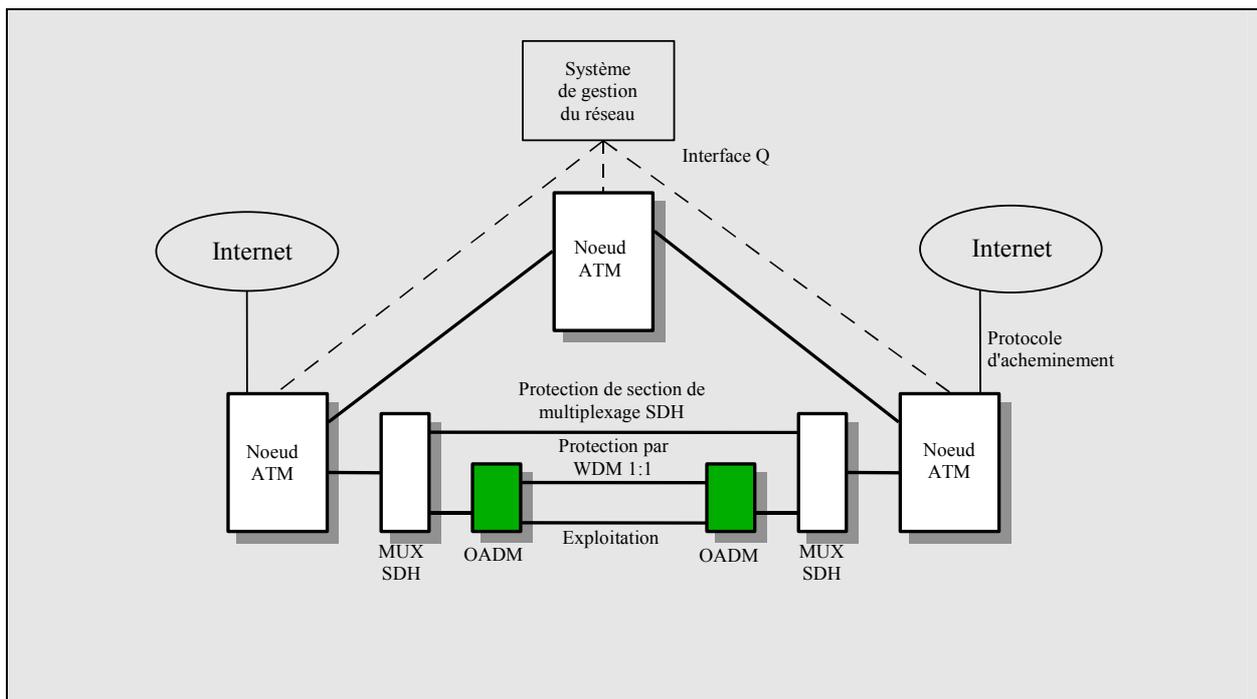


Figure 6.13 – Exemple de trafic dans un réseau optique à structure annulaire



On prévoit que les futurs réseaux de transmission utiliseront le mode de transfert ATM pour la prestation des services. Les signaux ATM peuvent être transportés par transmission SDH et les signaux SDH peuvent être transportés par la transmission DWDM. La Figure 6.14 montre qu'en associant ces technologies on peut obtenir une variété de systèmes de protection et d'acheminement. Dans l'exemple représenté, la protection par DWDM et SDH coopère avec les moyens de réacheminement des nœuds ATM, commandés par exemple par un système de gestion du réseau. Dans le cas de connexions Internet, on a des possibilités d'acheminement supplémentaire en utilisant les protocoles d'acheminement Internet. Il est indispensable de choisir judicieusement les mécanismes de protection si l'on veut satisfaire aux exigences de qualité élevée des services, existants ou nouveaux.

Figure 6.14 – Protection du réseau



6.4 Lignes d'abonné numériques (xDSL)

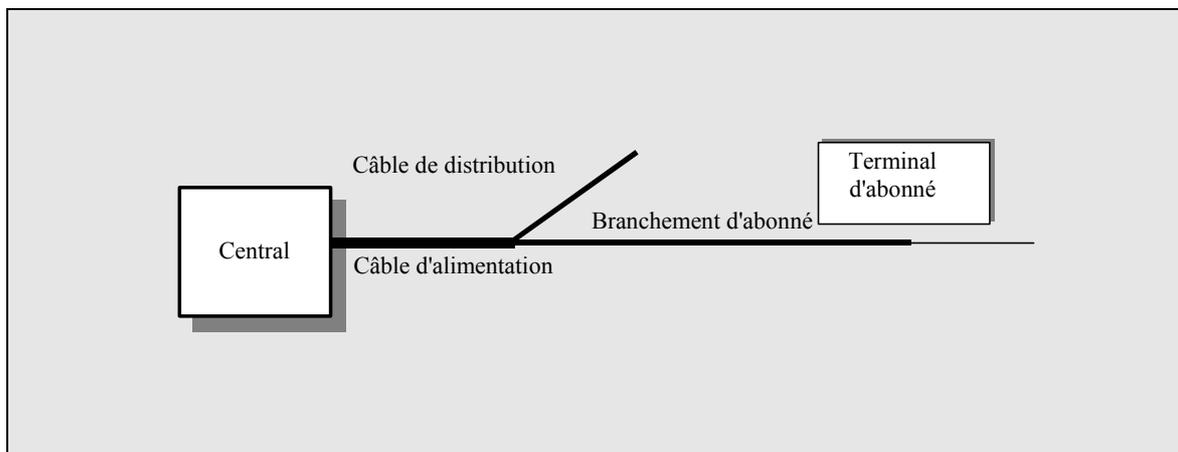
6.4.1 Lignes d'abonné

Les usagers des services de télécommunication – les abonnés – sont reliés aux réseaux de transit par le réseau d'accès. Depuis toujours, ces connexions – les lignes d'abonné – sont constituées par des paires de conducteurs en cuivre torsadées, réunies dans des câbles. La Figure 6.15 donne un exemple d'installation de lignes d'abonné, qui comportent les éléments suivants: des câbles desservant des zones à forte concentration d'abonnés, des câbles de distribution pour les sites d'abonnés potentiels et des branchements d'abonné pour les locaux des usagers.

Les lignes d'abonné sont étudiées depuis de nombreuses années. Il en existe différents modèles, dont les caractéristiques les plus importantes sont les suivantes:

- type de câble (diamètre des conducteurs, isolant);
- longueur du câble;
- structure de la ligne (bobines de charge, ponts de dérivation);
- sources de bruit (diaphonie, bruit impulsif, brouillage radioélectrique).

Figure 6.15 – Exemple d'installation de lignes téléphoniques



Dans le cas des signaux analogiques à fréquences vocales, la longueur de la ligne d'abonné est généralement déterminée par l'affaiblissement, qui dépend du calibre des conducteurs. On utilise parfois des bobines de charge pour augmenter la portée de transmission.

Dans le cas des signaux numériques dont la largeur de spectre est supérieure numériquement aux fréquences vocales, la longueur de la ligne d'abonné est généralement limitée par l'affaiblissement, la diaphonie et le temps de propagation de phase. La portée peut aussi être influencée par le bruit impulsif.

Avec l'apparition de nouveaux services exigeant des signaux numériques transmis à des débits binaires de plus en plus élevés, on s'est trouvé placé devant les obligations suivantes: soit augmenter la largeur de bande utilisable des lignes d'abonné existantes en appliquant des technologies complexes, soit remplacer les paires torsadées par des supports de transmission à large bande, tels que câbles à fibres optiques, câbles à paires coaxiales ou transmission radioélectrique.

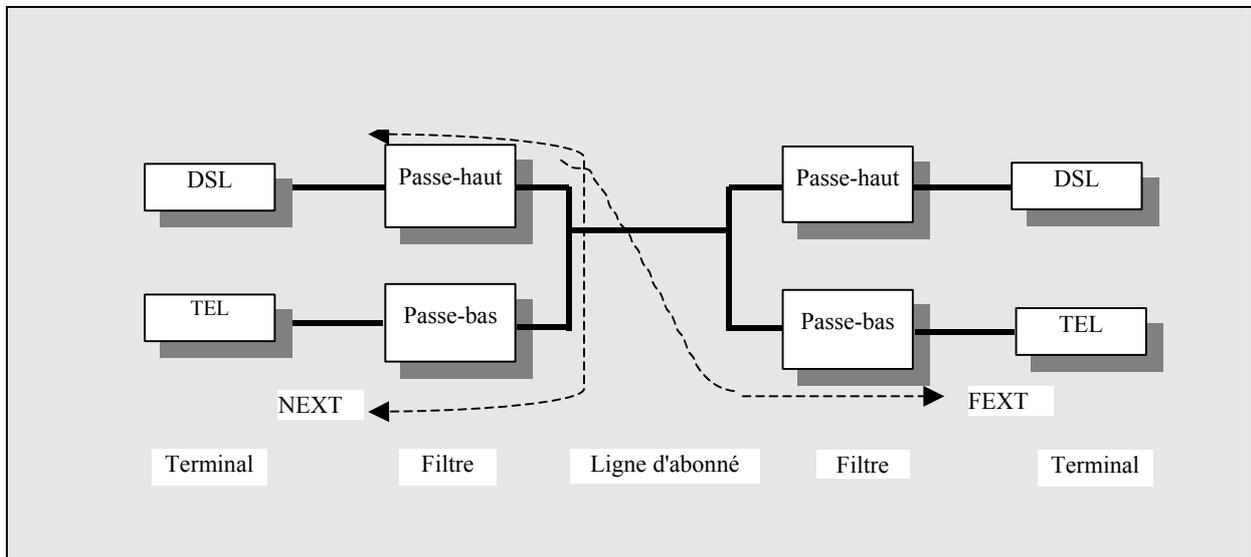
Le remplacement des lignes d'abonné étant une opération coûteuse et des progrès ayant été enregistrés dans le traitement des signaux numériques, on a été amené à développer des technologies nouvelles pour mieux utiliser la largeur de bande disponible, par exemple:

- modems en bande de base;
- modems dans la bande vocale;
- ligne d'abonné numérique (xDSL: *digital subscriber lines*).

Environ 15% des lignes d'abonné existantes devront être améliorées pour permettre l'application des techniques xDSL. Parmi les mesures correctives nécessaires, citons l'introduction de répéteurs à mi-parcours, la suppression des bobines de charge et, dans certains cas, la suppression des ponts de dérivation. Pour transmettre simultanément des signaux à fréquences vocales et des signaux à fréquences plus élevées dans le même sens ou en sens opposés, il peut être nécessaire de recourir à un filtre séparateur (voir la Figure 6.16).

La paradiaphonie (NEXT: *near-end crosstalk*) est une dégradation majeure dans les systèmes qui utilisent la même bande de fréquences pour la transmission vers l'amont et la transmission vers l'aval. Le bruit dû à NEXT est perçu par le récepteur situé à la même extrémité du câble que l'émetteur qui est la source de ce bruit. La télédiaphonie (FEXT: *far-end crosstalk*) est le bruit détecté par le récepteur situé à l'extrémité opposée du câble par rapport à l'émetteur qui est la source de ce bruit. FEXT est moins grave que NEXT, parce que son bruit est affaibli par la propagation sur la longueur totale du câble.

Figure 6.16 – Exemple de filtre séparateur



Les filtres séparateurs permettent d'isoler les opérations du service POTS des opérations sur les lignes DSL. Les séparateurs réduisent l'influence des variations d'impédance liées aux états de raccrochage et de décrochage, et aux perturbations en relation avec les impulsions, les sonneries et la diaphonie. La paradiaphonie doit être affaiblie, car un émetteur DSL envoie une puissance d'environ 100 mW et un récepteur téléphonique fonctionne avec 0,1 mW.

Le spectre utilisable d'une paire torsadée peut aller des signaux à fréquences vocales (jusqu'à 4 kHz) jusqu'à plus de 500 kHz pour la transmission de signaux numériques avec utilisation des techniques xDSL. Avec les techniques puissantes du traitement numérique des signaux, il est possible d'utiliser des méthodes de codage très élaborées qui réduisent la diaphonie. En associant les techniques d'égalisation des canaux et d'annulation de l'écho, on peut transmettre à des débits binaires de l'ordre des Mbit/s sur les lignes d'abonné physiques actuelles. Les systèmes en ligne d'abonné sont conçus pour fonctionner avec une marge de rapport signal/bruit égale à 6 dB, ce qui donne un taux d'erreur binaire meilleur que 10^{-7} . Cette marge nominale permet de remédier, par exemple, aux variations sur les câbles et aux dégradations dues au bruit. Elle représente un compromis entre un fonctionnement fiable et la transmission sur la ligne d'abonné la plus longue possible.

6.4.2 Systèmes en lignes d'abonné

Les modems en bande vocale, mis en service à la fin des années 50, avaient pour fonction de transmettre des données dans la bande des fréquences vocales, entre 200 Hz et 3 400 Hz. On a réalisé des modems de plus en plus économiques en largeur de bande. A la fin de 1996, on a atteint la limite technologique pour les modems, avec la normalisation par l'UIT des modems V.90, qui permettent de transmettre à des débits binaires pouvant aller jusqu'à 56 kbit/s sur une connexion téléphonique commutée, avec un rendement en largeur de bande d'environ 14 bit/s par Hz.

Le Tableau 6.5 précise les correspondances entre, d'une part, les technologies existantes et les nouvelles technologies et, d'autre part, les débits binaires d'accès et les applications.

Tableau 6.5 – Technologies des lignes d'abonné

Type	Désignation	Accès/débits binaires/portée	Applications
BB	Modems en bande de base	Duplex: de 32 kbit/s à 2 Mbit/s Portée: quelques km/1 paire	Connexion sur ligne louée
V.22 à V.90	Connexions avec modem en bande vocale	Duplex: de 1,2 kbit/s à 56 kbit/s Portée: illimité/1 paire	Connexion commutée
DSL	Ligne d'abonné numérique	Duplex: 160 kbit/s (2B + D + MI) Portée: jusqu'à 5,5 km/1 paire	Service RNIS
HDSL	Ligne d'abonné numérique à grand débit de données	Duplex: 2 × T1; 2 × E1 1 ou 2 paires de fils de cuivre Portée: 3 700 m sans répéteur	Services T1 et E1
SDSL	Ligne d'abonné numérique	Duplex: 2 × T1; 2 × E1 1 paire de fils de cuivre Portée: jusqu'à 3 000 m	Services synchrones
ADSL	Ligne d'abonné numérique	Vers l'aval: de 1,5 à 9 Mbit/s Vers l'amont: de 16 à 640 kbit/s Portée: de 2 700 à 5 400 m/1 paire	Internet, vidéo à la demande, LAN, vidéo et multimédia
VDSL	Ligne d'abonné numérique	Vers l'aval: de 13 à 52 Mbit/s Vers l'amont: de 1,6 Mbit/s à 13 Mbit/s Portée: de 300 à 1 350 m/1 paire	Comme pour ADSL et HDSL

T1 = 1,544 Mbit/s

E1 = 2,048 Mbit/s

MI = information de gestion (*management information*)

Le concept RNIS, tel qu'il a été élaboré en 1976, offre un accès au débit binaire de base pour deux canaux B (2 × 64 kbit/s) et un canal D (16 kbit/s), à quoi s'ajoutent 16 kbit/s pour les fonctions de gestion. On obtient ainsi une capacité de transmission duplex de 160 kbit/s. Les données sont envoyées simultanément dans les deux sens de transmission, avec annulation d'écho. Une largeur de bande de 80 kHz est nécessaire pour appliquer les techniques de transmission 2B1Q en bande de base. La valeur correspondante du rendement en largeur de bande est de 2 bit/s par Hz.

Les premiers systèmes HDSL ont été mis en service en 1992 sur la base de ce concept RNIS.

Le système HDSL (ligne d'abonné numérique à grand débit) assure la transmission bidirectionnelle à 1,544 ou 2,048 Mbit/s sur des lignes d'abonné en paires torsadées, sur des distances allant jusqu'à 3,7 km. On utilise généralement la transmission duplex hybride 2B1Q avec annulation d'écho. Ces systèmes mettent en œuvre deux paires de fils, chaque paire transportant la moitié de la charge utile dans les deux sens de transmission (transmission duplex double). On peut aussi avoir les modes duplex simple et simplex double.

Avec le système SDSL, on a la même largeur de bande vers l'amont et vers l'aval, avec utilisation d'une seule paire. Le prix à payer pour cette symétrie de largeur de bande est une diminution de la largeur de bande totale. Des débits de données de 384 kbit/s jusqu'à 2 Mbit/s sont possibles.

Dans beaucoup d'applications, le débit vers l'aval (dans le sens du centre de commutation vers le terminal distant) doit être supérieur au débit vers l'amont. Le système ADSL (ligne d'abonné numérique asymétrique) met en œuvre une technologie de transmission sur ligne d'abonné qui assure simultanément les transports suivants sur une seule paire de fils, à des distances pouvant atteindre environ 5 km:

- vers l'aval (en direction de l'utilisateur), débits binaires pouvant aller jusqu'à environ 9 Mbit/s;
- vers l'amont (en direction du réseau), débits binaires pouvant aller jusqu'à 1 Mbit/s;
- service téléphonique classique.

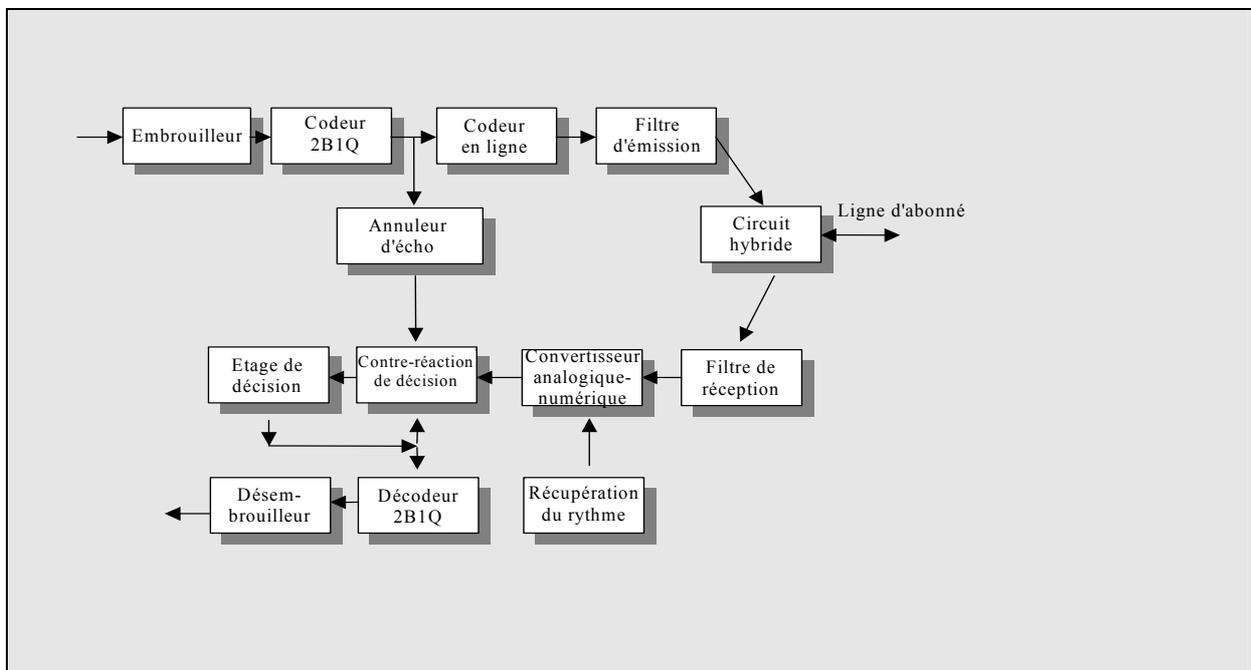
Le système ADSL, défini par l'UIT-T aux alentours de 1998, est appelé à fonctionner avec ou sans filtres séparateurs. Compte tenu de leur bon rendement en largeur de bande (environ 15 bit/s par Hz) et de leur simplicité d'installation, on prévoit la mise en œuvre de nombreux systèmes ADSL sur les lignes d'abonné existantes.

On obtient le système VDSL (ligne d'abonné numérique à très grand débit) en étendant la technologie xDSL à des débits binaires plus élevés, jusqu'à 52 Mbit/s vers l'aval et jusqu'à 13 Mbit/s vers l'amont, sur de courtes distances (la Commission d'études 15 de l'UIT-T poursuit actuellement l'évaluation des spécifications détaillées de ce système).

La Figure 6.17 montre la structure générale d'un émetteur-récepteur fonctionnant en 2B1Q sur ligne d'abonné numérique. Le flux de données d'entrée en provenance du terminal de l'utilisateur est embrouillé pour empêcher la formation de longues chaînes de zéros ou de 1. Chaque couple de bits est codé pour donner un symbole 2B1Q, de sorte que le débit des symboles est deux fois plus petit que le débit binaire. Deux signaux binaires sont convertis en un signal à 4 niveaux. Les symboles sont convertis dans le code en ligne, filtrés et transmis au circuit hybride et à la ligne d'abonné.

Les signaux en ligne entrants sont soumis aux traitements suivants: filtrage pour réduire le bruit hors bande à un minimum, amplification et régénération dans le convertisseur analogique-numérique à l'aide de signaux de rythme. Côté émission, les symboles 2B1Q sont envoyés à l'annuleur d'écho, qui modélise l'équivalent du trajet d'écho. Les horloges d'émission et de réception sont synchronisées, ce qui assure la stabilité de la fonction de transfert du trajet d'écho. Après numérisation et annulation d'écho, le signal reçu subit un nouveau filtrage, appliqué par le circuit de décision à contre-réaction, après quoi il est transmis à l'étage de décision, qui est un détecteur de seuil à quatre niveaux. L'information reçue est ensuite convertie en signaux binaires et désembrouillée, puis transmise au terminal de l'utilisateur.

Figure 6.17 – Structure générale d'un émetteur-récepteur DSL

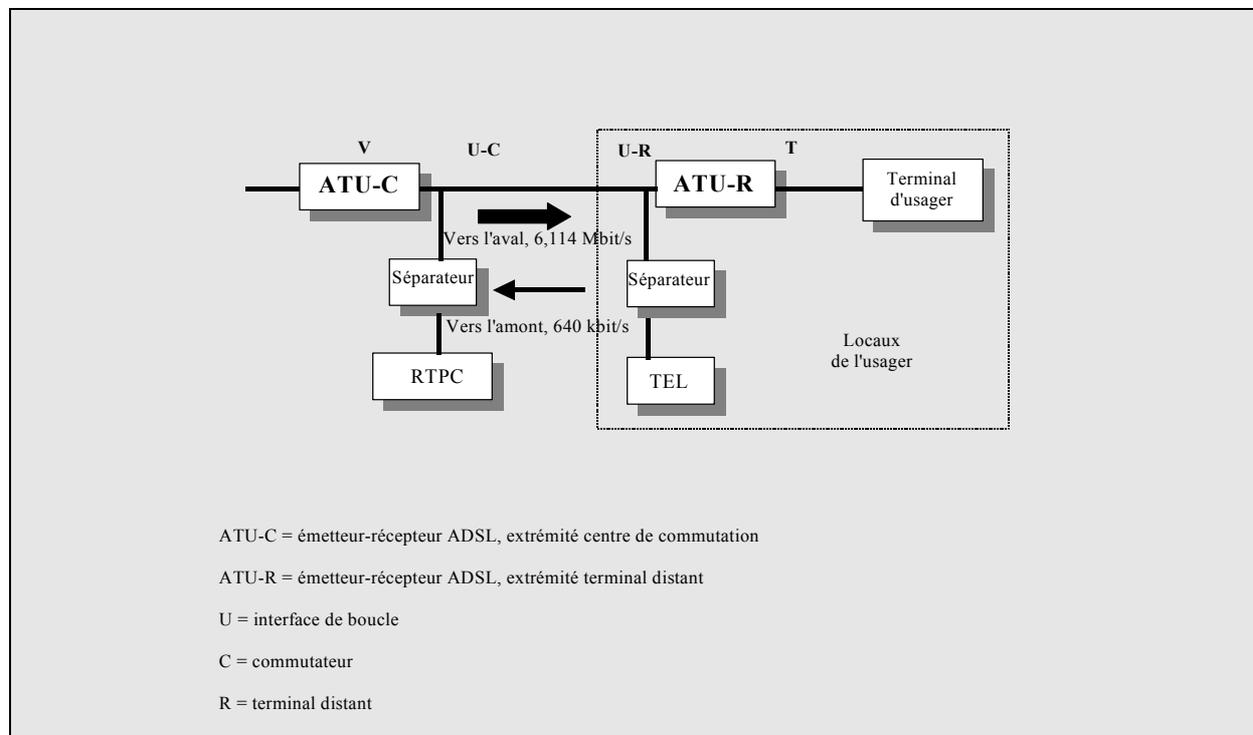


6.4.3 ADSL

Initialement, le système ADSL (ligne d'abonné numérique asymétrique) a été spécifié pour la vidéo à la demande et pour les services type RNIS. A la différence des autres systèmes de transmission, qui ont des débits binaires définis, l'ADSL fonctionne avec adaptation du débit, c'est-à-dire que le débit dépend de la qualité des supports de transmission.

La Figure 6.18 représente schématiquement le modèle de référence du système ADSL.

Figure 6.18 – Modèle de référence du système ADSL



Il existe deux versions du système, illustrées par la Figure 6.19:

- ADSL plein débit avec fréquence de coupure de 1 104 kHz;
- ADSL Lite avec fréquence de coupure de 552 kHz.

