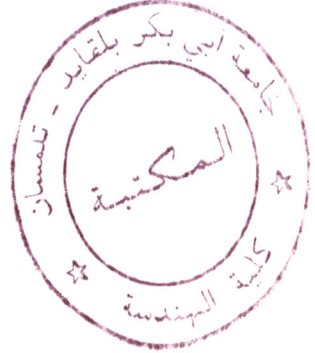


REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE ALGERIENNE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abou Bakr BELKAID-Tlemcen



Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département d'Electronique

Mémoire de Magister en A.P.I
"Automatique Productique Informatique"
Option : Informatique

**Mise en œuvre d'un Réseau haut débit et d'un logiciel dédié
à la téléchirurgie**

Présenté par
Mme CHERIF BENMOUSSA Fawzia

Président : **M. BENYOUCEF Boumediene**
Examineur : **M. CHABANE SARI Nasereddine**
Examineur : **M. KHERBOUCHE Mouaffek**
Examineur : **M. BESSAID Abdelhafid**
Examinatrice: **Mme. DIDI Fedoua**
Rapporteur : **M. BENABDELLAH Mohamed**

Pr à l'université de Tlemcen
Pr à l'université de Tlemcen
Pr à l'université de Tlemcen
M.C à l'université de Tlemcen
C.C à l'université de Tlemcen
M.C à l'université de Tlemcen

AVANT-PROPOS,

Je tiens à présenter mes vifs remerciements à Monsieur Benabdellah Mohamed, maître de conférence à l'université de Tlemcen, pour son appui et son aide d'une part; et d'avoir, d'autre part, orienté mes recherches.

Monsieur Benyoucef Boumedienne, professeur à l'université de Tlemcen, m'a fait l'honneur d'avoir accepté de présider à mon jury, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Monsieur Chabane Sari Nasreddine, professeur à l'université de Tlemcen, a accepté d'examiner et juger mon travail, je lui exprime mes remerciements les plus sincères.

Monsieur Kherbouche Mouaffek, professeur à l'université de Tlemcen, a bien voulu lire et examiner mon travail, je le remercie vivement.

Monsieur Bessaid Abdelhahid, maître de conférence à l'université de Tlemcen, a accepté d'examiner et juger mon travail, je lui exprime ma sincère reconnaissance.

Que Madame Didi Fedoua, chargée de cours au département d'informatique, retrouve ici ma gratitude pour sa disponibilité. Je la remercie d'avoir accepté d'être membre du jury.

Mes vifs remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation de post- graduation à l'université de Tlemcen et tout particulièrement à Monsieur Cherki Brahim dont le dévouement a été remarquable.

Je remercie Monsieur Moussaoui, enseignant au département d'électronique, pour son aide et ses conseils.

J'adresse aussi toute ma reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail et tout spécialement à Monsieur Chérif Benmoussa Yazid.

A toute ma famille,

Résumé

La prise en charge du patient par l'hôpital a considérablement évolué au fil des décennies. Le meilleur diagnostic et le meilleur soin se sont progressivement accompagnés du recours aux technologies les plus avancées. Hôpital et NTIC (Nouvelles Technologies l'Information et de la Communication) sont à présent indissociables. L'essor de ces nouvelles technologies permet d'imaginer de nouvelles solutions, que ce soit pour apporter des soins au patient ou pour suivre le patient à domicile.

Les liaisons à haut débit ont ouvert des perspectives d'applications multiples dans le secteur de la santé. L'ADSL, qui est une technologie de liaison Internet, en fait partie. Elle permet le transport numérique de l'information sur une simple ligne téléphonique. Quant au Wi-Fi, protocole de l'Internet sans fil, il offre des débits élevés. Grâce à son fonctionnement par ondes hertziennes, il évite le câblage des bâtiments qui est coûteux, l'accès au réseau se faisant grâce à des antennes. La télémédecine utilise ces technologies pour obtenir un diagnostic, ou soigner un malade et ceci, à distance. La visioconférence permet la discussion entre praticiens situés à des endroits différents, offre la possibilité de faire des consultations "on line" ainsi que des interventions chirurgicales pratiquées à distance ce qui a donné naissance à la téléchirurgie.

Les applications multimédias ont pénétré dans le bloc opératoire sous la forme d'une caméra filmant le champ opératoire et d'un logiciel capable de numériser les images et les transmettre à distance permettant ainsi à un expert d'assister son confrère et de guider son geste chirurgical.

Mots clef : réseau, ADSL, Wi-Fi, télémédecine, téléchirurgie, visioconférence, protocole, haut débit

Abstract

The assumption of responsibility of the patient by the hospital evolved/moved considerably with the wire of the decades. The best diagnosis and the best care were gradually accompanied by the recourse to the most advanced technologies. Hospital and NTIC are now indissociable. The rise of these new technologies makes it possible to imagine new solutions that are to take care to the patient or to follow the patient at home.

The connections with high bit rate opened prospects for multiple applications in the sector of health health. The ADSL, which is a technology of connection Internet, in fact part. It allows the numerical transport of information on a simple telephone line. As for Wi-Fi, protocol of the Internet without wire, it offers high flows. Thanks to its operation by Hertzian waves, it avoids the wiring of the buildings which is expensive, the access to the network being done thanks to antennas. The telemedicine uses these technologies to obtain a diagnosis, or to look after a patient. The videoconference allows the discussion between experts located at different places, makes it possible to turn into consultations "one line" as well as surgical operations practised remotely what gave rise to the téléchirurgie. The multimedia applications penetrated in the operating theatre suite in the form of a camera filming the operative field and of a software able to digitize the images and to transmit them remotely thus making it possible to an expert to assist his fellow-member and to guide his surgical gesture.

Keywords: network, ADSL, Wi-Fi, telemedicine, téléchirurgie, telesurgery, videoconferencing, protocol, high bit rate,

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I L'ADSL	
1 Introduction	3
2 Définition de xDSL ou ADSL	3
3 Description d'un câble cuivre	4
4 Position du problème	5
4.1 Dissipation d'énergie	5
4.2 Diaphonie.....	5
4.3 Pupinisation.....	6
5 Réseaux et hauts débits	6
5.1 Définition d'un réseau.....	6
5.2 Réseau local	6
5.3 Ethernet.....	7
5.4 Réseaux et hauts débits.....	7
6 Différentes technologies xDSL	8
6.1 Aperçu des différentes techniques	8
6.1.1 Les solutions symétriques	9
6.1.2 Les solutions asymétriques.....	12
6.2 Synthèse des technologies xDSL.....	12
7 Codage en ligne et modulation employée dans les technologies xDSL	12
7.1 Code 2B1Q.....	13
7.2 CAP et DMT	14
7.2.1 Modulation QAM	14
7.3 Rappels sur les techniques de codage.....	15
7.3.1 Codages de ligne	15
7.3.2 Modulation d'amplitude.....	16
7.3.3 Modulation de phase	17
7.3.4 FDM et Annulation d'écho	18
7.4 Technologie CAP.....	19
7.5 Technologie DMT	21
7.5.1 Le principe de la modulation DMT	24
7.5.2 Répartition des porteuses	24
7.5.3 Les limitations.....	25
7.6 Comparaison entre CAP et DMT.....	26
7.6.1 Conclusion	26
8 La technologie ADSL	26

8.1 Le signal ADSL	29
8.2 ADSL Lite	31
8.3 Caractéristiques des technologies ADSL.....	32
8.4 Architecture.....	32
8.4.1 DSLAM	33
8.4.2 Le splitter et le micro filtre	34
8.4.2.1 Rôle du splitter	34
8.4.2.2 Rôle du micro filtre	34
8.4.2.3 Procédé splitterless.....	34
8.4.3 Le modem ADSL	34
8.4.4 Implantation facile.....	36
9 Les primitives de service	37
9.1 Les trames ADSL	38
10 La technologie ATM	40
10.1 Caractéristiques d'ATM.....	40
10.2 Intérêts d'ATM.....	41
10.3 Inconvénients d'ATM.....	41
10.4 DSL dédié au transport de services	43
10.5 Le multi service	43
10.6 ATM et ADSL.....	43
11 Conclusion.....	43

Chapitre II La technologie WiFi

1 Introduction	46
2 Les réseaux sans fil.....	46
2.1 Réseaux personnels sans fil WPAN (Wireless Personal Area Network)	47
2.1.1 Bluetooth.....	48
2.1.2 ZigBee	48
2.1.3 Liaisons infrarouges.....	48
2.2 Réseaux locaux sans fil : WLAN (Wireless Local Area Network)	48
2.3 Réseaux métropolitains sans fil : WMAN (Wireless Metropolitan Area Network).....	49
2.4 Réseaux étendus sans fil : WWAN (Wireless Wide Area Network).....	49
3 Technologie Wi-Fi	50
3.1 Introduction	50
3.2 Présentation de la norme IEEE 802.11	50
3.2.1 Définition de l'Access Point (AP).....	51
3.3 L'architecture Wi-Fi.....	51
3.3.1 La couche physique.....	53
3.3.2 La couche liaison de données.....	55

3.3.2.1	Techniques d'accès.....	56
3.3.3	Analyse des types de trames utilisés pour le protocole 802.11.....	58
3.4	Les différentes normes Wi-Fi.....	59
3.5	La norme 802.11b	61
3.5.1	La Propagation Multiple	62
3.5.2	Aux Fours à Micro-ondes.....	63
3.5.3	A la transmissions ISM	63
3.6	La sécurité.....	63
3.6.1	Le WEP	65
3.6.1.1	Failles du protocole.....	66
3.6.2	WPA.....	67
3.6.3	Conclusion	68
3.7	Utilisation du WIFI	68
3.7.1	Bornes d'accès Wi-Fi dans les lieux de passage ou "Hot spots"	68
3.8	Les performances d'un Réseau WIFI.....	69
3.9	Avantages du Wi-Fi	69
4	Les réseaux WIMAX	70
5	Les réseaux MESH	71
5.1	MANET	72
6	Les Ondes Wi-Fi et la santé	72
7	Conclusion	73

Chapitre III La visioconférence

1	Introduction	74
1.1	Définition	74
1.2	L'historique de la visioconférence	75
2	Les protocoles de visioconférence	75
2.1	Rappel de quelques protocoles standard.....	76
2.2	Principales normes.....	79
2.2.1	La norme AUDIO	79
2.2.2	La norme VIDEO	80
2.3	Modes d'utilisation de la visioconférence.....	80
3	L'architecture d'un système de visioconférence	82
3.1	Exemples d'architecture	82
3.2	Structure d'un système de visioconférence (norme H320 de l'UIT)	83
4	Codage de l'information	84
4.1	Le codage du son	86
4.1.1	Échantillonnage.....	86
4.1.2	le nombre de bits	86

4.1.3	Techniques de compression	86
4.2	Le codage de la vidéo.....	87
4.2.1	Réduction des information par sous échantillonnage de la couleur .	88
4.2.2	Réduction des informations redondantes	88
4.2.3	Le codage H.261	88
4.2.4	Le codage MPEG.....	90
4.2.4.1	MPEG-4.....	91
4.2.5	Différence entre MPEG et H.261	91
4.3	Pourquoi H.261 et pas MPEG pour la visioconférence ?.....	92
5	Normalisation.....	92
5.1	La visioconférence sur IP	93
5.1.1	Un terminal H.323 ou client H.323	93
5.1.2	Le serveur de communication (Gatekeeper).....	94
5.1.3	La passerelle (gateway)	94
5.1.4	Le contrôleur multipoint (MCU).....	94
5.1.5	Le codec vidéo H.263	94
5.1.6	Les conférences H.323 sur les réseaux IP.....	95
5.1.7	Les conférences H.323 sur les réseaux IP.....	96
5.1.8	Les limites de la visioconférence sur IP: protocoles et débits	97
5.2	T.120 : le contrôle de conférence	97
5.3	Interopérabilité des équipements.....	99
5.3.1	La couche 1 ou " réseau "	99
5.3.2	La couche 2 ou " protocole "	100
5.3.3	La couche 3 ou " multiplexage "	100
5.3.4	La couche 4 ou " audiovisuelle "	100
5.3.5	La couche 5 ou " télécommande "	100
5.3.6	La couche 6 ou " données "	101
5.3.7	La couche 7 ou " coopération "	101
6	Les applications de la visioconférence sur Internet	101
6.1	La télé-Ingénierie	101
6.2	L'apprentissage à distance	101
6.3	La diffusion de séminaires et conférences	102
6.4	La conférence personnelle.....	102
6.5	Les réunions de travail	102
6.6	Le télétravail	102
6.7	La téléchirurgie.....	103
7	Avantages de la visioconférence	103
7.1	Economie de temps	103
7.2	Economie d'argent	103
7.3	Participation accrue	103
7.4	Fréquence accrue	103

8 le Mbone	103
8.1 Définition du Mbone.....	104
8.2 Multicast IP	104
8.3 Historique du Mbone.....	105
8.4 Applications de visioconférence du Mbone.....	106
9 Conclusion	106

Chapitre IV La télémédecine

1 Introduction	107
1.1 Définition	109
2 Problématique	109
2.1 Risques liés au tiers technologique	110
3 Technologie utilisée	110
3.1 Les technologies de communication utilisables en télémédecine.....	110
3.1.2 Les moyens	111
3.2 Les normes de télémédecine	111
3.3 Un réseau répondant à un triple besoin.....	111
4 Applications de la télémédecine et technologies de communication	112
4.1 Applications	112
4.1.1 La téléconsultation	112
4.1.2 Le télémonitoring ou la télésurveillance.....	113
4.1.3 La téléchirurgie.....	114
4.1.4 Les réseaux de soins	114
4.1.5 La téléformation ou télé-éducation	114
4.2 Technologies de communication au service de la santé	115
5 La téléchirurgie	117
5.1 La téléchirurgie de compagnonnage.....	119
5.2 Chirurgie robotisée	119
5.2.1 Exemples de robots médicaux	121
5.2.1.1 L'endoscope à commande vocale.	121
5.2.1.2 CASPAR	121
5.2.2 Conclusion.....	123
6 Objectifs visés par la télémédecine	124
6.1 Répondre à l'urgence	124
6.2 L'intérêt de la télémédecine pour le monde en développement.....	124
7 Contribution de la télémédecine	125
7.1 Santé-Partenaires : un réseau d'experts radiologues au service de l'Afrique.....	125
7.1.1 La norme DICOM	126

7.2	Expérience au Sénégal	127
8	Conclusion	127
Chapitre V Mise en œuvre d'un réseau haut débit et d'un logiciel dédié à la téléchirurgie		
1	Introduction	129
2	Mise en œuvre du réseau	129
2.1	Définition	130
2.2	Propriétés du réseau	131
2.2.1	Méthodes de partage logiciel	132
2.2.2	Les mesures de sécurisation	133
2.3	Création d'une base de données	133
3	Mise en œuvre du logiciel Vlan	134
3.1	Structure de VLS	136
3.1.1	Section "Groups"	136
3.1.2	Section "Users"	139
3.1.3	Section "Telnet"	139
3.1.4	Section "Inputs"	140
3.1.5	Section "Channels"	140
3.1.6	Commandes de l'interface	141
3.2	Structure de VLC	142
3.2.1	Configuration des sorties	143
3.2.2	Démultiplexeurs	144
3.2.3	Décodeurs	145
3.2.4	Modules de sortie vidéo	145
3.2.5	Modules de filtre vidéo	145
3.2.6	Modules de sortie audio	146
3.2.7	Modules d'interface	146
4	Contraintes dues à la téléchirurgie	146
Conclusion générale		147
Conclusion		
Annexe		148
A.	Modulation d'amplitude sur deux porteuses en quadrature (MAQ)	148
A.1	Les constellations MAQ-M	148
A.2	Modulation et démodulation	149

A.3 Efficacité spectrale	150
A.4 Une généralisation de la MDA et de la MDP	150
B. Rappels sur les protocoles de communication	152
B.1 Modèles de communication ISO	152
B.2 Architecture TCP/IP	154
B.3 Protocole et services	155
B.3.1 Protocole Telnet	156
Bibliographie	157
Glossaire	159

Table des illustrations

Chapitre I

Figure 1.1 Câble cuivre	4
Figure 1.2 Les canaux ADSL.....	8
Figure 1.3 Architecture VDSL	11
Figure 1.4 Le code en ligne 2B1Q.....	13
Figure 1.5 Comparaison 2B1Q/ CAP	15
Figure 1.6 Code NRZ et code Manchester	16
Figure 1.7 Modulation de phase en quatre moments	17
Figure 1.8 Codage de ligne à une ou deux dimensions.....	17
Figure I.9 Annulation d'écho	18
Figure I.10 Multiplexage en fréquence FDM	19
Figure 1.11 Constellation pour un codage de ligne à 2-CAP et 64-CAP.....	20
Figure I.12 Utilisation de la bande passante par CAP.....	21
Figure 1.13 Indication du débit théorique possible en fonction de la distance sur une boucle locale traditionnelle d'abonné	21
Figure 1.14 Codage DMT	22
Figure 1.15 Utilisation de la bande passante par DMT.....	23
Figure I.16 Répartition des spectres de fréquences pour la technologie ADSL.....	23
Figure I.17 Adaptation du taux de charge sur les canaux.....	24
Figure 1.18 Répartition des canaux DMT sur POTS avec annulation d'écho	25
Figure 1.19 Spectre de fréquence spécifique à la technologie ADSL.....	27
Figure 1.20 Répartition de la bande passante.....	28
Figure 1.21 Multiplexage fréquentiel utilisé par ADSL (échelle des fréquences non réelles)	28
Figure 1.22 Divers blocs fonctionnels composant une liaison ADSL.....	30
Figure 1.23 Ajustement des débits par canaux en cours de transmission	30
Figure 1.24 Connexion à Internet via ADSL Lite[13]	31

Figure 1.25 Séparation du téléphone et des données chez l'utilisateur en ADSL	35
Figure 1.26 Communication entre stations et commutateurs	39
Figure 1.27 Une cellule ATM	40
Figure 1.28 Services ATM	42

Chapitre II

Figure 2.1 Réseaux personnels sans fil WPAN (Wireless Personal Area Network)	47
Figure 2.2 Architecture d'un réseau Wi-Fi.....	52
Figure 2.3 Structure d'une trame Wi-Fi.....	58
Figure 2.4 Schéma général de la trame MAC.....	59
Figure 2.5 Variation de la bande passante en fonction de la distance au point d'accès	62
Figure 2.6 Chiffrement d'un paquet WEP	65
Figure 2.7 Réseau WiMax	71

Chapitre III

Figure 3.1 Les paquets RTP et RTCP	77
Figure 3.2 Chemin d'une réservation RSVP	78
Figure 3.3 Communication point à multipoint	82
Figure 3.4 Communication point à point	83
Figure 3.5 Structure d'un système de visioconférence	83
Figure 3.6 Compression de l'information	85
Figure 3.7 Principes du codage H.261	89
Figure 3.8 Système de Codage Vidéo H.261.....	89
Figure 3.9 Principe du codage MPEG.....	90
Figure 3.10 Domaine de normalisation de H.320 et de T.120	93
Figure 3.11 Protocoles des terminaux H.323	94
Figure 3.12 Protocoles utilisés par H323 sur les réseaux IP	96

Chapitre IV

Figure 4.1 Télé-échographie robotisée	117
Figure 4.2 Opération Lindbergh	120
Figure 4.3 L'endoscope à commande vocale AESOP	121
Figure 4.4 CASPAR un robot dédié à la chirurgie orthopédique	122

Chapitre V

Figure 5.1 Architecture du réseau local de l'hôpital	126
Figure 5.2 Architecture de l'intranet	127
Figure 5.3 Schéma d'une prise RJ45	127
Figure 5.4 Schéma global du logiciel.....	131
Figure 5.5 Structure de VLS.....	132
Figure 5.6 Classes principales de VLC	135

Annexe A

Figure 1 : Constellations MAQ-16 et MAQ-64	140
Figure 2 : Modulateur MAQ-M.....	140
Figure 3 : Constellation de la MDAP-16.....	142

Annexe B

Figure. 1 - Modèle de référence OSI.....	146
Figure. 2 - Modèle TCP/IP (Internet)	146
Figure. 3 - Connexion telnet de A vers B.....	157

Introduction générale

La révolution de l'information et des technologies de la communication est un formidable accélérateur du changement. Ses effets marquent profondément tous les domaines, particulièrement ceux de l'éducation et du monde du travail.

L'exploitation des avancées récentes en physique, informatique, traitement du signal et les innovations technologiques assurent un progrès significatif de la qualité de soins médicaux et de la qualité de vie de chaque citoyen. L'utilisation des réseaux informatiques pour la transmission de données ne cesse de croître. La téléopération d'engins, la réalité virtuelle, la téléprésence, la télémédecine sont des domaines applicatifs qui sont amenés à se développer avec la banalisation de ces réseaux.

Les nouvelles applications issues du développement d'Internet nécessitent des performances en termes de vitesse de téléchargement que l'actuel réseau Internet ne peut offrir. L'émergence de nouvelles technologies, les technologies de type DSL, a permis une amélioration sensible de l'épine dorsale des réseaux. L'ADSL appartient à cette famille technologique qui permet de faire passer de hauts débits sur la paire de cuivre utilisée pour la ligne téléphonique.

Ainsi ces nouveaux débits ont transformé le réseau public existant en un système puissant capable d'apporter du multimédia, y compris la vidéo temps réel. Cette nouvelle approche a bouleversé bien des domaines notamment celui de la médecine. En effet, La technologie aujourd'hui permet le transfert d'images médicales autant fixes que dynamiques et les inforoutes offrent maintenant des moyens efficaces et rapides qui respectent les critères essentiels de sécurité et de confidentialité. Ces moyens offrent donc de nouvelles perspectives dans l'organisation des soins de santé, particulièrement à l'égard de l'accessibilité aux soins de spécialité.

L'ensemble des nouvelles pratiques médicales intégrant les technologies de communication à distance annonce l'avènement de la télémédecine et une profonde mutation des usages de santé. Mais surtout l'introduction des nouvelles technologies de l'information et de la communication dans la médecine a augmenté considérablement l'efficacité des pratiques opératoires et laisse encore prévoir de grands progrès dans les années à venir.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à la mise en œuvre d'un réseau haut débit soutenu par les techniques ADSL suivi par l'implémentation d'un logiciel dédié à la téléchirurgie. Il est organisé comme suit :

- Le **premier chapitre** permet au lecteur de se familiariser avec le contexte des nouvelles technologies de communication *xDSL* qui permettent l'accès au monde extérieur à partir du domicile ou du lieu de travail.
- Le **deuxième chapitre** présente les nouvelles technologies sans fil *Wireless* où là encore des contraintes ont été levées.
- Le **troisième chapitre** traite de la *visioconférence* qui ouvre l'horizon aux études, au travail, aux réunions entre personnes se trouvant aux deux points du globe.
- Le **quatrième chapitre** aborde un problème crucial dans la vie d'un être humain, c'est le problème de la santé ou *télémédecine*. La télémédecine est un domaine qui est en croissance soutenue depuis plusieurs années. Ces nouvelles formes de pratique médicale sont aujourd'hui reconnues par les professionnels de santé

Enfin, en annexe on trouvera le détail de des calculs concernant la modulation d'amplitude sur deux porteuses en quadrature et un rappel sur des protocoles de communication.

LA TECHNOLOGIE ADSL

L'ADSL est une technologie permettant le transport numérique de l'information sur une simple ligne de raccordement téléphonique. Ce chapitre explicitera ses caractéristiques ainsi que ses applications

1. Introduction

Le rapide développement des technologies de l'information a fait apparaître de nouveaux services gourmands en capacité de transmission. L'accès rapide à Internet la visioconférence, l'interconnexion des réseaux, le télétravail, l'enseignement à distance font parties de ces nouveaux multimédia que l'utilisateur désire obtenir à domicile ou au bureau.

Jusqu'à présent les services à hauts débits existant (câble coaxial, fibre optique) n'étaient pas bien adaptés aux besoins réels (trop chers à remplacer des fibres optiques ou connexion pas très stable en câble coaxial). L'idée d'utiliser la paire torsadée semble la mieux adaptée puisque dans le monde plus de 800 millions de connexions de ce type sont déjà en place et qu'il suffit d'ajouter un équipement au central téléphonique ainsi qu'une petite installation chez l'utilisateur pour pouvoir accéder à l'ADSL.

Plusieurs technologies filaires se disputent l'accès aux réseaux. Le câble a pris les devants, mais les télécoms réagissent en offrant un renouveau à leurs réseaux de fil de cuivre. Le fil de cuivre du téléphone est capable dans des conditions optimales, de tolérer des fréquences de près de 4 MHz. De nouvelles techniques de transmission numérique sont aujourd'hui à même d'exploiter cette bande de base, qui reste dans la pratique limitée à 1 MHz (de 25 kHz à 1,1 MHz.). Le débit de données chute rapidement avec la distance, et la boucle ADSL ne peut pas dépasser 4 km [2]

xDSL est donc la réponse des opérateurs de téléphonie traditionnelle à l'offre d'accès large bande des cablo-opérateurs.

2. Définition de xDSL ou ADSL

Le terme DSL ou xDSL signifie *Digital Subscriber Line (Ligne numérique d'abonné)* et regroupe l'ensemble des technologies mises en place pour un transport numérique de l'information sur une simple ligne de raccordement téléphonique. Les technologies xDSL sont divisées en deux grandes familles :

- La première utilisant une transmission symétrique
- La deuxième utilisant une transmission asymétrique.

Historiquement, les méthodes xDSL, datent de 10 ans. Elles se basent sur des tests effectués sur les infrastructures existantes (la paire de conducteur de cuivre des câbles téléphoniques), en vue de multiplier leur débit grâce à un spectre étendu. L'ADSL, Asymmetric

Digital Subscriber Line (dans les pays francophones ce terme est parfois remplacé par *LNPA* qui signifie *Ligne Numérique à Paire Asymétrique*), est une norme internationale agréée en 1997 par l'ANSI (American National Standards Institute) qui utilise la modulation DMT (Discrete MultiTone). On entend par Asymetric le fait que le débit des flux montant (du client vers le central) est nettement inférieur à celui du flux descendant (du central vers le client). Le débit maximal peut atteindre 8Mbits/s pour le flux descendant (8 000Kbits/s contre actuellement 128Kbits/s pour Numéris) et 1Mbits/s pour le flux montant. Mais ces taux sont difficilement atteints en raison des conditions de raccordement. Ce système permet donc de faire coexister sur une même ligne un canal descendant (downstream) de haut débit, un canal montant (upstream) moyen débit ainsi qu'un canal de téléphonie (appelé POTS en télécommunication qui signifie : Plain Old Telephone Service).

Depuis l'avènement des technologies xDSL, la paire torsadée en cuivre a retrouvé un intérêt grandissant parmi les grandes entreprises de télécommunication. Les différentes technologies xDSL ont une caractéristique commune, elles permettent de faire passer des flux importants de données sur de simples lignes téléphoniques torsadées, des débits de l'ordre de plusieurs mégabits sans bouleverser l'infrastructure existante. La transmission ne nécessite que de simples paires de cuivre omniprésentes dans les réseaux de distribution des opérateurs. Ces technologies utilisent les structures existantes, permettant de transférer les données entre l'utilisateur et le réseau, sans nécessiter un investissement astronomique de la part des opérateurs de télécommunication.

3. Description d'un câble cuivre

Comment faire cohabiter un réseau analogique et ADSL sur une même ligne ?

La paire torsadée est constituée de deux conducteurs de cuivre d'un diamètre compris entre 0.4mm et 0.8mm (rarement 1mm). Les conducteurs sont isolés et torsadés afin de diminuer la diaphonie. La plupart du temps, les paires torsadées sont regroupées en quatre dans un câble protégé par un manteau de plastique.

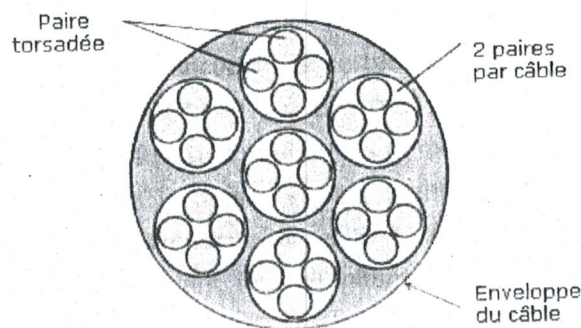


Figure 1.1 **Câble cuivre**

Les services téléphoniques traditionnels nécessitent une largeur de bande de 3,1 kHz (la bande passante comprise entre 300 Hz et 3400 Hz), or les câbles reliant les centraux téléphoniques aux utilisateurs possèdent tous une bande passante supérieure, de l'ordre de plusieurs centaines de kHz. C'est sur ce réseau d'accès câblé que ce sont développées les techniques xDSL[14].

En hautes fréquences les problèmes liés à la distance sont les plus contraignants (affaiblissement, diaphonie, distorsion de phase). Aux basses fréquences, ce sont les difficultés liées aux bruits impulsionnels qui dominent sans trop de difficulté jusqu'à 1 Mhz. Au-delà, leur utilisation devient délicate et elle nécessite des systèmes de transmission très performants

4. Position du problème

Pour remédier au problème des derniers kilomètres de la transmission, il a tout d'abord été envisagé de déployer de la fibre optique jusque chez l'abonné. L'investissement s'est cependant révélé trop onéreux. La rentabilité du système était donc compromise.

Il fallait donc trouver une autre solution pour proposer des services assurant de hauts débits à moindre coût. La solution fut trouvée par les téléphonistes : doper le réseau téléphonique existant. C'est le but des technologies xDSL.

L'idée de base de ces technologies est de repousser la barrière théorique des 300-3400 Hz de bande passante qu'utilisent les modems actuels. Mais ce n'est pas si simple car la dissipation d'énergie, la diaphonie et la pupinisation posent problème lorsqu'il s'agit de transmettre des données à haute fréquence.

4.1 Dissipation d'énergie

Un courant électrique passant au travers d'un conducteur dissipe une partie de son énergie sous forme de chaleur (pertes par effet Joule). Ces pertes augmentent avec la résistance du câble. Celle-ci est fonction de la longueur du câble, de sa section et de sa résistivité. Les technologies xDSL font passer des signaux haute fréquence dans ces câbles. Cela a le désavantage de créer un effet de peau qui a pour conséquence d'augmenter dramatiquement la résistance du câble, et donc d'atténuer le signal utile[3].

Ceci a directement pour effet de limiter la longueur des boucles locales. Cependant, l'un des moyens de minimiser cette atténuation est d'utiliser des câbles moins sensibles à l'effet de peau, donc de diamètre plus gros. Ce qui se traduit bien sur par un coût d'implantation plus élevé.

4.2 Diaphonie

Dans un réseau téléphonique, de multiples paires de fils téléphoniques sont regroupés dans un même câble. Des signaux transitant dans une paire torsadée sont susceptibles de créer des interférences (rayonnement électromagnétique) sur les autres paires du câble. C'est la diaphonie.

Sachant que, du côté des centraux opérateurs, la concentration de câbles est très forte, l'extension des technologies HF comme l'xDSL risque de créer de nombreuses perturbations entre signaux de même caractéristiques, limitant ainsi le débit obtenu.

4.3 Pupinisation.

Afin d'éviter les parasites haute fréquence, les opérateurs téléphoniques ont disposés, à différents endroits de leur réseau, des bobines d'auto-induction afin de les éliminer. Les technologies xDSL ont pour principe de laisser la bande des 300Hz 3400Hz libre, et donc d'émettre sur des fréquences élevés. Ces bobines auront pour effet d'éliminer le signal utile. Il est donc impossible de transmettre suivant une technologie xDSL sur une boucle locale équipée de bobines de pupinisation [4].

Voici quelques uns des problèmes auxquels est confronté cette nouvelle technologie. Sans que ceux-ci empêchent l'installation d'équipements xDSL, ils imposent des contraintes dans le développement du réseau dont il faut tenir compte au fur et à mesure de la progression de ses technologies sur l'ensemble des boucles locales.

5. Réseaux et hauts débits

Les nouvelles technologies xDSL se situent sur le créneau des réseaux à large débit. Il serait intéressant de situer ces termes dans leur contexte permettant ainsi de mieux comprendre l'engouement que suscitent ces technologies si prometteuses [5].

5.1 Définition d'un réseau

Un réseau est un système de partage de ressources distribuées. Il comprend un ensemble de liens et de nœuds reliés entre eux pour permettre à deux abonnés (au moins) d'établir une liaison pour communiquer entre eux. La périphérie du réseau est constituée de réseaux de commutateurs d'accès qui regroupent plusieurs abonnés, assurant également un rôle de multiplexeur. Les nœuds internes du réseau commutent avec les communications d'un lien d'entrée vers un lien de sortie en fonction d'un critère d'acheminement. Ainsi un réseau utilise des techniques de multiplexage à sa périphérie et des techniques de commutation en interne. Le réseau de commutation peut être ainsi vu comme un lien composite virtuel.

5.2 Réseau local

Un réseau local, appelé aussi réseau local d'entreprise (*RLE*) (ou en anglais *LAN*, local area network), est un réseau permettant d'interconnecter les ordinateurs d'une entreprise ou d'une organisation. Grâce à ce concept, datant de 1970, les employés d'une entreprise ont à disposition un système permettant:

- d'échanger des informations
- de communiquer

- d'avoir accès à des services divers

Un réseau local relie généralement des ordinateurs (ou des ressources telles que des imprimantes) à l'aide de support de transmission filaires (câbles coaxiaux la plupart du temps) sur une circonférence d'un centaine de mètres. Au-delà, on considère que le réseau fait partie d'une autre catégorie de réseau appelé MAN (*metropolitan area network*), pour laquelle les supports de transmission sont plus adaptés aux grandes distances...

5.3 Ethernet

Ethernet (aussi connu sous le nom de *norme IEEE 802.3*) est une technologie de réseau local basé sur le principe que toutes les machines du réseau Ethernet sont connectées à une même ligne de communication, constituée de câble cylindriques. On distingue différentes variantes de technologies Ethernet suivant le diamètre des câbles utilisés:

- 10Base-2: Le câble utilisé est un câble coaxial de faible diamètre
- 10Base-5: Le câble utilisé est un câble coaxial de gros diamètre
- 10Base-T: Le câble utilisé est une paire torsadée, le débit atteint est d'environ 10Mbps
- 100Base-TX: Comme 10Base-T mais avec une vitesse de transmission beaucoup plus importante (100Mbps)

Technologie	Type de câble	Vitesse	Portée
10Base-2	Câble coaxial de faible diamètre	10Mb/s	185m
10Base-5	Câble coaxial de gros diamètre (0.4 inch)	10Mb/s	500m
10Base-T	double paire torsadée	10 Mb/s	100m
100Base-TX	double paire torsadée	100 Mb/s	100m
1000Base-SX	fibres optiques	1000 Mb/s	500m

Ethernet est une technologie de réseau très utilisée car le prix de revient d'un tel réseau n'est pas très élevé

5.4 Réseaux à hauts débits

Comme toutes les autres technologies situées sur le créneau des réseaux à hauts débits, les technologies xDSL doivent pouvoir répondre à des exigences pour un transfert efficace de données qui sont :

- la bande passante requise,
- le temps de transfert,
- le taux d'erreur,

- la variation du délai de transmission (problème du *jitter* ou gigue correspondant à un décalage temporel entre les cellules successives de la même source. Lors d'un transfert on a intérêt à avoir une gigue la plus faible possible).

6. Différentes technologies xDSL

Le sigle xDSL regroupe plusieurs variantes de techniques de transmissions hauts débits, utilisant la ligne téléphonique. Une paire de cuivre offre une bande passante de 1Mhz, or seulement 4khz sont utilisés pour la transmission de la voix. Les technologies xDSL exploitent cette bande passante supplémentaire pour créer ainsi deux voies de communications. Les versions des technologies xDSL diffèrent par le nombre de paires téléphoniques utilisés (1 ou 2), le choix des fréquences porteuses et le type de modulation utilisée. La technologie ADSL met en place un débit dissymétrique, plus important sur la voie descendante (VD) que sur la voie Montante (VM). Cette dissymétrie est adaptée aux exigences de l'accès à Internet.

Les techniques xDSL mixent sur une simple paire téléphonique des trafics de voix, de données et d'images. Une liaison xDSL comporte plusieurs canaux, par exemple la technique ADSL met en œuvre 3 canaux : un canal voix traditionnel et deux canaux multimédia.

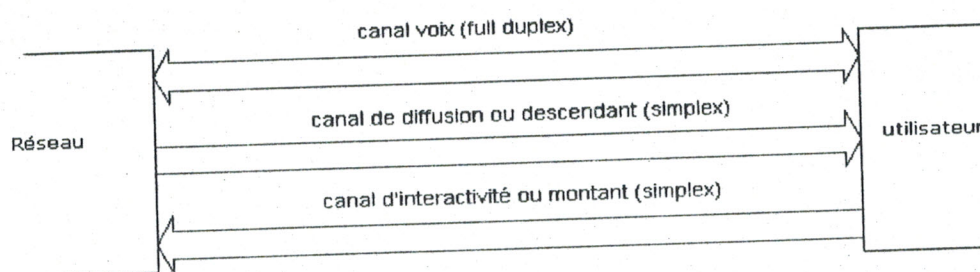


Figure 1.2 Les canaux ADSL

Selon la technique de modulation mise en œuvre et les débits respectifs des canaux multimédia, on distingue de nombreuses variantes présentées maintenant...

6.1 Aperçu des différentes techniques

Le terme DSL ou xDSL peut se décliner en plusieurs groupes : HDSL, SDSL, ADSL, RADSL, VDSL. A chacun de ces groupes correspondent une utilisation et des caractéristiques particulières.

Les différences entre ces technologies sont :

- La vitesse de transmission
- La distance maximale de transmission
- La variation de débit entre le flux montant et le flux descendant
- Le caractère symétrique ou non de la liaison

La connexion point à point est effectuée via une ligne téléphonique entre deux équipements, d'une part le NT (Network Termination) installé chez l'utilisateur et d'autre part le LT (Line Termination) installé dans le centre de raccordement.

6.1.1 Les solutions symétriques

La connexion s'effectue au travers de paires torsadées avec un débit identique en flux montant comme en flux descendant [16].

- **HDSL** (*High bit rate DSL*) est la première technique issue de DSL et a vu le jour au début des années 1990. technique de transmission *full duplex* destinée à stimuler le réseau de distribution en cuivre en offrant des équivalents à l'accès primaire RNIS de types T1 (1544 kbit/s) et E1 (2048 kbit/s). HDSL exploite en outre deux ou trois paires téléphoniques

Cette technique consiste à diviser le tronc numérique du réseau, T1 (1.5 Mbps) en Amérique et E1 (2 Mbps) en Europe sur 2 paires de fils pour T1 et 3 paires de fil pour E1. Avec cette technique, il est possible d'atteindre un débit de 2Mbps dans les 2 sens sur trois paires torsadées et 1,5 Mbps dans les 2 sens sur deux paires torsadées. Il est possible que le débit, s'il est à 2 Mbps, puisse tomber à 384 kbps secondes par exemple en fonction de la qualité de la ligne et de la distance de la ligne sur le dernier kilomètre (entre 3 et 7 km suivant le diamètre du fil, respectivement entre 0.4mm et 0.8mm).

La connexion peut être permanente mais il n'y a pas de canal de téléphonie disponible lors d'une connexion HDSL. Le problème actuel de cette technologie est que sa standardisation n'est pas encore parfaite.

- **SDSL** (*Single pair DSL, ou symmetric DSL*) est le précurseur de HDSL2 (cette technologie, dérivée de HDSL devrait offrir les mêmes performances que ce dernier mais sur une seule paire torsadée). version monoligne de HDSL, mais plus limitée en distance. Le SDSL est tout à fait adapté à la visioconférence, aux travaux en groupe sur réseaux LAN interconnectés.

Cette technique est conçue pour une plus courte distance qu'HDSL (voir tableau ci-dessous). La technique SDSL va certainement disparaître au profit de l'HDSL2.

Downstream : [Kbit/s]	Upstream : [Kbit/s]	Distance : [km]
128	128	7
256	256	6.5
384	384	4.5
768	768	4
1024	1024	3.5
2048	2048	3

Tableau 1 Distances et débits d'une liaison SDSL

6.1.2 Les solutions asymétriques

En étudiant différents cas de figure, on s'est aperçu qu'il était possible de transmettre les données plus rapidement d'un central vers un utilisateur mais que lorsque l'utilisateur envoie des informations vers le central, ceux-ci sont plus sensibles aux bruits causés par des perturbations électromagnétiques (plus on se rapproche du central, plus la concentration de câble augmente donc ces derniers génèrent plus de diaphonie). Il est donc préférable de transmettre en basse fréquence (ou sur une bande de fréquence moins large) les données issues de l'utilisateur.

L'idée a alors été d'utiliser un système asymétrique, en imposant un débit plus faible de l'abonné vers le central. Les systèmes utilisant cette technique ont été nommés ADSL. Il en existe au moins en deux variantes: le RADSL et le VDSL

- **ADSL** (Asymmetric Digital Subscriber Line) au même titre que l'HDSL existe depuis une dizaine d'années et a tout d'abord été développé pour recevoir la télévision par le réseau téléphonique classique. Mais le développement d'Internet a trouvé une autre fonction à cette technologie, celle de pouvoir surfer rapidement sur le net et sans occuper une ligne téléphonique.

La plus importante caractéristique de l'ADSL est sa capacité d'offrir des services numériques rapides sur le réseau cuivré existant, en superposition et sans interférence avec le service téléphonique analogique traditionnel (POTS). Un circuit ADSL relie un central du réseau public au modem ADSL de l'utilisateur, créant ainsi trois canaux d'information :

- ✓ un canal descendant haut débit
- ✓ un canal duplex moyen débit
- ✓ un canal de téléphonie (POTS : Plain Old Telephone Service)

ADSL est aussi actuellement une des seule technologie disponible sur le marché qui offre le transport de la TV/vidéo sous forme numérique (MPEG1 ou MPEG 2) en utilisant un raccordement téléphonique.

L'ADSL permet notamment le transport de données TCP/IP, ATM et X 25. Elle sera expliquée ultérieurement plus en détail.