La largeur de bande disponible de la ligne d'abonné est divisée en bandes de fréquences pour:

- le service téléphonique ordinaire (POTS) analogique ou le RNIS;
- les sous-porteuses du trafic amont;
- les sous-porteuses du trafic aval.

En plus des versions illustrées par la Figure 6.19, on peut avoir les systèmes ADSL Lite et ADSL plein débit avec annulation d'écho, la bande de fréquences 4-138 kHz étant alors utilisée pour la transmission vers l'amont et vers l'aval.

Le système ADSL Lite est destiné à remplacer les modems en bande vocale pour l'accès à l'Internet. Il sera mis en service à un très grand nombre d'exemplaires si les conditions suivantes sont réunies:

- facilité d'installation chez l'utilisateur, sans filtres séparateurs ni inspection par le personnel de service;
- grande distance de transmission;
- souplesse d'utilisation des débits de données pour les utilisateurs, jusqu'à 1,5 Mbit/s;
- interopérabilité et compatibilité avec le système ADSL plein débit.

Etant donné que la facilité d'installation est ici impérative, la mise en œuvre sans filtres séparateurs est une condition importante pour le système ADSL Lite. Toutefois, dans certains cas, il est indispensable d'équiper ce système de filtres séparateurs ou de filtres supplémentaires pour protéger les postes téléphoniques. C'est ce que montre la Figure 6.20.

Figure 6.19 – Plan de fréquences pour le système ADSL

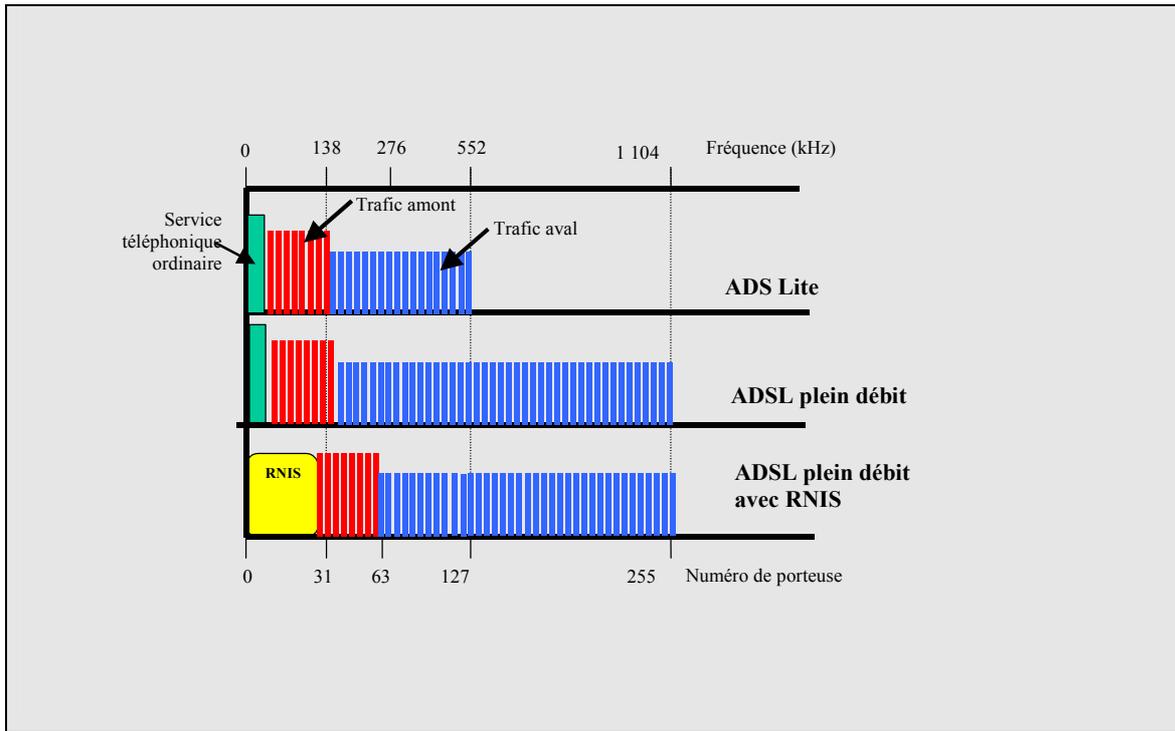
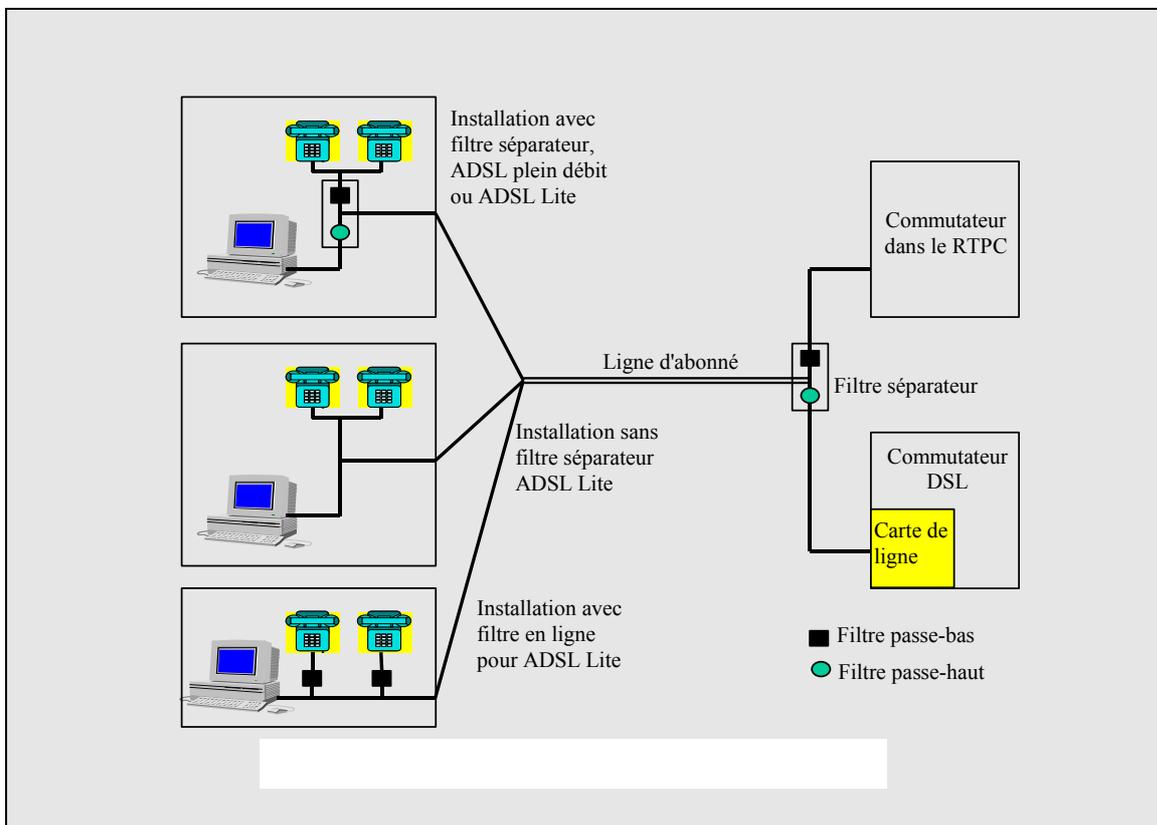


Figure 6.20 – Exemples d'installation du système ADSL Lite



Le Tableau 6.6 donne des exemples de portées de transmission du système ADSL sur des lignes d'abonné supportant des valeurs types de bruit (fils de 0,4 mm de diamètre).

Tableau 6.6 – Portée de transmission et débits dans les systèmes ADSL

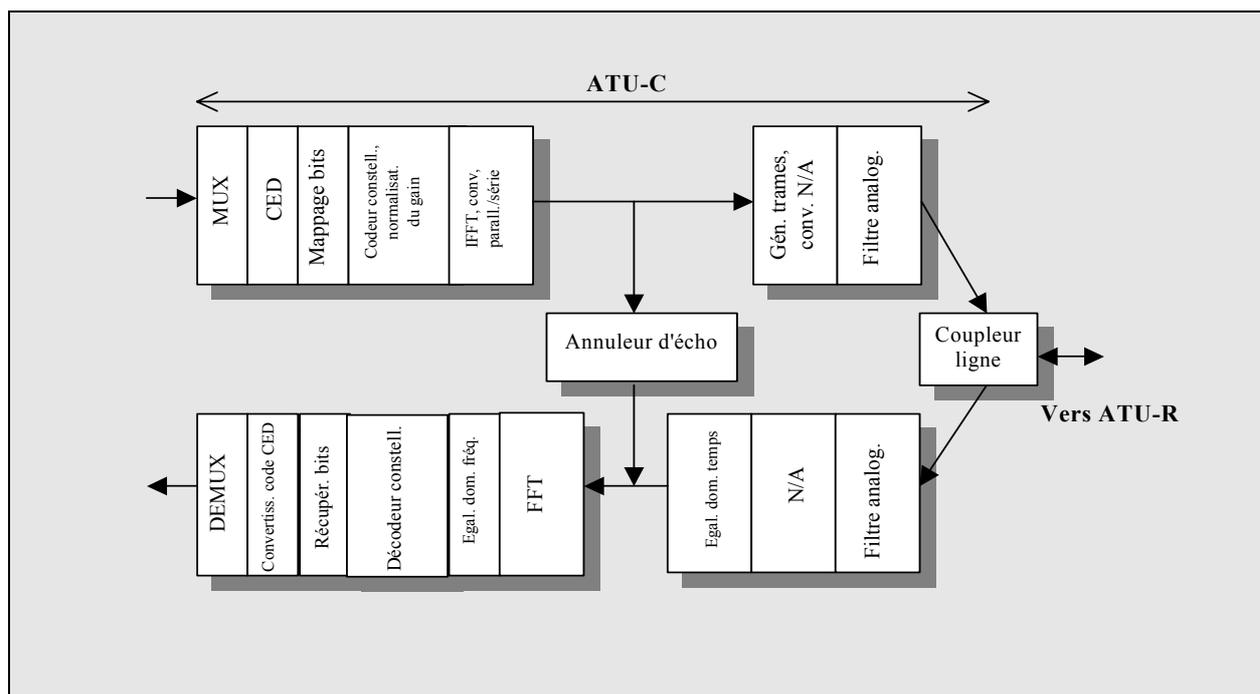
Fil de 0,4 mm	Vers l'aval	Vers l'amont	Longueur de la ligne
ADSL plein débit	4 096 kbit/s	120 kbit/s	2,8 km
	2 048 kbit/s	128 kbit/s	3,5 km
	578 kbit/s	128 kbit/s	4,2 km
ADSL Lite	1 536 kbit/s	256 kbit/s	2,8 km
	1 536 kbit/s	96 kbit/s	3,5 km
		96 kbit/s	4,2 km

La technologie spécifiée pour les systèmes ADSL repose sur la transmission à multitonalités discrètes (DMT: *discrete multitone*).

La Figure 6.21 représente un terminal ADSL simplifié, qui possède les fonctions suivantes:

- filtrage à l'émission et à la réception, commande automatique de gain, conversion analogique-numérique et numérique-analogique;
- modulation/démodulation, codage/décodage et condensation/décondensation de paquets binaires;
- transformation de Fourier rapide (FFT) et transformation de Fourier rapide inverse (IFFT);
- annulation d'écho adaptative, égalisation de voie adaptative, conversion symbole/bit et récupération du rythme.

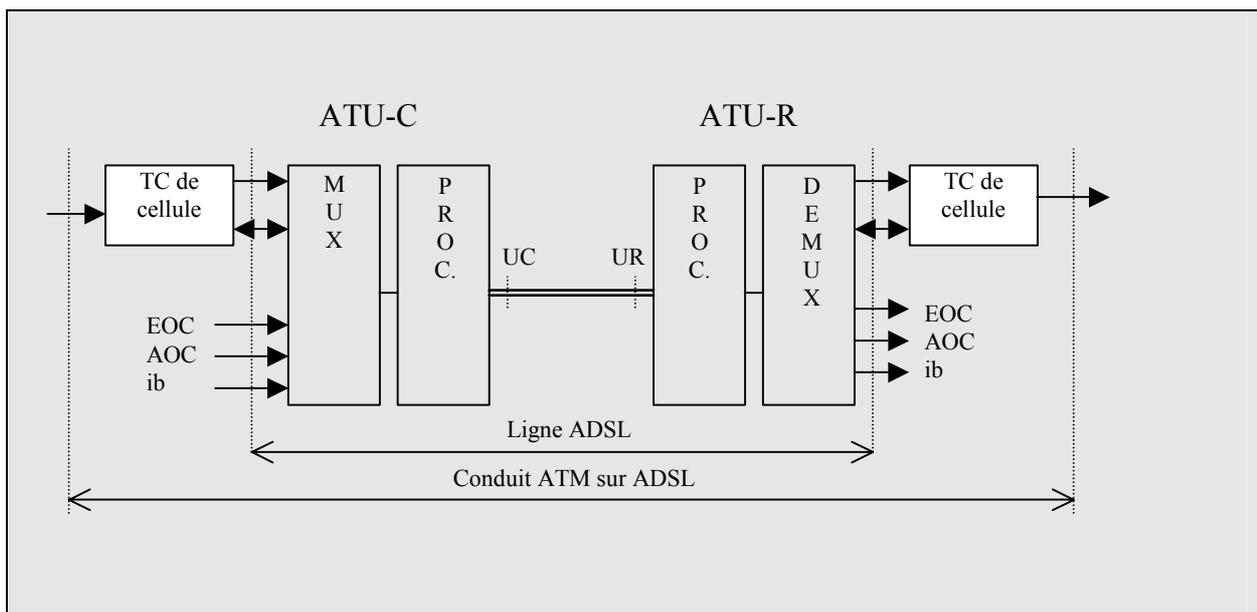
Figure 6.21 – Exemple d'unité ATU-C dans un terminal ADSL



Les systèmes ADSL peuvent être considérés comme des étages de modulation de la couche physique qui fournissent une connexion physique asymétrique entre deux points d'extrémités, les unités ATU-C et ATU-R.

Les signaux synchrones STM et les signaux asynchrones ATM¹ (ou d'autres protocoles à base de trames) peuvent être transmis par les systèmes ADSL. La Figure 6.22 donne l'exemple d'un conduit ATM sur système ADSL.

Figure 6.22 – Liaison ATM sur système ADSL



La liaison ADSL transmet le signal d'alignement AS = 6 144 kbit/s de la voie simplex unidirectionnelle et le LSO = 640 kbit/s de la voie duplex. Sont également transmis, pour les besoins de la gestion, le canal d'exploitation intégré (EOC: *embedded operation channel*), le canal d'exploitation ADSL (AOC: *ADSL operation channel*) et les bits indicateurs (ib).

Pour transporter les cellules ATM, il faut mettre en œuvre une sous-couche de convergence de transmission (TC: *transmission convergence*) qui a les fonctions suivantes:

- production et récupération de la trame de transmission;
- adaptation du flux de cellules au support de transmission physique;
- délimitation des cellules et correction des erreurs sur les en-têtes;
- veiller à ce que les appels ne soient pas abandonnés pendant une interruption de 3 secondes.

Outre les cellules ATM, il est possible de transmettre sur ADSL des protocoles à base de trames – largement utilisés actuellement dans les réseaux – par exemple le protocole point à point (PPP) et le protocole usager-usager à base de trame (FUNI: *frame-based user network interface*). Les signaux dérivés STM peuvent être transmis sur ADSL en tant que multiples de 32 kbit/s.

¹ Voir le Chapitre 7 du présent fascicule pour de plus amples informations sur le mode ATM.

6.4.4 HDSL

La nécessité du système de ligne d'abonné numérique à fort débit (HDSL: *high speed digital subscriber line*) est apparue à l'évidence lorsqu'on a utilisé les systèmes de transmission T1 et E1 en tant que lignes privées entre les centres de commutation et les locaux des usagers. Le système HDSL offre cependant un certain nombre d'avantages, par exemple:

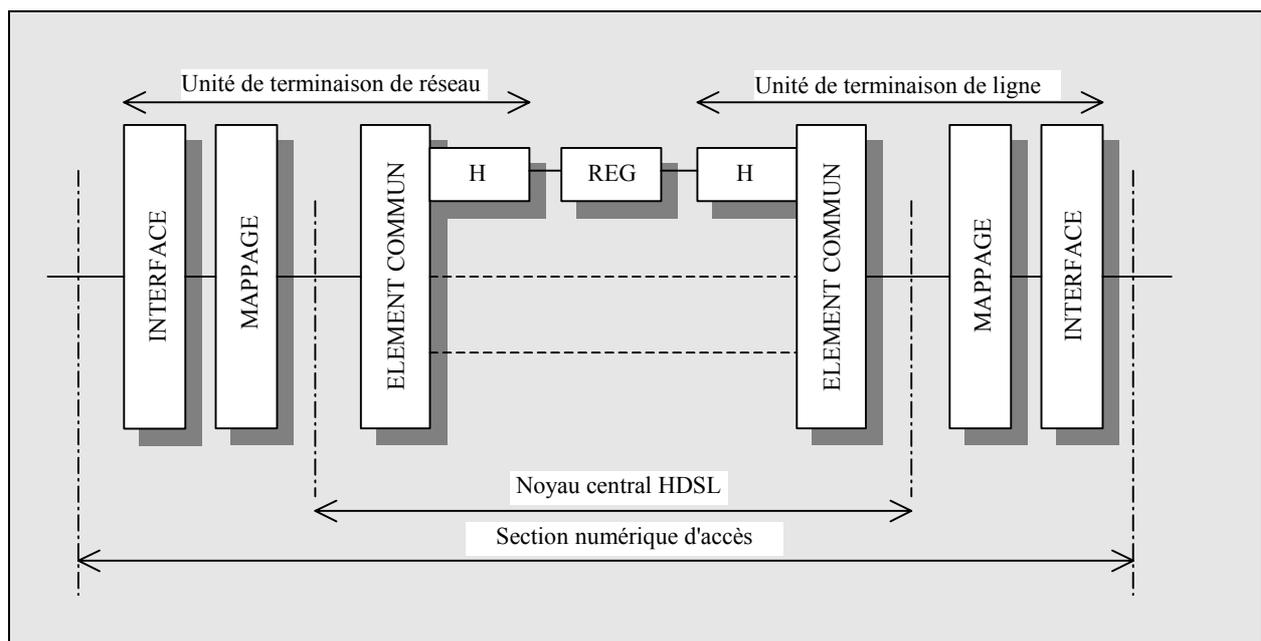
- une largeur de bande plus petite;
- moins de diaphonie causée aux autres systèmes;
- diagnostics améliorés, grâce à un grand surdébit, d'où diminution des dépenses de maintenance;
- exploitation sur 95% des lignes HDSL sans répéteur à mi-portée;
- valeurs types du taux d'erreur: meilleures que 10^{-9} .

Il existe plusieurs modes de fonctionnement possibles pour les systèmes HDSL:

- Les systèmes HDSL 1,544 double duplex fonctionnent sur deux paires de fils, chaque paire transportant une charge utile de 768 kbit/s et une voie d'exploitation intégrée (EOC) dans les deux sens. Les systèmes HDSL 2,048 fonctionnent sur deux ou trois paires. En transmission hybride avec annulation d'écho, on utilise généralement le code en ligne 2B1Q.
- Les systèmes duplex simple (SDSL: *single duplex systems*) fonctionnent avec une seule paire. Les deux sens de transmission sont séparés grâce au multiplexage par répartition en fréquence, ou par annulation d'écho. Toutefois, comme un large spectre de fréquences est nécessaire, la portée de transmission est limitée.
- Les systèmes du type simplex double comportent deux paires. L'une des paires transporte la totalité de la charge utile dans un sens de transmission, l'autre, la totalité de la charge utile dans le sens opposé.

La Figure 6.23 représente un modèle de référence HDSL simplifié. Un émetteur-répéteur HDSL complètement équipé émet sur une paire à 2 320 kbit/s, sur deux paires à 1 168 kbit/s par paire, ou sur deux ou trois paires à 784 kbit/s par paire. Les émetteurs-récepteurs sont reliés par des lignes locales numériques (DLL: *digital local lines*) ou reliés à des régénérateurs (REG). L'unité de terminaison de ligne (LTU: *line termination unit*) est asservie à l'unité de terminaison de réseau (NTU: *network termination unit*).

Figure 6.23 – Modèle de référence HDSL

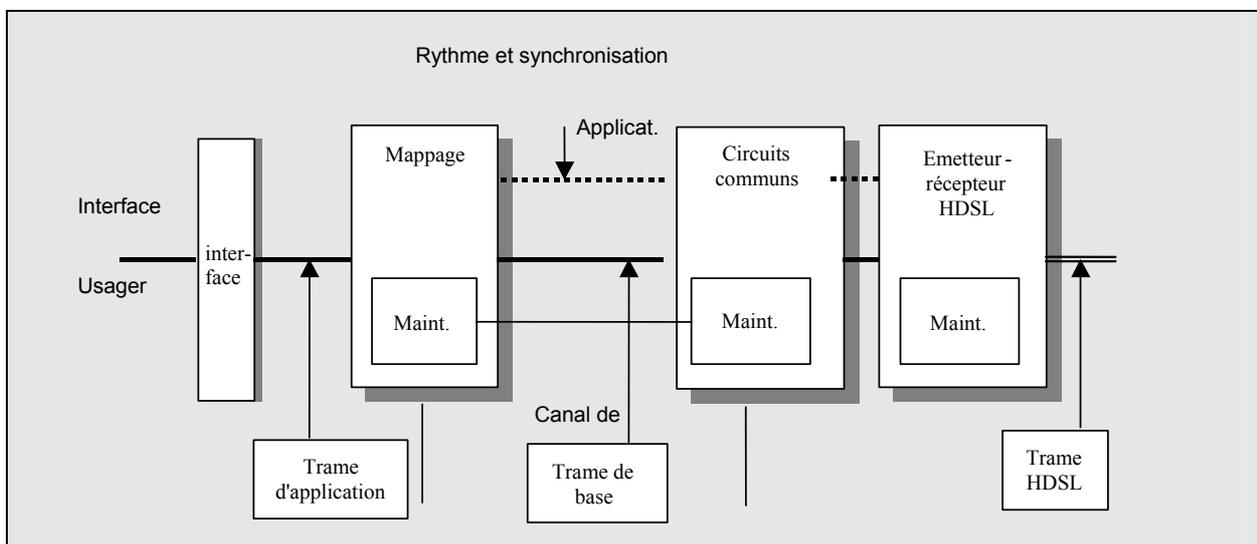


Le code en ligne pour un système double duplex à 1,544 Mbit/s est du type 2B1Q, ce qui donne des composantes spectrales comprises entre 0 et 392 kHz. La composante continue du code ne peut pas traverser les transformateurs différentiels, avec les conséquences suivantes: distorsion des impulsions et nécessité d'une égalisation ultérieure.

La Figure 6.24 donne une représentation simplifiée de la fonction du système HDSL. Le train de bits en provenance de l'installation de l'utilisateur attaque l'unité NTU en passant par l'interface d'application et est réparti, dans l'interface, en trames d'application. Pour les applications à 2,048 Mbit/s, les trames d'application sont mappées 144 octets sur des trames de base. L'information des trames de base est multiplexée avec des bits d'alignement, de maintenance et de surdébit. Cela donne des trames HDSL qui sont transmises sur des lignes locales numériques avec utilisation de codes en ligne 2B1Q.

À la réception, les données contenues dans les trames HDSL reçues sont démultiplexées, ce qui restitue les trames de base. Celles-ci sont soumises à la fonction de mappage, pour récupération de la trame d'application, puis transmises à l'interface d'application côté réseau.

Figure 6.24 – Fonction de l'émetteur-récepteur HDSL

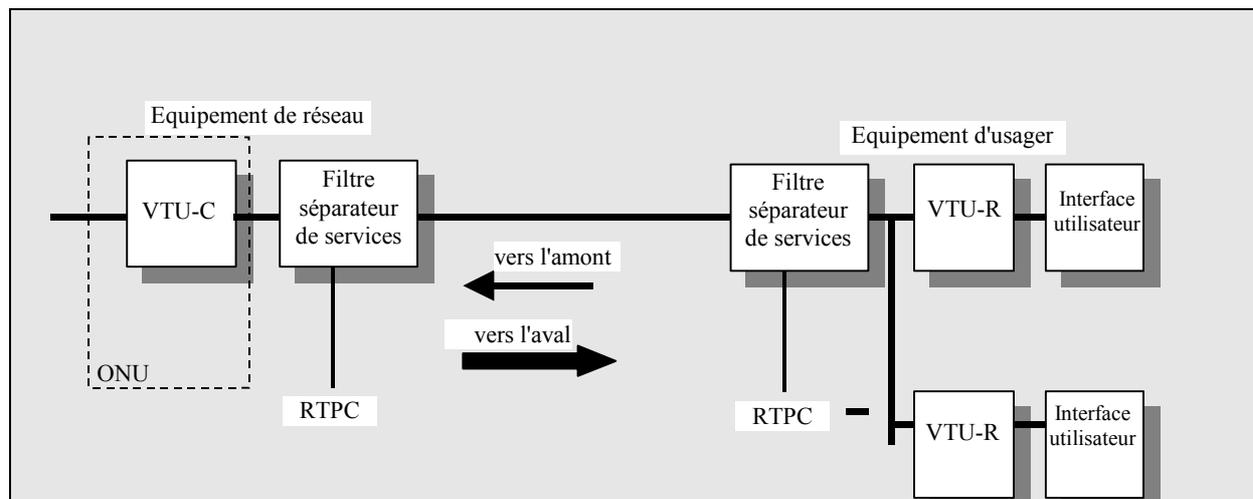


6.4.5 VDSL

Le système à ligne d'abonné numérique à très haut débit (VDSL: *very high bit rate subscriber line*) est obtenu par extension des technologies xDSL à des débits binaires supérieurs. Le VDSL est capable de transmettre simultanément des signaux de téléphonie, de données et de vidéo, à quoi s'ajouteront dans l'avenir des applications telles que la télévision à haute définition et le calcul électronique à haute performance. Dans le sens vers l'aval, les débits VDSL peuvent aller jusqu'à 52 Mbit/s et, vers l'amont, jusqu'à 13 Mbit/s. Avec des débits aussi élevés, les données ne peuvent être transmises que sur de courtes distances. On prévoit qu'avec l'évolution des installations existantes de lignes téléphoniques, les liaisons par fibres optiques remplaceront, en nombre de plus en plus grands, les lignes d'abonné physiques, et que la longueur des lignes d'abonné restantes sera de l'ordre de 1 km. Cette distance convient bien pour les systèmes VDSL. La Figure 6.25 représente le modèle de référence d'un système de transmission à large bande avec VDSL.