- **RADSL** (Rate Adaptive DSL) Cette technique est basée sur l'ADSL. La vitesse de transmission est fixée de manière automatique et dynamique en recherchant la vitesse maximale possible sur la ligne de raccordement et en la réadaptant en permanence et sans coupure. Extension de la variante ADSL, capable d'adapter le débit du modem à des vitesses de replis, lorsque la qualité de transmission de la ligne se détériore. La particularité de cette technique asymétrique est de mettre en œuvre des mécanismes de replis permettant l'adaptation du débit aux ratés physiques intervenue sur le canal.

RADSL permettrait des débits ascendants de 128kbps à 1Mbps et des débits descendants de 600kbps à 7Mbps, pour une longueur maximale de boucle locale de 5,4 km. Le RADSL utilise la modulation DMT (comme la plus part du temps pour l'ADSL). Il est en cours de normalisation par l'ANSI.

- **VDSL (Very High Bit Rate DSL)** est la plus rapide des technologies DSL et est basée sur le RADSL. Elle est capable de supporter, sur une simple paire torsadée, des débits de :
 - ✓ 13 à 55.2 Mbps en downstream
 - ✓ et de 1,5 à 6 Mbps en upstream

En revanche, la longueur maximale de la boucle est seulement de 1,5km. Cette distance est très faible, cependant, elle peut être augmentée en utilisant de la fibre optique, du fournisseur jusqu'à un ONU (Optical Network Unit) proche de l'utilisateur. A partir de cet ONU ce dernier peut être connecté en VDSL (voir figure ci-dessous).

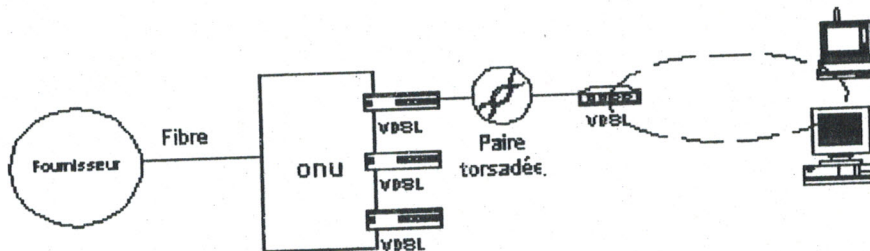


Figure 1.3 Architecture VDSL

En ce qui concerne la modulation, les deux canaux de données sont séparés des bandes utilisées pour la téléphonie d'une part, et de celles utilisées pour le RNIS d'autre part. Ceci permettrait aux fournisseurs de services de superposer VDSL aux services déjà existants. Pour l'heure il est envisagé que les deux canaux (ascendants et descendant) soient aussi séparés en fréquence.

VDSL a principalement été développé pour le transport de l'ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) à haut débit sur une courte distance (jusqu'à 1,5 km). Le standard est en cours de normalisation. Pour le transport des données, l'équipement VDSL est relié au central de raccordement par des fibres optiques formant des boucles SDH à 155 bps, 622 Mbps ou 2,5 Gbps. Le transport de la voix entre l'équipement VDSL et le central de raccordement peut également être assuré par des lignes de cuivre.

6.2 Synthèse des technologies xDSL

Technologie xDSL	Mode de transmission	Débit Mbit/s	Mode de fonctionnement Canal	Codage	Distance/Débit Km/(Mbit/s)	Mode de séparation des canaux
ADSL	Asymétrique	1,5444 à 9 0,016 à 0,640	Descendant Montant	DMT, CAP	5,5 / 1,5 1,8 / 7	FDM, annulation d'écho
HDSL	Symétrique	1.544 2,048	Duplex sur 2 paires Duplex sur 3 paires	CAP, 2B1Q	5,5 / 2,048	Annulation d'écho
SDSL	Symétrique	0.128 à 2	Duplex	CAP, 2B1Q	3,6 / 2,048	Annulation d'écho
VDSL	Asymétrique	13 à 51 1,544 à 2,3	Descendant Montant	CAP, DMT	1,5 / 3 0,3 / 51	FDM

- * canal montant ou liaison montante, précise le sens du flux des données, de l'abonné vers le réseau.
- * canal descendant ou liaison descendant du réseau vers l'abonné.

7. Codage en ligne et modulation employée dans les technologies xDSL

Il faut dans un premier temps décider du type de codage de la donnée à envoyer, c'est-à-dire sa représentation informatique. Celle-ci sera différente selon le type de données, car il peut s'agir de:

- données sonores ;
- données textuelles ;
- données graphiques ;
- données vidéo.

La représentation de ces données peut se diviser en deux catégories:

- Une représentation numérique : c'est-à-dire le codage de l'information en un ensemble de valeurs binaires, soit une suite de 0 et de 1 ;

- Une représentation analogique : c'est-à-dire que la donnée sera représentée par la variation d'une grandeur physique continue.

Pour qu'il puisse y avoir un échange de données, un codage des signaux de transmission doit être choisi, celui-ci dépend essentiellement du support physique utilisé pour transférer les données, ainsi que de la garantie de l'intégrité des données et de la vitesse de transmission.

7.1 Code 2B1Q

Le codage 2B1Q utilisé pour les liaisons HDSL, est le même que le codage retenu pour le RNIS en accès de base. Avec deux bits consécutifs, on forme un symbole dibit. Il faut donc coder quatre symboles dibits possibles en bande de base (on parle aussi de "codes en ligne").

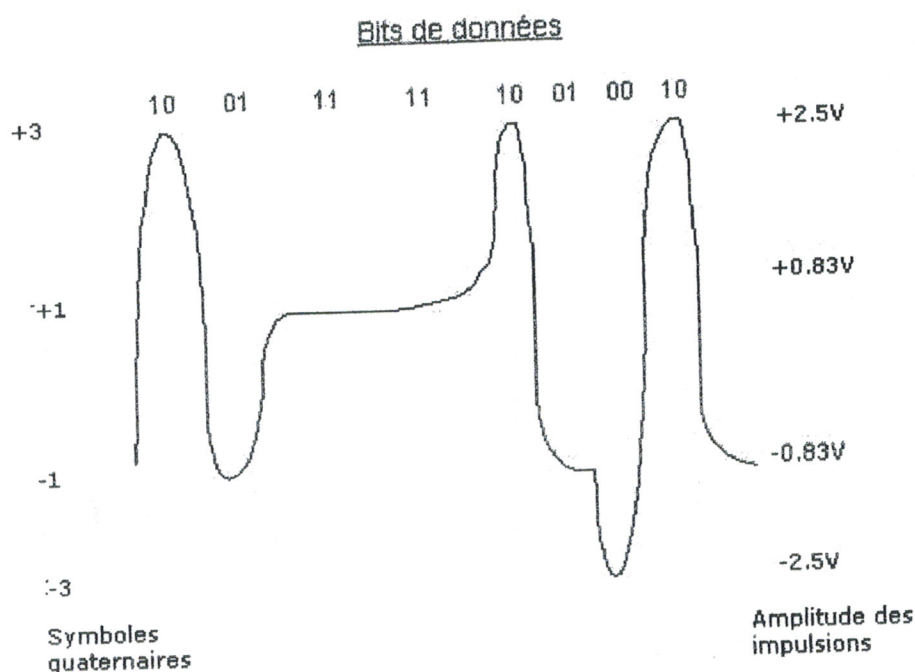


Figure 1.4 Le code en ligne 2B1Q

Pour ce faire, on associe chaque dibit à un niveau particulier d'une impulsion pouvant prendre quatre niveaux électriques ; on sort alors de la logique binaire. On transcrit ainsi deux éléments binaires (2B) en un élément quaternaire (1Q) (voir exemple figure 1.4). Le code en ligne 2B1Q fait correspondre à un groupe de deux éléments binaires un créneau de tension, dit symbole quaternaire, pouvant endosser quatre valeurs différentes. Dans l'exemple ci-dessus, la séquence binaire 1001111110010010 émise sera codée en ligne sous la forme des symboles quaternaires +3 -1 +1 +1 +3 -1 -3 +3 -1.

7.2 CAP et DMT

Certaines technologies xDSL utilisent communément les techniques CAP (Carrierless Amplitude Phase) ou DMT (Discrete MultiTone). Toutes deux utilisent la modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation) mais diffèrent dans la manière de l'appliquer. La modulation d'amplitude sur deux porteuses en quadrature MAQ (ou QAM en anglais) est détaillée dans l'annexe A.

7.2.1 Modulation QAM

Soit $m(t)$ le signal modulateur en bande de base représentant un signal de type numérique.

Soit une porteuse $x(t) = A \cos(\omega_c t + \varphi_c)$ (1) où A : amplitude de la porteuse

ω_c : pulsation de la porteuse

φ_c : phase de la porteuse

correspondant à un signal haute fréquence vis à vis de la fréquence maximale à transmettre dans le spectre du signal numérique en bande de base. Une modulation numérique peut s'effectuer sur les trois paramètres de $x(t)$, une transcription sera faite entre la modulation numérique $m(t)$ et la porteuse $x(t)$. Ainsi la modulation QAM va porter sur un décalage simultané de la phase φ_c et de l'amplitude A . La transmission de la porteuse module numériquement par sauts de phase correspond, dans un même canal, de deux porteuses en quadrature dans le temps (c'est à dire déphasé de $\pi/2$).

D'après (1), $x(t) = A \cos \omega_c t \cos \varphi_c - A \sin \omega_c t \sin \varphi_c$

En posant $a = \cos \varphi_c$, $b = \sin \varphi_c$

Soit $x(t) = a \cos \omega_c t - b \sin \omega_c t$ (2)

Le premier terme de $x(t)$ correspond, dans un plan, à l'axe horizontale gradué en $\cos \varphi_c$ (noté aussi axe I signifiant en phase) et le deuxième terme à l'axe verticale gradué en $\sin \varphi_c$ (cet axe est noté Q signifiant en quadrature de phase). Dans la modulation QAM, deux porteuses liées aux I et Q, en quadrature dans le temps, sont modulées avec des coefficients pouvant prendre des valeurs autres que 0 ou ± 1 .

Donc pour résumer, la modulation QAM est la combinaison d'une modulation de phase et d'amplitude, afin d'augmenter le nombre d'états par symbole. A chaque état correspond une amplitude et une phase. Ceci augmente la difficulté de modulation et de démodulation, mais permet une augmentation importante de la bande passante transmise. En théorie, on peut ainsi

transmettre de 1 à 6bps/Hz L'utilisation de la modulation en amplitude et en phase a permis une amélioration sensible de la transmission de données. En effet, à la différence du 2B/1Q, les codes CAP (figure 1.5) et DMT, dérivées du QAM, sont typiquement passe-bande et peuvent être conçues pour opérer sur une bande de fréquence spécifiée. Ceci va permettre de séparer les canaux réservés à la ligne téléphonique, la réception et l'émission.

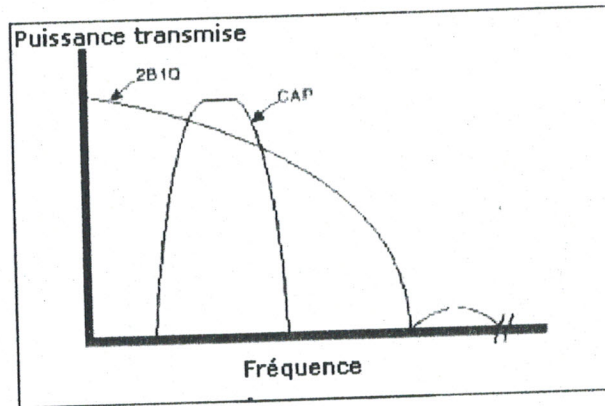


Figure 1.5 Comparaison 2B1Q/ CAP

7.3 Rappels sur les techniques de codage

Avant d'expliquer CAP et DMT, il me semble utile de faire un bref rappel sur les deux techniques de base de codage en ligne, sur la "Modulation d'Amplitude", sur la "Modulation de Phase", et sur FDM.

7.3.1 Codages de ligne

Le codage de ligne est en fait l'opération qui consiste à coder les "zéros" et les "un" sur une ligne téléphonique. Il existe deux techniques de codage de ligne :

- ✓ NRZ (non-return-to-zero)
 - ✓ et le Manchester (utilisé principalement pour Ethernet)
- NRZ génère deux valeurs discrètes basées sur le voltage de la ligne pour transmettre chaque bit. Avec cette technique, deux valeurs possibles sont disponibles pour transmettre un bit d'information (une valeur pour transmettre un "1" et une autre pour transmettre un "0") pour chaque signal émis. Il utilise un voltage négatif pour un bit à "1" et un voltage positif pour un bit à "0" (figure 1.6). Pour cette raison, NRZ est considéré comme une forme simple de modulation d'amplitude.
 - Manchester est une technique très fréquemment utilisée. Pour cette dernière; un bit d'information à "1" est transformé en un signal électrique (figure 1.6) subissant en son milieu une transition de 1 vers 0 tandis qu'un bit à "0" est transformé en un signal électrique subissant une transition de 0 vers 1. Avec cette technique, il existe au moins une transition par

bit qui permet une meilleure synchronisation du récepteur sur l'émetteur. Il en résulte un certain gaspillage de la bande passante et donc une perte de capacité utile.

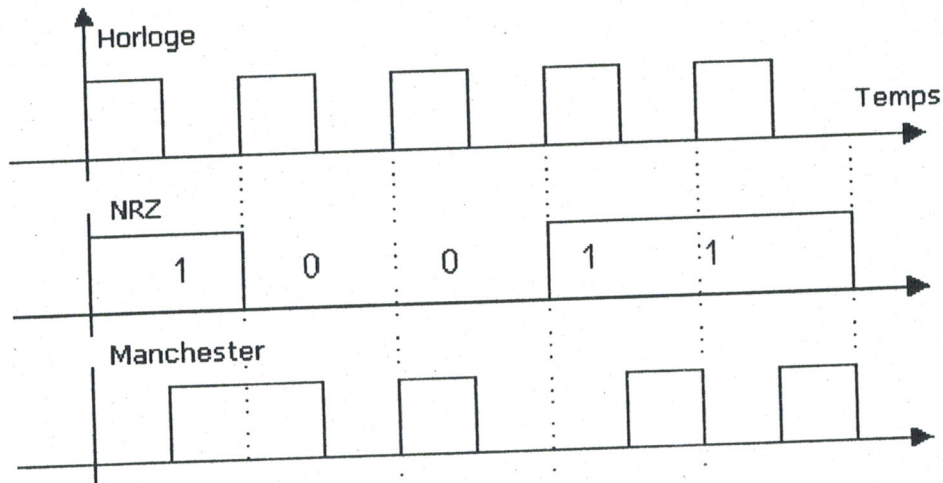


Figure 1.6 Code NRZ et code Manchester

On voit immédiatement que le code NRZ ne peut être transmis directement car en cas de longue suite de zéro ou de un, le rythme binaire n'est plus récupérable par le récepteur. Par contre, le code Manchester comporte une transition par coup d'horloge mais les fronts ne sont pas équidistants. La récupération d'horloge sera plus facile qu'avec le NRZ. Par contre, l'encombrement spectral moins important (impulsion de largeur minimale $1/2$ de la période horloge).

Malgré que ces techniques de codage soient relativement inefficaces dans l'utilisation de la bande passante, elles ont connu un succès important pour deux raisons :

1. Les câbles LAN (câbles coaxiaux 10Base2 ou 10Base5...) qui couvrent de relatives courtes distances ont une largeur de bande importante qui permet un certain gaspillage;
2. Ces techniques de codage binaire sont simples et bon marché à implémenter.

Afin de prendre au maximum avantage de la largeur de bande, d'autres techniques de codage ont été développées pour générer plus de deux valeurs possibles distinctes par signal. Ce qui a permis d'encoder plus d'un bit par impulsion. Ces deux techniques sont la modulation d'amplitude et la modulation de phase.

7.3.2 Modulation d'amplitude

NRZ utilise deux niveaux d'amplitude pour encoder les bits d'information. En augmentant le nombre possible de niveaux d'amplitude, il est possible de transmettre plus de deux bits par impulsion.

voltage négatif "moyen"), il est possible de transmettre par impulsion deux bits. Chaque voltage correspondra respectivement au couple de bits 00, 11, 01, 10.

En augmentant encore le nombre de niveaux d'amplitude, on peut encore augmenter le nombre de bits d'information émis à chaque impulsion. Si on utilise 8 niveaux d'amplitude (4 positifs et 4 négatifs), chaque impulsion pourra transmettre un groupe de trois bits. On peut encore continuer le raisonnement pour arriver au cas plus général: m bits d'information peuvent être transmis en une impulsion s'il est possible de générer 2^m niveaux d'amplitude.

7.3.3 Modulation de phase

Pour la modulation de phase, la distinction entre "0" et "1" est effectuée par un signal qui commence à des emplacements différents de la sinusoïde (phase).

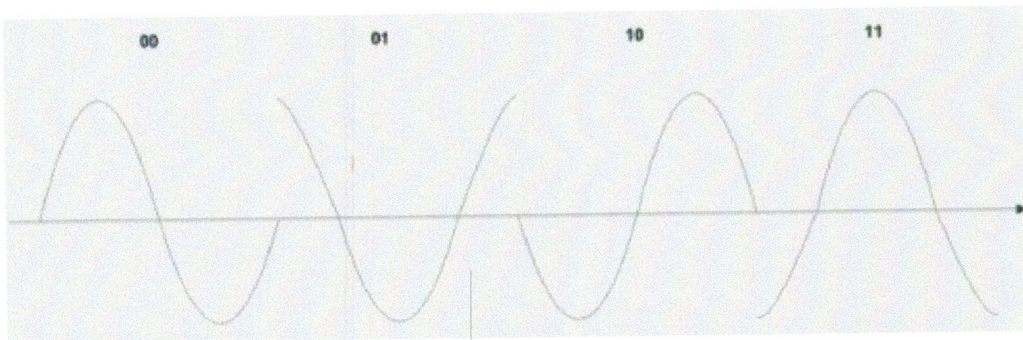


Figure 1.7 Modulation de phase en quatre moments

Sur la figure 1.7 on peut remarquer quatre endroits différents où la sinusoïde peut débuter, ce qui permet de coder quatre informations différentes (00, 01, 10, 11).

Pour coder un couple de bits "00" la phase doit débuter à 0° . Si la séquence de bits à envoyer change, on doit opérer un décalage de phase. Dans le cas où la séquence de bits devient 01, la sinusoïde doit être décalée de 90° etc. En général, lorsqu'on peut coder n bits par instant de modulation on parle d'un codage à n dimensions.

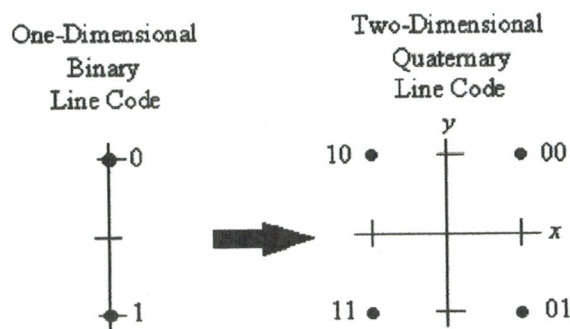


Figure 1.8 Codage de ligne à une ou deux dimensions

7.3.4 FDM et Annulation d'écho

L'un des problèmes de la transmission haut débit est l'interférence entre les signaux émis et reçus, si ceux-ci sont situés sur la même bande de fréquences. La technologie utilisée au niveau de la séparation des canaux est de type FDM ou annulation d'écho. Pour créer les canaux multiples, les modems ADSL divisent la largeur de la bande disponible d'une ligne téléphonique suivant deux types : Multiplexage à Division de fréquence (FDM) ou annulation d'écho

➤ Annulation d'écho

Etant donné que les caractéristiques du signal émis sont connues, il est possible de soustraire au signal reçu la perturbation due au signal émis. Cette première technique, appelée "annulation d'écho", permet un chevauchement des fréquences des deux sens de transmission, comme le montre la figure ci-dessous :

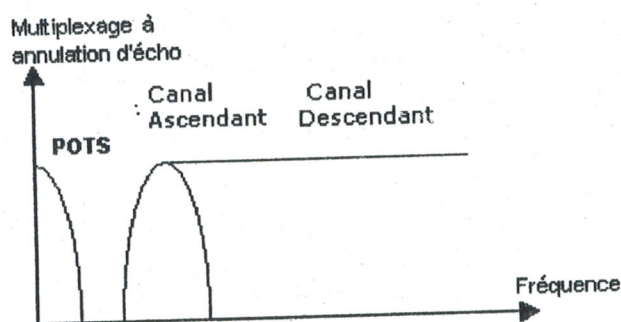


Figure I.9 Annulation d'écho

Elle introduit cependant une nouvelle perturbation en cas de présence simultanée dans un même câble de plusieurs transmissions à annulation d'écho. Il est donc important, au moment d'installer une technologie xDSL, de vérifier le nombre d'installations similaires présentes dans la gaine téléphonique qui achemine la transmission sur le réseau téléphonique. Sans ces considérations, les performances en débit et en distance seront modifiées.

L'annulation d'écho assigne donc la bande ascendante pour superposer le descendant, et sépare les deux au moyen d'annulation locale d'écho, une technique utilisée dans les modems V.32 et V.34.