Les systèmes VDSL sont généralement reliés à des réseaux d'accès optiques, par exemple les installations du type «fibre jusqu'au point de concentration». Les lignes VDSL aboutissent à des unités terminales VDSL, VTU-C côté réseau et VTU-R côté usager distant. L'unité VTU-C peut être placée dans l'unité de réseau optique (ONU: *optical network unit*), qui termine le réseau de distribution optique (ODN: *optical distribution network*). Les filtres séparateurs de services séparent les signaux RTPC ou RNIS des signaux VDSL.

Figure 6.25 – Modèle de référence d'un système VDSL



Le transfert de l'information est organisé dans des trames VDSL qui contiennent la charge utile et des mécanismes de correction d'erreur séparés pour l'amont et pour l'aval. Les codes en ligne peuvent être du type QAM (8 bits par symbole) ou CAP, ce qui donne les caractéristiques indiquées dans le Tableau 6.7:

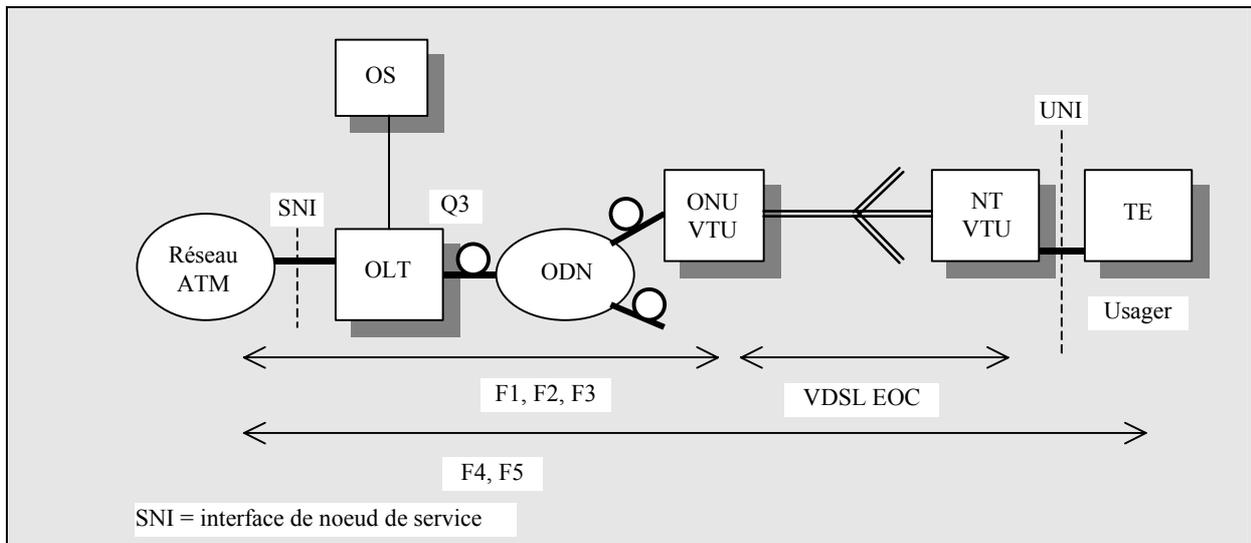
Tableau 6.7 – Débits de données types dans un système VDSL

Longueur de la ligne, km	Débit vers l'aval, Mbit/s	Spectre de fréquences, MHz
1,5	13	2-5.8
1,0	26	2-9.8
0,3	52	2-17.5
1,5	1,6	1,2-1,4
1,0	3,2	1,1-1,6
0,3	6,5	0,8-1,8

Les bandes de fréquences utilisées par les stations radioélectriques à ondes décimétriques et à ondes hectométriques modulées en amplitude, ainsi que les bandes des services publics de sécurité et de détresse, se trouvent dans les mêmes gammes de fréquences que la largeur de bande occupée par les signaux VDSL – d'où risque de brouillage entre les signaux. Le débit dans un système VDSL est limité principalement par le bruit de fond et par le bruit de paradiaphonie interne (*self NEXT*) présent sur la ligne.

La Figure 6.26 donne l'exemple d'un réseau mixte optique et VDSL. Le réseau de distribution optique (ODN) se situe entre la terminaison de ligne optique (OLT: *optical line termination*) et l'unité de réseau optique (ONU), qui contient aussi l'unité VTU-C. La liaison VDSL aboutit à la terminaison de réseau (NT: *network termination*), qui contient aussi l'unité VTU-R. Pour les besoins de la maintenance, un système d'exploitation (OS: *operation system*) est relié à la terminaison OLT par l'intermédiaire de l'interface de gestion Q3. La gestion des liaisons ATM se répartit entre la couche ATM (F4 et F5) et la couche physique (F1, F2, F3). L'information de gestion relative à la liaison VDSL (contenue dans la voie d'exploitation intégrée du système VDSL) est transmise au système OS en mode ATM.

Figure 6.26 – Exemple de gestion d'un réseau ATM avec système VDSL



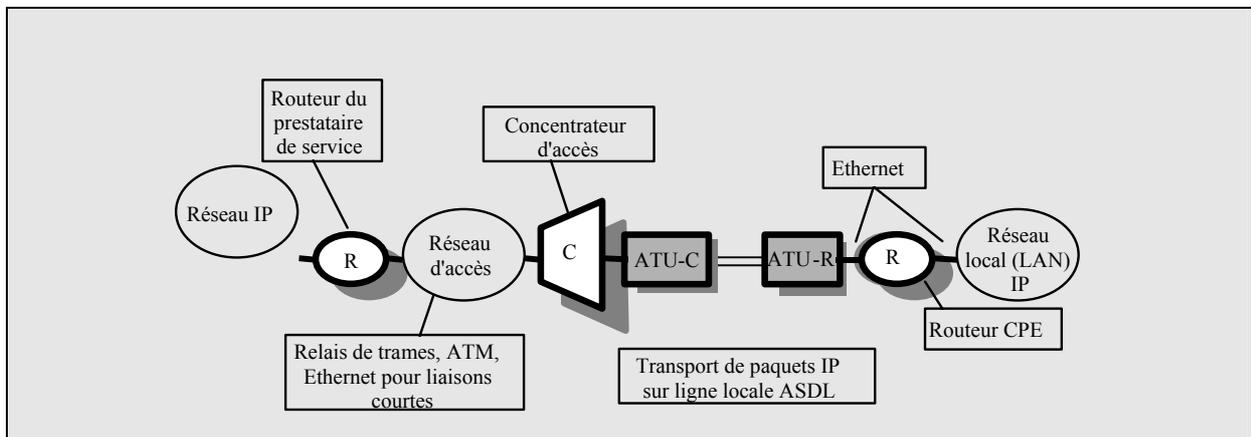
6.4.6 Exemple de réseaux

La technologie xDSL étant une technologie de transmission appliquée principalement dans la couche physique, elle est capable de prendre en charge une variété de protocoles, de services et d'applications de réseau, essentiellement dans la partie accès des réseaux de télécommunication. Il n'y a pas encore de consensus quant à l'architecture de réseau la plus appropriée pour inclure les systèmes xDSL comme technologie d'accès. Pour l'heure, on considère que le système ADSL est adapté à la majorité des applications; en effet, des trains de données à des débits compris entre 6 et 8 Mbit/s peuvent être transmis jusqu'aux installations des usagers sur la plupart des lignes d'abonné existantes.

La Figure 6.27 présente un exemple de transport de trafic avec protocole Internet (IP).

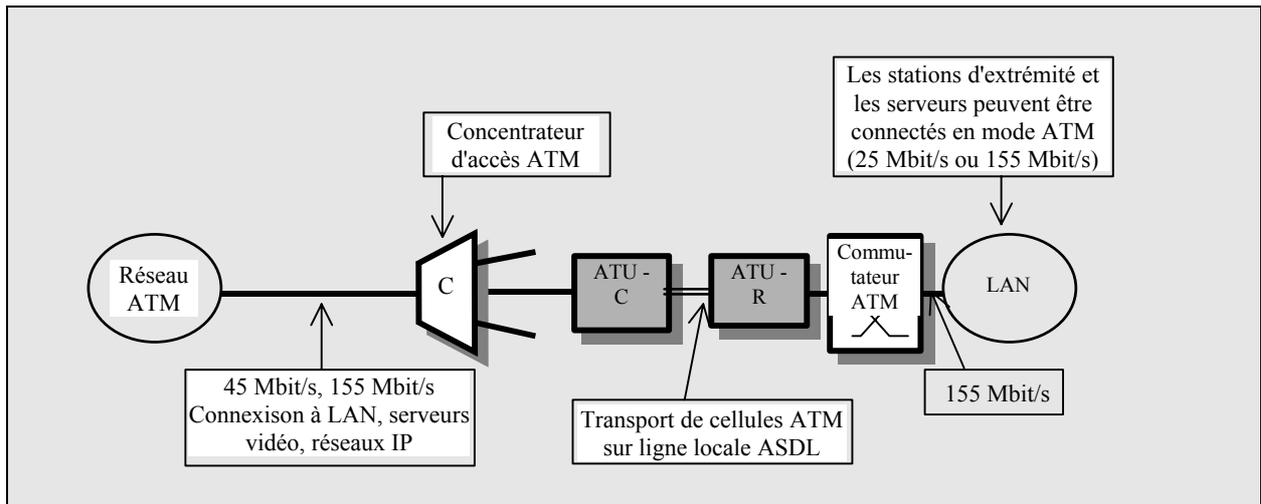
Selon les spécifications du Forum ADSL, les paquets Internet peuvent être transportés directement sur les liaisons ADSL, sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à des protocoles additionnels. Outre l'application «entreprise» illustrée par la figure, le protocole IP peut être utilisé pour des applications privées, avec ordinateurs personnels (PC) reliés à l'extrémité distante du système ADSL. L'accès au réseau IP peut être réalisé à l'aide d'un protocole point à point (PPP) sur une connexion ADSL.

Figure 6.27 – Transmission IP sur système ADSL



La Figure 6.28 illustre la transmission en mode ATM par un système ADSL. Le Forum ADSL a précisé de quelle façon les cellules ATM peuvent être transmises sur ADSL, depuis le terminal de l'utilisateur jusqu'au réseau ATM. A signaler, cependant, que les applications ATM avec débits de données inférieurs à 25 Mbit/s sur liaisons ADSL multiples entraînent un surdébit assez important. A 155 Mbit/s, il est préférable d'opter pour la connexion par fibre optique.

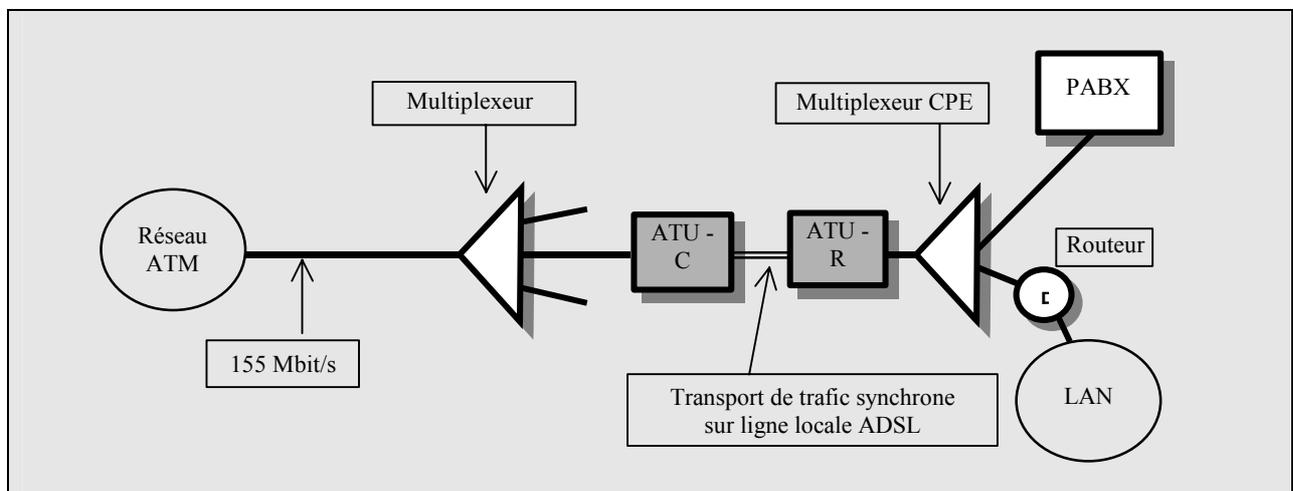
Figure 6.28 – Transmission en mode ATM sur système ADSL



La Figure 6.29 illustre la transmission du trafic synchrone par des liaisons ADSL.

Deux ou trois signaux d'unités d'affluents (TU-12) peuvent être transmis de l'unité ATU-C à l'unité ATU-R (chaque signal TU-12 correspond à 2,304 Mbit/s).

Figure 6.29 – Transmission synchrone sur système ADSL

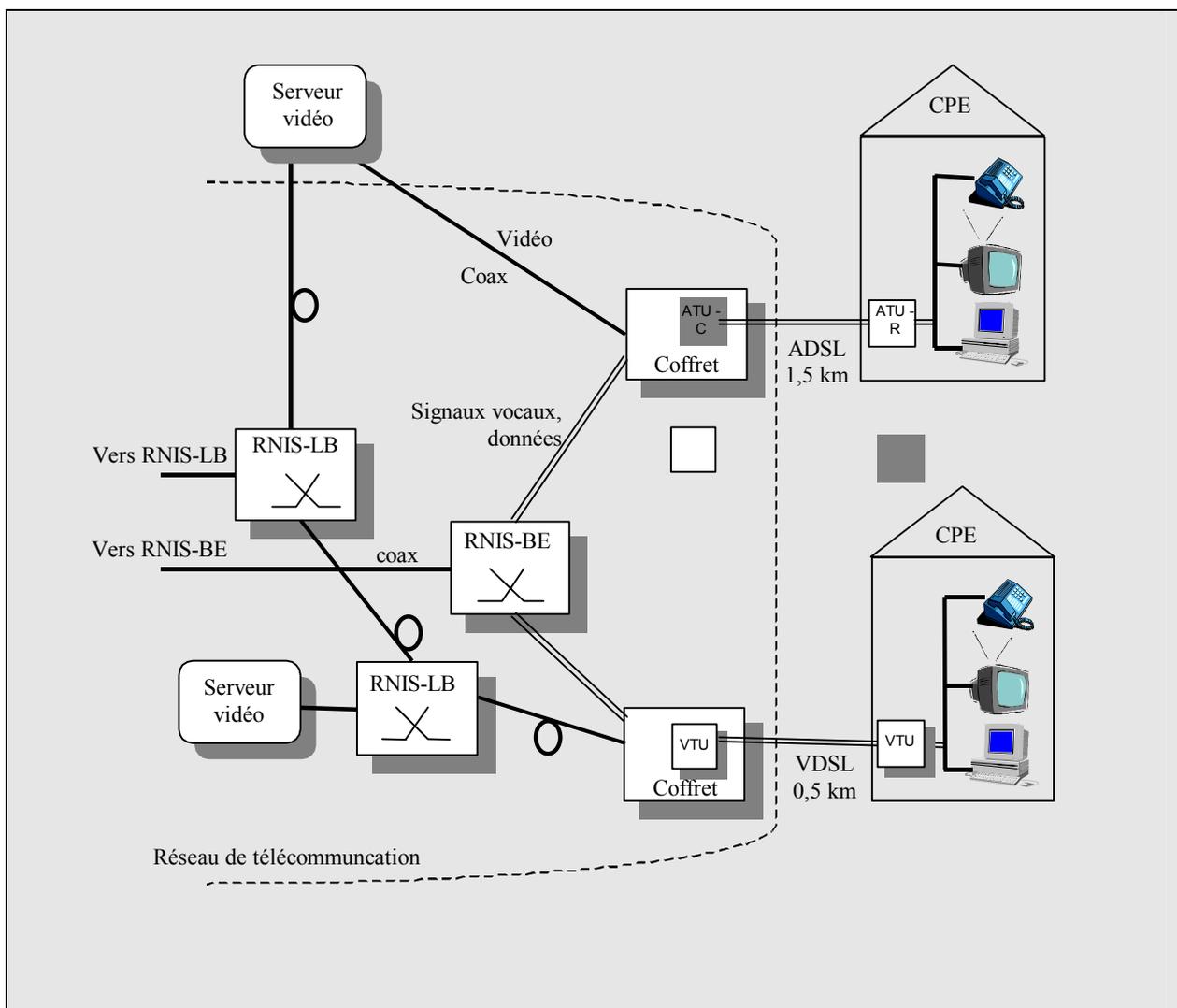


La Figure 6.30 représente la connexion d'un équipement de locaux client (CPE: *customer premises equipment*) à un réseau de télécommunication comportant des liaisons ADSL et VDSL. En provenance d'un serveur vidéo externe, les signaux vidéo numérisés atteignent:

- Le coffret 1 après transmission par câble à paires coaxiales. L'équipement CPE est connecté par une liaison ADSL.
- Le coffret 2 après transmission par câble à fibres optiques et passage par des commutateurs RNIS-LB. L'équipement CPE est connecté par une liaison VDSL.

Les signaux de données et de téléphonie sont transportés dans le réseau RNIS-BE jusqu'à un commutateur RNIS-BE. Ces signaux atteignent les coffrets 1 et 2 après transmission sur des câbles ordinaires. Par ailleurs, un serveur vidéo interne peut être relié au coffret 2 par l'intermédiaire d'un commutateur RNIS-LB.

Figure 6.30 – Exemple de réseau ADSL-VDSL



6.4.7 Recommandations de l'UIT-T

L'étude de la technologie xDSL a commencé en 1993 avec les travaux de normalisation de l'ANSI visant à définir le système à multitonalités discrètes (DMT) pour l'exploitation en ADSL. Les travaux effectués en coopération avec l'ETSI ont pris en compte les besoins spécifiques à l'Europe.

En 1997, l'UIT-T a commencé à élaborer une série de Recommandations relatives aux systèmes DSL et, à l'heure actuelle (année 2000), plusieurs Recommandations ont été élaborées par la Commission d'études 15 relatives aux fonctions, à la gestion, aux procédures de prise de contact et aux procédures d'essais pour les systèmes ADSL, HDSL et VDSL. Un examen des Recommandations relatives à xDSL de la série G.99x donne une idée de la complexité des systèmes DSL, puisque la définition de ces systèmes couvre près de mille pages. La famille des Recommandations G.99x comprend:

- G.991.1 Émetteurs-récepteurs de ligne d'abonné numérique à grand débit
- G.992.1 Émetteurs-récepteurs de lignes d'abonné numérique asymétrique
- G.992.2 Émetteurs-récepteurs de lignes d'abonné numérique asymétrique sans filtres séparateurs
- G.994.1 Procédures d'établissement de liaison pour les émetteurs-récepteurs de lignes d'abonné numérique (DSL)
- G.995.1 Aperçu général des Recommandations relatives aux lignes d'abonné numérique (DSL)
- G.996.1 Procédures d'essai pour les émetteurs-récepteurs de lignes d'abonné numérique (DSL)
- G.997.1 Gestion de la couche physique pour les émetteurs-récepteurs de lignes d'abonné numérique

En plus de ces Recommandations, la Commission d'études 13 a élaboré, au titre du concept de l'Infrastructure mondiale de l'information (GII), plusieurs Recommandations générales, par exemple la Recommandation Y.120 qui énonce des scénarios fondés sur la technologie xDSL.

6.4.8 Perspectives d'avenir

Le système ADSL est considéré comme l'option de service DSL de base pour le marché des communications de la catégorie «résidence». Un système ADSL fonctionne avec un débit de données rapide vers l'aval et un débit plus lent vers l'amont; c'est donc le système idéal pour l'accès à l'Internet. Les opérateurs locaux concurrents (CLEC: *competitive local exchange carriers*) considèrent l'existence du système ADSL comme une occasion idéale pour accéder rapidement au marché des données et entrer en concurrence avec les opérateurs qui sont déjà dans la place. Toutefois, pour déployer les systèmes ADSL, il faudrait mettre en œuvre des cartes de lignes ou des multiplexeurs d'accès aux lignes d'abonnées numériques (DSLAM: *digital subscriber line access multiplexors*) près du centre de commutation appartenant à ces derniers opérateurs. Par ailleurs, compte tenu de la qualité des réseaux d'origine et du câblage interne des locaux, qui influe sur le débit des données maximum et sur la portée du système de transmission, il existe de nombreux cas où les technologies avec filtre séparateur sont inapplicables.

Le système HDSL permet de fournir des services numériques à débit élevé sur les lignes d'abonné en cuivre, sur deux à quatre paires parallèles. Pour les distances allant jusqu'à 3 km environ, ce système constitue une solution rapide et rentable pour la mise en place de systèmes duplex du type T1 ou E1. Des études de grande ampleur sont en cours pour définir un système HDSL à une seule paire, appelé «HDSL de la prochaine génération», HDSL2 ou SHDSL (ligne d'abonné numérique à haut débit à une paire). Pour atteindre cet objectif, il faut améliorer la qualité et augmenter le gain du système. Il faut aussi atténuer les effets de la paradiaphonie en pratiquant la mise en forme du spectre.

On procède à des études comparatives sur les codes en ligne, les filtres et la complexité qui en découle pour les émetteurs-récepteurs. Le système HDSL2 pourrait être environ huit fois plus complexe que le HDSL!

Le système ADSL est sans doute une étape intermédiaire vers le VDSL, qui fournira la largeur de bande supplémentaire nécessaire pour les services à large bande. Le succès du système VDSL dépendra de la possibilité de prolonger les fibres optiques et de les amener beaucoup plus près de l'utilisateur, par exemple en améliorant la qualité des artères d'alimentation des fibres.

6.4.9 Bibliographie

- [1] *Livre de référence sur les lignes d'abonné numériques*, UIT-D, Commission d'études 2, Question 12/2, en préparation, 2000.
- [2] Albin Johansson, *ADSL Lite, The broadband enabler for the mass market*, Ericsson Review No. 4, 1998.
- [3] Thomas Starr, *Understanding Digital Subscriber Line Technology*, Communication Engineering and Emerging Technologies Prentice Hall PTR, NJ 07458, 1999.
- [4] Dr. Walter Y. Chen, *DSL, Simulation Techniques and Standards*, Macmillan Technical Publishing, Indianapolis, Indiana, 1998.
- [5] Prof. Dr. Z. Petrovic, *Digitalne pretplatnic ke petlje*, Telfor International Conference, Belgrade, 1999.

6.5 Abréviations

2B1Q	2 binaire/1 quaternaire (technique de codage en ligne)
A/N	Analogique/numérique (conversion) (<i>analogue/digital</i>)
AAL	Couche d'adaptation ATM (<i>ATM adaptation layer</i>)
ABR	Service de débit binaire disponible (<i>available bit rate</i>)
ADSL	Ligne d'abonné numérique asymétrique (<i>asymmetric digital subscriber line</i>)
AOC	Canal d'exploitation ADSL (<i>ADSL operation channel</i>)
AOM	Administration, exploitation, maintenance (<i>administration, operation, maintenance</i>)
ASM	Multiplexeur de service ATM (<i>ASM service multiplexer</i>)
ATM	Mode de transfert asynchrone (<i>asynchronous transfer mode</i>)
ATU-C	Unité de transmission ADSL-centre de commutation (<i>ADSL transmission unit-central office</i>)
ATU-R	Unité de transmission ADSL-extrémité distante (<i>ADSL transmission unit-remote</i>)
AU	Unité administrative (<i>administrative unit</i>)
AUG	Groupe d'unités administratives (<i>administrative unit group</i>)
BB	Modem en bande de base
C	Conteneur
CBR	Service à débit binaire constant (<i>constant bit rate service</i>)
CED	Correction d'erreur directe
CPE	Équipement de locaux client (<i>customer premises equipment</i>)
DLL	Ligne locale numérique (<i>digital local line</i>)
DMT	Multitonalités discrètes (<i>discrete multitone</i>)
DSL	Ligne d'abonné numérique (<i>digital subscriber line</i>)
DWDM	Multiplex par répartition en longueur d'onde à haute densité (<i>dense wavelength division multiplex</i>)
DXC	Brassage numérique (<i>digital cross connect</i>)
EOC	Voie d'exploitation intégrée (<i>embedded operation channel</i>)

FEXT	Télédiaphonie (<i>far end crosstalk</i>)
FFT	Transformée de Fourier rapide (<i>fast Fourier transform</i>)
FUNI	Interface usager-réseau à base de trame (<i>frame-based user network interface</i>)
HDSL	Ligne d'abonné numérique à fort débit (<i>high speed digital subscriber line</i>)
HVC	Conteneur virtuel d'ordre supérieur (<i>high order virtual container</i>)
IFFT	Transformée de Fourier rapide inverse (<i>inverse fast Fourier transform</i>)
LAD	Dispositif d'accès à réseau LAN (<i>LAN access device</i>)
LAN	Réseau local (<i>local area network</i>)
LVC	Conteneur virtuel d'ordre inférieur (<i>low order virtual container</i>)
MAQ	Modulation d'amplitude en quadrature
MI	Information de gestion (<i>management information</i>)
MIC	Modulation par impulsions et codage
MRF	Multiplexage par répartition en fréquence
MSSP	Protection partagée de section de multiplexage (<i>multiplex section shared protection</i>)
N/A	Numérique/analogique (conversion) (<i>digital/analogue</i>)
NEXT	Paradiaphonie (<i>near end crosstalk</i>)
NNI	Interface de nœud de réseau (<i>network node interface</i>)
NT	Terminaison de réseau (<i>network termination</i>)
NTU	Unité de terminaison de réseau (<i>network termination unit</i>)
OADM	Multiplexeur/démultiplexeur optique d'insertion-extraction (<i>optical add-drop multiplexer/demultiplexer</i>)
ODN	Réseau de distribution optique (<i>optical distribution network</i>)
OH	Préfixe; surdébit (<i>overhead</i>)
OLA	Amplificateur de ligne optique (<i>optical line amplifier</i>)
OLT	Terminaison de ligne optique (<i>optical line termination</i>)
OS	Système d'exploitation (<i>operation system</i>)
OSC	Canal de supervision optique (<i>optical supervisory channel</i>)
PC	Ordinateur personnel (<i>personal computer</i>)
PDH	Hierarchie numérique plésiochrone (<i>plesiochronous digital hierarchy</i>)
PHY	Couche physique
POTS	Service téléphonique ordinaire (traditionnel, classique) (<i>plain old telephone service</i>)
PPP	Protocole point à point
RGT	Réseau de gestion des télécommunications
RNIS	Réseau numérique à intégration de services
RNIS-BE	Réseau numérique à intégration de services à bande étroite
RNIS-LB	Réseau numérique à intégration de services à large bande
RTP	Répéteur de réception (<i>receiver transponder</i>)
SDH	Hierarchie numérique synchrone (<i>synchronous digital hierarchy</i>)
SDSL	Ligne d'abonné numérique à débit symétrique (<i>digital subscriber line</i>)
SONET	Réseau optique synchrone (<i>synchronous optical network</i>)
STM	Module de transport synchrone (<i>synchronous transport module</i>)

TC	Sous-couche de convergence de transmission (<i>transmission convergence sublayer</i>)
TE	Équipement terminal (<i>terminal equipment</i>)
TP	Répéteur d'émission (<i>send transponder</i>)
TU	Unité d'affluents (<i>tributary unit</i>)
TUG	Groupe d'unité d'affluents (<i>tributary unit group</i>)
UBR	Service à débit binaire non spécifié (<i>unspecified bit rate service</i>)
UNI	Interface usager-réseau (<i>user network interface</i>)
VBR	Service à débit binaire variable (<i>variable bit rate service</i>)
VC	Conteneur virtuel (SDH) (<i>virtual container (SDH)</i>)
VC	Canal virtuel (ATM) (<i>virtual channel (ATM)</i>)
VCI	Identificateur de canal virtuel (<i>virtual channel identifier</i>)
VDSL	Ligne d'abonné numérique à très haut débit (<i>very high speed digital subscriber line</i>)
VP	Conduit virtuel (<i>virtual path</i>)
VPI	Identificateur de conduit virtuel (<i>virtual path identifier</i>)
VTU	Unité terminale VDSL (<i>VDSL terminal unit</i>)
VTU-C	Unité de transmission VDSL-centre de commutation (<i>VDSL transmission unit-central office</i>)
VTU-R	Unité de transmission VDSL-extrémité distante (<i>VDSL transmission unit-remote</i>)
xDSL	Terme générique désignant tous les types d'équipement DSL

CHAPITRE 7

7 Technologie ATM

7.1 Introduction

On considère que le mode de transfert asynchrone (ATM: *asynchronous transfer mode*) est le point culminant de toute l'évolution intervenue au cours des dix années écoulées dans les domaines de la commutation et de la transmission. Les télécommunications ont toujours évolué, dans le passé, vers ce concept du mode de transfert asynchrone. Les causes de ce phénomène étaient extrêmement solides. Pour les comprendre, un bref historique de l'évolution des télécommunications s'impose.

Les télécommunications ont vu le jour au cours du dix-neuvième siècle avec l'invention du téléphone, technique permettant de transmettre des signaux vocaux analogiques. Les usagers étaient reliés les uns aux autres par des commutateurs répartis dans le réseau, ce qui conduisait à former un circuit. Ce type de commutation, appelée *commutation de circuits*, repose sur une attribution permanente de voies de transmission ou de largeur de bande entre les points d'extrémité d'une connexion. En téléphonie analogique, la seule technique permettant une utilisation partagée des supports de transmission commun était le *multiplexage par répartition en fréquence*, qui est apparu en 1925. Avec les premiers câbles à paires coaxiales, posés en 1936, on a pu obtenir une grande largeur de bande et une meilleure qualité en ce qui concerne le rapport signal/bruit.

Les communications numériques apparues à la fin des années 60, sont contemporaines du *multiplexage par répartition dans le temps*. Peu après s'est posé le problème de l'interconnexion des systèmes informatiques sur les réseaux de télécommunication. On utilisait des modems pour produire les signaux analogiques compatibles avec le réseau téléphonique public commuté. Les données sont transportées dans des salves séparées par des intervalles de silence. Pour cette raison, la connexion permanente réalisée par la commutation de circuits n'était pas la connexion optimale. La solution de ce problème a consisté à découper les données pour obtenir des unités séparées, des paquets, qui étaient transmis individuellement dans un réseau. Les paquets contiennent un très important surdébit qui sert à corriger les erreurs, renforcer la redondance et fournir des informations d'acheminement. Ainsi fut mise au point la *commutation par paquets*.

Le multiplexage par répartition dans le temps, s'il est mis en œuvre dans la commutation, rend possible la *commutation multidébit*, dans laquelle une station est rattachée au réseau par une liaison physique unique qui porte plusieurs canaux à débit de données fixe (canaux B, 64 kbit/s). Le trafic écoulé sur chaque canal peut être commuté indépendamment dans le réseau. Ce principe a aussi été appliqué dans le *réseau numérique à intégration de services* (RNIS). Il offrait un choix de plusieurs débits de données, mais ces débits sont fixes, donc peu efficaces pour une transmission à débit binaire variable (VBR: *variable bit rate*).

La même organisation des octets qui permet la commutation multidébit se retrouve dans le réseau à hiérarchie numérique synchrone (SDH: *synchronous digital hierarchy*). A noter qu'un multiplexage synchrone par répartition dans le temps est utilisé dans la hiérarchie SDH. Il fournit le moyen de gérer les ressources du réseau de manière à obtenir une qualité de service (QS) garantie, mais au prix d'une utilisation inefficace de ces ressources.

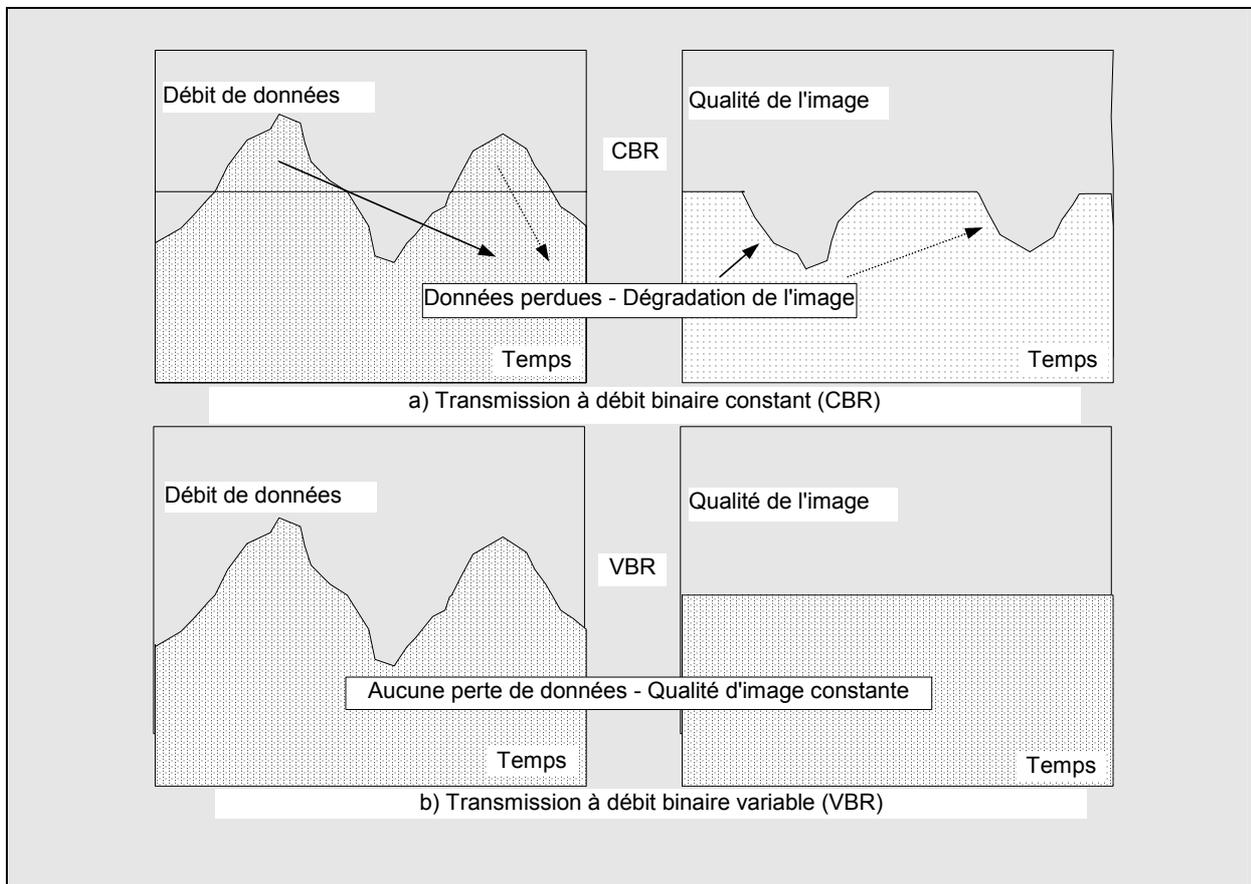
S'agissant de mettre en œuvre des débits de données différents dans les réseaux de télécommunication modernes à fort débit, la technique du *relais de trame* est apparue comme une solution prometteuse. Pour l'essentiel, cette technique est identique à la commutation par paquets, hormis l'utilisation de paquets de longueur variable, et elle est conçue pour fonctionner jusqu'à 2 Mbit/s. Dans les systèmes à relais de trame, les paquets ont un surdébit moindre que dans les systèmes antérieurs, et ils sont plus performants dans la transmission du trafic VBR.

Dans les applications en temps réel telles que la transmission de signaux vocaux ou vidéo, le fonctionnement avec salves n'est pas la règle générale; on obtient le débit binaire constant à la sortie. Un procédé efficace consiste à allouer une largeur de bande fixe à une source unique. La capacité disponible est partagée à parts égales entre ces sources.

L'augmentation énorme des quantités de données à fournir, surtout dans les applications vidéo, a eu pour conséquence la mise au point de plusieurs techniques de compression. Il en résulte que les trains de bits produits dans maintes applications nouvelles sont à débit variable. La transmission à débit binaire variable (VBR) permet d'obtenir une qualité de service satisfaisante. Par exemple, la compression est appliquée aux détails les moins significatifs dans la transmission des images (ou vidéo), la largeur de bande étant économisée pour des détails plus importants. Dans le cas de la transmission en VBR, on peut obtenir une qualité constante en lieu et place d'un débit constant, Figure 7.1.

Figure 7.1 – Débit constant et qualité constante pour

- a) transmission CBR,
- b) transmission VBR



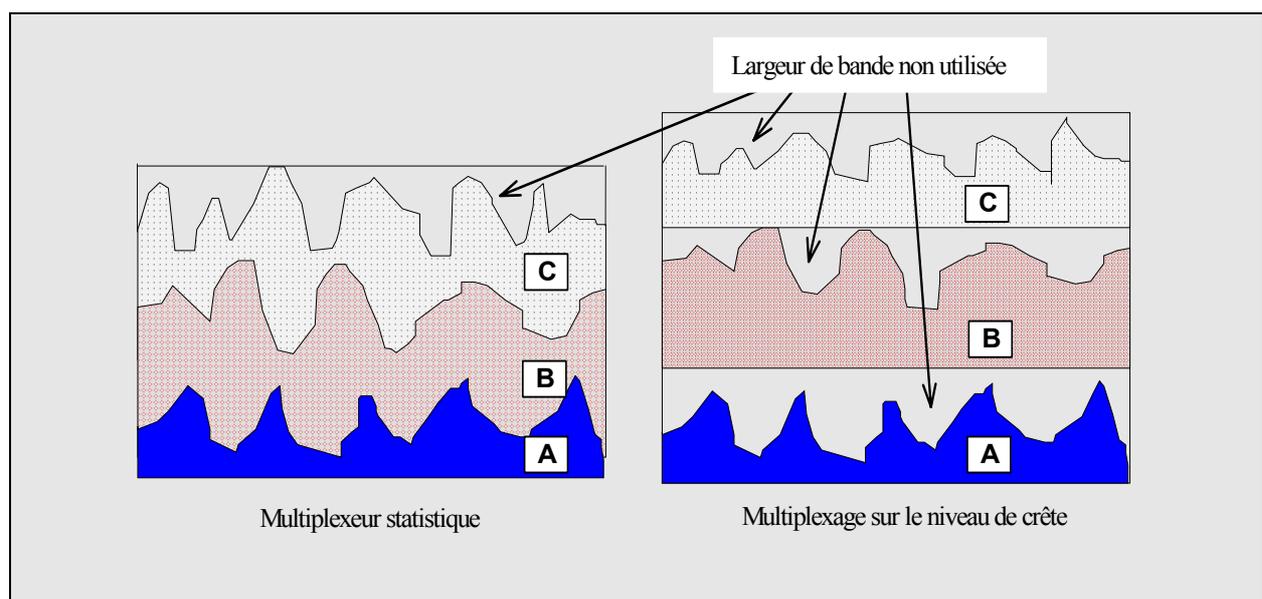
L'introduction de nouveaux services à la fin des années 80 a nécessité l'application d'une technologie nouvelle, capable de prendre en charge une multiplicité de services, de fournir les grands débits de transmission requis, de mettre en pratique la technique de la largeur de bande à la demande et d'assurer une gestion efficace grâce à une commande de bout en bout. Il a donc fallu spécialiser les réseaux traditionnels pour satisfaire à ces exigences. On a mis au point plusieurs types de réseaux possédant des caractéristiques spécifiques en matière d'interfaces, de fonctionnalités et de conditions de prise en charge. Avec le développement de la technologie des fibres optiques, on a obtenu un support de transmission à fort débit, peu sensible au bruit. Cette technologie permet la mise en œuvre de différents types de services à large bande, grands consommateurs de largeur de bande. C'est sur cette base qu'a été érigé le RNIS à large bande (RNIS-LB).

La technique du relais de trame, a évolué pour donner la technique du relais de cellule, dans laquelle on utilise des paquets courts de longueur fixe, les cellules. Cette technique est appliquée sur un support de transmission rapide à faible bruit, avec commande plus positive dans la couche réseau; la conséquence est un surdébit minimum pour la protection contre les erreurs. Le relais de cellule permet de définir des voies virtuelles et de définir dynamiquement les débits de données. On peut donc considérer que cette technique est un progrès par rapport à la commutation de circuits pour les débits binaires constants et par rapport à la commutation par paquets pour les débits binaires variables.

Pour empêcher toute perte d'information, il faut transmettre les signaux à la valeur de crête du débit naturel. La conséquence est la suivante: lorsque le débit de transmission de l'information diminue (par exemple, lorsqu'une redondance était présente dans le signal initial, ce qui permettait d'économiser de la largeur de bande par l'application de techniques de codage), les ressources du réseau ne sont pas utilisées efficacement. On a proposé de recourir au multiplexage de signaux différents pour résoudre ce problème.

Le mode ATM procure un gain d'efficacité par le biais du multiplexage statistique d'un trafic d'utilisateur dynamique. Avec ce mode d'exploitation, plusieurs connexions peuvent se partager la largeur de bande aux accès de sortie, ce qui donne une utilisation intensive des ressources disponibles; voir la Figure 7.2. Dans ce système, les besoins en largeur de bande aux entrées sont variables et ils se cumulent dans une file d'attente à la sortie; dans ces conditions, le débit des cellules à la sortie d'un multiplexeur statistique est supérieur à la somme des valeurs de crête des débits de cellules à l'entrée. Pour éviter des pertes de cellules, il faut avoir recours à une mémoire tampon pour stocker les cellules excédentaires en file d'attente. On croyait qu'un traitement approprié avec mémoire tampon atténuerait le caractère sporadique (sporadicité) du trafic (rapport du maximum au nombre moyen de cellules), en lissant le flux total de cellules (sortie d'un multiplexeur statistique). On a montré, cependant, que le flux total est tout aussi *sporadique* que le trafic aux entrées. Conclusion: pour obtenir un gain de multiplexage statistique, il faut avoir une mémoire tampon de capacité beaucoup plus grande en chaque point de contention. Le dimensionnement des tampons est affaire de compromis entre un temps de transmission court et un petit taux d'erreur sur les cellules.

Figure 7.2 – Comparaison entre le multiplexeur statistique et le multiplexeur agissant sur les niveaux de crête



Ainsi qu'il est indiqué dans la Recommandation UIT-T I.120, *la caractéristique principale d'un RNIS (donc aussi d'un RNIS-LB) est d'assurer, au sein d'un même réseau, une large gamme de possibilités d'applications téléphoniques et non téléphoniques. Un élément clé de l'intégration des services ... est la fourniture de services à l'aide d'un ensemble limité de types de connexions et d'arrangements d'interface usager-réseau polyvalente.*

ATM est un mode de transfert qui permet la mise en œuvre du RNIS-LB. Le terme «transfert» recouvre à la fois la transmission et la commutation de l'information (avec un temps de transmission et un degré de complexité raisonnables). La Figure 7.3 présente trois types différents de mode de transfert, qui mettent en évidence les propriétés du mode ATM.

Aujourd'hui, la technique de commutation courante pour les signaux à spectre étroit (principalement des connexions vocales) consiste à commuter des voies synchrones pendant la durée de la connexion. Cette commutation est réalisée par des combinaisons d'étages de commutation spatiale et temporelle dans les centraux. Dans le *mode de transfert synchrone* (STM: *synchronous transfer mode*), chaque connexion est présentée périodiquement comme un mot de longueur fixe (également appelé «intervalle de temps»); Figure 7.3 (a).

Dans les applications de données, on utilise des paquets (blocs d'information). Dans le *mode de transfert par paquets* (Recommandation UIT-T I.113), les fonctions de transmission et de commutation sont réalisées par l'application de techniques basées sur les paquets (compte tenu de leur adresse uniquement, sans prise en compte du temps), ce qui permet un partage dynamique des ressources entre les différentes connexions, Figure 7.3 (b).

Dans le *mode de transfert asynchrone* (ATM) toute l'information à transférer est mise sous forme de paquets dans des intervalles de longueur fixe appelés **cellules**, le fonctionnement se faisant en mode avec connexion. Les cellules se composent d'un champ d'information de 48 octets et d'un en-tête de 5 octets qui contient des informations d'acheminement et de commande. Le transfert est asynchrone en ce sens que la récurrence des cellules contenant l'information en provenance d'un utilisateur donné pour un service donné n'est pas forcément périodique, Figure 7.3 (c).

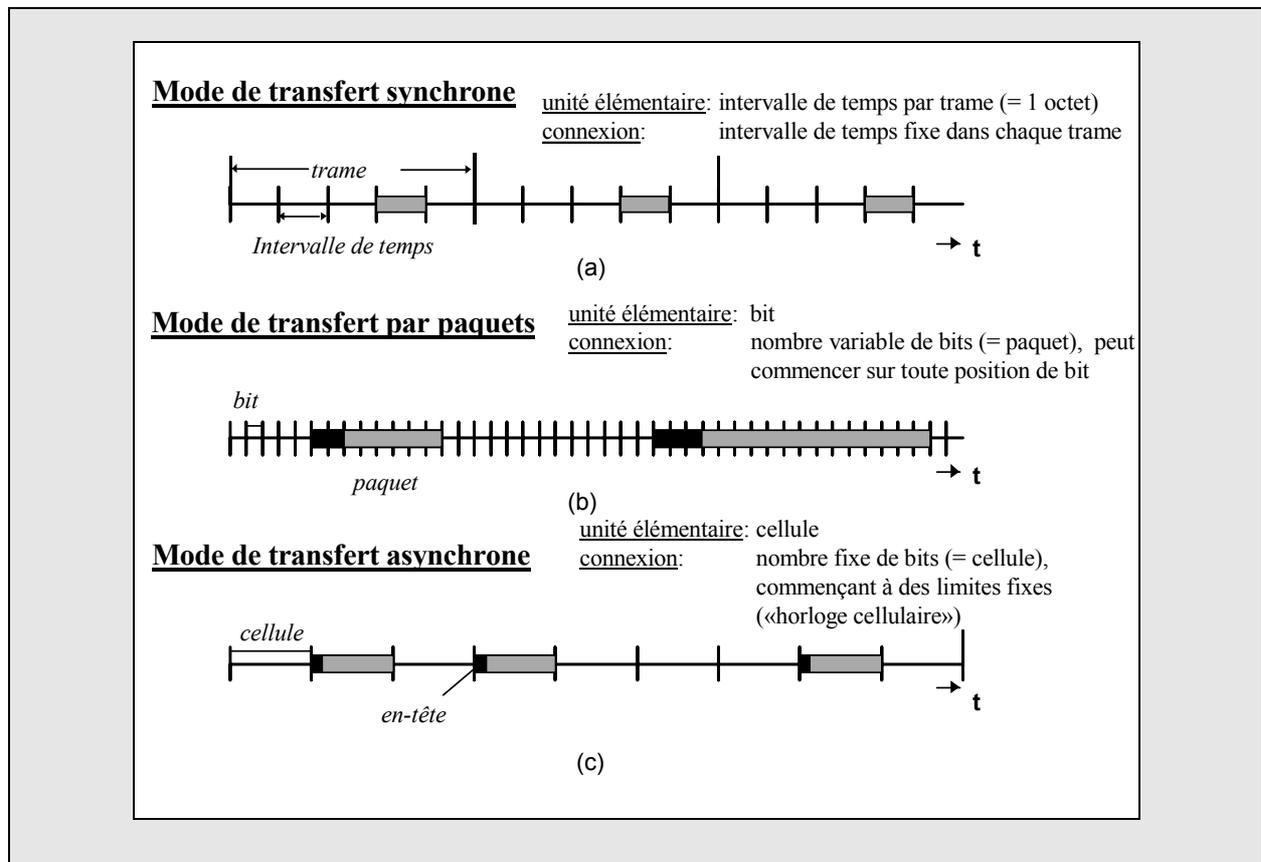
La technologie ATM vise à supprimer la duplication des matériels et des logiciels nécessaires. Ainsi, un réseau donné devrait avoir les caractéristiques suivantes: meilleur rendement sur les liaisons, simplification de l'exploitation, de la maintenance, de la fourniture du service, réduction des dépenses d'équipement et souplesse dans l'attribution des ressources du réseau.

Dans le mode ATM, on applique le principe de la division asynchrone du temps (ATD: *asynchronous time division*), selon lequel une capacité de transmission est organisée dans des intervalles non spécialisés qui sont remplis de cellules étiquetées, en relation avec les besoins instantanés de chaque application. Etant donné que chaque source d'application peut avoir un débit binaire variable, elle définit elle-même son débit de transmission.

Le mode ATM satisfait à trois conditions fondamentales pour les services futurs:

- Ces services exigent des débits de transmissions élevés, pouvant dépasser 100 Mbit/s. Ils seront utilisés pour la transmission rapide de documents, pour des connexions rapides de processeurs ou pour des transmissions vidéo.
- Pour nombre de services, on a besoin d'une capacité de transport variable, pouvant être définie individuellement pour chaque connexion. Selon la caractéristique de trafic du service, on pourra être amené à transmettre une information continue et une information divisée en paquets.
- La troisième condition est liée à la nécessité d'avoir des débits binaires variables pendant la durée de la connexion. Dans les services interactifs, on a des phases à débits binaires très élevés pendant le transfert de l'information et des phases durant lesquelles le flux d'information est presque nul (traitement de l'information – trafic en salves ou sporadique). Le codage avec débit binaire variable donne des débits différents pendant la durée de la connexion.