➤ FDM

La deuxième solution consiste à séparer les bandes de fréquences utilisées en réception et en émission. Pour cela on utilise une technique de multiplexage en fréquence (FDM) comme le montre la figure suivante :

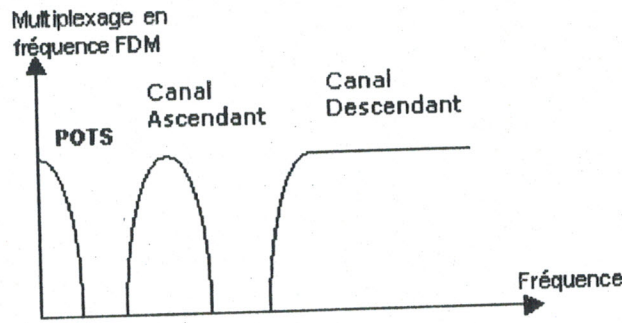


Figure I.10 **Multiplexage en fréquence FDM**

FDM (Frequency Division Multiplexing) est une technique de multiplexage par répartition de fréquence (MRF). Elle est utilisée pour accroître les débits sur paires torsadées et plus particulièrement des lignes téléphoniques. Elle assigne une bande pour des données ascendantes et une bande différente pour les données descendantes. La voie d'accès descendante est alors multiplexée temporellement en un ou plusieurs canaux à grande vitesse et un ou plusieurs canaux à vitesse réduite. La voie d'accès ascendante est également multiplexée dans les canaux à vitesse réduite correspondants.

Le multiplexage fréquentiel consiste donc à partager la bande de fréquence disponible en un certain nombre de canaux ou sous bandes plus étroites et à affecter en permanence chacun de ces canaux à un utilisateur ou à un usage exclusif.

Cette technique n'introduit pas de nouvelles interférences, à la différence de la technique précédente, mais à débit équivalent, elle utilise une bande passante plus importante, ce qui diminue la distance maximale de transmission.

7.4 Technologie CAP

Dans la modulation CAP, on génère une onde modulée qui transporte les paramètres amplitude et phase avec des états changeants que l'on sauvegarde en partie avant réassemblage. Cette variante du code en ligne QAM (modulation d'amplitude de deux porteuses en quadrature) est largement mis en oeuvre sur les modems traditionnels et est adaptée aux premiers modems ADSL mis sur le marché, il permet d'offrir trois canaux : un, réservé à la voix (0-4 kHz), deux autres à la transmission asymétriques des données.

Dans ce codage en ligne, la transmission s'effectue en bande de base transposée en fréquence, par le biais d'une modulation d'onde porteuse. Le codage CAP module une seule porteuse qui est supprimée avant la transmission, d'où le qualificatif carrierless, puis reconstruite par le modem récepteur. CAP s'apparente à la technique QAM appliquée sur les modems RTC. A l'image de ces équipements, ce codage autorise l'affectation d'un symbole à une séquence binaire de forte densité, avec des débits de 1,5 Mbit/s à 6 Mbit/s résultants

- CAP utilise aussi bien la modulation de phase que la modulation d'amplitude.

- L'ensemble des combinaisons de bits qu'on peut envoyer à un instant de modulation donné se nomme une constellation. Chaque combinaison possible de bits est représentée par un point de cette constellation (voir figure 1.11). Ces combinaisons de bits sont obtenues par une combinaison de plusieurs valeurs d'amplitude possibles ainsi que par des décalages de phase. La figure 1.11 donne un exemple de constellation pour un 2-CAP (un décalage de phase de 180° et un niveau d'amplitude) et un 64-CAP (décalages de phase de 90° et quatre niveaux d'amplitude).

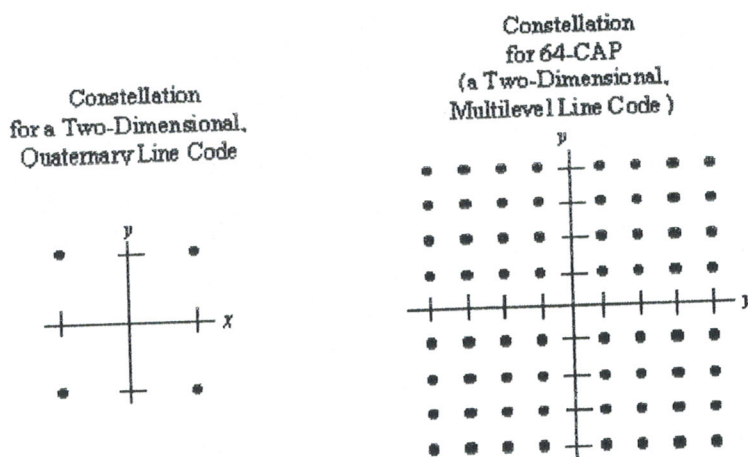


Figure 1.11 Constellation pour un codage de ligne à 2-CAP et 64-CAP.

- Les émetteurs-récepteurs CAP peuvent utiliser des constellations multiples qui créent 2^n valeurs. Cependant en réaction aux différentes conditions de la ligne (bruit, défauts...), les algorithmes CAP peuvent étendre et contracter ces constellations (c'est-à-dire N-CAP = 512-CAP, 64-CAP, 4-CAP, etc..). Cette capacité à changer la taille des constellations est une des deux façons utilisées par CAP pour s'adapter aux caractéristiques de la ligne. L'autre méthode est simplement de réduire la bande passante utilisée.
- Contrairement à DMT, CAP ne subdivise pas la bande passante disponible au dessus des 4KHz en canaux étroits. CAP peut augmenter ou diminuer la largeur de bande qu'il utilise par incrément de 1Hz.
- Dans les systèmes CAP, seulement deux canaux sont requis en plus de celui utilisé par le téléphone: "upstream" et "downstream". Ces canaux sont séparés par une technique "Frequency division multiplexing-FDM" voir figure suivante ;

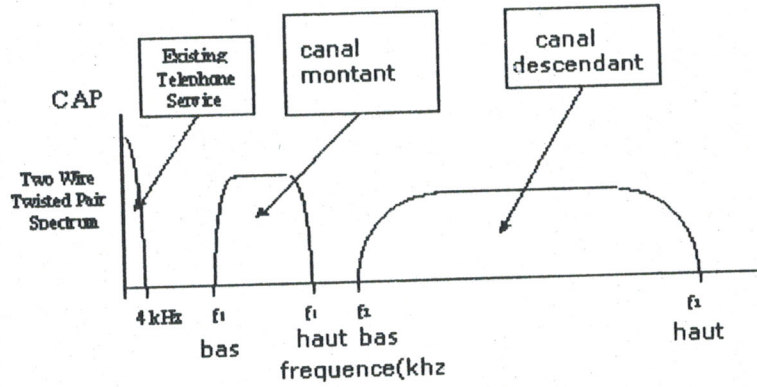


Figure I.12 Utilisation de la bande passante par CAP

7.5 La technologie DMT

Le codage DMT a été normalisé par l'ANSI, il divise chacun des spectres hauts débits en sous canaux (tonalité) espacés de 4,3 kHz. Chaque canal est modulé en phase et en amplitude (QAM) à 256 états (8 bits par moment élémentaire). Chaque canal constitue un symbole DMT. Ce code en ligne affecte donc jusqu'à 8 bits par symbole à une vitesse de modulation de 4 kBd/s. Le sens émission (ou canal ascendant) se voit octroyer vingt canaux, soit un débit total de $20 \times 8\text{bits} \times 4 \text{ k symboles} \text{ égal à } 640 \text{ kb/s}$. Le sens réception (ou canal descendant) bénéficie de 256 canaux, soit un débit cumulé de $256 \times 8 \text{ bits} \times 4 \text{ k symbole} \text{ égal à } 8,192 \text{ Mbit/s}$. En fonction des conditions des lignes, certains canaux peuvent être inhibés en fonction de la distance sur une boucle locale traditionnelle d'abonné (paire en cuivre de diamètre 0,4 mm).

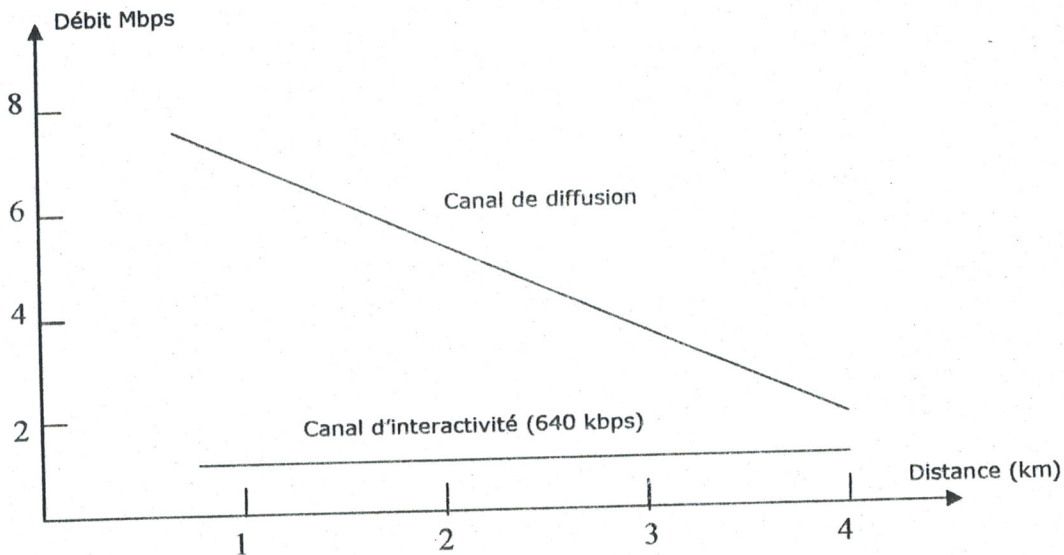


Figure 1.13 Indication du débit théorique possible en fonction de la distance sur une boucle locale traditionnelle d'abonné

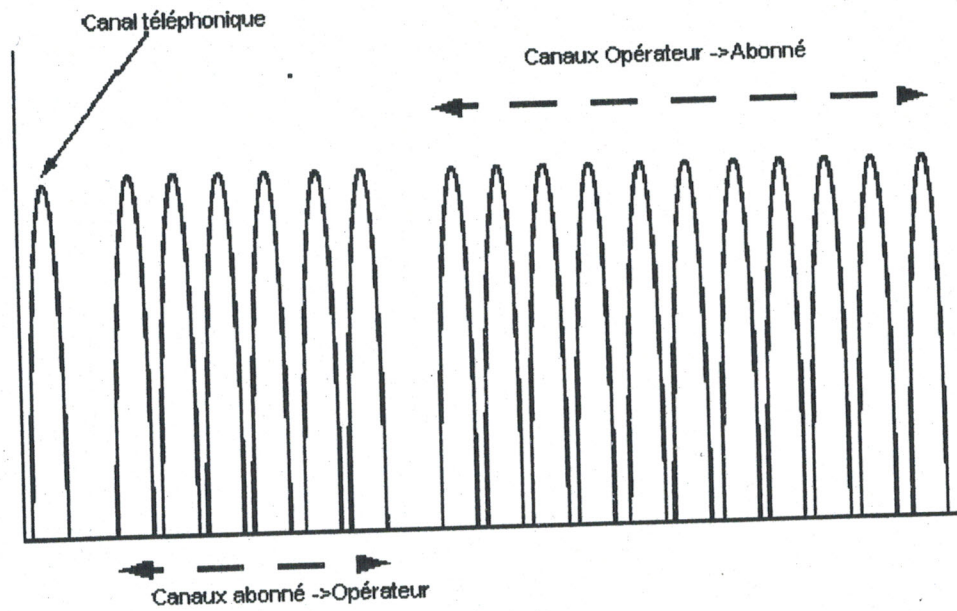


Figure 1.14 Codage DMT

La voix est transportée sur les quatre premiers kilohertz, ce qui libère le reste. Cependant l'amplification n'est pas la même pour toutes les fréquences, c'est pourquoi DMT divise en 256 portions les fréquences supérieures jusqu'à 1,1 MHz. Chacune de ces fréquences est une chaîne indépendante qui possède son propre flux, défini par le protocole appelant (ex: ADSL) Les subdivisions n'interfèrent pas avec la zone utilisée par la voix grâce au splitter.

Donc, pour résumer on peut dire que :

- Le principe de DMT est de séparer la bande passante en 256 sous-canaux distincts d'une largeur de 4,3 kHz et de placer le signal digital sur des porteuses analogiques. DMT utilise le spectre entre 26 KHz et 1.1 Mhz pour les données. Ainsi, le 1^{er} canal est réservé à la téléphonie. Les canaux 2 à 6 servent à séparer la voix des données numériques. Le flux montant occupe les 32 canaux suivants (voir figure 1.15) et le flux descendant tous les canaux restants, dans le cas où aucune zone de fréquence ne sépare les deux sens de communication et que l'annulation d'écho est en place. Le fait que la largeur de bande montante soit plus faible que la descendante explique le terme *asymétrique* dans la dénomination ADSL. De plus, certains sous-canaux sont utilisés pour la gestion de la transmission. DMT va en outre permettre d'adapter dynamiquement la capacité de chaque canal en fonction des caractéristiques de la ligne à ce moment. La bande passante restante sera utilisée pour la transmission des informations de contrôle propres à ADSL.

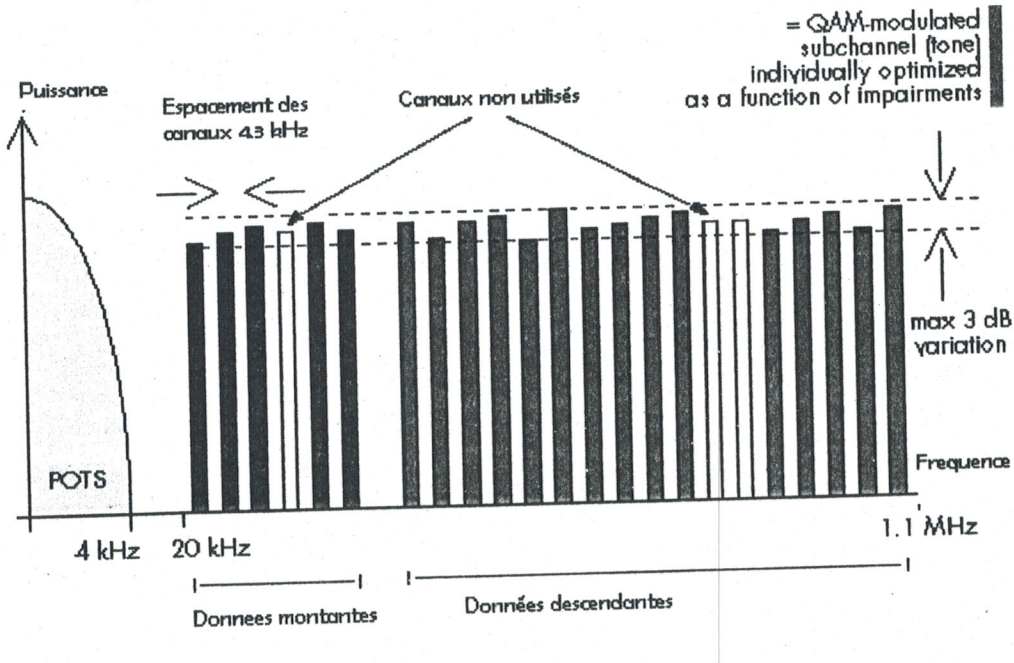


Figure 1.15 Utilisation de la bande passante par DMT.

Chacun des sous-canaux est modulé indépendamment en utilisant la technique du QAM (qui est une méthode de modulation d'amplitude de deux porteuses en quadrature (4 niveaux d'amplitude)). Avant tout transfert de données, une procédure de négociation (handshake) est mise en place pour mesurer la qualité de la transmission et l'adapter en fonction de la ligne. On appelle cette technique *rate adaptative*, car elle est capable de diminuer le débit si la qualité de la transmission se dégrade

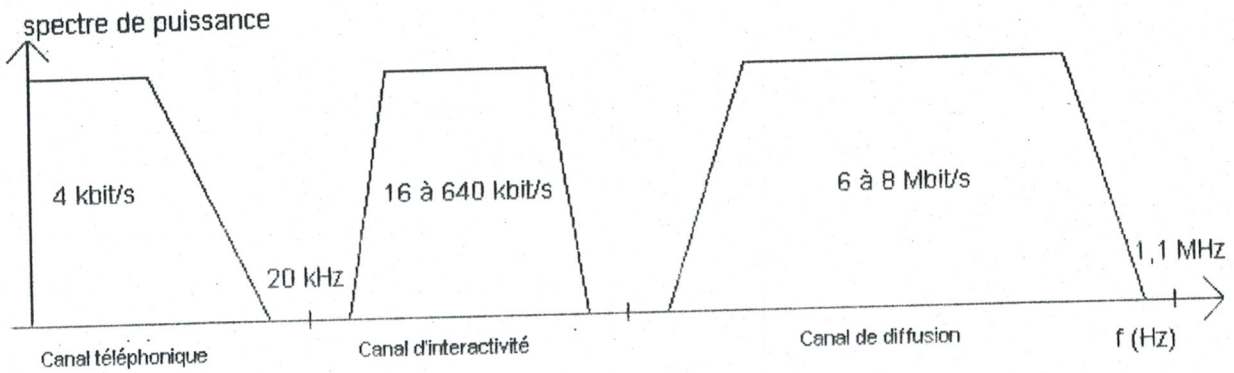


Figure 1.16 Répartition des spectres de fréquences pour la technologie ADSL

- La division de la bande passante disponible en un ensemble de sous-canaux indépendants est la clé des performances obtenues par DMT. En mesurant la qualité de chaque sous-canal et en allouant un nombre de bits par canal basé sur la qualité de ce canal, DMT optimise le signal transmis sur chaque ligne. Ainsi, DMT évite d'utiliser des zones de la bande passante où l'atténuation du signal est trop importante.

- Quand un système DMT est en opération, la qualité de chaque sous-canal est constamment surveillée, et des ajustements sont réalisés sur la distribution des bits pour maintenir les performances désirées. Donc si la qualité d'un sous-canal se dégrade au point que les performances du système soient compromises, un ou plusieurs bits de ce sous-canal sont déplacés vers un canal qui peut transporter des bits supplémentaires.
- La bande passante est divisée en un grand nombre de canaux indépendants (figure 1.15), chacun pouvant supporter un nombre de bits proportionnel à son rapport signal/bruit (figure 1.17). L'adaptation de la charge est réalisée en augmentant ou diminuant simplement le nombre de bits supporté par chaque canal (figure 1.17 - 3ème graphique). Par exemple, en ADSL, la bande passante réservée aux transferts d'éléments autres que la voix et les informations de contrôle est divisée en 256 canaux indépendants. Chaque canal possède une bande passante de 4 KHz. Donc théoriquement, le débit maximum d'informations "downstream", c'est à dire du serveur vers le client, est de $256 \text{ canaux} * 15 \text{ bits/canal} * 4 \text{ KHz} = 15 \text{ Mbps}$.

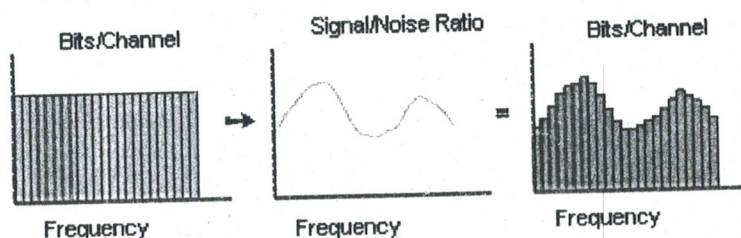


Figure 1.17 **Adaptation du taux de charge sur les canaux.**

7.5.1 Le principe de la modulation DMT

Il se compose d'un grand nombre de porteuses modulées indépendamment réparties au-delà de 26KHz, afin de laisser une bande (0 à 26KHz) à la téléphonie analogique actuelle POTS (Plain Old Telephone Service), qui contient une bande vocale (300Hz à 4.3KHz) et les signaux spéciaux utilisés par différents opérateurs. Ces porteuses sont au nombre de 256 dans la version standard (figure 1.13) entre 26KHz et 1.130MHz, chacune d'une largeur de 4.3125KHz. Elles sont toutes modulées en QAM (Quadrature Amplitude Modulation) qui permet selon leur degré de coder entre 2 et 15 Bits/Hz. Ce degré est établi lors de la phase d'initialisation et reste adaptatif selon le rapport Signal/Brui. Ce qui permet théoriquement de transmettre un maximum de 64.7Kbits/s pour chaque porteuse et un total de 16Mbits/s (avec les 256 porteuses).

7.5.2 Répartition des porteuses

Selon la norme, il existe différentes façons de répartir les porteuses liées au fonctionnement choisi. Le mode FDM, Fréquence Division Multiplexing est simple à mettre en place car il sépare les flux sur différentes fréquences : les premières fréquences sont réservées au flux montant (porteuses 0 à 26 pour la norme à 256 porteuses ou 0 à 32 pour le cas de 224 porteuses). L'inconvénient est que les porteuses les plus fiables sont prises pour le flux montant

alors que ce flux est souvent le moins utilisé. On peut procéder à une autre répartition. Dans ce cas les premières fréquences (porteuse 0 à 26) sont utilisées par les deux flux simultanément. Il y a donc une capacité accrue pour le flux descendant (hautes fréquences et partage des basses). De plus, le flux descendant bénéficie de porteuses de meilleure qualité (car moins amorties et donc avec un meilleur degré de modulation). Par contre, il est nécessaire de compenser l'écho du côté de l'utilisateur (relatif à la réflexion du signal montant) et du côté central (relatif à la réflexion du signal descendant).