Figure 7.3 – Comparaison de trois modes de transfert différents



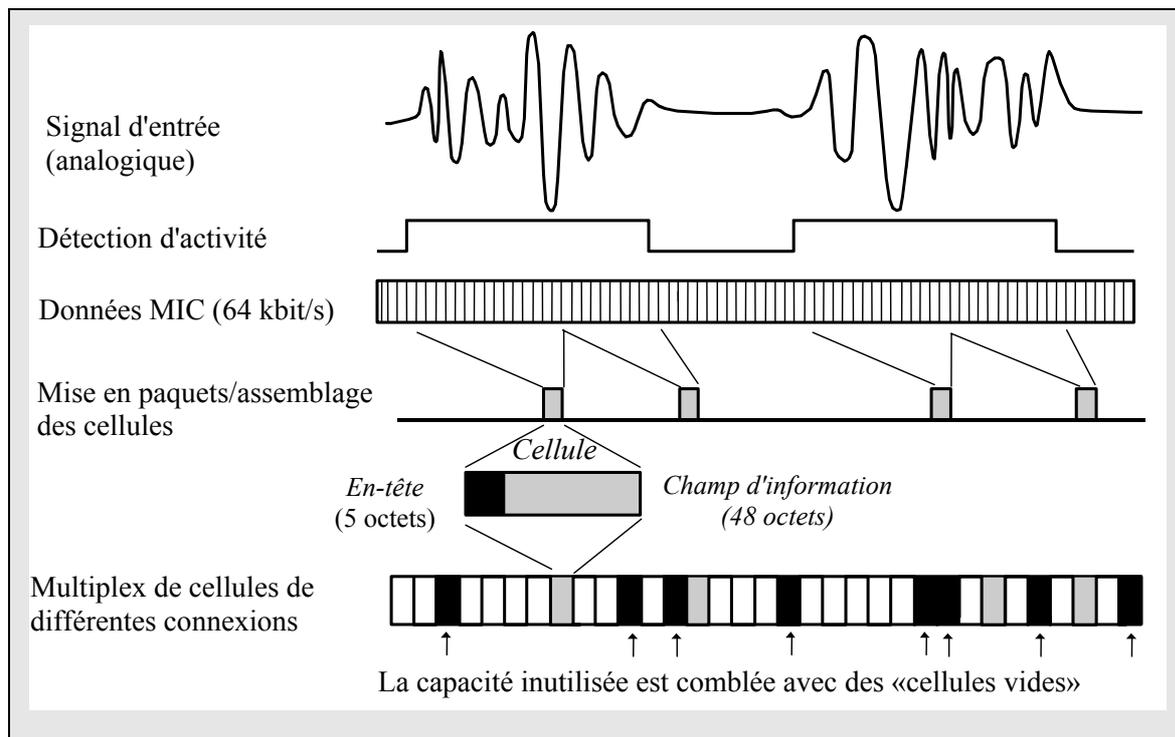
Les cellules ATM peuvent être transportées sur différents systèmes de transmission. La seule condition à respecter est de garantir l'indépendance de la séquence des bits, c'est-à-dire l'absence de restrictions sur l'information autorisée transportée par les cellules. L'UIT-T a défini deux options pour l'interface usager-réseau, l'une basée sur la hiérarchie SDH, l'autre sur le multiplexage pur des cellules.

Les signaux de la source sont mis en paquets dans le terminal ou, pour les terminaux classiques, dans un adaptateur de terminal séparé, pour former les cellules ATM. Dans les systèmes ATM (commutateurs, multiplexeurs, concentrateurs), les cellules provenant de plusieurs connexions sont multiplexées statistiquement. La capacité de transmission non utilisée sera comblée avec des cellules vides. La Figure 7.4 donne un exemple du processus dans lequel des signaux analogiques sont groupés pour former des cellules, ces cellules étant ensuite multiplexées avec des cellules d'autres connexions.

Dans un réseau ATM, on observe des phénomènes qui n'existent pas dans les réseaux synchrones. Par exemple, il faut 6 ms pour remplir une cellule d'un train de données à 64 kbit/s. Dans le réseau, ces cellules sont multiplexées avec d'autres cellules et modifiées dans le nœud de commutation. Il en résulte des temps de transmission supplémentaires au lieu de temps de transmission fixes. Des mesures appropriées doivent être prises dans le cas des services utilisant des flux binaires constants.

Par ailleurs, il peut y avoir perte de cellules, imputable à différentes causes: erreurs binaires, débordement de mémoires tampons ou application d'une fonction de surveillance qui supervise le flux de cellules pour vérifier la conformité à des paramètres agréés. Une cellule perdue représente la perte de 48 octets d'information. Le codage de la source doit remédier à ce type d'erreurs.

Figure 7.4 – Processus de mise en paquets et assemblage des cellules



7.2 Connexions virtuelles: voie virtuelle et conduit virtuel

Le mode ATM est une technique en *mode connexion*, avec des connexions virtuelles entre les points de terminaison. Les termes fondamentaux relatifs aux connexions virtuelles sont définis dans la Recommandation UIT-T I.311.

Voie virtuelle

Le terme voie virtuelle (VC) est un terme générique utilisé pour décrire une possibilité de communication unidirectionnelle pour le transport des cellules ATM. Toute voie virtuelle reçoit son identificateur (VCI) dans le processus d'établissement de la connexion. Le VCI est une partie de l'en-tête de la cellule.

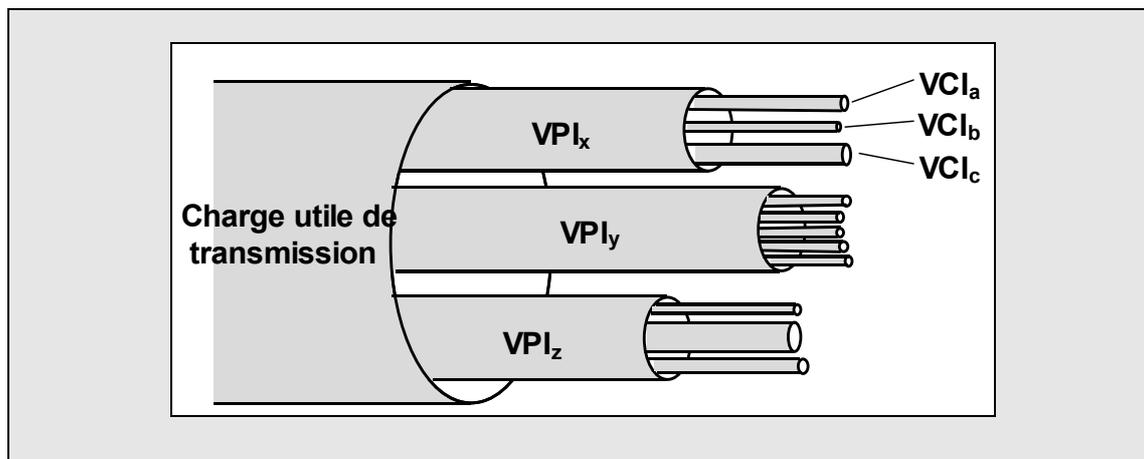
Conduit virtuel

Le conduit virtuel (VP) est un concept utilisé pour décrire le transport unidirectionnel de cellules appartenant à des voies virtuelles et associées par un identificateur unique commun (VPI). Le VPI est aussi une partie de l'en-tête de la cellule.

Les paramètres d'une connexion virtuelle seront définis pendant la phase d'établissement de la connexion. A l'aide d'une procédure de signalisation, il est demandé au commutateur local de fournir l'identificateur de voie virtuelle (VCI: *virtual channel identifier*) et l'identificateur de conduit virtuel (VPI: *virtual path identifier*). Les commutateurs vérifient si les ressources demandées sont disponibles et, si tel est le cas, attribuent ces ressources.

Les identificateurs VPI et VCI de l'en-tête définissent les modalités de l'acheminement des cellules dans le réseau. Ainsi, les cellules appartenant à une même connexion virtuelle sont reconnues et on peut les distinguer de cellules appartenant à d'autres connexions virtuelles.

Figure 7.5 – Relation entre conduits virtuels et voies virtuelles



Les valeurs de VPI et VCI ne sont valides que pour la durée de la connexion. Elles diffèrent généralement d'une liaison à une autre parce que chaque nœud de commutation leur applique un nouveau traitement pour la liaison suivante. Toutefois, ces valeurs sont toujours clairement affectées à leur connexion virtuelle. Le mode ATM étant une technique en mode connexion, toutes les cellules d'une connexion donnée suivent le même chemin. Il en résulte qu'elles se présentent toujours dans le même ordre, tout dépassement est impossible. Cette conservation de l'ordre de succession des cellules est désignée par l'expression *principe d'intégrité de la séquence des cellules* (Recommandation UIT-T I.150).

L'identificateur VPI définit des faisceaux de connexions virtuelles (voir la Figure 7.5). Dans les limites du réseau, des faisceaux de connexions caractérisés par le même VPI peuvent être traités ensemble. Dans l'avenir, on pourrait avoir recours à une application différente pour faire la distinction entre des réseaux et des opérateurs différents. En se servant de l'adresse VPI, l'abonné pourrait indiquer quel réseau il souhaite utiliser.

Dans un environnement ATM, un circuit ou un conduit ne possède pas une capacité fixe. L'adjectif «virtuel» signifie que les cellules sont acheminées de la source jusqu'à la destination sur la base de l'identificateur VPI, de la manière qui semble appropriée. Toutes les cellules relevant d'une même valeur de VPI appartiennent au même conduit virtuel (VP) et un VP peut contenir plusieurs voies virtuelles. Un VP est donc une subdivision logique du conduit VP et toutes les cellules correspondant aux mêmes indicateurs VPI et VCI appartiennent à la même VC.

Une liaison physique contenant des VP et des VC réalise l'interconnexion de nœuds adjacents; toutefois, les concepts VP et VC ont une signification plus large que celle de simples connexions d'un nœud à un autre nœud. Un conduit VP peut être établi sur plusieurs nœuds. La valeur de VP n'est rien d'autre qu'un identificateur local correspondant à une section d'un conduit VP. Une telle section porte le nom de *liaison VP*. Au moyen de commutateurs ATM, plusieurs liaisons VP peuvent être connectées pour former un conduit virtuel complet.

Chaque conduit virtuel peut contenir un certain nombre de voies virtuelles. Tout comme le VP, la VC peut être établie sur plusieurs nœuds. La section d'une VC qui réside dans un VP s'appelle une *liaison VC*. Pour connecter une liaison VC à une autre liaison VC, il faut un commutateur ATM capable de réaliser la connexion au niveau VC.

Les connexions par conduits virtuels et par voies virtuelles peuvent être établies dynamiquement (à la demande), grâce à des procédures déclenchées par l'utilisateur final. Un opérateur peut aussi établir des connexions virtuelles à l'aide d'un système de gestion.

Exemple d'utilisation de ces conduits et de ces voies: considérons une entreprise possédant deux bureaux qui pourrait connecter les ordinateurs et les postes téléphoniques de ces bureaux en louant un conduit virtuel. A cette fin, l'entreprise reçoit un certain nombre de voies virtuelles. Ces VC peuvent être utilisées pour de nombreux services différents, par exemple le courrier électronique, la téléphonie, l'accès à l'Internet et le transfert de fichiers.

L'ATM étant une technique en mode connexion, des circuits virtuels doivent être établis entre les nœuds d'extrémité avant que la transmission puisse commencer. De cette façon, l'acheminement des cellules est effectué dans chaque nœud pour chaque cellule entrante. L'identificateur VPI (champ de 8 ou 12 bits) et l'identificateur VCI (champ de 16 bits) contiennent à eux deux l'information d'acheminement pour une cellule. Dans le processus d'acheminement, la valeur du VCI d'une liaison VC entrante est convertie en valeur du VCI de la liaison sortante.

Un conduit VP est un ensemble de voies VC entre deux nœuds dans un RNIS-LB. Un itinéraire prédéfini est associé à chaque VP dans le réseau physique. Par ailleurs, chaque VP possède sa propre largeur de bande définie, qui limite le nombre de VC pouvant être multiplexées sur un conduit VP. En général, les identificateurs VPI sont utilisés pour acheminer les paquets entre deux nœuds qui commencent, qui suppriment ou qui terminent les VP. De leur côté, les identificateurs VCI sont utilisés dans les nœuds d'extrémité pour établir la distinction entre des connexions différentes.

7.3 Structure en couches des réseaux de transport ATM – théorie générale

La Recommandation UIT-T I.311 indique qu'un réseau de transport ATM est structuré en deux couches: la couche ATM et la couche physique, voir la Figure 7.6. Les fonctions de transport de la couche ATM se répartissent entre deux niveaux, le niveau VC et le niveau VP. Les fonctions de transport de la couche physique se subdivisent entre trois niveaux: le niveau conduit de transmission, le niveau section numérique et le niveau de la section de régénération. Les fonctions de transport de la couche sont indépendantes de la forme de mise en œuvre de la couche physique.

L'*extrémité de connexion* est située à la frontière du niveau (par exemple, entre le niveau VC et le niveau VP), là où un client est desservi. Le client peut se trouver au niveau immédiatement supérieur ou dans le plan de gestion. L'extrémité de connexion assure la fonction de terminaison de connexion.

Le *point de connexion* se trouve à l'intérieur d'une connexion, là où convergent deux liaisons adjacentes. Il est situé à un niveau où l'information est acheminée en mode transparent. Ce point assure la fonction de connexion.

La *connexion* fournit la capacité de transfert de l'information entre extrémités de connexion. Elle représente l'association entre extrémités ainsi que toute information additionnelle concernant l'intégrité du transfert de l'information.

La *liaison* fournit la capacité de transfert de l'information en transparence. Une liaison représente l'association entre points de connexion contigus ou entre une extrémité et le point de connexion contigu.

Les Figures 7.6 et 7.7 montrent qu'un conduit de transmission peut contenir plusieurs conduits virtuels, chacun d'eux transportant plusieurs voies virtuelles. La relation entre des niveaux différents du réseau de transport ATM est évidente.

Le *niveau conduit de transmission* s'étend entre des éléments de réseau qui assemblent et désassemblent la charge utile d'un système de transmission. A l'extrémité d'un conduit de transmission, il faut procéder au cadrage des cellules et au contrôle d'erreur d'en-tête.

Le *niveau section numérique* s'étend entre des éléments de réseau qui assemblent et désassemblent un flux continu de bits ou d'octets.

Le *niveau section de régénération* s'étend entre des éléments de réseau chargés de la régénération des signaux.

Figure 7.6 – Relation entre les couches hiérarchiques

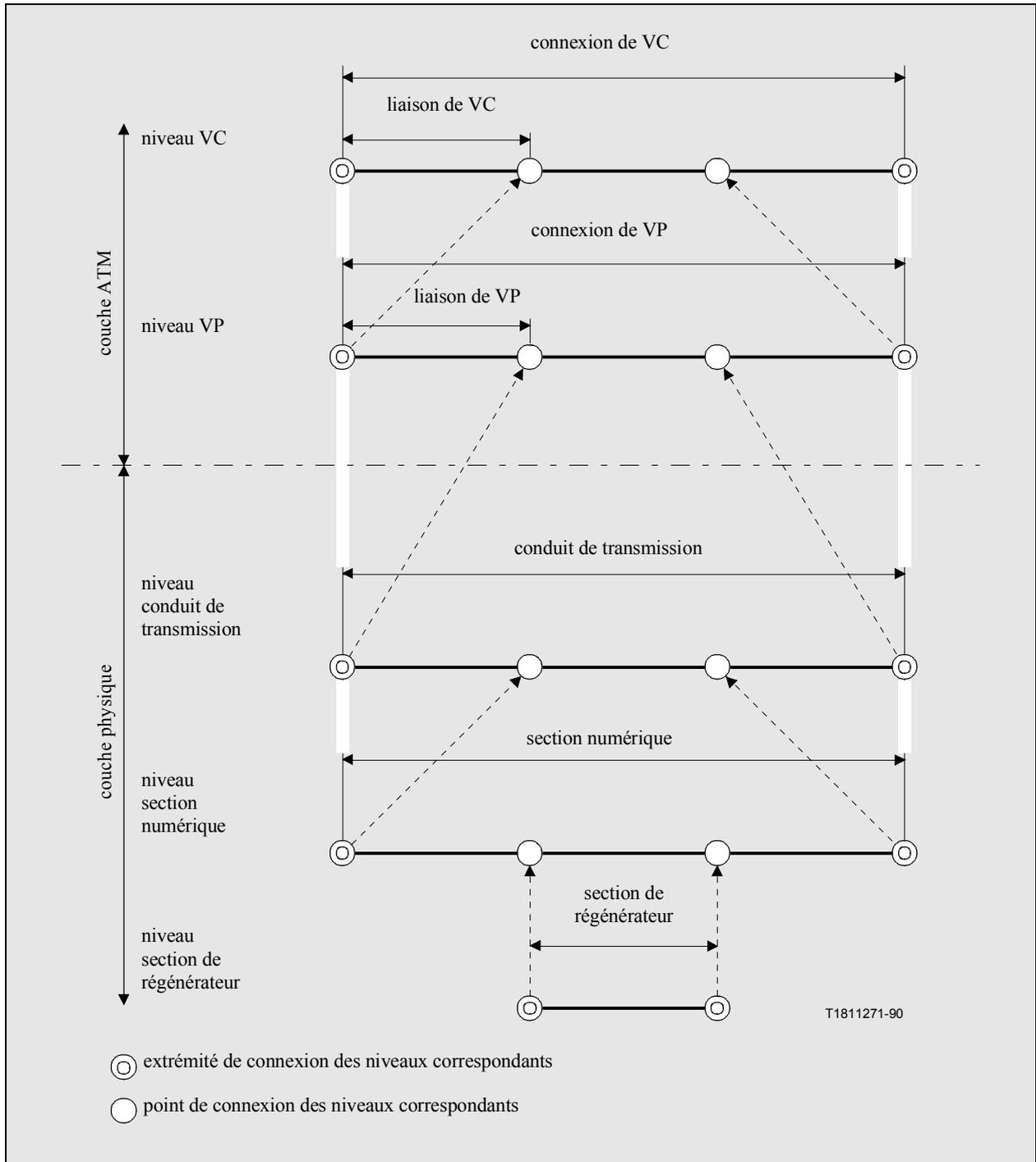
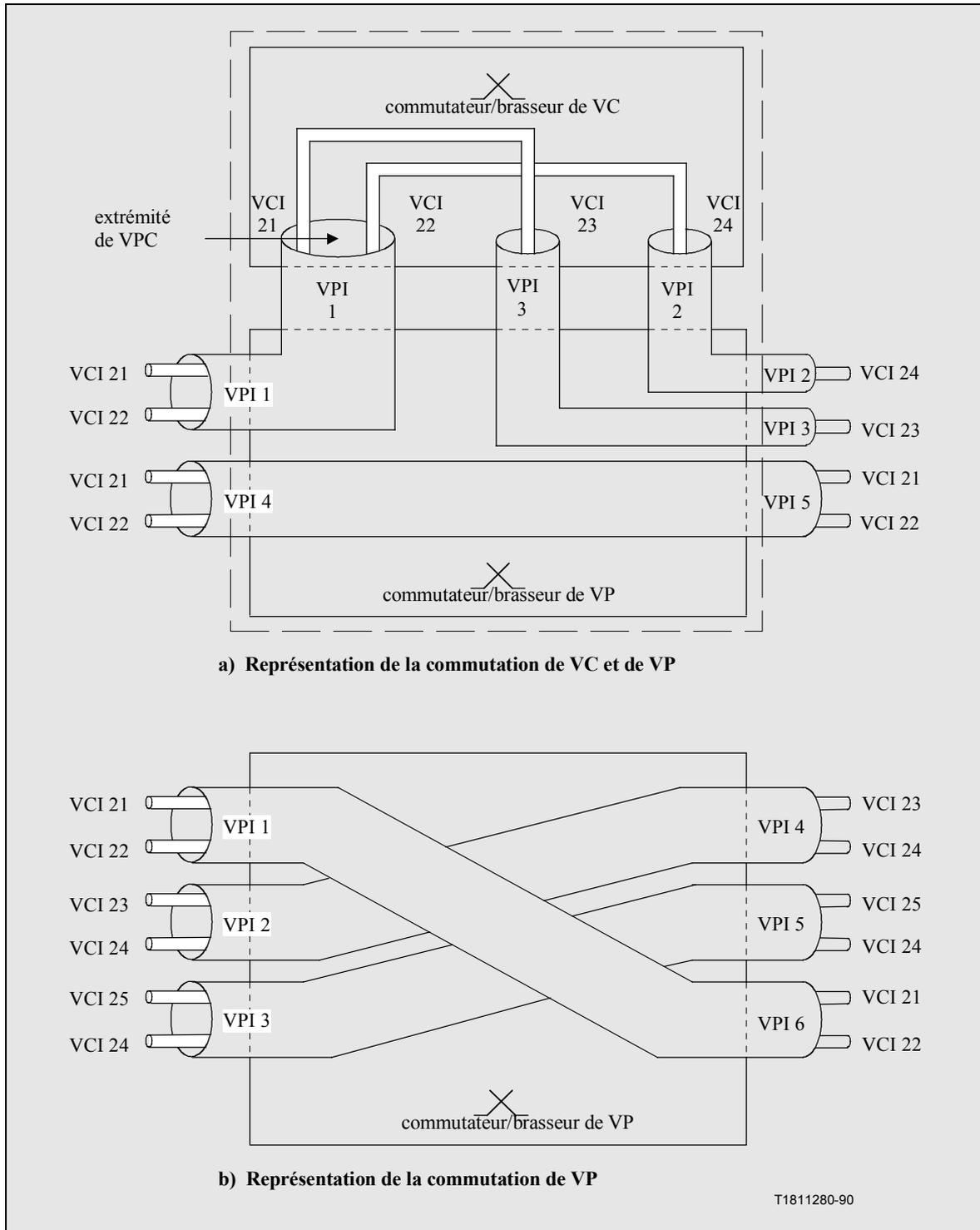


Figure 7.7 – Représentation de la hiérarchie de commutation de conduit virtuel et de voie virtuelle (Recommandation UIT-T I.311)



7.4 Commutation en mode ATM des conduits virtuels (VP) et des voies virtuelles (VC)

Un système ATM permet la commutation par paquets. Il utilise de petits paquets de même taille, appelés cellules, et un protocole simple grâce auquel les cellules peuvent être transmises, interprétées et remises assez rapidement pour permettre le transport de tous types d'information, y compris les signaux vocaux et de vidéo. Les débits binaires étant élevés, il faut une logique de matériel à action rapide pour le traitement des cellules (commutation, multiplexage) au lieu d'un traitement des cellules par logiciel, qui prendrait plus de temps.

Les deux principales fonctions d'un nœud ATM de commutation ou de brassage sont les suivantes:

- évaluation et nouveau calcul des identificateurs VPI/VCI;
- transport des cellules depuis les accès d'entrée jusqu'aux accès de sortie correspondants.

La commutation des cellules ATM s'effectue sur la base d'une table d'acheminement. S'agissant de la première fonction de commutation, on peut dire qu'il existe deux niveaux de commutation possibles: le niveau VC et le niveau VP. La commutation au niveau VC signifie qu'une liaison VC entrante est connectée à une (ou plusieurs) liaison(s) VC sortante(s). Le transfert s'opère sur la base de données contenues dans la table d'acheminement, qui mettent en relation la valeur de VPI/VCI à l'entrée avec l'accès de sortie.

La commutation au niveau VP signifie que l'acheminement des cellules se fonde uniquement sur la valeur de l'identificateur VPI. De cette façon, toutes les cellules entrantes assorties d'une certaine valeur de VPI sont dirigées vers une certaine liaison VP de sortie. Il n'est pas tenu compte de l'identificateur VCI, dont la valeur demeure inchangée.

Le VCI identifie une liaison VC donnée, pour une connexion de conduit virtuel donnée (VPC: *virtual path connection*). Une valeur spécifique de VCI est attribuée chaque fois qu'une voie virtuelle est commutée dans le réseau.

Les fonctions d'acheminement des voies virtuelles sont exécutées dans un module de commutation/brassage de VC. Cet acheminement est déclenché par une traduction des valeurs de VCI des liaisons VC entrantes en valeurs de VCI des liaisons VC sortantes.

Les liaisons par voies virtuelles sont soumises à une concaténation qui forme une connexion de voies virtuelles (VCC: *virtual channel connection*). Une VCC est comprise entre deux extrémités de VCC ou, dans le cas des systèmes point à multipoint, entre un plus grand nombre de ces extrémités. Une extrémité de VCC est le point où le champ d'information des cellules est échangé entre la couche ATM et l'utilisateur du service de couche ATM.

7.5 Format des cellules ATM

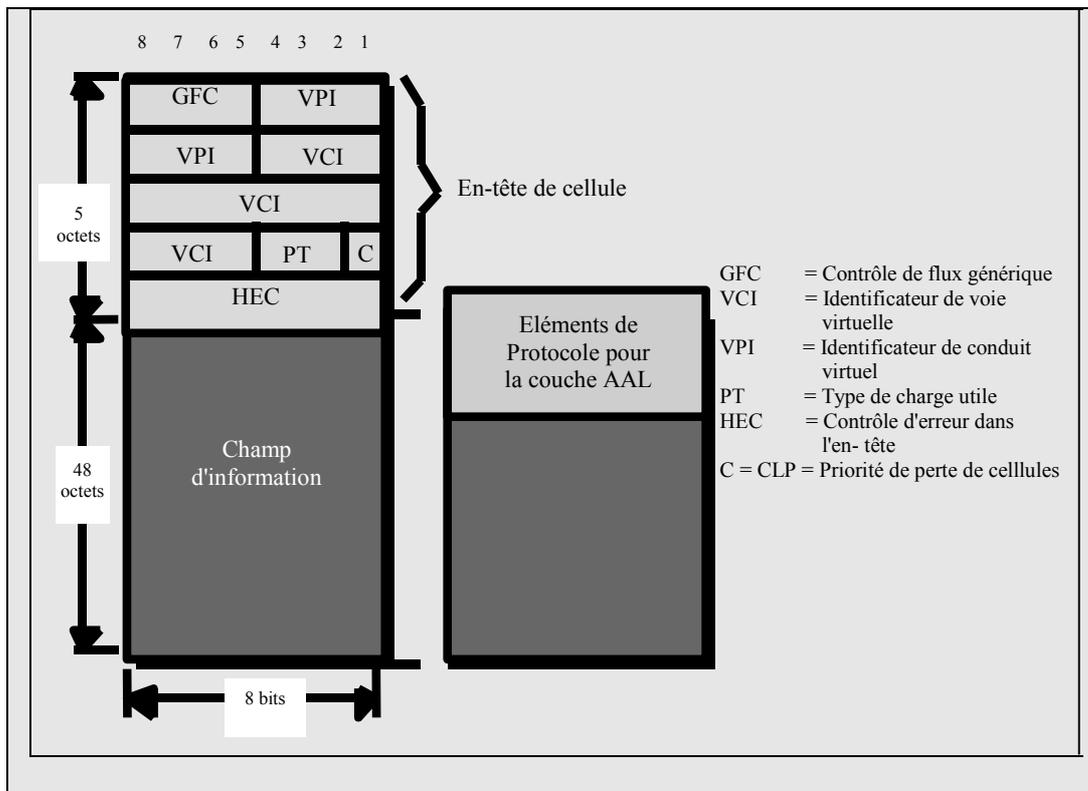
Le système ATM transporte l'information dans des paquets de petite taille appelés cellules, dont les caractéristiques sont les suivantes:

- longueur de bloc fixe (48 octets) pour le champ d'information;
- 5 octets pour l'information de commande (en-tête de la cellule).

Les avantages d'une taille de cellule fixe sont une diminution du délai de mise en file d'attente pour les cellules très prioritaires et une commutation efficace. Ces deux avantages sont extrêmement importants pour les très grands débits de données prévus dans l'exploitation en mode ATM.

La Figure 7.8 représente la structure d'une cellule ATM (Recommandation UIT-T I.361). Ce format est celui de la cellule telle qu'elle se présente à l'interface usager-réseau (UNI: *user-network interface*), qui est généralement le point de séparation entre un réseau ATM public et l'installation privée. Il y a une petite différence par rapport à la cellule présente à l'interface de nœud de réseau (NNI: *network-node interface*), c'est-à-dire entre les nœuds du réseau ATM. Dans le cas NNI, il n'y a pas de contrôle de flux générique (GFC) dans la cellule, ce contrôle étant remplacé par quatre bits supplémentaires dans l'identification VPI.

Figure 7.8 – Format de la cellule ATM



GFC – Contrôle de flux générique

Cette fonction occupe un champ de 4 bits pour le contrôle de flux à l'interface UNI, appliqué au trafic en provenance de l'équipement utilisateur et à destination du réseau. Le contrôle de flux ne s'applique pas au trafic qui s'écoule dans le sens opposé (du réseau vers l'utilisateur). Il n'est pas utilisé à l'intérieur du réseau; il a vocation à être appliqué par des mécanismes d'accès qui mettent en œuvre différents niveaux et priorités d'accès. La Recommandation UIT-T I.150 précise les conditions d'utilisation du GFC.

La fonction GFC doit être capable de faire en sorte que les terminaux accèdent à leur capacité assurée, surtout les terminaux qui possèdent des éléments de capacités garanties. La capacité de réserve restante sera partagée équitablement entre tous les autres terminaux, à l'interface UNI. Plusieurs mesures ont été proposées pour assurer ce partage équitable. La plupart d'entre elles reposent sur des quantités égales de capacité de réserve ou sur le même pourcentage du débit binaire demandé en supplément. On trouvera dans plusieurs exposés et dans des contributions au Forum ATM une analyse détaillée du partage équitable de la capacité à différents niveaux.

Le contrôle de flux GFC doit pouvoir accepter des temps de transmission différents, des variations différentes de ces temps de transmission et des conditions pouvant être satisfaites prioritairement. Il ne doit pas être influencé par la composition du trafic (présence de plusieurs catégories de trafic), par le nombre de terminaux, ni par la distance séparant les terminaux.

Le principal objectif du mode ATM est de réaliser des débits binaires élevés et des temps de transmission courts, sans mettre en œuvre des moyens, pour stocker des cellules pendant de longues périodes. Le GFC n'a donc pas sa place dans un réseau ATM. Cette fonction contrôle des terminaux reliés à un réseau de clients.

VPI – Champ d'identificateur de conduit virtuel

Le champ VPI à l'interface UNI contient huit bits (quatre respectivement dans le premier octet et dans le second octet). Ces bits sont utilisés pour l'acheminement. A l'interface NNI, l'identificateur VPI possède quatre bits supplémentaires (12 au total) qui renforcent les capacités d'acheminement. Le VPI est utilisé pour acheminer les cellules entre deux nœuds qui commencent, qui suppriment ou qui terminent les conduits virtuels.

VCI – Champ d'identificateur de voie virtuelle

Le champ VCI, composé de 16 bits, est utilisé (conjointement avec le VPI) pour l'acheminement. Mis en œuvre dans les nœuds d'extrémité, il établit la distinction entre différentes connexions.

PTI – Identificateur de type de charge utile

L'en-tête ATM contient trois bits pour définir le type de charge utile. La valeur 0 pour le premier bit du PTI indique une information d'utilisateur, à savoir l'information provenant de la couche immédiatement supérieure. Dans ce cas, le deuxième bit indique s'il y a eu encombrement (0 s'il n'y a pas eu encombrement).

La valeur 1 pour le premier bit indique qu'une cellule transporte une information de gestion ou de maintenance du réseau.

CLP – Priorité de perte de cellules

Le champ CLP de l'en-tête de cellule ATM est un champ de 1 bit qui sert explicitement à indiquer la priorité de perte de cellules. Du fait du multiplexage statistique des connexions, des pertes de cellules sont inévitables sur une connexion du RNIS-LB. Une cellule dans laquelle CLP = 1 peut être rejetée par le réseau en cas d'encombrement, selon les conditions qui règnent dans le réseau. Une cellule dans laquelle CLP = 0 a un rang de priorité plus élevé et ne doit pas, si possible, être rejetée.

Au moment de l'établissement d'une connexion, le débit des cellules prioritaires, le cas échéant, est déterminé (une priorité plus élevée est fixée pour les services qui nécessitent une capacité minimale garantie).

HEC – Contrôle d'erreur dans l'en-tête

Le champ HEC a deux fonctions principales: corriger (si possible) ou rejeter les cellules dont l'en-tête est mutilé, et cadrer les cellules. Ce champ de 8 bits effectue la correction d'erreur sur un seul bit et garantit une faible probabilité de transmission des cellules mutilées. Le mécanisme HEC est décrit dans la Recommandation UIT-T I.432. Il s'agit d'une fonction de la couche physique, capable de corriger les erreurs sur un seul bit et de détecter les erreurs sur plusieurs bits dans l'en-tête des cellules ATM.

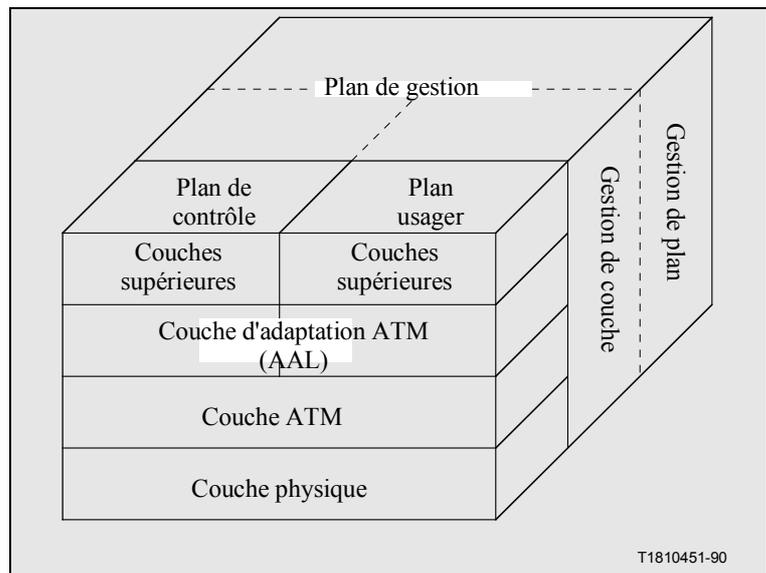
On notera que la convention de numérotation relative à la position des octets dans une cellule est basée sur la transmission des octets dans l'ordre croissant. Dans ces conditions, l'en-tête de la cellule est transmis en premier. Les bits constituant un octet sont transmis dans l'ordre décroissant, en commençant par le bit de plus fort poids (MSB: *most significant bit*).

7.6 Le modèle de référence pour le protocole du RNIS à large bande

Le modèle de référence du protocole du RNIS à large bande (PRM RNIS-LB) est représenté à la Figure 7.9. Il se compose des éléments suivants:

- le plan usager;
- le plan contrôle;
- le plan gestion.

Figure 7.9 – Modèle de référence du protocole du RNIS-LB (UIT-T I.321)



Au-dessus de la couche physique, la couche ATM assure le transfert des cellules pour tous les services et la couche d'adaptation ATM (AAL: *ATM adaptation layer*) fournit à la couche au-dessus de l'AAL les fonctions qui dépendent du service. Les couches au-dessus de l'AAL dans le plan contrôle assurent les fonctions de contrôle d'appel et de connexion. Le plan gestion assure les fonctions de supervision du réseau. La description fonctionnelle de la couche physique, de la couche ATM et de l'AAL apparaît dans la suite du texte. Un complément d'étude est nécessaire pour les fonctions des couches au-dessus de l'AAL.

Plan usager

Le plan usager, avec sa structure en couches, assure le transfert du flux d'information de l'utilisateur avec les mécanismes de contrôle correspondants (par exemple, contrôle de flux et correction d'erreur).

Plan de contrôle

Ce plan a une structure en couches et accomplit les fonctions de contrôle d'appel et de connexion; il traite la signalisation nécessaire à l'établissement, à la supervision et à la libération des communications et des connexions. La distinction éventuelle entre le plan contrôle local et le plan contrôle global dans l'environnement large bande doit faire l'objet d'un complément d'étude.

Plan de gestion

Le plan de gestion accomplit deux types de fonctions, à savoir les fonctions de gestion de couche et les fonctions de gestion de plan.

- a) *Fonctions de gestion de plan*: La gestion de plan exécute les fonctions de gestion liées à un système pris dans son ensemble et assure la coordination entre tous les plans. La gestion de plan n'a pas de structure en couches.
- b) *Fonctions de gestion de couche*: La gestion de couche accomplit les fonctions de gestion liées aux ressources et aux paramètres situés dans ses entités de protocole. La gestion de couche écoule les flux d'information d'exploitation et de maintenance propres à la couche concernée. La Recommandation Q.940 contient des renseignements supplémentaires.

NOTE – L'éventualité d'une fusion des fonctions de gestion de plan et de gestion de couche doit faire l'objet d'un complément d'étude.

7.6.1 Fonctions des couches individuelles du PRM RNIS large bande

On trouvera ci-après la description des fonctions de chaque couche, des primitives échangées entre couches et des primitives échangées entre les couches et le plan gestion. Les flux d'information qui sont décrits n'impliquent aucune réalisation physique spécifique. La Figure 7.10 représente les couches du PRM et identifie les fonctions de la couche physique, de la couche ATM et de l'AAL.

Figure 7.10 – Fonctions du RNIS large bande liées au PRM

Gestion de couche	Fonctions des couches supérieures	Couches supérieures	
	Convergence	CS	AAL
	Segmentation et réassemblage	SAR	
	Contrôle de flux générique Génération/extraction de l'en-tête de cellule Traduction du VPI/VCI des cellules Multiplexage et démultiplexage de cellules	ATM	
	Découplage du débit des cellules Génération/vérification de l'information de contrôle d'erreur de l'en-tête (HEC) Cadrage cellule Adaptation à la trame de transmission Génération/récupération de la trame de transmission	TC	Couche physique
	Synchronisation bit	PM	

CS Sous-couche convergence
 PM Support physique (sous-couche)
 SAR Sous-couche segmentation et réassemblage
 TC Sous-couche convergence de transmission

Un en-tête de cellule contient exclusivement de l'information relative au réseau. La Recommandation UIT-T I.321 donne des définitions des divers types de cellule. Les cellules qui ne transportent pas d'information concernant la couche ATM et toutes les couches supérieures sont utilisées dans la couche physique.

Cellule libre: cellule qui est insérée/extraite dans la couche physique dans le but d'adapter à la capacité utile disponible du système de transmission utilisé le débit du flux de cellules à la limite entre la couche ATM et la couche physique.

Cellule valide: cellule dont l'en-tête ne comporte pas d'erreurs ou a été modifié par le processus de vérification du (HEC) de la cellule.

Cellule non valide: cellule dont l'en-tête comporte des erreurs et n'a pas été modifié par le processus de vérification du (HEC) de la cellule (cellule détruite à la couche physique).

Deux types de cellules sont passées dans la couche ATM:

Cellule assignée: cellule qui fournit un service à une application à l'aide du service de la couche ATM.

Cellule non assignée: cellule sans assignation.

Les diverses couches traitent des aspects différents des connexions. Etant donné que les connexions peuvent s'étendre sur plusieurs nœuds, il est nécessaire d'échanger de l'information entre eux. A chaque niveau, des protocoles sont disponibles à cet effet.

7.6.2 Couche physique

La *couche physique* a pour fonction de transporter les cellules. La couche physique du mode ATM se divise en fait en deux parties: la sous-couche support physique (PM) et la sous-couche convergence de transmission (TC).

La *sous-couche support physique* (PM: *physical medium*), partie la plus basse de la hiérarchie du PRM, contient seulement les fonctions qui dépendent du support physique. Elle a pour fonction d'émettre et de recevoir un flux continu de bits, accompagné d'une information de rythme pour synchroniser émission et réception. En d'autres termes, la principale tâche de la sous-couche PM est une capacité de transmission, y compris la production et la réception de formes d'onde appropriées au support (insertion et extraction de l'information de rythme, codage en ligne).

La *sous-couche convergence de transmission* (TC: *transmission convergence*) a les fonctions suivantes: cadrage des cellules (identification des limites des cellules, Recommandation UIT-T I.432), contrôle d'erreur d'en-tête, découplage du débit des cellules, adaptation à la trame de transmission, génération et récupération des trames de transmission. La fonction d'adaptation à la trame de transmission englobe toutes les actions nécessaires pour adapter le flux de cellules conformément à la structure de la capacité utile du système de transmission. Cette trame peut être structurée en équivalent cellule (si aucune trame externe n'est utilisée) ou elle peut dépendre du réseau de transport (par exemple, SDH, xDSL).

7.6.3 La couche ATM

La couche ATM regroupe les cellules pour les mettre au format correct. Elle prélève le champ d'information de 48 octets formé dans la couche d'adaptation ATM (AAL) et ajoute l'en-tête de cellule ATM (5 octets). Les valeurs des identificateurs VPI et VCI pour chaque cellule sont calculées dans la couche ATM.

Comme indiqué précédemment, le traitement des conduits virtuels et des voies virtuelles nécessite la commutation des cellules provenant de la couche physique, sur la base de tables d'acheminement. Cet acheminement est pris en charge par la couche ATM.

Les caractéristiques de la couche ATM sont indépendantes du support physique. Les quatre fonctions principales de cette couche sont les suivantes:

- Le *multiplexage des cellules*, le train composite étant un flux discontinu de cellules. A la réception, un démultiplexage donne des flux de cellules individuels, appropriés aux conduits virtuels et aux voies virtuelles.
- La *traduction des identificateurs VPI et VCI*, effectuée aux nœuds de commutation et/ou aux nœuds de brassage.
- La *génération et l'extraction des en-têtes de cellule*, effectuées aux points de terminaison de la couche ATM. Le champ d'information (les 48 octets qui suivent l'en-tête) est transmis à la couche supérieure (la couche d'adaptation ATM).
- La *fonction GFC*, qui est définie pour l'interface usager-réseau. Cette fonction peut être utilisée pour réduire les surcharges de courte durée. L'information GFC est transportée dans des cellules assignées ou non assignées.

Toutes les cellules n'ont pas le même rang de priorité. Dans une même qualité de service (QS), la priorité d'une cellule s'exprime par la valeur du bit CLP contenu dans l'en-tête de la cellule. En cas d'encombrement, les cellules possédant la priorité la plus basse sont rejetées en premier. Les cellules circulant dans un conduit virtuel ou dans une voie virtuelle doivent être envoyées dans l'ordre correct. Ces fonctions sont exécutées dans la couche ATM.

7.6.4 La couche d'adaptation ATM

L'utilisation du mode de transport ATM pose le problème de la prise en charge des flux d'information non ATM. L'exemple le plus simple est celui de signaux MIC (modulation par impulsions et codage)

transmis dans un train continu d'octets. C'est à la couche d'adaptation ATM qu'il incombe de déterminer la manière d'assembler les bits MIC pour former les cellules à transmettre et la manière dont ces bits doivent être lus à la réception.

Classes de service ATM

L'UIT a recensé cinq classes de service en rapport avec le débit binaire, la relation de rythme entre la source et le récepteur, et le mode de connexion. Voir le Tableau 7.1.

Tableau 7.1 – Classes de service dans le RNIS-LB, déterminées par l'UIT-T

Classe	Débit binaire	Relation de rythme	Mode de connexion	Protocole AAL	Exemple
Train A	constant – CBR	nécessaire	avec connexion	Type 1	signaux vocaux
Train B	variable – VBR	nécessaire	avec connexion	Type 2	vidéo
Données C	variable – VBR	inutile	avec connexion	Type 3, 4 Type 5	données en salves
Données D	variable – VBR	inutile	sans connexion	Type 3, 4	données
Données X	variable – VBR	inutile	avec connexion ou sans connexion	Type 3, 4	données

Protocoles AAL

La couche d'adaptation ATM (AAL) réalise le mappage de l'information de l'utilisateur et de l'information de signalisation sur les cellules ATM. La couche AAL est divisée en sous-couches. Elle intervient uniquement à la périphérie du réseau ATM, à l'interface avec le réseau du service.

- La *sous-couche AAL de convergence* (CS: *convergence sublayer*) se compose d'une partie commune et d'une partie service. Elle constitue l'interface entre les services pris en charge et la sous-couche de segmentation et réassemblage sous-jacente.
- La *sous-couche de segmentation et réassemblage* (SAR: *segmentation and re-assembly*) effectue la conversion vers le format des cellules ATM, et à partir de ce format. Elle peut ainsi réaliser la détection d'erreur et le multiplexage. Il existe plusieurs types différents de sous-couche SAR pour plusieurs types différents de service.

Les caractéristiques requises du service support varient selon les applications des services. Pour certaines applications, par exemple Internet, il faut un débit binaire non spécifié; pour d'autres, par exemple le RTPC, on a besoin d'un débit binaire constant. Grâce aux techniques de compression utilisées, il est possible d'inclure la télévision interactive avec un débit binaire variable. La couche AAL adapte la couche ATM aux exigences des différentes applications de l'utilisateur du mode ATM.

Plusieurs protocoles d'adaptation sont définis pour la couche AAL. Afin de réduire leur nombre à un minimum, l'UIT-T a proposé une classification des services propre à cette couche. Les classifications ont été faites par rapport aux paramètres suivants:

- la relation de rythme (si nécessaire);
- le débit binaire (constant ou variable);
- le mode de connexion (exploitation avec ou sans connexion).

Les protocoles ont été définis pour être utilisés avec différentes catégories de trafic (Recommandation UIT-T I.363), comme expliqué ci-après:

- AAL1 Protocole d'adaptation pour les services à débit binaire constant (CBR). Destiné à des services avec connexion dans lesquels une relation de rythme est nécessaire pour le couple origine-destination (I.363.1).
- AAL2 Protocole d'adaptation pour les services à débit binaire variable (VBR) en mode avec connexion dans lesquels une relation de rythme est nécessaire pour le couple origine-destination (I.363.2).
- AAL3/AAL4 Le protocole mixte AAL3/AAL4 a été défini principalement pour la liaison des réseaux LAN et WAN. C'est le protocole d'adaptation pour les services VBR avec connexion dans lesquels il est inutile d'avoir une relation de rythme pour le couple origine-destination (I.363.3).
- AAL5 Ce protocole se prête bien aux applications de transmission de données par paquets et de signalisation (applications du type VBR). Il est destiné, par conséquent, aux services sans connexion dans lesquels la relation de rythme est inutile (I.363.5).

On trouvera dans les Recommandations UIT-T I.363.1 à I.363.5 des explications détaillées sur les différents protocoles AAL, par référence à la classification des services ATM.

Etant donné que la couche ATM fournit un mécanisme de transport indépendant du service, une couche d'adaptation ATM (AAL) prend en charge les couches supérieures en utilisant une information additionnelle qui dépend du service. Cette information est transmise dans le champ d'information de la cellule, ce qui la rend transparente à la couche ATM. Afin d'éviter de définir une couche AAL pour chaque service, on a divisé les services en plusieurs classes. Les fonctions de la couche AAL diffèrent selon la classe du service.

Exemples de ces fonctions:

- segmentation de la charge utile contenue dans les cellules;
- reconstitution de la charge utile à partir des cellules;
- traitement des différents temps de transmission des cellules;
- traitement des cellules perdues et des cellules mal acheminées;
- reconstitution du rythme à la réception;
- détection des erreurs binaires dans le champ d'information;
- traitement des erreurs binaires du champ d'information;
- multiplexage et démultiplexage de l'information de la charge utile.

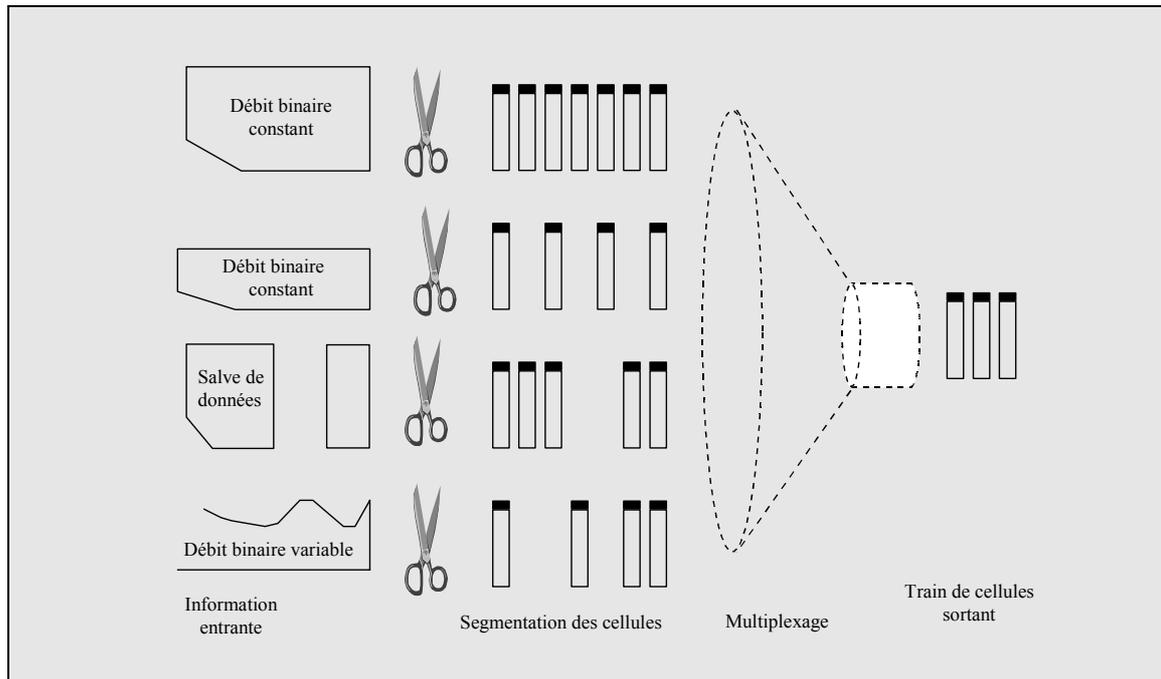
Les couches supérieures ignorent l'influence exercée par les principes du mode de transfert ATM. Elles remettent l'information à la couche AAL, qui a pour fonctions de segmenter le train d'information en cellules, de mettre en œuvre les moyens de protection et de transférer les cellules à la couche ATM pour retransmission.

La fréquence des cellules dépend du débit de l'information entrante, comme le montre la Figure 7.11.

Le mode ATM effectue les opérations suivantes: emballage en cellules de tous les trains d'information provenant de différents services, placement des cellules dans un train de cellules synchrone et acheminement dans un réseau ATM. Les cellules sont introduites dans des intervalles de temps (qui correspondent au temps de transfert d'une cellule); elles sont placées en file d'attente si des intervalles de temps ne sont pas disponibles. Les cellules sont transférées en mode asynchrone, ce qui est conforme au principe de l'intégrité des séquences de cellules. Il faut cependant limiter le flux des cellules, pour éviter de surcharger le réseau.