7.5.3 Répartition des canaux DMT sur POTS avec annulation d'écho

Les sous-canaux 1 à 6 sont utilisés pour la téléphonie, les sous-canaux 7 à 31 pour le flux montant, le sous-canal 32 est réservé, les sous-canaux 33 à 256 sont utilisés pour le flux descendant.

A noter que les sous-canaux 16 et 64 sont utilisés pour transporter un signal pilote et que les canaux 250 à 256 sont utilisables que sur des lignes de raccordement de faible longueur. Au dessus de 1 MHz, les perturbations sont trop grandes pour permettre un flux stable.

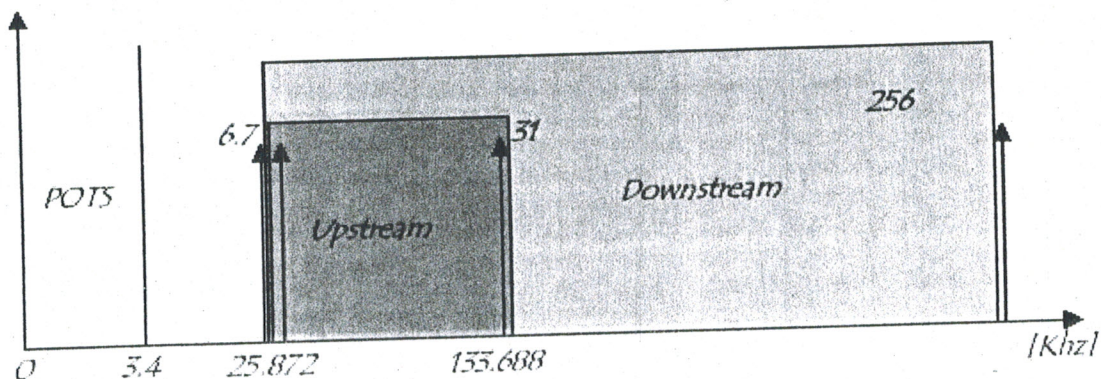


Figure 1.18 Répartition des canaux DMT sur POTS avec annulation d'écho

Dans ce cas, DMT utilise la technique d'annulation d'écho sur ces sous-canaux ce qui résulte un flux en duplex sur les sous-canaux 7 à 31. Si DMT avait appliqué FDM, seuls les sous-canaux supérieurs (33 à 256) seraient utilisés pour le downstream.

7.5.4 Les limitations

En fait, les conditions de liaison diminuent de moitié le débit maximum théorique cité ci-dessus pour des raisons d'efficacité et de fiabilité de la transmission. L'origine de ces perturbations est de différents ordres :

- Diaphonie : perturbation due à une autre ligne du faisceau,
- Caractéristiques du raccordement : ligne ne dépassant pas 3Km,
- Qualité des raccordement chez l'utilisateur : section, matériau,
- Taux de réflexion de la ligne.

Ces limitations ont pour principal effet de diminuer l'occupation des bits d'une porteuse en diminuant le degré de la modulation QAM; il se peut même qu'une partie entière de la bande passante soit éliminée du signal DMT. Il est à noter qu'environ 10% des abonnés ne disposent pas d'une ligne propre les reliant au central mais la partagent en multiplexage ce qui rend impossible une connexion ADSL, de même 15% ont un raccordement de plus de 3Km (ce qui nuit gravement à la qualité de la connexion).

7.6 Comparaison CAP et DMT

Des deux méthodes qui ont été étudiées ci-dessus, DMT et celle plus ancienne, modulation d'amplitude/phase (CAP), DMT s'avère être un meilleur choix en termes de :

- *d'interopérabilité* : les constructeurs multiples, y compris tous les constructeurs principaux de circuits intégrés de télécommunication, visent à développer les solutions inter opérables basées sur la norme DMT. En conséquence, la plupart des constructeurs sur le marché ADSL coopèrent aux questions d'interopérabilité.
- *d'exécution* : en dépit de la maturité de CAP, des essais impartiaux, tels que celui récemment conduit par Network Computing, ont prouvé que des modems de DMT pouvaient être plus rapides, plus robustes et pouvaient couvrir de plus longues distances . CAP a une exécution plus faible pour des cadences équivalentes et des boucles.
- *d'immunité au bruit* : la meilleure technique de transmission est celle qui adapte son signal au canal. DMT surveille facilement

7.6.1 Conclusion

La guerre qui a fait rage entre les techniques DMT et CAP, a été un frein dans le développement des technologies xDSL. De plus, malgré la normalisation du DMT, c'est bel et bien le CAP qui a été développé par la majorité des constructeurs. Il semble cependant que cette tendance s'inverse, et que petit à petit, on assiste à la mise en œuvre de systèmes capables de gérer les deux codages. A la limite, la technique de code pourrait bien devenir transparente pour l'utilisateur si les constructeurs définissent des normes d'interopérabilité assez précises.

8. La technologie ADSL

Comme nous l'avons déjà vu, l'ADSL utilise des spectres de fréquences différentes pour séparer le canal de diffusion du canal d'interaction (FDM Frequency Division Multiplexing). Ce procédé, plus simple que les techniques d'annulation d'échos, autorise la préservation du canal téléphonique.

Par exemple, l'utilisation de la boucle locale pour la diffusion d'une image vidéo nécessite la mise en œuvre de techniques spécifiques (DSL). L'architecture d'un tel système dans le cas d'un lien ADSL est représentée par la figure 1.19

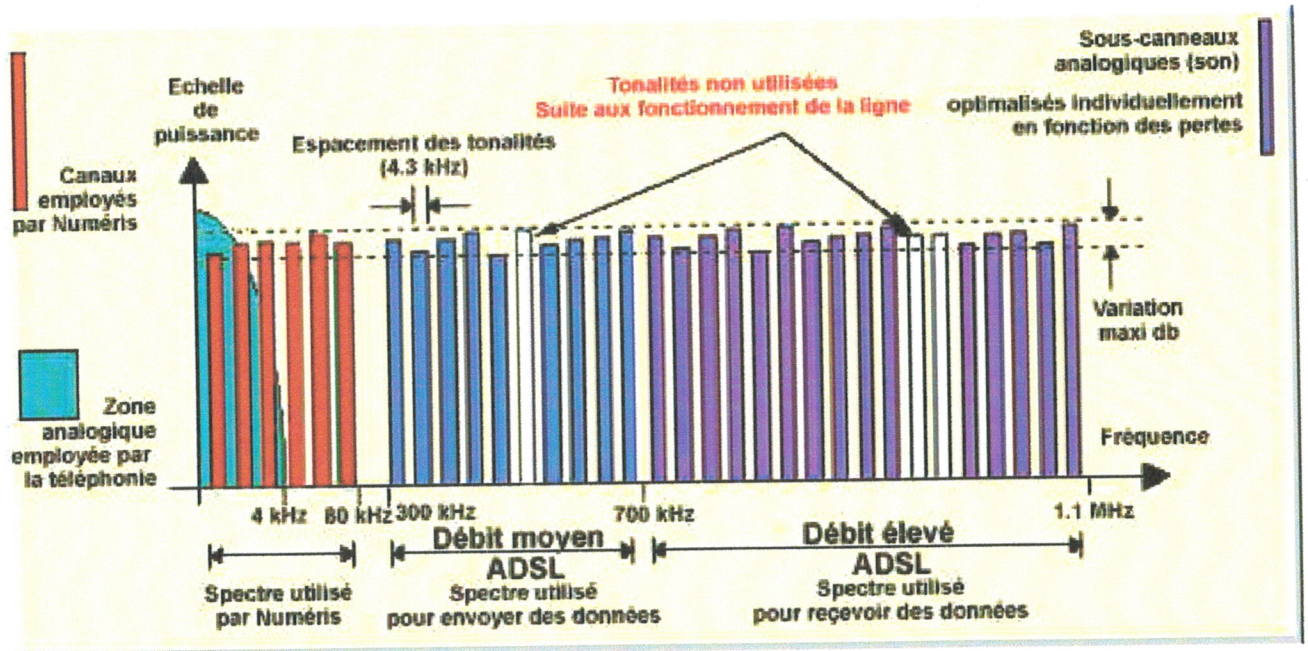


Figure 1.19 Spectre de fréquence spécifique à la technologie ADSL

Le spectre de fréquences ADSL héberge trois canaux : un canal de diffusion haut débit dans le sens réseau-abonné pour recevoir des données (débit de plusieurs Mbit/s), un autre canal de diffusion dans le sens abonné-réseau pour émettre, qui ne demande pas un débit important : par exemple 640 kbit/s pour interagir sur cette diffusion et transmettre des données de la part de l'utilisateur, et un canal réservé à une communication téléphonique classique.

La base du système est constitué d'un multiplexeur d'accès ADSL qui multiplexe les flux voix provenant des réseaux de commutation de circuit et le flux vidéo en provenance du réseau haut débit. Chez l'utilisateur, une terminaison numérique ADSL achemine le flux voix vers le poste téléphonique et le flux vidéo vers le récepteur de télévision

Les modems effectuent un traitement spécifique du signal pour réduire l'influence du bruit et supprimer les échos parasites. Ces techniques permettant d'atteindre un débit de plusieurs Mbits/s sur une distance de quelques kilomètres.

Les communications téléphoniques nécessitent une largeur de bande de 4 KHz, or les câbles reliant les centraux téléphoniques aux utilisateurs possèdent tous une bande passante d'environ 1 Mhz. On constate donc qu'il reste une bande passante de 966 KHz qui est inutilisée. Les modems ADSL ont été conçus pour utiliser l'entièreté de la bande passante disponible sur les câbles tout en permettant l'utilisation normale du téléphone.

aux utilisateurs d'accéder au WWW ou tout autre serveur tout en téléphonant ou envoyant un fax par exemple.

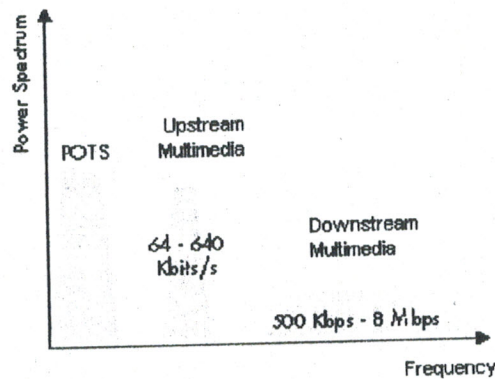


Figure 1.20 Répartition de la bande passante

ADSL a tout d'abord été développé pour recevoir la télévision par le réseau téléphonique classique. Mais le développement d'Internet a trouvé une autre fonction à cette technologie, celle de pouvoir surfer rapidement sur le net et sans occuper une ligne téléphonique. C'est actuellement une des seule technologie disponible sur le marché qui offre le transport de la TV/vidéo sous forme numérique (MPEG1 ou MPEG 2) en utilisant un raccordement téléphonique.

Le standard ADSL a été finalisé en 1995 et prévoit :

- Un canal montant avec une capacité maximale de 800 kbits/s
- Un canal descendant avec un débit maximal de 8192 kbits/s
- Un canal téléphonique avec raccordement analogique ou RNIS .Ce canal voix traditionnel, qui exploite les fréquences les plus basses, est extrait au niveau du modem par un splitter (séparateur) qui filtre le signal. Le canal voix reste opérationnel même si la transmission ADSL est hors d'usage, garantissant la continuité et la disponibilité du service de téléphone.

D'un point de vue technique ADSL fonctionne en full duplex grâce à un multiplexage fréquentiel, permettant de faire transiter simultanément les signaux montant et descendant accompagnés également des signaux portant la voix téléphonique.

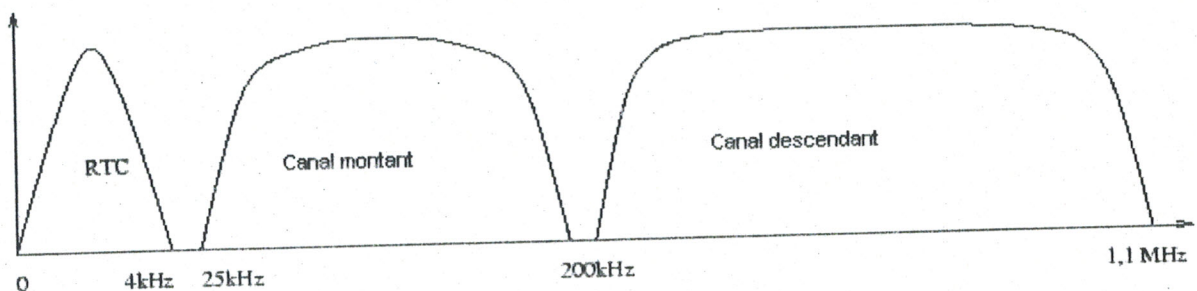


Figure 1.21 Multiplexage fréquentiel utilisé par ADSL (échelle des fréquences non réelles)

La figure 1.21 illustre ce multiplexage dans le cas où les fréquences pour les voies montantes et descendantes ont été clairement séparées. Pour gagner encore en largeur de bande, et donc en débit, on peut envisager de rapprocher les deux espaces de fréquences mais il faut alors annuler les perturbations (phénomène d'écho) que subissent les signaux montant et descendant émis simultanément.

Comme pour toutes les technologies DSL, la distance de boucle entre le central et l'utilisateur ne doit pas dépasser certaines échelles afin de garantir un bon débit des données (voir tableau).[9]

Downstream : [Kbit/s]	Upstream : [Kbit/s]	Diamètre du fil : [Mm]	Distance : [km]
2048	160	0.4	3.6
2048	160	0.5	4.9
4096	384	0.4	3.3
4096	384	0.5	4.3
6144	640	0.4	3.0
6144	640	0.5	4.0
8192	800	0.4	2.4
8192	800	0.5	3.3

Tableau 3 Débits en fonction de la distance et du diamètre du câble

8.1 Le signal ADSL

Lors de l'établissement de la connexion une phase d'initialisation de 20 à 60 secondes est requise. Durant cette phase, le modem ADSL et le serveur échangent un protocole complexe destiné à la communication de leur configuration respective et à établir les paramètres relatifs à la qualité de la transmission, c'est alors que le débit maximal est défini. Concrètement, il s'agit de l'envoi des fréquences 'pures', les porteuses dans les deux directions afin d'établir les courbes des niveaux servant à la fois à la détermination de la qualité de la communication et également à établir les corrections à faire sur le signal reçu en fonction de la porteuse (c'est-à-dire en fonction de la fréquence). C'est également durant cette phase qu'un processus d'apprentissage est mis en oeuvre sur les paramètres complexes de la liaison afin de pouvoir corriger les phénomènes d'échos sur la ligne. Le choix du type de modulation a également lieu durant cette phase d'initialisation. Cette phase de configuration initialise des paramètres qui peuvent évoluer dynamiquement au cours de la connexion, c'est pourquoi l'ADSL peut optimiser son débit même dans des cas très défavorables. De même, lors de brusques changements sur la ligne, une procédure abrégée de réévaluation des paramètres de la ligne permet généralement de récupérer la connexion en

quelques secondes. Ces paramétrages évolutifs ont un coût car ils obligent le modem et le serveur à surveiller en permanence la qualité des liaisons.

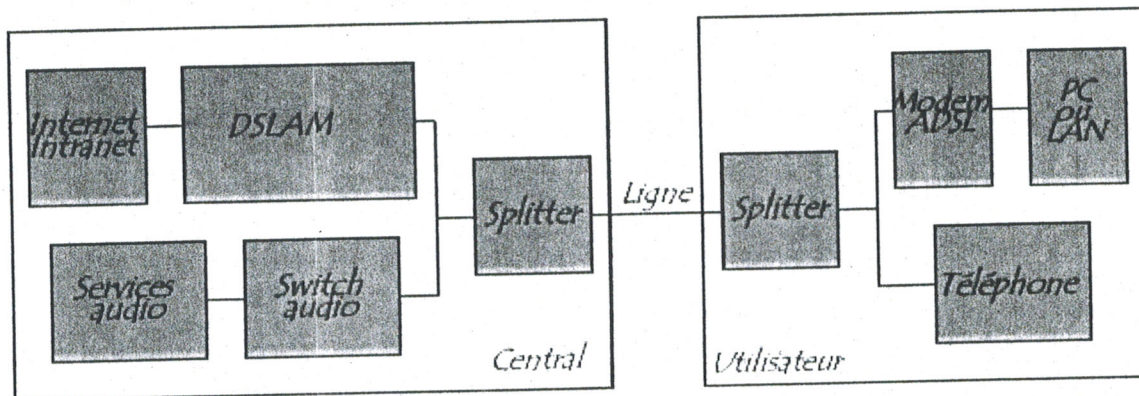


Figure 1.22 Divers blocs fonctionnels composant une liaison ADSL

La séparation entre les 2 catégories de service est faite dans le réseau[8] et chez le client par splitter

L'ajustement du débit par canal est constant. Si la qualité se dégrade sur un canal en cours de transmission, le système peut diminuer le nombre de bits alloués sur ce canal, et les répartir sur d'autres (voir figure 1.23)

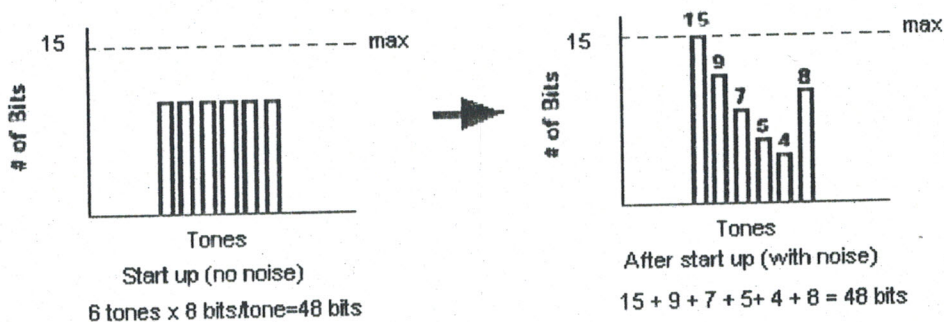


Figure 1.23 Ajustement des débits par canaux en cours de transmission

Cette possibilité d'ajustement à la qualité de la ligne en fait une technologie particulièrement adaptée au réseau téléphonique commuté dont la qualité peut être très inégale suivant les localisations géographiques.

La version d'ADSL telle que décrite ci-dessus, appelée parfois ADSL Full Rate n'a pas connu un engouement immédiat chez les opérateurs. DMT a été retenu en 1993 par l'ANSI, l'UIT (Union Internationale des Télécommunications) a confirmé le choix de DMT pour son standard ADSL en 1998. Malgré cet effort de normalisation, ADSL a été encore peu déployé.

Plusieurs raisons expliquent cela. L'ADSL Full Rate exige la présence d'un filtre (splitter) chez l'abonné. La pose de ce filtre doit être faite par un technicien spécialisé. Par ailleurs, l'usage

Initialement prévu de l'ADSL, à savoir la diffusion de vidéo à la demande a été fortement concurrencée par les opérateurs câbles ou satellite. Une nouvelle cible est apparue pour ADSL : l'accès à Internet. Mais pour séduire opérateurs et utilisateurs, il fallait un produit moins coûteux et plus simple à installer. Comme par ailleurs les débits nécessaires pour un accès à Internet sont moindre que ceux nécessaires à de la vidéo, une nouvelle version d'ADSL a vu le jour : ADSL Lite.

8.2 ADSL Lite

En décembre 1998, une importante étape a été franchie par l'UIT en ce qui concerne la normalisation des systèmes DSL. Le standard le plus attendu était l'ADSL-Lite, qui est en fait une version allégée de l'ADSL. Il est destiné aux accès rapides à Internet et fonctionne à des débits inférieurs à ceux de son aîné (de l'ordre de 1,5 Mb/s, qui sont toutefois 25 fois supérieurs à ceux des modems V.90). Il est moins complexe à mettre en œuvre car il ne requiert pas de séparateur de ligne (POTS splitter). Il reste basé sur DMT, mais utilise 127 sous-canaux, réduisant la bande totale à 550 kHz au lieu de 1,1 Mhz. Les débits offerts ont de 1,5 Mbit/s en réception et 512 kbit/s en émission. Le filtre chez l'abonné n'est plus nécessaire, celui-ci est inclus dans le modem ADSL.

Dans sa version Lite, elle permet de connecter à Internet un particulier en utilisant simplement sa ligne téléphonique habituelle comme illustré dans la figure 1.24

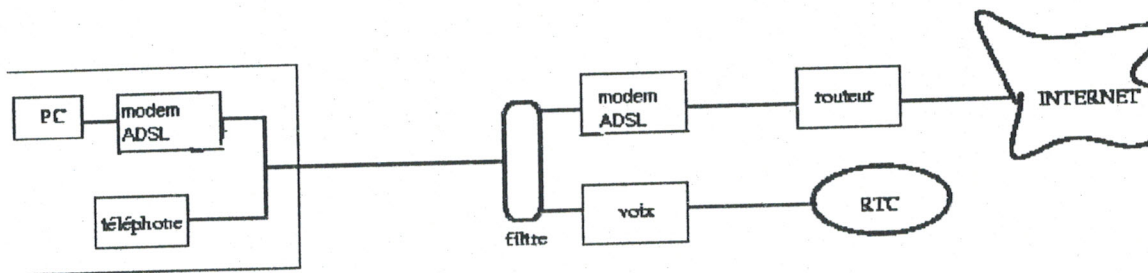


Figure 1.24 Connexion à Internet via ADSL Lite[13]

Pour conclure nous pouvons dire que La **norme G.Lite**, qui définit la version "légère" de l'ADSL (encore appelée "Universal ADSL", "splitterless ADSL", ou "lite ADSL"), règle les principaux problèmes :

- Elle fixe les débits : 1.5 Mbps dans le sens descendant, et 384 Kbps dans le sens montant.
- Elle intègre le splitter au modem (splitterless ADSL).
- Elle impose un modem auto-configurable (Plug and Play).
- Elle choisit le procédé de modulation DMT de préférence au procédé CAP

8.3 Caractéristiques des technologies ADSL

Pour la transmission des données, ADSL utilise les deux techniques de modulation qui ont été étudiées précédemment :

- Le codage **CAP** : très utilisé au début de l'ère ADSL, ce type de modulation n'a jamais été correctement normalisé et, de ce fait, il n'y a pas d'interopérabilité possible entre équipements de fabrications différentes.
- Le codage **DMT** : technique de modulation plus récente. Son principe repose sur l'utilisation d'un grand nombre de sous-porteuses réparties sur la bande de fréquence utilisée par le système.

Le procédé utilisé pour la mise en œuvre de DMT s'apparente à celui utilisé par COFDM. (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) Il s'agit de la technique de multiplexage adoptée par la norme de radiodiffusion numérique (DAB : Digital Audio Broadband).

Les concepteurs du processus de modulation COFDM ont tourné la difficulté par l'utilisation d'une transformée de Fourier inverse. D'un point de vue pratique, la nécessité d'opérer très vite, en temps réel, conduit à utiliser une FFT (Fast Fourier Transform = transformée de Fourier rapide) travaillant en numérique, suivant des algorithmes très performants.

Comme on parle de processeurs " massivement parallèles en informatique, on peut dire que l'une des caractéristiques du procédé COFDM est l'utilisation des transmissions " massivement parallèles " dans le domaine des fréquences. L'information à transmettre est répartie sur un nombre très élevé de porteuses adjacentes.

Ces porteuses ne sont pas issues de générateurs ayant une existence concrète, comme dans tous les procédés classiques de modulation numérique ou analogique, mais leur existence provient d'un artifice mathématique utilisant une transformée de Fourier.

8.4 Architecture

Comme nous l'avons vu, un équipement ADSL doit être en mesure de moduler ou démoduler jusqu'à 256 porteuses. L'utilisation de la technologie mise en œuvre pour le multiplexage FDM classique n'est pas envisageable techniquement sur un si grand nombre de porteuses.

Le signal ADSL utilisant une bande de fréquence supérieure à celle du réseau téléphonique, il est possible de le séparer à l'aide de filtres passe-haut et ainsi de le traiter indépendamment des communications téléphoniques. Cela impose des séparateurs (splitters) à chaque extrémité de la ligne. De plus, il faut également un dispositif de terminaison de ligne (le modem pour l'abonné) qui doit, du côté du central, assurer la transition des deux flux vers une dorsale ATM (Asynchronous Transfer Mode) permettant un débit de 155 Mbits/s. On peut remarquer que l'abonné aura besoin, sur son ordinateur, d'une carte spéciale pour se raccorder au modem qui sera soit une carte réseau LAN (Local Area Network), soit une carte ATM F25.6 (à 25.6 Mbit/s).

Donc pour compléter un circuit ADSL, il est nécessaire de disposer d'un ADSL Network Termination (ANT) du côté utilisateur et un Access Adapter (AA) au terminal téléphonique.

- L'ANT est composé du modem ADSL proprement dit, et d'un coupleur POTS (pots splitter).
- L'AA est composé d'un rack contenant un ensemble de modems ADSL, chacun étant lui-même raccordé à un coupleur POTS. L'AA est également composé d'un Network Interface (NI) qui permet d'assurer la connexion avec n'importe quel type de réseau (ATM...).

Au cœur des deux AA et ANT, se trouve un modem ADSL qui module et démodule les données numériques en utilisant des algorithmes complexes, de sorte qu'elles puissent être transmises sur la paire torsadée. Les coupleurs POTS sont utilisés pour combiner les services téléphoniques analogiques et les services ADSL numériques, permettant ainsi aux services téléphoniques traditionnels de coexister avec les nouveaux services rapides sur la même paire torsadée. D'une manière générale, le couple modem ADSL et coupleurs POTS sont regroupés au sein d'un même boîtier "le modem ADSL".

A l'autre extrémité de la ligne, dans le standard de la compagnie de téléphone, on installe également un splitter (Figure I.19). Son filtre passe-bas aiguille la voix vers un commutateur de circuits. Son filtre passe-haut est relié à un modem, qui reconstitue les données numériques, et les dirige vers un réseau de transmission de données numériques. L'ensemble de ces dispositifs est appelé DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer), parce qu'il regroupe le trafic issu de plusieurs lignes d'utilisateur sur une même ligne à haut débit.

8.4.1 DSLAM

Les DSLAM forment l'autre extrémité de la liaison, chez l'opérateur. Ce sont des équipements dont le rôle est de récupérer les données émises par l'utilisateur depuis son équipement terminal au travers de son modem ADSL. Ces équipements intègrent des modems situés à la frontière de la boucle locale et du réseau de l'opérateur.

Cet élément n'accueille pas seulement des cartes ADSL mais peut aussi accueillir différents services DSL tels que SDSL ou HDSL en y insérant les cartes de multiplexage correspondant. Chaque carte supporte plusieurs modems ADSL.

Les éléments regroupés dans le DSLAM sont appelés ATU-C (ADSL Transceiver Unit, Central office end). En fait tous les services disponibles sur le réseau (Internet, LAN-MAN-WAN, Video MPEG) arrivent par broadband vers une station DSLAM pour être ensuite redistribués vers les utilisateurs. La maintenance et la configuration du DSLAM et des équipements ADSL est effectuée à distance. [17]

La conception du DSLAM permet :

- une utilisation plus rationnelle des réseaux, car le transport des données et l'interrogation d'Internet n'encombrent plus les commutateurs et les circuits de transport de la voix, comme c'est le cas avec les modems analogiques et le RNIS
- une économie sur le transport des données, qui est moins onéreuse sur un réseau à commutation de paquets que sur un réseau à commutation de circuits.

La conception du DSLAM permet :

- une utilisation plus rationnelle des réseaux, car le transport des données et l'interrogation d'Internet n'encombrent plus les commutateurs et les circuits de transport de la voix, comme c'est le cas avec les modems analogiques et le RNIS
- une économie sur le transport des données, qui est moins onéreuse sur un réseau à commutation de paquets que sur un réseau à commutation de circuits.

8.4.2 Le splitter et le micro filtre

Le splitter est installé dans le central téléphonique, en aval du DSLAM et switch audio.

A l'extrémité de la ligne téléphonique qui se trouve chez l'utilisateur, on installe un "splitter" (Figure I.25). Ce dispositif est constitué :

- d'un filtre passe-bas, auquel on raccorde un téléphone analogique ;
- d'un filtre passe-haut, auquel on raccorde un micro-ordinateur via un modem approprié.

Si l'utilisateur a une connexion ISDN, il devra installer un splitter chez lui en amont de son modem et de son NT ISDN. S'il a une connexion analogique traditionnelle, il n'a pas besoin d'installer de splitter chez lui, mais un microfiltre avant chaque appareil téléphonique [14].

8.4.2.1 Rôle du splitter

Le splitter est un filtre d'aiguillage qui sépare la bande passante réservée au service téléphonique de la bande passante utilisée pour la transmission ADSL. Il assure un découplage suffisant pour éviter que les signaux émis sur l'une des bandes fréquences ne viennent perturber le fonctionnement de l'autre. A noter que l'installation du splitter est obligatoire pour avoir ADSL avec une connexion ISDN.

8.4.2.2 Rôle du microfiltre

Le microfiltre est un filtre passe-bas et est installé sur les connexions analogiques. Il n'y a donc pas besoin d'installer de splitter.

8.4.2.3 procédé splitterless

L'intégration du splitter au modem est un facteur de réduction des coûts, car la transformation d'une ligne ordinaire en ligne ADSL ne nécessite plus l'intervention d'un agent au domicile de l'abonné. La nouvelle norme rend l'ADSL "splitterless", au grand soulagement de ses partisans.

plus par un câble USB, dont le débit maximum (12 Mbps) est amplement suffisant, ce qui évitera l'installation d'une carte Ethernet dans l'ordinateur.

Le canal dédié au téléphone est séparé des canaux dédiés aux données par un filtre passe-bas (Splitter) passif. Le filtre envoie également l'intégralité du signal au modem ADSL (ATU-R). Celui-ci est doté d'un filtre passe-haut qui élimine le canal dédié au téléphone. Le signal est ensuite traité par la technologie DMT pour être transmis à l'équipement informatique via une liaison de type Ethernet 10BaseT ou ATM25.

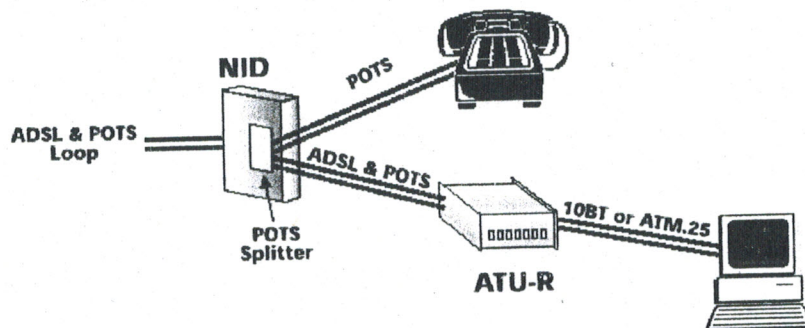


Figure 1.25 Séparation du téléphone et des données chez l'utilisateur en ADSL

Il existe à l'heure actuelle trois types de modems suivant les besoins de l'utilisateur :

- Avec interface 10/100 baseT, pour les PC équipés de carte Ethernet
- ATMD 25 pour les pc équipés de carte ATM ou pour redistribuer ADSL sur un réseau ATM
- Avec interface USB, pour les PC équipés d'interface USB

Dans une petite entreprise, on peut regrouper les micro-ordinateurs sur un même réseau Ethernet, et raccorder ce dernier au modem ADSL via un concentrateur (certains constructeurs envisagent de regrouper les deux appareils en un seul). On peut ainsi interroger Internet à partir de chacun des postes, en n'utilisant qu'une seule ligne téléphonique -- et une seule adresse IP, si le modem permet d'attribuer l'adresse à la volée.

Le circuit est en principe identique du côté client et du côté central. Les signaux sur la ligne sont séparés à l'aide d'un diplexeur.

1. *l'émission* : Les données sont transmises à un codeur qui distribue les bits à coder sur les différentes porteuses en fonction de la configuration de la connexion (initialisation) et du nombre de bits/s qu'elles peuvent transmettre. Il effectue également une correction FEC, Forward Error Correction. Ensuite, les bits sont traités en parallèle pour en obtenir une transformée de Fourier inverse. On obtient ainsi, à partir du spectre numérique de fréquence sur N bits, des porteuses indépendantes sous forme de signal temporel sous forme de nombre complexe de 2N bits (partie réelle + partie imaginaire). Un entête de synchronisation est ajoutée périodiquement après la conversion parallèle/série. Pour finir, le signal passe dans le correcteur d'échos qui déforme le signal de façon à le rendre compréhensible lors de la

réception à l'autre bout de la ligne (cela se fait conformément à une procédure d'apprentissage lors de l'initialisation de la connexion). Le signal peut alors être transmis à la sortie d'un convertisseur N/A.

2. **La réception** : Le signal reçu passe dans un convertisseur A/N puis dans le compensateur d'échos. Ensuite, un égaliseur permet de remettre à niveau le signal de chaque porteuse en fonction de l'atténuation qui a été constatée lors de la configuration et périodiquement corrigée. On supprime ensuite l'entête et on passe le signal dans un convertisseur série/parallèle. On peut alors utiliser une transformée de Fourier sur des portions de $2N$ bits (correspondant au degré de la modulation QAM de la porteuse), pour passer au domaine fréquentiel, ce qui donne les états de phase de la modulation QAM sous forme de N bits. Il reste alors à utiliser le FEC pour éliminer d'éventuelles erreurs de transmission et à remettre dans l'ordre les bits venant des différentes porteuses.

8.4.4 *Implantation facile*

L'utilisation d'un modem Plug and Play s'impose : aujourd'hui, les utilisateurs de micro-ordinateurs (et plus spécialement les particuliers) n'admettent plus que les périphériques soient difficiles à configurer. "Plug and Play" signifie que le modem doit être automatiquement reconnu et configuré par le système d'exploitation. Le fait que ce dernier soit "ADSL-ready" facilite l'écriture des programmes pilotes par les fabricants de modems (ex : Windows 98), et leur installation par l'utilisateur. On notera que l'utilisation du connecteur USB (pour relier le modem à l'ordinateur) va de pair avec le caractère Plug and Play.

9. Les primitives de service

Nous allons décrire dans ce qui suit les primitives de service utilisées par les modems ADSL. Etant donné que nous nous trouvons au niveau physique (NIV1 du modèle OSI), il en existe un nombre limité: (modèle OSI voir annexe B)

Primitives	Paramètres	Req	Ind	Resp	Conf
CONNECT	No de tél. de l'appelé	X	X	X	X
DISCONNECT		X	X		
DATA	Données à transmettre	X	X		

- La primitive CONNECT va permettre au modem appelant d'établir la liaison avec le destinataire. Dans le cas de modems ADSL, une phase d'initialisation du circuit est nécessaire. Cette phase se compose de trois opérations :

- ✓ Activation de la ligne et réception de la confirmation du récepteur.
 - ✓ Vérification du matériel émetteur/récepteur.
 - ✓ Analyse du canal. ADSL utilisant des techniques de modulation particulière (DMT ou CAP) qui permettent d'utiliser la partie de la bande passante la moins soumise aux perturbations (bruit...), pour ce faire, une phase préalable au transfert est l'analyse des conditions de la ligne.
- La primitive **CONNECT.req** est utilisée par une entité de niveau deux (liaison de données) qui demande d'établir une connexion.
 - **CONNECT.ind** indique à l'entité destinatrice qu'on veut établir une liaison avec celle-ci. Cette entité de niveau deux va renvoyer un **CONNECT.resp**
 - **CONNECT.resp** indique qu'elle est d'accord d'établir une liaison avec une entité paire.
 - La dernière primitive, le **CONNECT.conf**, est employée pour indiquer à l'entité de niveau deux réceptrice que la liaison a bien été ouverte. Certains problèmes peuvent survenir, par exemple la ligne est coupée, ou le modem récepteur est en panne ou hors tension... Dans ce cas, il n'y aura jamais de **CONNECT.resp**, et l'entité initiatrice cessera d'émettre.
- L'entité émettrice peut cesser la communication, dans ce cas un **DISCONNECT.req** va être utilisé par l'entité de niveau deux émettrice, l'entité de niveau deux réceptrice étant avertie par un **DISCONNECT.ind**.

L'entité réceptrice peut également cesser la communication.

- La primitive **DATA** va permettre à l'entité de niveau deux émettrice d'envoyer ses données vers l'entité réceptrice, une fois la communication établie. La primitive **DATA** peut également être utilisée par l'entité réceptrice pour envoyer des informations de contrôle vers son émetteur.

9.1 Les Trames ADSL

- L'en-tête ADSL (ou overhead) permet la transmission de nombreuses informations. Ses fonctions sont :
 - synchronisation des canaux ;
 - reconfiguration à distance et adaptation du débit (occ : Operations Control channel) ;
 - détection des erreurs (crc : Cyclical Redundancy Check) ;
 - Correction des erreurs (fec : Forward Error Correction) donc permet de corriger certaines erreurs sans avoir à retransmettre de trames ;
 - Supervision (oam : Operation, Administration and maintenance).
- La supertrame ADSL est composée de 68 trames ADSL :
 - les bits sont organisés en trame ;

- Les trames sont rassemblées dans des supertrames ;
- la supertrame ADSL est constituée de 68 trames ADSL ;
- trames 0 et 1 transportent des informations nécessaires au contrôle d'erreur crc ainsi que des informations de gestion de la liaison donc transportent des ib (indicator bits) ;
- trames 34 et 35 transportent aussi des ib ;
- à la fin de chaque supertrame => trame de synchronisation ;
- pas besoin d'adresse de destination ni d'identifiant de connexion (point à point) ;
- fast byte contient les informations crc et ib ;
- fec permet de corriger certaines erreurs
 - bit los (ib12) :
- Loss Of Signal :
- utilisé par l'équipement ATU (ADSL Transport Unit) afin d'indiquer que le signal envoyé par l'émetteur à l'autre extrémité de la liaison a disparu ou que sa puissance est tombée à un niveau trop bas ;
- est à la valeur 1 lorsque la puissance du signal reçu est au dessus du seuil défini, à 0 dans le cas contraire

10. La technologie ATM

Comme nous avons évoqué plus haut ATM, il semblerait judicieux de faire un bref aperçu sur cette technologie

La normalisation des réseaux ATM, à la fin des années 80, avait pour ambition de proposer une solution capable de remplacer tous les autres réseaux et de permettre le passage de la parole téléphonique et de toutes les applications à fortes contraintes de temps réel. Cette solution a pris pour nom la commutation de cellules afin de la différencier de la commutation de trames classiques [1].

ATM est la contraction d'Asynchronous Transfer Mode : mode de transfert asynchrone. Le terme asynchrone qualifie le mode de transfert des informations par opposition au RTC (Réseau Téléphonique Commuté) ou RNIS (Réseau Numérique à Intégration de Services) qui sont des réseaux synchrones. En d'autres termes, cela signifie que dans un réseau ATM, la source et la destination ne sont pas synchronisées.

Concrètement, cela implique qu'en l'absence de trafic, il n'y a pas de données de synchronisation qui sont véhiculées sur le réseau. Cette technologie permet le transport et l'échange de données générées par des applications multimédia ou d'équipement tels que le téléphone, les ordinateurs, les caméras vidéo, etc. ATM est une technologie LAN, MAN, WAN.

Les objectifs affichés par les promoteurs de l'ATM étaient particulièrement ambitieux :

- Unification des réseaux. Remplacer les réseaux à commutation de circuits et à commutation de paquets par une technologie qui allierait les avantages des deux, fondée sur une commutation de cellules.
- Intégration de services. C'était déjà l'objectif du RNIS, mais ce dernier fonctionne en mode synchrone et offre un débit fixe auquel toutes les applications [2] doivent s'adapter.

Le mode asynchrone de l'ATM offre toute la flexibilité et la souplesse pour accueillir des services aux exigences très diverses : audio, vidéotransmission, tout type de transfert de données. Une relation de temps stricte et un débit constant seront nécessaires pour la téléphonie, alors que les données bénéficieront d'un débit variable.

Les réseaux ATM sont constitués de trois éléments distincts : utilisateurs (périphériques de terminaison), commutateurs et interfaces. Dans la technologie de réseau ATM, il existe deux types d'interfaces pour décrire comment ces éléments communiquent : interfaces utilisateur-réseau (UNI) et interfaces réseau-réseau (NNI)

Ces deux interfaces ont été définies dans le monde ATM suivant que la cellule provient de l'extérieur du réseau ou passe d'un nœud de commutation à un autre à l'intérieur du réseau :

- L'interface NNI (Network Node Interface), qui se situe entre deux nœuds du réseau.
- L'interface UNI (User Network Interface), qui est utilisée pour entrer dans le réseau ou pour en sortir.
- Ces deux noms d'interfaces, UNI et NNI, sont maintenant utilisés dans la plupart des réseaux, même s'ils ne sont pas ATM. [1]

Les spécifications UNI et NNI fournissent une méthode de signalisation standard pour la communication entre les stations terminales et les commutateurs ATM

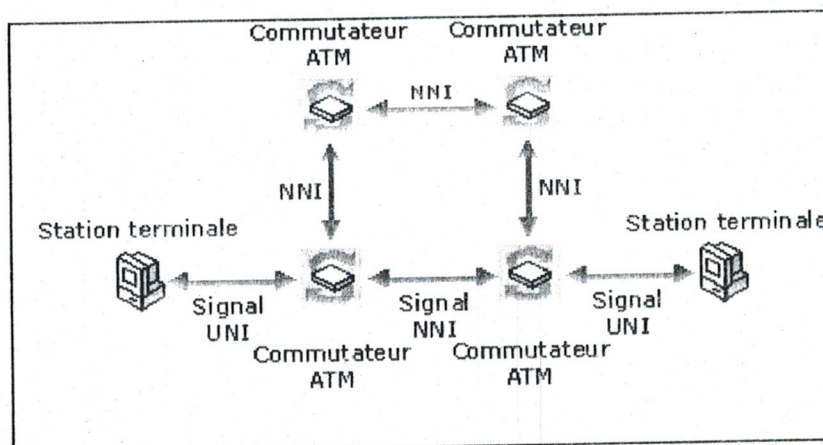


Figure 1.26 Communication entre stations et commutateurs

10.1 Caractéristiques d'ATM

- Technologie de commutation basée sur des cellules
- Cellules de 53 octets (48 octets de données et 5 octets d'en-tête) : compromis entre 32 octets (européens) et 64 octets (américains). La cellule ATM est une trame et non un paquet. Pour retrouver le début et la fin de cette trame lors d'une transmission, il suffit de compter jusqu'à 424 bits pour déterminer la fin de la trame.