La réussite d'un échange d'information ATM dépend de la définition des protocoles et de la spécification, par exemple, de la syntaxe, de la sémantique, de la signalisation et des interfaces.

Figure 7.11 – Exemple de segmentation de cellules



On trouvera ci-après la liste des fonctions qui interviennent dans une transmission ATM entre terminaux ATM (dans le cas où le système de transmission est du type SDH):

Côté émission

- AAL: La charge utile dépend du service fourni (débit binaire constant ou variable, mode avec ou sans connexion).
- ATM: Addition des adresses des VC et des VP à l'en-tête.
Conversion des VC dans le commutateur ATM.
Conversion des VP dans le brasseur ATM.
Multiplexage des trains de cellules.
- PHY: Insertion de cellules libres pour adapter le débit binaire au système de transmission SDH.
Commande du contrôle d'erreur d'en-tête pour permettre la vérification de l'en-tête dans le récepteur.
Addition d'information de surdébit de transmission.
Insertion dans la trame SDH et transmission des signaux STM.

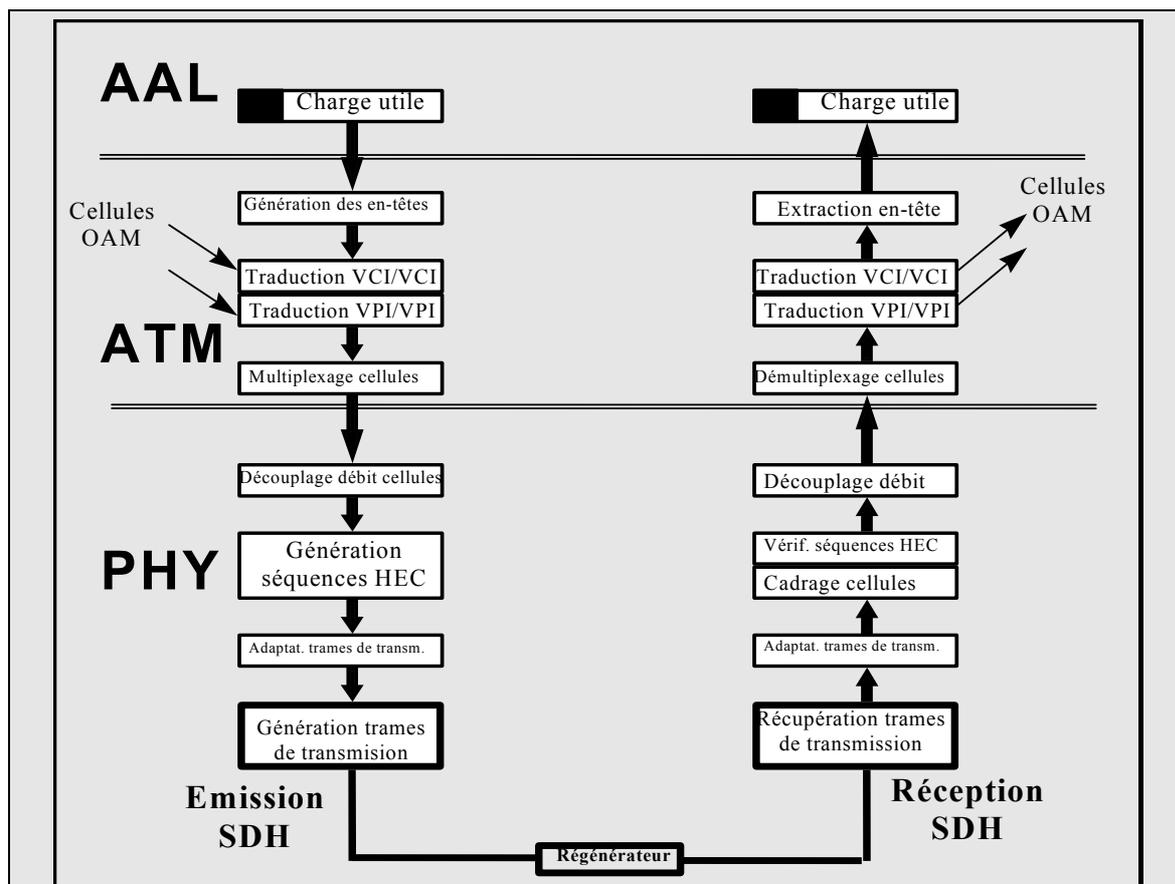
Côté réception

- PHY: Réception du signal STM et extraction de la trame SDH.
Suppression du préfixe de transmission.
Reconnaissance des cellules (synchronisation des cellules).
Vérification du contrôle d'erreur d'en-tête.
Elimination des cellules ayant un en-tête non valable.
Elimination des cellules libres.
- ATM: Démultiplexage des trains de cellules et transfert à leur adresse.
Conversion des VP dans un brasseur ATM.
Conversion des VC dans un commutateur ATM.
Elimination de l'en-tête.
- AAL: Remise de la charge utile au récepteur du service.

Outre les adresses des voies virtuelles et des conduits virtuels, l'en-tête contient de l'information concernant: le contrôle de flux, la priorité de perte de cellules, l'identificateur de type de charge utile et le contrôle d'erreur d'en-tête. En cas de surcharge, les cellules peu prioritaires sont éliminées, afin d'éviter l'encombrement du réseau. Les cellules erronées sont rejetées.

Pour la gestion de bout en bout de la voie et du conduit, des cellules DAM peuvent être insérées côté émission et extraites côté réception. Ces cellules permettent d'évaluer la qualité de l'information transmise.

Figure 7.12 – Fonctions d'émission et de réception en mode ATM



7.7 Exploitation et maintenance

7.7.1 Principes OAM

Les principes suivants ont été pris en considération lors de la spécification des fonctions d'*exploitation* et de *maintenance* (OAM) du RNIS-LB:

a) *surveillance de la qualité de fonctionnement*

La surveillance de la qualité de fonctionnement (PM, *performance monitoring*) est une fonction qui extrait des informations d'utilisateur les informations de maintenance propres aux premières. Ces informations de maintenance sont ajoutées aux informations d'utilisateur à la source d'une connexion/liaison et en sont extraites au collecteur d'une connexion/liaison. L'analyse des informations d'événements de maintenance au collecteur de la connexion permet d'estimer l'intégrité du transport;

b) *détection des défauts et des dérangements*

Les défauts/dérangements affectant le transport d'informations d'utilisateur sont détectés par vérification continue ou périodique, donnant lieu à l'émission d'informations d'événements de maintenance ou de diverses alarmes;

c) *protection des systèmes*

L'effet d'un défaut sur le transport d'informations d'utilisateur est minimisé par blocage ou par basculement sur d'autres entités. En conséquence, l'entité en défaut sera retirée de l'exploitation;

d) *informations de défaut*

Les informations de défaut sont données à d'autres entités de gestion. En conséquence, des indications d'alarme seront données aux autres plans de gestion. Une réponse sera également donnée à une demande de rapport d'état;

e) *emplacement des défauts*

Détermination de l'entité défaillante par des systèmes de test internes ou externes si les informations de défaut sont insuffisantes.

7.7.2 Niveaux OAM dans le RNIS-LB

Les fonctions OAM sont exécutées dans le réseau sur cinq niveaux hiérarchiques OAM qui sont associés à la couche ATM et à la couche physique du modèle de référence de protocole (Recommandation UIT-T I.610). Ces fonctions donnent des flux d'information bidirectionnels correspondants, F1, F2, F3, F4 et F5, appelés flux OAM (voir la Figure 7.6). Il n'est pas indispensable que tous ces flux soient présents. Si un niveau est manquant, les fonctions OAM qui dépendent de lui sont exécutées au niveau immédiatement supérieur. Les différents niveaux sont les suivants:

- *Niveau voie virtuelle (F5)* – La voie virtuelle s'étend entre des éléments de réseau qui exécutent des fonctions de terminaison de connexion par voies virtuelles. Elle est représentée comme couvrant une ou plusieurs connexions par conduits (Recommandation UIT-T I.311).
- *Niveau conduit virtuel (F4)* – Le conduit virtuel s'étend entre des éléments de réseau qui exécutent des fonctions de terminaison de connexion par conduits virtuels (I.311). Il est représenté comme couvrant un ou plusieurs conduits de transmission.
- *Niveau conduit de transmission (F3)* – Le conduit de transmission s'étend entre des éléments de réseau qui assemblent et désassemblent la charge utile d'un système de transmission et qui associent cette charge utile aux fonctions OAM. Les fonctions de cadrage des cellules et de contrôle d'erreur d'en-tête (HEC) sont nécessaires aux extrémités de chaque conduit de transmission. Le conduit de transmission est connecté par l'intermédiaire d'une ou plusieurs sections numériques.
- *Niveau section numérique (F2)* – La section numérique s'étend entre des extrémités de section. Elle contient une entité de maintenance.
- *Niveau section de régénérateur (F1)* – Une section de régénérateur est une partie de section numérique. C'est donc une sous-entité de maintenance.

Relation entre les fonctions OAM et les modèles du RNIS-LB

Les fonctions OAM sont affectées à la gestion des couches dans le modèle de référence de protocole du RNIS-LB. Cette structure en couches et la nécessaire indépendance des couches les unes par rapport aux autres conduisent à énoncer les principes suivants:

- 1) Les fonctions OAM relatives aux niveaux OAM sont indépendantes des fonctions OAM relatives à d'autres couches. Elles doivent être mises en œuvre dans chaque couche.
 - Chaque couche dans laquelle des fonctions OAM sont nécessaires est capable d'effectuer elle-même le traitement qui lui incombe pour obtenir l'information de qualité et d'état. Les fonctions OAM sont appliquées par l'instance de gestion des couches. Ces résultats peuvent être fournis à l'instance de gestion du plan ou à la couche immédiatement supérieure. Il n'est pas nécessaire que les fonctions de la couche supérieure prennent en charge les actions OAM de la couche inférieure.

7.7.3 Mécanisme de flux F4 (F5)

Le flux F4 (F5) est bidirectionnel. Les cellules OAM pour le flux F4 (F5) ont la même valeur de VPI (VCI/VPI) que les cellules d'utilisateur de la VPC (VCC); elles sont identifiées par une ou plusieurs valeurs préassignées de VCI (PTI). La même valeur préassignée de VCI (PTI) doit être utilisée pour les deux sens du flux F4 (F5). Les cellules OAM pour les deux sens de ce flux doivent suivre le même itinéraire physique; c'est la condition nécessaire pour que les points de connexion par lesquels passe la connexion considérée puissent corrélérer les informations de défaillance et de qualité de fonctionnement correspondant aux deux sens de transmission.

Il existe deux types de flux F4 (F5), qui peuvent coexister dans une connexion de conduit virtuel (VPC: *virtual path connection*):

- *Flux F4 (F5) de bout en bout* – Ce flux, identifié par un identificateur VCI (PTI) normalisé (Recommandation UIT-T I.361), est utilisé pour les communications VPC (VCC) de bout en bout.
- *Flux F4 (F5) de segment* – Ce flux, identifié par un identificateur VCI (PTI) normalisé (Recommandation UIT-T I.361), est utilisé pour communiquer de l'information d'exploitation dans les limites d'une liaison VPC (VCC) ou de plusieurs liaisons VPC (VCC) interconnectées. Une telle concaténation de liaisons VPC (VCC) s'appelle un segment.

Un ou plusieurs segments OAM peuvent être définis le long d'une connexion VPC (VCC). En revanche, on ne peut pas définir des segments en chevauchement, ni des segments imbriqués. Pour cela, il faut avoir la certitude que tous les points de connexion (CP) intermédiaires entre les CP source et collecteur d'un segment ne seront pas des CP source ou collecteur d'un autre segment.

La définition de l'étendue d'un segment géré n'est pas nécessairement invariable pendant la durée d'une connexion. Autrement dit, le segment géré peut être reconfiguré selon les besoins.

NOTE – Un segment de connexion VPC (VCC) est généralement contrôlé par une administration ou une organisation. Cependant, le contrôle peut être étendu, d'un commun accord, au-delà d'une administration ou d'une organisation.

Les flux F4 (F5) de bout en bout doivent se terminer aux extrémités de connexion d'une VPC (VCC) et les flux F4 (F5) de segment, aux points de connexion qui terminent un segment de VPC (VCC). Les points intermédiaires (points de connexion) le long de la connexion VPC (VCC) ou le long du segment de connexion VPC (VCC) peuvent superviser les cellules OAM qui les traversent et insérer les nouvelles cellules OAM, mais ils ne peuvent pas terminer le flux OAM, sauf en cas de bouclage. Dans ce cas, la cellule de bouclage peut être extraite du flux OAM par le point intermédiaire où le bouclage doit s'effectuer et la cellule bouclée peut être extraite par l'expéditeur du bouclage à la réception. Le flux F4 sera déclenché lors de l'établissement de la connexion, ou après l'établissement, soit par le *Réseau de gestion des télécommunications* (RGT), soit par les procédures d'activation dépendant de la fonction OAM.

Un point source d'un segment de VPC (VCC) agissant vers l'aval doit rejeter les cellules OAM de connexion VPC (VCC) non attendues qui arrivent de l'amont de la connexion.

Tout point de connexion intermédiaire doit pouvoir être configuré en tant que source/collecteur d'un segment de connexion VPC (VCC).

7.8 Signalisation dans le réseau ATM

7.8.1 Capacités de contrôle des connexions ATM par voies virtuelles et des connexions ATM par conduits virtuels pour le transfert de l'information

- a) Etablissement, maintien et libération des connexions ATM par voies virtuelles (VCC: *virtual channel connections*) et des connexions ATM par conduits virtuels (VPC: *virtual path connections*) pour le transfert de l'information: l'établissement peut se faire à la demande ou être semi-permanent. Il doit satisfaire aux caractéristiques de la connexion demandée (par exemple, largeur de bande, qualité de service).

- b) Prise en charge des configurations de communication en mode point à point, point à multipoint et diffusion.
- c) Négociation des caractéristiques de trafic d'une connexion au moment de l'établissement de celle-ci.
- d) Aptitude à renégocier les caractéristiques de trafic source d'une connexion déjà établie.

7.8.2 Capacité de prise en charge de communications à plusieurs correspondants et à plusieurs connexions

- a) Prise en charge de communications symétriques et asymétriques (par exemple, largeurs de bande petites ou nulles dans un sens de transmission et grandes largeurs de bande dans le sens opposé).
- b) Etablissement simultané et libération simultanée de connexions multiples associées à une communication.

NOTE 1 – L'établissement simultané de connexions multiples ne doit pas durer beaucoup plus longtemps que l'établissement d'une connexion unique.

- c) Etablissement de communications entre deux correspondants ou plusieurs correspondants, avec ou sans connexions.
- d) Etablissement simultané et libération simultanée d'une communication et d'une ou plusieurs connexions associées à une communication.
- e) Insertion et suppression d'une ou de plusieurs connexions dans une communication établie, par l'utilisateur appelant et l'utilisateur appelé.
- f) Libération de la communication par l'utilisateur appelé.
- g) Insertion et suppression d'un ou de plusieurs correspondants dans une communication à plusieurs correspondants, par l'utilisateur appelant.
- h) Rattachement/détachement d'un ou de plusieurs correspondants dans une connexion.
- i) Détachement dans une ou plusieurs connexions, par l'utilisateur appelé.
- j) La capacité de corrélation, lorsque des connexions composent une communication à plusieurs connexions, est nécessaire.

NOTE 2 – Cette corrélation est effectuée par les commutateurs de départ et de destination dans le RNIS-LB, ces commutateurs pouvant être publics ou privés.

- k) Reconfiguration d'une communication à plusieurs correspondants qui comprend une communication existante, ou division de la communication initiale à plusieurs correspondants en plusieurs communications.

7.8.3 Autres capacités

- l) Capacité de reconfiguration d'une connexion déjà établie, par exemple, pour franchir une entité de traitement intermédiaire telle qu'un pont de conférence.
- m) Prise en charge de l'interfonctionnement entre des procédés de codage différents.
- n) Prise en charge de l'interfonctionnement avec des services non RNIS-LB, par exemple des services pris en charge par le RPTC ou le RNIS à 64 kbit/s.
- o) Prise en charge de l'interaction entre un réseau intelligent (IN) et le RNIS-LB.
- p) Prise en charge de l'interaction entre le RGT et le RNIS-LB.
- q) Prise en charge de l'indication de panne et de la commutation de protection automatique pour les connexions semi-permanentes et permanentes.

7.8.4 Fonction de transport de signalisation

Au point d'accès de l'utilisateur, plusieurs conduits virtuels (VP) peuvent être utilisés pour porter des canaux virtuels de signalisation (SVC: *signalling virtual channels*). Ces conduits VP peuvent connecter l'utilisateur au commutateur local, à d'autres utilisateurs et/ou à d'autres réseaux. Les configurations de signalisation dans le RNIS-LB peuvent être des configurations point à multipoint ou point à point.

On a une configuration de signalisation point à multipoint lorsqu'une entité de signalisation («point») interagit avec plusieurs entités de signalisation («multipoint»). Dans cette configuration, on utilise des procédures de méta-signalisation pour demander l'affectation de canaux SVC individuels du type point à point.

On a une configuration de signalisation point à point lorsqu'une entité de signalisation interagit avec une autre entité de signalisation unique.

Dans les cas où la configuration de signalisation est inconnue, on supposera qu'on a affaire à une configuration du type point à multipoint. Une configuration de signalisation peut être connue soit par abonnement, soit par application d'une procédure dynamique.

7.8.5 Protocoles de signalisation

Trois interfaces de signalisation principales, et les protocoles correspondants, sont utilisés dans les réseaux ATM. Ce sont: l'interface utilisateur-réseau (UNI: *user network interface*), l'interface réseau-réseau privée (PNNI: *private network-network interface*) et l'interface interopérateur dans le RNIS-LB (B-ICI: *B-ISDN inter-carrier interface*).

- UNI Permet les opérations suivantes: l'accès de l'abonné UNI à un réseau ATM, la reconnaissance de l'abonné UNI par adressage ATM, et le transfert, sur la connexion, de la reconnaissance du contrat de qualité de service (QS) et des caractéristiques des données.
- PNNI Fournit les protocoles de signalisation et d'acheminement nécessaires pour la gestion et le contrôle du réseau ATM, pour établir et prendre en charge des connexions commutées, à la demande, ainsi que le mécanisme qui permet à chaque nœud du réseau de tenir à jour des informations topologiques concernant tous les autres nœuds du réseau.
- B-ICI Protocoles de signalisation et d'acheminement nécessaires pour gérer des connexions commutées, à la demande, entre un réseau ATM et un autre réseau ATM. L'interface B-ICI peut aussi être utilisée, à l'intérieur d'un réseau ATM, pour améliorer la régulation de l'acheminement du trafic.

7.9 Gestion du trafic

La gestion du trafic AMT résulte de la combinaison de plusieurs fonctions qui surveillent et régulent le flux d'information dans le réseau ATM. Ces fonctions ont pour but de garantir à chaque connexion la qualité de service (QS) qui a été négociée pour elle. Pour obtenir ce résultat, l'utilisateur doit faire connaître au réseau, dans la procédure d'établissement de la connexion, la nature prévue du trafic et le type de QS. Le nœud source doit faire connaître au réseau les paramètres du trafic et la QS pour chaque sens de transmission.

Une fonction clé de la gestion du trafic est la protection du réseau contre l'encombrement, le but étant de réaliser les objectifs en matière de qualité de fonctionnement du réseau. Une autre fonction de cette gestion est de réaliser une utilisation efficace des ressources du réseau.

La *régulation du trafic* est un ensemble d'actions conduites par le réseau, dans tous ses éléments pertinents, pour empêcher l'apparition d'encombres. On considère qu'il y a encombrement quand un ou plusieurs éléments du réseau ne sont pas en mesure de réaliser l'objectif de QS négocié pour les connexions déjà établies et pour les demandes de nouvelles connexions. En général, un encombrement peut être causé par des fluctuations statistiques imprévisibles des flux de trafic ou par des défaillances qui surviennent dans le réseau. La protection contre l'encombrement (ensemble des actions visant à atténuer les effets de l'encombrement en limitant son extension et sa durée) est une des fonctions les plus importantes de la régulation du trafic.

Pour atteindre ces objectifs, on met en jeu les fonctions décrites ci-après, qui définissent un cadre pour la gestion et la régulation du trafic et de l'encombrement dans les réseaux ATM, et que l'on peut combiner de façon appropriée. Ce cadre repose sur la notion fondamentale de *contrat de trafic* (niveau de QS demandé pour une connexion ATM donnée et tolérance maximale accordée à l'équipement du client pour la variation du temps de transfert des cellules), contrat négocié entre l'utilisateur et le réseau, et entre les réseaux, au moment de l'établissement d'une connexion.

La *gestion des ressources du réseau* (NRM: *network resource management*) permet d'affecter les ressources du réseau pour séparer les flux de trafic en fonction des caractéristiques du service. Le séquençage des cellules et la mise à disposition des ressources sont des opérations spécifiques à la mise en œuvre et au réseau; on peut néanmoins y avoir recours pour obtenir l'isolement approprié et un accès approprié aux ressources.

La définition de la *gestion des admissions de connexion* (CAC: *connection admission control*) est la suivante: c'est l'ensemble des actions entreprises par le réseau pendant la phase d'établissement de l'appel (ou pendant la phase de renégociation de l'appel) afin de déterminer si une demande de connexion par voie virtuelle ou conduit virtuel peut être acceptée ou rejetée (ou si une demande de réattribution peut être acceptée). Le choix d'un conduit dans le réseau fait partie du contrôle d'admission de connexion du réseau.

Les fonctions de *gestion des ressources de la couche ATM* (RM: *ATM layer resource management*) utilisent des cellules de gestion des ressources, par exemple pour modifier les ressources affectées aux connexions ATM.

Les *commandes de rétroaction* sont définies comme l'ensemble des actions entreprises par le réseau et par les utilisateurs pour réguler le trafic appliqué sur les connexions ATM, selon l'état de fonctionnement des éléments du réseau. Ces actions sont en rapport avec le service de débit binaire disponible (ABR), qui met en œuvre un mécanisme de commande par rétroaction.

La *commande des paramètres côté utilisation et la commande des paramètres côté réseau* (UPC/NPC: *usage/network parameter control*) sont définies comme l'ensemble des actions entreprises par le réseau pour la supervision et la régulation du trafic en termes de trafic offert et de validité de connexion ATM, respectivement à l'accès utilisateur et à l'accès réseau. Ces actions ont essentiellement pour but de protéger les ressources du réseau contre des actes malveillants ou des erreurs involontaires pouvant affecter la qualité de service d'autres connexions déjà établies. Les actions consistent à détecter des violations, des valeurs de paramètres négociées ou des procédures, et à prendre les mesures appropriées (supervision du train de cellules envoyé pendant la connexion). Lorsqu'un abonné dépasse le débit binaire qu'il a souscrit, la *fonction de surveillance* peut protéger le réseau contre la surcharge en abaissant le rang de priorité de la connexion (étiquetage de cellules) ou, dans le cas d'une surcharge effective, en rejetant des cellules.

La *gestion des priorités* (PC: *priority controls*) est un ensemble de fonctions qui différencient les traitements que le réseau applique aux cellules les unes par rapport aux autres, en termes de priorité temporelle ou de priorité de perte.

On peut recourir à des *mécanismes de mise en forme du trafic* pour modifier dans un sens souhaitable les caractéristiques de trafic d'une connexion. Cette fonction a pour but d'améliorer l'efficacité du réseau tout en réalisant les objectifs de qualité de service et/ou de garantir la performance de trafic de la connexion sur une interface en aval.

La fonction de gestion du trafic, définie dans la Recommandation UIT-T I.371, peut être expliquée sur la base de la configuration de référence de la Figure 7.13. Elle se compose des principaux éléments suivants: la gestion des ressources du réseau (NRM), la gestion des admissions de connexion (CAC), la commande des paramètres côté utilisation et la commande des paramètres côté réseau (UPC/NPC), les commandes de rétroaction et la gestion des priorités. La figure montre où se situent ces fonctions.

Un paramètre de trafic est une spécification d'un aspect particulier du trafic. Il peut être qualitatif ou quantitatif. Les paramètres de trafic décrivent, par exemple, les caractéristiques suivantes:

Débit cellulaire crête (PCR: *peak cell rate*): limite supérieure applicable au trafic qui peut être offert sur une connexion ATM. Ce paramètre est défini par référence à la variable T, espacement minimal des cellules.

Débit cellulaire moyen (ACR: *average cell rate*): valeur moyenne du débit de transfert des cellules sur une connexion ATM.

Débit cellulaire soutenu (SCR: *sustainable cell rate*): limite supérieure du débit moyen de transfert des cellules sur une connexion ATM.

Variation du temps de propagation des cellules (CDV: *cell delay variation*): variation des temps d'arrivée effectifs des cellules sur une connexion ATM par rapport aux temps d'arrivée théoriques.

Sporadicité: rapport du débit cellulaire crête au débit cellulaire moyen.

Taille maximale des rafales (MBS: *maximum burst size*): nombre maximal de cellules pouvant être transmises de façon continue au débit cellulaire crête.

Ces paramètres peuvent être déterminés d'après le type de service (par exemple, téléphonie, visiophonie).

Certains des paramètres ci-dessus sont interdépendants (par exemple, la sporadicité est interdépendante avec le débit cellulaire moyen et le débit cellulaire crête).