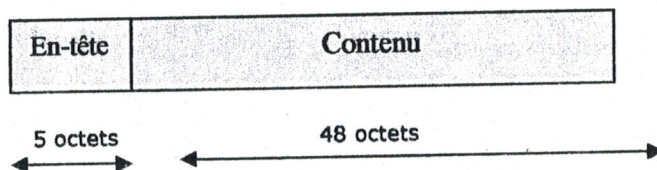


Figure I.27 une cellule ATM

- aucun contrôle d'erreurs mis à part un contrôle rudimentaire sur l'en-tête
- technologie orientée connexion (comme RNIS, Transpac) opposé à Ethernet et Token Ring qui eux ne sont pas orientés connexion
- permet de faire le lien entre un réseau orienté et non orienté connexion en utilisant certains mécanismes
- prise en compte de la qualité de service au niveau des négociations (notion de contrat entre l'utilisateur et le réseau visant à obtenir une certaine qualité de service)

10.2 Intérêts d'ATM

- technologie pour voix-données-images (négociation de QoS). Les liaisons ATM utilisent un mécanisme de priorité des données, appelé QoS (Quality Of Service). Ceci signifie que les messages haute priorité sont envoyés directement. Cette possibilité permet de transférer via des liaisons ATM toutes sortes d'informations (données, voix et autres). La transmission est supposée sans erreur. Ceci signifie que le message n'est jamais rémis. Ceci nécessite un réseau (câblage) avec de faibles pertes.
- support d'une large gamme de débits (du Mbit/s au Gbit/s).
- technologie sans limite géographique (LAN, MAN, WAN)
- processus de normalisation unique (ATM Forum)
- bande minimale garantie à chaque connexion
- ATM supporte différentes qualités de services aptes à satisfaire au mieux les besoins du trafic d'application de toute nature (notion de multiservice et multimédia).
- le multiplexage statistique d'ATM permet un partage optimal de la bande passante qui est alloué à la demande
- la tarification de l'usage d'une infrastructure ATM peut être basée sur le trafic effectif
- La notion de connexion virtuelle permet d'assurer une certaine qualité de service de bout en bout.

Technologie en mode connecté, les données ne sont acheminées dans le réseau qu'après établissement d'une voie virtuelle (VCC Virtual Channel Connection), ce circuit peut être établi de façon soit bidirectionnel un mode point à point (unicast) soit unidirectionnel (un mode point à multipoint).

Il existe deux types de circuits virtuels : l'un permanent, l'autre commuté :

les PVC (Permanent Virtual Circuit) sont établis pour des connexions de longue durée par l'administrateur du réseau (procédure non normalisée). Les paramètres de la connexion sont déterminés lors de l'établissement de celle-ci selon les caractéristiques du contrat de service souscrit.

Les SVC (Switched Virtual Circuit) sont établis à la demande (appel par appel) et sont libérés explicitement après utilisation. La qualité du service est négociée à chaque connexion, ce dernier SVC est toujours bidirectionnel.

Bien que ce soit une technologie orientée connexion, l'ATM peut toutefois émuler un mode de fonctionnement non connecté. Les liaisons sont indépendantes du type de support réseau. La technologie ATM peut donc être implantée sur du câble torsadé, coaxial ou fibre optique avec des limitations pour les grandes vitesses. Elle n'est pas forcément indépendante de la technologie IP, mais complémentaire. La technologie ATM n'a pas dans sa structure des adresses de destinations et d'émissions. Elle régit uniquement les couches basses du modèle OSI chargées du transport.

10.3 Inconvénients d'ATM

- Le temps d'établissement d'une connexion (SVC) peut être prohibitif pour un flux de donnée de faible volume (notion de durée).
- Les applications doivent connaître à l'avance leur besoin en qualité de service.
- ATM ne supporte pas les connexions multicast à multicast.
- Très peu d'applications peuvent s'exécuter directement sur ATM et tirer pleinement parti de ses potentialités.
- ATM n'intègre pas les services de sécurités, ceux-ci devant être assurés par les applications.
- La taille de l'en-tête est importante vis-à-vis de la charge utile (overhead d'environ 20 %), une cellule ATM se compose d'un en-tête de 5 octets et d'une charge utile de 48 octets.

10.4 DSL dédié au transport de services

Les technologies xDSL apparaissent comme un très bon moyen pour permettre un accès rapide et peu coûteux depuis les foyers des abonnés ou bureaux de travail jusqu'aux services réseaux très hauts débits. Les technologies de transmission xDSL agissent depuis 64 kbps jusqu'à plusieurs mégabits. Ce qui facilite entre autre la communication sur Internet.

Mais de nouveaux déploiements de services pour des accès très rapides à Internet ou des accès LAN induisent de nouvelles confrontations pour les fournisseurs de services. Pour l'expliquer,

nous devons tout d'abord considérer la façon dont laquelle un réseau point à point est organisé, quels protocoles et technologies doivent être utilisés pour fournir un service faible coût avec de bonnes performances. Plusieurs services s'offrent donc à l'utilisateur : une nécessité d'adapter le service à la demande s'impose.

Les différents services qui s'offrent à l'abonné sont principalement:

- architecture IP/LAN tels que les accès Internet ou réseaux locaux (LAN) à distance.
- architecture du relais de trames (Frame Relay).FR peut transporter des paquets de taille variable, à des vitesses élevées. Les nœuds intermédiaires n'ont plus à prendre en charge les fonctions d'établissements et le maintien de la connexion.
- architecture ATM

La figure 1.28 nous montre comment les services ATM peuvent être déployés plus facilement jusque chez l'abonné grâce aux technologies xDSL .Nous verrons comment cette infrastructure permet l'accès aux différents réseaux pour délivrer cette multitude de services. Nous insisterons plus particulièrement sur les services ATM, qui grâce aux technologies d'accès xDSL se verront être déployés plus facilement jusque chez l'abonné.

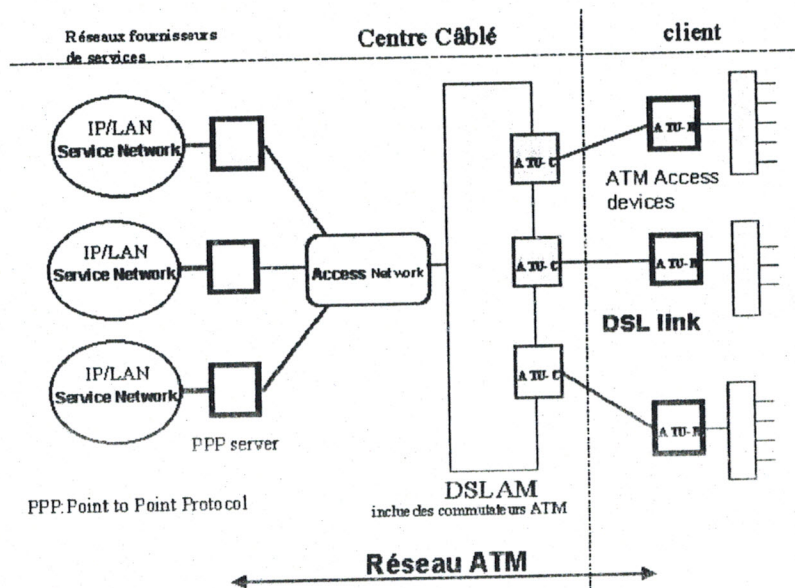


Figure 1.28 Services ATM

Basé sur la structure précédemment étudiée, le transport de service ATM semble être l'un des plus convoités.

On peut noter les avantages de cette architecture :

Une structure niveau 2 (ATM) est utilisée dans le réseau d'accès, supprimant le besoin de routeurs. Cette structure peut servir de support à de futures applications multimédia basées sur ATM, tel que le MPEG vidéo. ATM promet d'être un véritable support de qualité du service.

Les mécanismes d'authentification et de sécurité sont bien connus avec l'utilisation du protocole point à point. Néanmoins il en ressort quelques inconvénients :

- ✓ PPP a été conçu pour supporter une liaison entre une simple station de travail et un réseau à connexion automatique.
- ✓ L'utilisation de PPP pour connecter un LAN (ou bien même une simple station de travail connectée à Ethernet) au réseau principal devient problématique.
- ✓ PPP nécessite une puissance CPU élevée.
- ✓ Un circuit virtuel d'accès permanent est nécessaire.

10.5 Le Multi service

Les services IP/LAN, Frame Relay et ATM sont fournis en utilisant le même DSLAM. Un réseau d'accès ATM interconnecte l'utilisateur aux différents services en regard du type de service qui peut être fourni par le fournisseur de services.

Le nombre grandissant de services permet de multiplier les champs d'applications de l'abonné. C'est pourquoi, avec les technologies xDSL le fournisseur de services se trouve maintenant confronté à un nouveau problème, à savoir bien adapter l'offre de services à la demande.

10.6 ATM et ADSL

Contrairement à Ethernet, ATM possède un support de qualité de services pour les transferts de voix, vidéo et données. De plus, comme nous l'avons déjà vu, ATM est implantable sur les réseaux WAN et LAN.

Des offres de raccordement des abonnés pour des applications de vidéo à la demande (VOD) se développent grâce à la technologie ADSL. Cette dernière, étant une liaison PPP (de point à point), permet le déploiement d'ATM jusque chez l'abonné. Et contrairement au câble qui exige un partage de l'accès occasionnant en période de pointe un ralentissement de la transmission, l'ADSL est lui un accès dédié à chaque utilisateur.

Le transfert ATM reste stable malgré les prédictions prévoyant la chute de cette technologie à partir des années 2000. Cette stabilité est due à la confiance qu'ont les opérateurs de télécommunications à son égard. Cette technique est aujourd'hui parfaitement maîtrisée et elle offre de plus des garanties de service qui lui confèrent un atout supplémentaire.

11. Conclusion

Même si la technologie xDSL est souvent une bonne solution, elle n'offre malheureusement pas toujours une liaison d'une qualité irréprochable. En effet, une ligne en xDSL est par définition constituée d'une ou deux paires de fils de cuivre; elle est donc influencée par des éléments externes et par la longueur et la résistance ohmique de la liaison considérée. Sa qualité peut varier

dans le temps. C'est pourquoi il est recommandé de conserver en parallèle une liaison classique, comme une ligne ISDN.

Malgré cette limitation, on s'attend dans les années à venir à un impact significatif des technologies xDSL, intrinsèquement adaptées aux besoins en communication multimédia employant une large bande passante: accès à Internet à haute vitesse, services on line, vidéo sur demande, distribution de signaux vidéo.

L'ADSL fournit un accès très rapide à l'Internet et aux réseaux locaux à distance : 100 fois plus vite qu'un modem 56 kbit/s (à la norme V.90). Elle permet de faire du temps réel, du multimédia interactif et de la diffusion de vidéo de qualité " broadcast " pour des services tels que la vidéoconférence, l'accès aux services de vidéo à la demande ou de formation à distance. Elle donne accès simultanément au vocal et aux données, et il n'est plus nécessaire de dédier la ligne de l'abonné à l'un de ces services. Sur les modems classiques, la connexion à Internet privait l'utilisateur de la ligne téléphonique par exemple.

L'ADSL est une liaison privée et sécurisée, l'utilisateur n'étant plus " commuté " pour aller de son installation à son destinataire. Il est également une liaison permanente, " always on line ", qui ne nécessite plus de composer un numéro et d'attendre la connexion.

De plus, l'avènement de la technologie ADSL Lite va permettre d'accélérer l'adoption de ces technologies à un public de masse de plus en plus exigeant au niveau des performances attendues ainsi que de la qualité de service rendue de la part des opérateurs de télécommunication, même si d'autres technologies peuvent à long terme sembler convenir aux réseaux à hauts débits tels que la fibre optique, les liaisons hertziennes à micro-ondes.

Pour résumer nous pouvons dire que de multiples services, de nouvelles applications qui, avant l'utilisation des technologies xDSL étaient difficilement concevables, sont désormais accessibles aux usagers :

- La vidéo à la demande (VOD) permet d'accéder à tout programme vidéo qui vous intéresse et ceci à n'importe quel moment ;
- Les technologies xDSL permettent de jouer en réseau, les jeux étant accessibles depuis un serveur ;
- xDSL favorise le développement du commerce en ligne ;
- La vidéo conférence avec une grande qualité d'images, améliore les communications;
- xDSL permet le vrai télétravail. L'employé travaille de chez lui, sur un réseau LAN virtuel avec d'autres télétravailleurs et ceci avec tous les avantages d'un réseau local : accès à un serveur d'applications, partage de fichiers... De plus, xDSL permet d'interconnecter des réseaux LAN entre eux. Des universités, des laboratoires peuvent ainsi relier leurs réseaux LAN locaux entre eux de manière transparente ;
- Télémédecine : un service client/serveur permet d'accéder à une base de données sur les patients, les diagnostics, les données graphiques produites par rayons X... Les médecins

peuvent apporter de meilleurs soins à leurs patients en travaillant en collaboration avec d'autres médecins. Le dossier médical d'un patient peut être transféré à un spécialiste pour consultation. En cas d'urgence, un hôpital peut retrouver l'historique médical du patient.

La technologie Wi-Fi

Wi-Fi ou Wireless Fidelity (Fidélité sans fil) est une nouvelle technologie de réseau sans fil permettant une utilisation dans divers domaines, et particulièrement l'accès à Internet haut débit.

1. Introduction

Les réseaux sans fil sont aujourd'hui en pleine expansion et le nombre de projets de déploiement révèle l'avenir prometteur de cette technologie. Ils sont en plein développement du fait de la flexibilité de leur interface, qui permet à un utilisateur de changer de place dans l'entreprise tout en restant connecté. Ces réseaux atteignent des débits de plusieurs mégabits par seconde, voire de plusieurs dizaines de mégabits par seconde. Bien que plusieurs de ces réseaux, tels Wi-Fi ou WiMax, ne soient pas directement des réseaux de la boucle locale, ils commencent à être utilisés pour recouvrir une ville.

Mais l'ombre de l'insécurité plane sur ce dessein et l'utilisation de ce type d'infrastructure ne doit se faire que dans le cadre d'une politique de sécurité précise et adaptée.

Une référence actuelle pour la mise en place de tels réseaux est la norme IEEE 802.11b dite Wi-Fi. La grande particularité du Wi-Fi est d'être un système rapide à déployer, pour un coût apparemment raisonnable. Les applications sont multiples puisqu'elles permettent aussi bien la constitution de réseaux privés et fermés que la mise en place de réseaux publics et ouverts. Sur ce second point, les choses sont actuellement en pleine évolution

Ainsi le Wi-Fi est utilisé dans le langage courant pour désigner les réseaux de données (réseaux locaux) sans fils, devenant ainsi le symbole de l'informatique et de l'Internet nomade.

2 - Les réseaux sans fil

Un réseau sans fil est un réseau qui permet de faire communiquer des équipements distants sans liaison filaire. Ces réseaux sans fils sont basés sur des liaisons utilisant des ondes radioélectriques (radios et infrarouges).

Outre la mobilité qui est introduite, l'autre avantage de ce type de réseau est principalement la mise en oeuvre par rapport à des installations filaires qui demandent des aménagements dits lourds.

Ce type de réseau présente aussi des inconvénients, les transmissions radioélectriques servent à beaucoup d'applications dans divers domaines, et sont sensibles à des interférences, d'où la nécessité d'une réglementation pour pouvoir utiliser ces ondes. De plus, apparaît le problème de la sécurité lié à

la transmission par ondes hertziennes, d'où la nécessité de mettre en place des outils de sécurisation. Il existe une réglementation internationale, et une réglementation dans chaque pays, en fonction des plages de fréquences utilisées (comme la FM par exemple).

Il existe plusieurs normes de réseaux sans fils, en fonction de la fréquence, du débit et de la portée (distance) :

- Réseaux personnels sans fil WPAN (Wireless Personal Area Network)
- Réseaux locaux sans fil WLAN (Wireless Local Area Network)
- Réseaux métropolitains sans fil WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)
- Réseaux étendus sans fil WWAN (Wireless Wide Area Network)

Les groupes de travail qui se chargent de cette normalisation proviennent de l'IEEE aux Etats-Unis et de l'ETSI en Europe. La figure 2.1 décrit les différentes catégories de réseaux suivant leur étendue

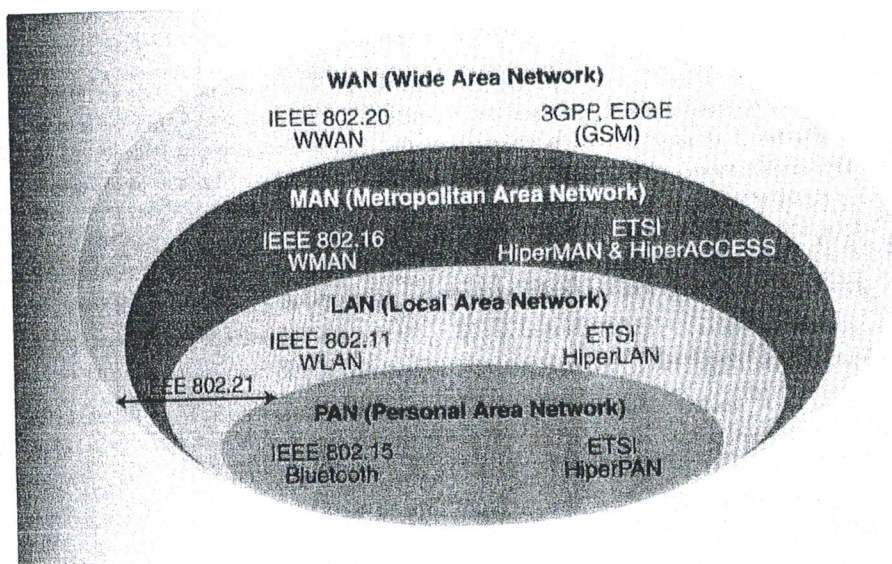


Figure 2.1 Catégories de réseaux sans fil

Les principales normes sont IEEE 802.15, pour les petits réseaux personnels d'une dizaine de mètres de portée, IEEE 802.11, ou Wi-Fi, pour les réseaux WLAN, IEEE 802.16, pour les réseaux WMAN c'est-à-dire les très grands réseaux.

2.1. Réseaux personnels sans fil WPAN (Wireless Personal Area Network)

Le réseau personnel sans fils (appelé également réseau individuel sans fils ou (réseau domotique sans fils) concerne les réseaux sans fils d'une faible portée : de l'ordre de quelques dizaines mètres. Ce type de réseau utilise des fréquences hertziennes ou infrarouges et sert généralement à relier des

périphériques (Imprimante, téléphone portable, appareils domestiques, ...) ou un assistant personnel (PDA) à un ordinateur sans liaison filaire ou bien à permettre la liaison sans fils entre deux machines très peu distantes. Il existe plusieurs technologies utilisées pour les WPAN :

2.1.1 Bluetooth

La principale technologie WPAN est la technologie Bluetooth, lancée par Ericsson en 1994, proposant un débit théorique de 1Mbps pour une portée maximale d'une trentaine de mètres. Bluetooth, connue aussi sous le nom IEEE 802.15.1, possède l'avantage d'être très peu gourmand en énergie, ce qui le rend particulièrement adapté à une utilisation au sein de petits périphériques. Très commercialisée aujourd'hui, c'est une technologie peu onéreuse, grâce à sa forte intégration sur une puce unique de 9 mm sur 9 mm. L'interconnexion se fait par liaison radio. Par rapport à une connexion infrarouge, l'avantage est évident. Les deux appareils n'ont plus à être en contact visuel pour échanger des informations. Par exemple, à partir d'un appareil photo numérique, on pourra envoyer une image par e-mail, en activant le téléphone mobile, sans l'aide d'un câble.

2.1.2 ZigBee

La technologie ZigBee (aussi connue sous le nom IEEE 802.15.4) permet d'obtenir des liaisons sans fil à très bas prix et avec une très faible consommation d'énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée pour être directement intégrée dans de petits appareils électroniques (appareils électroménagers, hifi, jouets, ...). Les réseaux ZigBee devraient arriver en force sur le marché de la commande et des bas débits dans les domaines de la domotique, de la bureautique et de l'automatisme.

2.1.3 Liaisons infrarouges

Enfin les liaisons infrarouges permettent de créer des liaisons sans fils de quelques mètres avec des débits pouvant monter à quelques mégabits par seconde. Cette technologie est largement utilisée pour la domotique (télécommandes) mais souffre toutefois des perturbations dues aux interférences lumineuses.