L'utilisateur peut se baser sur le type de service pour déclarer implicitement un ensemble complet de paramètres de trafic, par exemple en déclarant le service demandé (service vocal, etc.). Le type de service peut aussi inclure une déclaration implicite de la qualité de service requise. Un descripteur de cette nature serait utilisé, par exemple, comme adresse dans une table de consultation fournissant l'ensemble correspondant de caractéristiques de trafic. Dans le cas où le descripteur serait utilisé par une source de trafic, il serait par conséquent inutile de transmettre par signalisation d'autres paramètres de trafic se rapportant à ce descripteur de trafic. Le type de service peut aussi servir à décrire les caractéristiques de trafic d'une source. Il en est ainsi, par exemple, lorsque des comportements de sources types (par exemple, vidéo à débit binaire variable mettant en œuvre des procédés de codage standard) sont connus d'après l'expérience d'exploitation, ou par d'autres moyens, et utilisés par les opérateurs des réseaux pour appliquer des règles spécifiques d'ingénierie du trafic, qui peuvent conduire à des indications de qualité de service plutôt qu'à des engagements en cette matière.

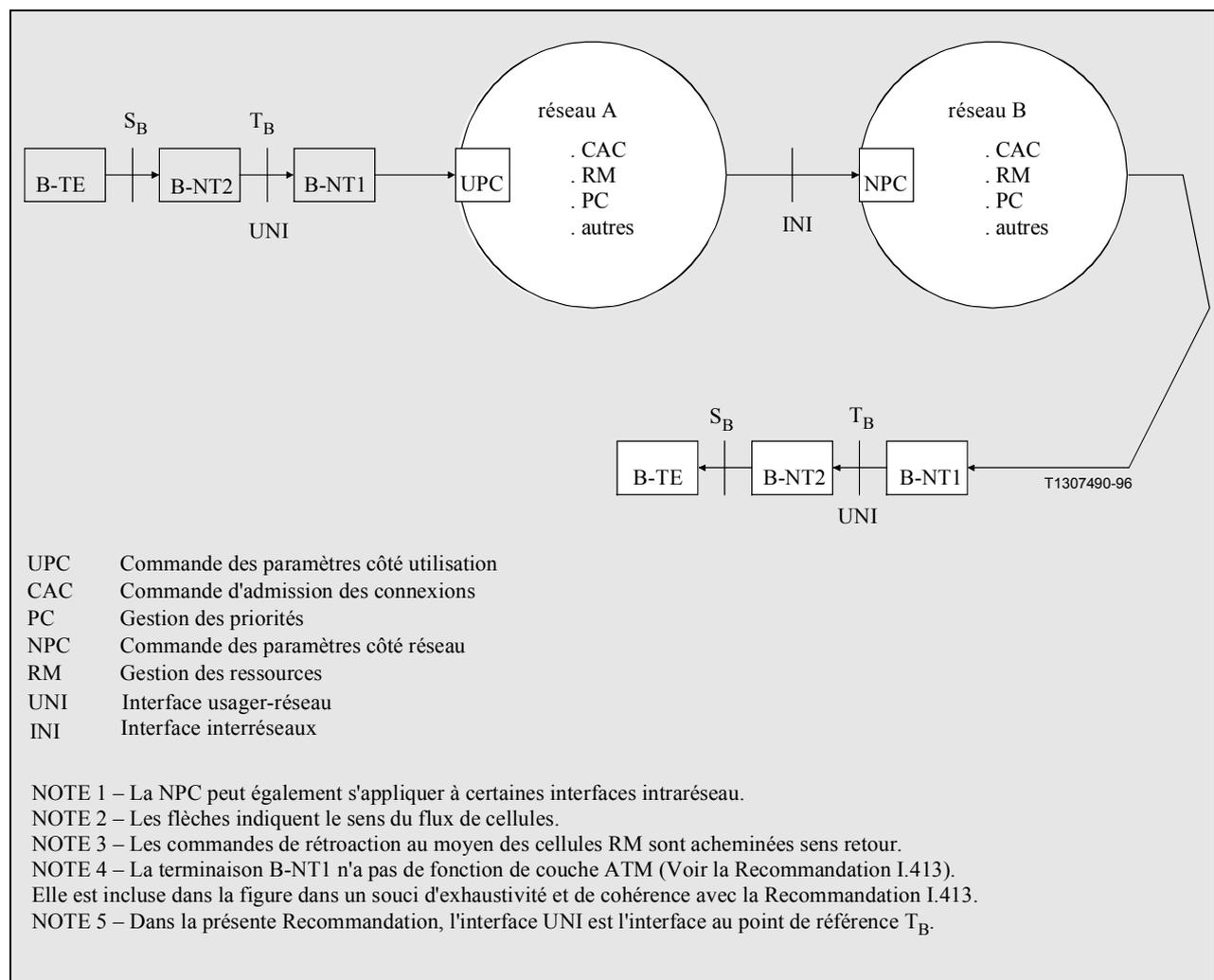
Descripteur de trafic: Définition des caractéristiques du trafic pouvant être offert par une connexion demandée.

Descripteur de trafic ATM: Liste générique des paramètres de trafic pouvant être utilisés pour saisir les paramètres de trafic intrinsèques d'une connexion ATM.

Descripteur de trafic source: Ensemble de paramètres de trafic appartenant au descripteur de trafic ATM, utilisé pendant l'établissement de la connexion pour saisir les caractéristiques de trafic intrinsèques de la connexion demandée par la source.

Il y a lieu d'indiquer la condition générale suivante: il est souhaitable de réaliser un niveau élevé de concordance entre les capacités de gestion du trafic indiquées ci-dessus. Un sous-ensemble spécifique de ces fonctions génériques se combine avec des paramètres de trafic pertinents, des valeurs de paramètres et avec des fonctions et des procédures de commande appropriées pour créer une *capacité de transfert ATM* (ATC: *ATM transfer capability*).

Figure 7.13 – Configuration de référence pour la gestion du trafic et des encombrements



7.9.1 Capacités de transfert ATM (ATC)

Une **capacité de transfert ATM** a pour fonction la prise en charge d'un modèle de service de couche ATM et de la qualité de service correspondante, par le biais d'un ensemble de paramètres et de procédures de trafic ATM.

Du point de vue de l'utilisateur, une capacité ATC est jugée appropriée à un ensemble donné d'applications. Un usager pourrait choisir un service basé sur une capacité ATM particulière autre que la capacité de transfert avec débit binaire déterministe; la motivation d'un tel choix est la possibilité d'obtenir un tarif réduit du prestataire de service.

Du point de vue de l'exploitant du réseau, une capacité ATC peut être avantageuse car elle permet le multiplexage statistique.

Il n'y a pas de correspondance biunivoque entre, d'une part, les services ou les classes de service (par exemple, les catégories de services supports à large bande) et, d'autre part, les capacités de transfert ATM utilisables. Un service de communication de données exploité dans une couche supérieure pourrait faire usage des capacités suivantes:

Capacité de débit binaire déterministe (DBR: deterministic bit rate capability) – Cette capacité est utilisée par une connexion qui demande une quantité fixe donnée de largeur de bande qui est disponible en permanence pendant la durée de la connexion. Cette quantité de largeur de bande est caractérisée par un débit cellulaire crête. Bien qu'elle corresponde à des applications à débit binaire constant (CBR), cette capacité n'est pas limitée à ces applications. Il s'agit de la capacité de transfert ATM par défaut.

Capacité de débit binaire statistique (SBR: statistical bit rate capability) – Dans la capacité de transfert avec débit binaire statistique (SBR), le système d'extrémité utilise des paramètres de trafic normalisés (débit cellulaire soutenu/tolérance intrinsèque de rafales, SCR/IBT, ou type de service) pour décrire, de façon plus détaillée que ce n'est le cas avec le simple débit cellulaire crête, les caractéristiques du flux cellulaire qui seront présentées à la connexion. Cette capacité convient bien pour des applications dont certaines caractéristiques de trafic sont connues a priori. La performance temporelle de la capacité SBR n'est pas spécifiée; cette capacité est susceptible, ou non selon le cas, de prendre en charge des applications soumises à des exigences temporelles rigoureuses.

Capacité de transfert de bloc ATM (ABT: ATM block transfer capability) – Une capacité de transfert de bloc ATM (ABT) est un mécanisme de la couche ATM qui fournit un service dans les cas où les caractéristiques de transfert de cette couche sont négociées sur la base des blocs ATM. A l'intérieur d'un bloc ATM accepté par le réseau, celui-ci alloue des ressources suffisantes pour que la qualité de service reçue par le bloc soit équivalente à la qualité de service reçue par une connexion DBR dont le débit cellulaire crête est égal au débit cellulaire crête négocié du bloc ATM (appelé débit cellulaire de bloc, BCR).

Plus précisément, un bloc ATM est défini comme un groupe de cellules d'une connexion ATM qui est encadré par deux cellules de gestion de ressources (RM), l'une placée devant la première cellule du bloc ATM (cellule RM de tête), l'autre derrière la dernière cellule du bloc (cellule RM de queue). La définition exacte des cellules RM qui encadrent un bloc ATM dépend de l'utilisation particulière des cellules RM, à savoir de la capacité ABT. La cellule RM de queue d'un bloc ATM peut être la cellule RM de tête du bloc ATM suivant. Le débit BCR d'un bloc ATM est constant sur toute la durée du bloc.

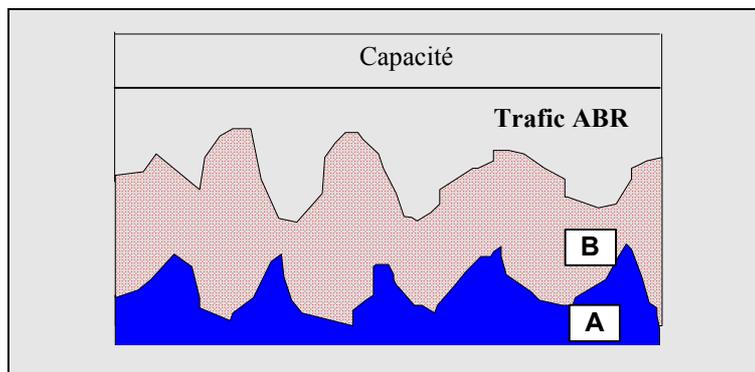
Capacité de transfert avec débit binaire disponible (ABR: available bit rate transfer capability) – Beaucoup d'applications sont capables de réduire leur débit de transfert de l'information si le réseau le leur demande – ou bien elles peuvent souhaiter augmenter ce débit si un supplément de largeur de bande est disponible dans le réseau. Il peut exister non seulement des paramètres de trafic statiques mais également des paramètres dynamiques, les utilisateurs pouvant être disposés à accepter une largeur de bande non réservée. Pour la prise en charge du trafic provenant de sources de cette nature dans un réseau ATM, on définit une capacité de transfert ATM appelée débit binaire disponible (ABR).

ABR est une capacité de transfert ATM dans laquelle les caractéristiques de transfert limites de la couche ATM fournies par le réseau peuvent varier après l'établissement de la connexion. Il est prévu que, pour un utilisateur qui adapte son trafic à ces caractéristiques variables, le taux de perte de cellules (CLR) sera faible. La variation du temps de propagation des cellules et le temps de transfert des cellules ne sont pas régulés. La capacité ABR n'a pas pour fonction de prendre en charge des applications CBR.

L'utilisateur s'adapte aux caractéristiques de transfert variables de la couche ATM après avoir reçu l'information de rétroaction du réseau. En raison du temps de transfert des cellules, cette information reflète l'état de fonctionnement du réseau à un moment qui précède celui où elle est reçue par l'utilisateur. Ainsi, même lorsque l'utilisateur s'adapte correctement à l'information de rétroaction, le réseau devra introduire un certain effet tampon pour permettre à la capacité ABR de fonctionner avec un faible taux de perte de cellules.

Les actions entreprises par l'utilisateur, la rétroaction du réseau et la réponse de l'utilisateur à cette rétroaction constituent une boucle de régulation sur la connexion ABR.

Figure 7.14 – Définition du service de débit binaire disponible (ABR)



Au moment de l'établissement d'une connexion ABR, un utilisateur indique au réseau une largeur de bande requise maximale. Cette largeur de bande est négociée entre utilisateur et réseau, et entre utilisateur et utilisateur, à l'établissement de la connexion. Une largeur de bande utilisable minimale (également appelée débit cellulaire minimal, MCR: *minimum cell rate*) doit être spécifiée connexion par connexion, mais la valeur spécifiée peut être zéro. La largeur de bande disponible fournie par le réseau peut diminuer jusqu'à atteindre la largeur de bande utilisable minimale. La largeur de bande requise maximale (également appelée débit cellulaire crête, PCR: *peak cell rate*) et le débit MCR sont prédéfinis. Les valeurs de PCR et MCR peuvent différer entre les deux sens de transmission sur la connexion.

7.9.2 Catégories de services spécifiées par le Forum ATM

La relation entre l'UIT (Recommandation UIT-T I.371) et le Forum ATM, sur la base des capacités de transfert, est explicitée dans la spécification af-tm-0121.000. Le Forum ATM définit six catégories de services en ce qui concerne le débit binaire, avec des spécifications particulières pour les caractéristiques suivantes: débit cellulaire crête (PCR), débit cellulaire soutenu (SCR), tolérance de variation du temps de propagation des cellules (CDVT), taille maximale des rafales (MBS), débit cellulaire minimal (MCR), taille maximale des trames (MFS), délai de transfert des cellules (CTD), taux de perte de cellules (CLR) et utilisation de la rétroaction. Voir le Tableau 7.2.

Le Forum ATM spécifie la classification des catégories de services. La première de ces catégories, le débit binaire constant (CBR), se retrouve dans la description, par l'UIT-T, des capacités de transfert ATM. Elle est utilisée pour les connexions qui nécessitent une quantité statique de largeur de bande, disponible en permanence pendant la durée de la connexion. Cette catégorie est caractérisée par la valeur de crête de cellule.

Le Forum ATM distingue deux catégories dans le transfert à débit binaire variable: le débit binaire en temps réel (rt-VBR: *real-time variable bit rate*) et le débit binaire en mode différé (nrt-VBR: *non real-time variable bit rate*). On obtient les différences en spécifiant les valeurs maximales requises du délai de transfert des cellules.

Le Forum ATM définit une catégorie de service qui n'a pas de débit binaire spécifié (UBR: *unspecified bit rate*). Cette catégorie n'a pas de capacité de service correspondante dans les Recommandations de l'UIT. La communication traditionnelle entre ordinateurs est un exemple de cette application. Les services ABR et UBR ont été développés à partir du «service avec meilleur effort» [8].

En mai 1999, le Forum ATM a adopté la version définitive du service de débit de trame garanti (GFR: *guaranteed frame rate*), destiné aux applications en mode différé qui pourraient nécessiter une garantie minimale et qui peuvent bénéficier de l'accès à une largeur de bande supplémentaire disponible dynamiquement dans le réseau. La capacité de service ATM similaire GFR est à l'étude au sein de l'UIT.

Tableau 7.2 – Catégories de services ATM spécifiées par le Forum ATM

Attribut	Catégorie de service de la couche ATM					
	CBR	rt-VBR	nrt-VBR	UBR	ABR	GFR
Paramètres de trafic⁴:						
PCR et CDVT ₅	Spécifié			Spécifié ₂	Spécifié ₃	Spécifié
SCR, MBS, CDVT ₅	n/a	Spécifié		n/a		
MCR	n/a				Spécifié	n/a
MCR, MBS, MFS, CDVT ₅	N/a					Spécifié
Paramètres de QS₀						
CDV crête à crête	Spécifié		Non spécifié			
maxCTD	Spécifié		Non spécifié			
CLR	Spécifié			Non spécifié	Voir Note 1	Voir Note 6
Autres attributs:						
Rétroaction	Non spécifié				Spécifié	Non spécifié

Notes:

- 1 Le taux de perte de cellules CLR est petit pour les sources qui règlent le flux des cellules en réaction à l'information de commande. La spécification d'une valeur numérique pour CLR est une caractéristique propre au réseau.
- 2 Pourrait ne pas relever des procédures CAC (gestion des admissions de connexion) et UPC (commande des paramètres côté utilisation).
- 3 Représente le débit maximal auquel une source ABR (débit binaire disponible) pourrait jamais émettre. Le débit effectif dépend de l'information de commande.
- 4 Ces paramètres sont spécifiés explicitement ou implicitement pour les PVC (connexions virtuelles permanentes) ou les SVC (connexions virtuelles commutées).
- 5 CDVT est l'acronyme de «tolérance de variation du temps de propagation des cellules». Ce paramètre n'est pas signalé. En général, il n'est pas nécessaire que la CDVT ait une valeur unique pour une connexion. Des valeurs différentes peuvent s'appliquer à chaque interface sur le trajet d'une connexion.
- 6 CLR (taux de perte de cellules) est petit pour les trames pouvant bénéficier de la garantie de service. La spécification d'une valeur numérique pour CLR est une caractéristique propre au réseau.
- 7 CTD: délai de transfert de cellules.
- 8 MFS: taille maximale de trame.

7.10 Références de l'UIT-T

Références générales:

- [1] ATM Forum Specifications AF-TM-0121000, 1999.
- [2] S. Fahmy, R. Jain, R. Goyal, B. Vandalore, "Fairness Definition and Flow Control for ATM Multipoint Connections", <http://www.cis.ohio-state.edu/~jain/papers/mpt2pt.htm>.
- [3] B. Vandalore, S. Fahmy, R. Jain, R. Goyal, M. Goyal, "Fairness Definition and Flow Control for ATM Multipoint Connections", http://www.cis.ohio-state.edu/~jain/papers/icpn98_bv.htm.
- [4] M. Schwartz, *Broadband Integrated Networks*, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [5] R. Handel, M. Huber, S. Schroder, *ATM Networks*, Addison-Wesley, Cambridge, 1994.
- [6] W. Stallings, *ISDN and Broadband ISDN with Frame Relay and ATM*, Prentice Hall, New Jersey, 1999.

Recommandations UIT-T

- [I.113]; 6/97 – Terminologie du RNIS à large bande
- [I.121]; 4/91 – Aspects large bande du RNIS
- [I.150]; 2/99 – Caractéristiques fonctionnelles du mode de transfert asynchrone du RNIS à large bande
- [I.211]; 3/93 – Aspects service du RNIS à large bande
- [I.311]; 8/96 – Aspects généraux réseau du RNIS à large bande
- [I.321]; 4/91 – Modèle de référence pour le protocole du RNIS à large bande et son application
- [I.327]; 3/93 – Architecture fonctionnelle du RNIS à large bande
- [I.356]; 10/96 – Caractéristiques du transfert de cellules de la couche ATM du RNIS-LB
- [I.361]; 2/99 – Spécifications de la couche ATM du RNIS à large bande
- [I.363.1]; 8/96 – Spécification de la couche d'adaptation ATM du RNIS-LB: AAL de type 1
- [I.363.2]; 9/97 – Spécification de la couche d'adaptation ATM du RNIS-LB: AAL de type 2
- [I.363.3]; 8/96 – Spécification de la couche d'adaptation ATM du RNIS-LB: AAL de type 3/4
- [I.363.5]; 8/96 – Spécification de la couche d'adaptation ATM du RNIS-LB: AAL de type 5
- [I.371]; 8/96 – Gestion du trafic et des encombrements dans le RNIS-LB
- [I.413]; 3/93 – Interface usager-réseau du RNIS à large bande
- [I.432.1]; 2/99 – Interface usager-réseau du RNIS-LB – Spécification de la couche physique – Caractéristiques générales
- [I.432.2]; 2/99 – Interface usager-réseau du RNIS-LB – Caractéristiques de la couche physique – Exploitation à 155 et 622 Mbit/s
- [I.432.3]; 2/99 – Interface usager-réseau du RNIS-LB – Caractéristiques de la couche physique – Exploitation à 1,5 et 2 Mbit/s
- [I.432.4]; 8/96 – Interface usager-réseau du RNIS-LB – Caractéristiques de la couche physique – Exploitation à 51 Mbit/s
- [I.432.5]; 6/97 – Interface usager-réseau du RNIS-LB – Caractéristiques de la couche physique – Exploitation à 25,6 Mbit/s
- [I.580]; 11/95 – Dispositions générales d'interfonctionnement entre le RNIS à large bande et le RNIS à 64 kbit/s
- [I.610]; 2/99 – Principes et fonctions d'exploitation et de maintenance du RNIS à large bande
- [I.731]; 3/96 – Types et caractéristiques générales des équipements ATM
- [I.732]; 3/96 – Caractéristiques fonctionnelles des équipements ATM
- [I.751]; 3/96 – Gestion en mode de transfert asynchrone du point de vue des éléments de réseau
- [Q.2931]; 2/95 – Systèmes de signalisation d'abonné numérique N° 2 – Spécification de la couche 3 de l'interface utilisateur-réseau pour la commande de connexion/appel de base

7.11 Abréviations

AAL	Couche d'adaptation ATM (<i>ATM adaptation layer</i>)
ABR	Capacité de transfert à débit binaire disponible (<i>available bit rate transfer capability</i>)
ABT	Capacité de transfert de bloc ATM (<i>ATM block transfer capability</i>)
ACR	Débit cellulaire moyen (<i>average cell rate</i>)
ATC	Capacités de transfert ATM (<i>ATM transfer capabilities</i>)
ATD	Division asynchrone du temps (<i>asynchronous time division</i>)
ATM	Mode de transfert asynchrone (<i>asynchronous transfer mode</i>)
B-ICI	Interface interopérateur dans le RNIS-LB (<i>B-ISDN inter-carrier interface</i>)
CAC	Gestion des administrations de connexion (<i>connection admission control</i>)
CBR	Transmission à débit binaire constant (<i>constant bit-rate transmission</i>)
CDV	Variation du délai cellulaire (<i>cell delay variation</i>)
CDVT	Tolérance de variation du temps de propagation des cellules; tolérance de variation du délai cellulaire (<i>cell delay variation tolerance</i>)
CLP	Priorité de perte de cellules (<i>cell loss priority</i>)
CLR	Taux de perte de cellules (<i>cell loss ratio</i>)
CP	Points de connexion (<i>connecting points</i>)
CS	Sous-couche de convergence (<i>convergence sublayer</i>)
CTD	Temps (délai) de transfert de cellules (<i>cell transfer delay</i>)
DBR	Capacité de débit binaire déterminante (<i>deterministic bit rate capability</i>)
GFC	Contrôle de flux générique (<i>generic flow control</i>)
HEC	Contrôle d'erreur dans l'en-tête (<i>header error control</i>)
INI	Interface interréseaux (<i>inter-network interface</i>)
MBS	Taille maximale des rafales (<i>maximum burst size</i>)
MCR	Débit cellulaire minimal (<i>minimum cell rate</i>)
MFS	Taille minimale des trames (<i>minimum frame size</i>)
MIC	Modulation par impulsions et codage
NNI	Interface réseau-réseau (<i>network network interface</i>)
NPC	Commande de paramètre de réseau (<i>network parameter control</i>)
NRM	Gestion de ressources du réseau (<i>network resource management</i>)
nrt-VBR	Transmission à débit binaire variable en mode différé (<i>non-real-time variable bit-rate transmission</i>)
OAM	Exploitation et maintenance (<i>operation and maintenance</i>)
PC	Gestion des priorités (<i>priority controls</i>)
PCR	Débit cellulaire crête (<i>peak cell rate PHY physical layer</i>)
PHY	Couche physique
PM	Sous-couche support physique (<i>physical medium sublayer</i>)
PNNI	Interface réseau-réseau privée (<i>private network network interface</i>)
PRM	Modèle de référence de protocole (<i>protocol reference model</i>)
PT	Type de charge utile (<i>payload type</i>)
PTI	Identificateur de type de charge utile (<i>payload type identifier</i>)
QS	Qualité de service

RGT	Réseau de gestion des télécommunications
RM	Gestion de ressources (<i>resource management</i>)
RNIS	Réseau numérique à intégration de services
RNIS-BE	Réseau numérique à intégration de services à bande étroite
RNIS-LB	Réseau numérique à intégration de services à large bande
rt-VBR	Transmission à débit binaire variable en temps réel (<i>real-time variable bit-rate transmission</i>)
SAR	Sous-couche de segmentation et réassemblage (<i>segmentation and reassembly sublayer</i>)
SBR	Capacité de débit binaire statistique (<i>statistical bit rate capability</i>)
SCR	Débit cellulaire soutenu; débit soutenable (<i>sustainable cell rate</i>)
SDH	Hiérarchie numérique synchrone (<i>synchronous digital hierarchy</i>)
STM	Mode de transfert synchrone (<i>synchronous transfer mode</i>)
SVC	Canal virtuel de signalisation (<i>signalling virtual channel</i>)
TC	Sous-couche de convergence de transmission (<i>transmission convergence sublayer</i>)
UBR	Débit binaire non spécifié (<i>unspecified bit rate</i>)
UNI	Interface utilisateur-réseau (<i>user network interface</i>)
UPC	Commande de paramètre d'utilisation (<i>usage parameter control</i>)
VBR	Transmission à débit binaire variable (<i>variable bit-rate transmission</i>)
VC	Voie virtuelle (<i>virtual channel</i>)
VCC	Connexion de voie virtuelle (<i>virtual channel connection</i>)
VCI	Identificateur de voie virtuelle (<i>virtual channel identifier</i>)
VP	Conduit virtuel (<i>virtual path</i>)
VPI	Identificateur de conduit virtuel (<i>virtual path identifier</i>)