2.2. Réseaux locaux sans fil : WLAN (Wireless Local Area Network)

Cette technologie a été conçue initialement pour construire des réseaux locaux Ethernet sans fil utilisant des fréquences hertziennes, pour une portée d'une centaine de mètres. Tout l'intérêt de cette technologie, réside dans le fait qu'on peut connecter par le biais de ce standard des types de matériels différents tels que ordinateurs, périphériques, ... et Internet.

Il existe plusieurs technologies dont les deux principales sont :

- La norme 802.11 subdivisée en deux types de réseaux :

- ✓ ceux qui travaillent à la vitesse de 11 Mbit/s : la norme IEEE 802.11b
- ✓ et ceux qui montent à 54 Mbits/s : la norme IEEE 802.11a et g
- HiperLAN (High Performance Local Area Network) norme européenne ETSI. Les vitesses de transfert peuvent atteindre une cinquantaine de mégabits par seconde. La distance entre postes de travail et stations de base va de quelques dizaines de mètres jusqu'à une centaine de mètres. Cette norme européenne n'a jamais vu le jour industriellement[1]

2.3 Réseaux métropolitains sans fil : WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)

Ce type de réseau est aussi appelé Boucle Locale Radio (BLR). Il est basé sur la norme IEEE 802.16. Il vise des entreprises ou des collectivités ayant des besoins en débits permettant de concurrencer les lignes spécialisées à moindre coût d'exploitation. Cependant les contraintes restent là encore liées à l'éloignement d'un relais (3 à 10 Km). Seules les grandes agglomérations sont actuellement dotées des antennes nécessaires. Les débits garantis s'échelonnent de 128 kbps à 4 Mbps.

Les réseaux hertziens IEEE 802.16 visent à remplacer les modems ADSL pour donner à l'utilisateur final des débits importants pour du hertzien, jusqu'à plusieurs mégabits par seconde. Plusieurs normes sont proposées suivant la fréquence utilisée. Un consortium s'est mis en place pour développer les applications de cette norme sous le nom de WiMax.

Les prochaines années devraient apporter la possibilité de se connecter de l'antenne de l'opérateur à des terminaux mobiles ce qui permettrait l'arrivée de l'ADSL vers les mobiles.

2.4. Réseaux étendus sans fil : WWAN (Wireless Wide Area Network)

C'est le réseau sans fil connu sous le nom de réseau cellulaire mobile, celui qui permet la connexion des téléphones mobiles. Les principales technologies sont :

- GSM (Global System for Mobile communication)
- GPRS (General Packet Radio Service)
- UMTS (Universal Mobile Telecommunication System)

3. Technologie Wi-Fi

3.1 Introduction

Wi-Fi est une abréviation de Wireless Fidelity (Fidélité sans fil). C'est l'appellation commerciale d'une technologie de transmission sans fil basée sur la norme de réseau radioélectrique 802. Elle a été normalisée en 1999 par l'IEEE (Institut of Electrical and Electronics Engineers). C'est une technologie standard d'accès sans fil à des réseaux locaux. Le principe est d'établir des liaisons radio rapides entre des terminaux et des bornes reliées aux réseaux Haut Débit. Grâce à ces bornes WiFi, l'utilisateur se connecte à Internet ou au système d'informations de son entreprise et accède à de nombreuses applications reposant sur le transfert de données. Cette technologie a donc une réelle complémentarité avec les réseaux ADSL, les réseaux d'entreprise ou encore les réseaux mobiles comme GPRS/UMTS. Le Wi-Fi (ou norme 802.11 de son nom technique) atteint en théorie un débit de 11Mbit/s. Avec le Wi-Fi, la connexion n'est possible qu'à proximité d'une borne. Ceci dit, une borne Wi-Fi dispose d'une portée de 100 à 150 mètres et donne accès aux données dans un périmètre assez vaste. Autre avantage pour les utilisateurs, le Wi-Fi est normalisé au niveau international. Cette technologie permet en principe une interopérabilité totale des équipements, quelle que soit la marque ou la nature du terminal.

Bien que cette norme existe depuis 1999, cela fait moins d'un an que tout le monde en parle, professionnels, medias, grand public[19]. Pourquoi un tel engouement ?

Cette nouvelle technologie de réseau sans fil, permet une utilisation dans divers domaines, et particulièrement l'accès à Internet haut débit et sans fil. Mais l'engouement vers le Wi-Fi tient aussi à son aspect financier, à la différence des réseaux de téléphonie mobile, les licences d'exploitation à l'extérieur sont gratuites. La mise en place d'un réseau Wi-Fi, en intérieur, est libre et ne nécessite pas d'autorisation préalable.

3.2 Présentation de la norme IEEE 802.11

La normalisation du groupe de travail IEEE 802.11 pour les réseaux locaux par voie hertzienne, ou WLAN (Wireless Local Area Network) a donné naissance au label de produits Wi-Fi. Cette norme a donné lieu à deux types de réseaux sans fil :

- ✓ ceux qui travaillent à la vitesse de 11 Mbits/s avec une fréquence se situant dans la gamme des 2.4 GHz
- ✓ et ceux qui montent à 54 Mbits/s

Le Wi-Fi est un réseau local de type Ethernet à accès sans fil. Actuellement, les débits sont de 2 à 11 Mbps dans la bande de fréquence de 2,4 GHz. Des évolutions de cette norme sont en cours, pour permettre des transferts plus importants sur la même bande et celle des 5 GHz.

Les communications peuvent se faire soit directement de station à station, mais sans qu'une station puisse relayer les paquets vers une autre station terminale, soit en passant par une borne de concentration, que l'on appelle point d'accès, ou access point. Les débits s'échelonnent d'une dizaine à plusieurs dizaines de mégabits par seconde, suivant la technique de codage utilisée, FHSS[1] ou DSSS.

Le réseau est construit autour des bornes d'accès, appelées aussi points d'accès, ou AP (Access point). Les points d'accès sont reliés entre eux par un réseau Ethernet. La mise en place d'un réseau Wi-Fi consiste à insérer des points d'accès dans le réseau Ethernet.

3.2.1 Définition de l'Access Point (AP)

Le Point d'Accès ou Access Point (AP) : c'est l'équipement central qui gère l'aspect radio du réseau sans fil. Il joue souvent le rôle de Routeur, Modem et gère la connexion avec le réseau filaire (Internet).

Rôle de l'AP :

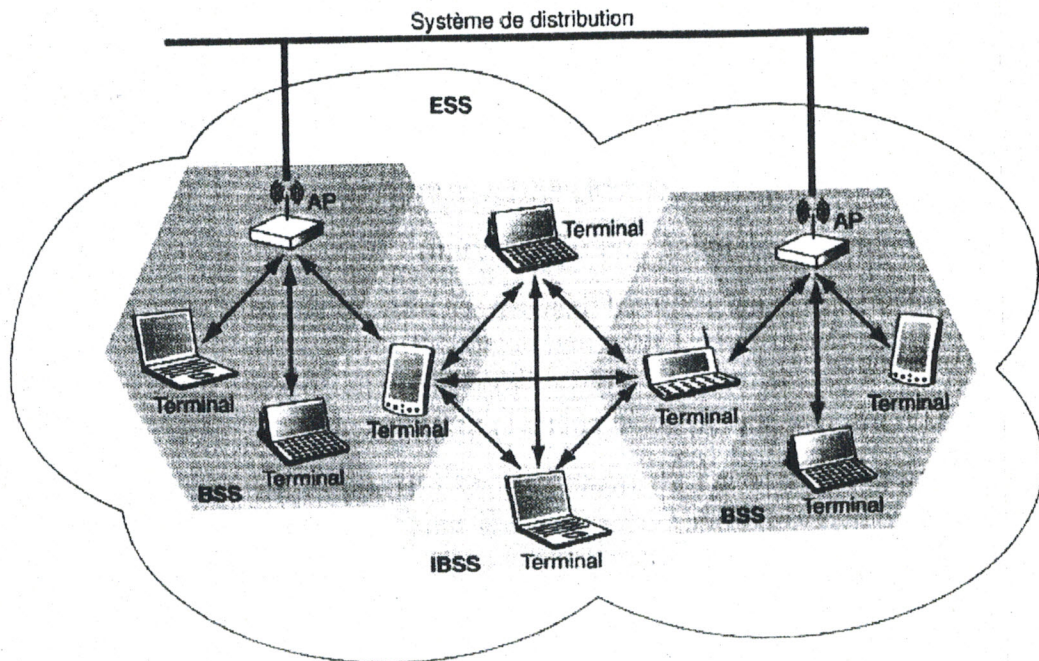
- Gestion radio
- Gestion du protocole 802.11 (couche MAC, les trames...)
- Gestion de la connexion au le réseau filaire grâce à un pont Ethernet/802.11 et d'une pile de protocole IP permettant d'embarquer le logiciel de configuration.
- Gestion de l'administration et de la sécurité de réseau

3.3 L'architecture Wi-Fi

C'est une architecture cellulaire. Un groupe de terminaux munis d'une carte d'interface réseau 802.11 s'associent pour établir des communications directes. Ils forment alors un BSS (Basic Service Set).

La norme 802.11 offre deux modes de fonctionnement :

- le mode ad-hoc où les stations se connectent les unes aux autres sans passer par un point d'accès
- Le mode infrastructure auquel se connectent toutes les stations (appareils équipés d'un équipement Wi-Fi) à un point d'accès ou un routeur.
- Un réseau en mode ad-hoc est un groupe de terminaux formant un IBSS (Independent Basic Service Set), dont le rôle consiste à permettre aux stations de communiquer sans l'aide d'une quelconque infrastructure (figure 2.2).



BSS (Basic Set Service) : cellule de base

ESS (Extended Set Service) : ensemble de cellules de base

IBSS (Independent Basic Set Service) : cellule de base en mode ad-hoc

Figure 2.2 **Architecture d'un réseau Wi-Fi**

Simple à mettre en oeuvre, il permet de connecter les stations quand aucun AP n'est disponible. Le concept de réseau "ad hoc" correspond au fait que chaque élément rejoint le réseau de façon immédiate, au besoin (en général, l'élément est identifié par son adresse réseau, reconnue spontanément). Et si l'un des éléments du réseau ne fonctionne plus, il ne change rien ou presque pour les autres éléments : de nouvelles routes sont empruntées par les informations, comme si l'élément manquant n'avait jamais existé.

Il convient de faire la distinction entre réseau ad hoc et réseau en mode ad hoc. Dans un réseau en mode Ad hoc les stations ne font pas transiter les informations entre elles, celles-ci ne se "voient" pas alors que en réseau Ad Hoc pur les données transitent.

Supposons que l'on ait trois PC A, B et C. A et B sont liés ainsi que B et C, mais A et C ne se voient pas directement. En mode Ad Hoc A et C ne peuvent communiquer, en Réseau Ad Hoc pur A et C peuvent communiquer.

Comme on peut le voir il n'est pas indispensable de posséder un AP pour monter un réseau sans fil.

Cependant il faut bien garder à l'esprit qu'au-delà de 3 stations un réseau ad hoc voit ses performances fortement diminuer. L'AP s'avère alors nécessaire pour retrouver des débits "normaux".

- Le mode infrastructure quant à lui est défini pour fournir aux différentes stations des services spécifiques sur une zone de couverture déterminée par la taille du réseau.

Si le réseau comporte plusieurs BSS ils seront reliés à un système de distribution par l'intermédiaire de leur point d'accès (AP). Un groupe de BSS interconnectés par un système de distribution forme un ESS (Extended Service Set). Ce dernier peut fournir aux différentes stations mobiles une passerelle d'accès vers un réseau fixe par exemple internet.

Donc, pour un réseau contenant plus de deux ordinateurs, il faudra opter pour le mode infrastructure. A la différence du premier, les ordinateurs se connectent à un point d'accès qui peut aussi servir de passerelle en se connectant lui même à un autre point d'accès.

Cette configuration sert à interconnecter plusieurs réseaux locaux distants les uns des autres. Néanmoins, pour le partage d'une connexion Internet, il sera nécessaire d'adopter un routeur, soit en supplément ou à la place du point d'accès.

La norme 802.11 s'attache à définir les couches basses du modèle OSI pour une liaison sans fil utilisant des ondes électromagnétiques, c'est-à-dire :

- la couche physique (notée parfois *couche PHY*),
- la couche liaison de données, constitué de deux sous-couches : le contrôle de la liaison logique (Logical Link Control, ou LLC) et le contrôle d'accès au support (Media Access Control, ou MAC)

La couche physique définit la modulation des ondes radio-électriques et les caractéristiques de la signalisation pour la transmission de données, tandis que la couche liaison de données définit l'interface entre le bus de la machine et la couche physique, notamment une méthode d'accès proche de celle utilisée dans le standard Ethernet et les règles de communication entre les différentes stations.

3.3.1 La couche physique

La couche physique est divisée en deux sous-couches, PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) et PMD (Physical Medium Dependant). Cette dernière s'occupe de l'encodage des données, tandis que la sous-couche PLCP prend en charge l'écoute du support. Elle fournit pour cela un CCA (Clear Channel Assesment), qui est le signal utilisé par la couche MAC pour savoir si le support est occupé ou non.

IEEE 802.11 définit quatre couches physiques différentes :

- FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)
- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
- IR (Infrarouge)
- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Les trois premières couches physiques définies à l'origine par 802.11 incluaient deux techniques radio à étalement de spectre et une spécification d'infrarouge diffus. Le FHSS et le DSSS utilisent la bande des 2.4 GHz de l'ISM (Industrial, Scientific, and Medical). Ces fréquences sont reconnues par les organismes réglementaires internationaux tels que la FCC (Etats-Unis), l'ETSI (Europe) et le MKK (Japon) pour utilisation sans licence.

Dans cette optique, les produits basés sur 802.11 ne nécessitent ni l'obtention d'une licence utilisateur ni une formation spécifique. Les techniques d'étalement de spectre, en plus de satisfaire aux conditions réglementaires, améliorent la fiabilité, accélèrent le débit et permettent à de nombreux produits non concernés de se partager le spectre sans coopération explicite et avec un minimum d'interférences.

La version originale du standard 802.11 prévoit des débits de 1 et 2 Mbps sur des ondes radio utilisant une technologie d'étalement de spectre avec sauts de fréquence (FHSS) ou en séquence directe (DSSS). Il est important de remarquer que FHSS et DSSS sont des mécanismes de signalisation fondamentalement différents l'un de l'autre et qu'aucune interopérabilité ne peut être envisagée entre eux.

FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) utilise un saut de fréquence tandis que DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) a recours à un codage continu

- Par la technique des sauts de fréquence (FHSS), la bande des 2,4 GHz est divisée en 75 sous-canaux de 1 MHz. L'émetteur et le récepteur s'accordent sur un schéma de saut, et les données sont envoyées sur une séquence de sous-canaux. Chaque conversation sur le réseau 802.11 s'effectue suivant un schéma de saut différent, et ces schémas sont définis de manière à minimiser le risque que deux expéditeurs utilisent simultanément le même sous-canal. Les techniques FHSS simplifient relativement la conception des liaisons radio, mais elles sont limitées à un débit de 2 Mbps, cette limitation résultant essentiellement des réglementations de la FCC qui restreignent la bande passante des sous-canaux à 1 MHz. Ces contraintes forcent les systèmes FHSS à s'étaler sur l'ensemble de la bande des 2,4 GHz, ce qui signifie que les sauts doivent être fréquents et représentent en fin de compte une charge importante.

- En revanche, la technique de signalisation en séquence directe divise la bande des 2,4 GHz en 14 canaux de 22 MHz. Les canaux adjacents se recouvrent partiellement, seuls trois canaux sur les 14

étant entièrement isolés. Les données sont transmises intégralement sur l'un de ces canaux de 22 MHz, sans saut. Pour compenser le bruit généré par un canal donné, on a recours à la technique du "chipping". Chaque bit de donnée de l'utilisateur est converti en une série de motifs de bits redondants baptisés "chips." La redondance inhérente à chaque chip associée à l'étalement du signal sur le canal de 22 MHz assure le contrôle et la correction d'erreur : même si une partie du signal est endommagée, il peut dans la plupart des cas être récupéré, ce qui minimise les demandes de retransmission.

- L'infrarouge n'est utilisé que pour les cas où les distances entre les différentes stations sont faibles.
- La quatrième couche physique a été définie dans la bande des 5,2 GHz. Grâce au codage OFDM[1], des débits compris entre 6 et 54 Mbits/s peuvent être atteints. 802.11 est le premier standard à utiliser un codage OFDM pour une communication de type paquet. Cette technologie était jusqu'à présent utilisée pour des systèmes de transmission de données continue.

Pour qu'un signal soit reçu correctement, sa portée ne peut dépasser 150 m dans un environnement de bureau, 600 m sans obstacle et 1,5 km avec une antenne extérieure. En règle générale, les stations ont une portée maximale de 50m. Lorsqu'il y a traversée de murs, cette distance est souvent plus restrictive.

3.3.2 La couche liaison de données

La couche de liaison de données se compose de deux sous-couches : le contrôle de la liaison logique (Logical Link Control, ou LLC) et le contrôle d'accès au support (Media Access Control, ou MAC). Le standard 802.11 utilise la LLC 802.2 et l'adressage sur 48 bits, tout comme les autres LAN 802, simplifiant ainsi le pontage entre les réseaux sans fil et filaires. Le contrôle d'accès au support est en revanche propre aux WLAN. Le 802.11 MAC est très proche de 802.3 dans sa conception : il est conçu pour supporter de multiples utilisateurs sur un support partagé en faisant détecter le support par l'expéditeur avant d'y accéder. Le rôle de la couche MAC 802.11 est assez similaire à celui de la couche MAC 802.3 du réseau Ethernet terrestre, puisque les terminaux écoutent la porteuse avant d'émettre. Si la porteuse est libre, le terminal émet, sinon il se met en attente. Aussi, la couche MAC 802.11 intègre des fonctions que l'on ne trouve pas dans la version terrestre.

Les fonctionnalités nécessaires pour réaliser un accès sur une interface radio sont les suivantes :

- procédures d'allocation du support
- adressage des paquets
- contrôle d'erreur CRC
- fragmentation-réassemblage

Pour les LAN Ethernet 802.3, le protocole CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) régule l'accès des stations Ethernet au câble ; il détecte et gère également les collisions qui se produisent lorsque deux périphériques ou plus tentent de communiquer simultanément sur le LAN.

Dans un WLAN 802.11, la détection des collisions est impossible. Pour détecter une collision, une station doit être capable de transmettre et d'écouter en même temps. Or, dans les systèmes radio, il ne peut y avoir transmission et écoute simultanées. Pour éviter les collisions, plusieurs temporisateurs sont déterminés, chaque station possédant des valeurs qui lui sont propres. Lorsqu'une station écoute la porteuse et que le canal est vide, elle transmet avec une probabilité de collision quasiment nulle. En effet, une collision entre deux stations émettant aléatoirement ne peut avoir lieu que si elles démarrent dans la même microseconde. A l'inverse, lorsqu'une transmission a lieu et que d'autres stations se mettent à l'écoute et y restent, la collision est inévitable.

Pour prendre en compte cette différence, le standard 802.11 fait appel au protocole légèrement modifié, le CSMA/CA ou à la fonction DCF (Distributed Coordination Function). Le protocole CSMA/CA tente d'éviter les collisions en imposant un accusé de réception systématique des paquets (ACK), ce qui signifie que pour chaque paquet de données arrivé intact, un paquet ACK est émis par la station de réception. Ce protocole CSMA/CA fonctionne de la manière suivante : une station qui souhaite émettre explore les ondes et, si aucune activité n'est détectée, attend un temps aléatoire avant de transmettre si le support est toujours libre. Si le paquet est intact à la réception, la station réceptrice émet une trame ACK qui, une fois reçue par l'émetteur, met un terme au processus. Si la trame ACK n'est pas détectée par la station émettrice (parce que le paquet original ou le paquet ACK n'a pas été reçu intact), une collision est supposée et le paquet de données est retransmis après attente d'un autre temps aléatoire.

Pour empêcher la collision, il faut que les stations attendent avant de transmettre, un temps aléatoire permettant de séparer leurs instants d'émission respectifs. Un premier temporisateur très petit, appelé SIFS (Short Inter-Frame Spacing), permet au récepteur d'envoyer immédiatement un acquittement (ACK). Un deuxième temporisateur permet de donner une forte priorité à une application temps réel

CSMA/CA permet donc de partager l'accès aux ondes. Ce mécanisme d'accusé de réception explicite gère aussi très efficacement les interférences et autres problèmes radio. Cependant, il ajoute à 802.11 une charge inconnue sous 802.3, aussi un réseau local 802.11 aura-t-il toujours des performances inférieures à un LAN Ethernet équivalent.

3.3.2.1 Techniques d'accès

Il en existe deux : DCF et PCF

- le DCF (Distributed Coordination Function) est la technique d'accès générale utilisée pour permettre des transferts de données asynchrones. Toutes les stations doivent la supporter. Le DCF s'appuie sur le CSMA/CA
- le PCF (Point Coordination Function) est basé sur l'interrogation à tour de rôle des terminaux, ou polling, sous le contrôle du point d'accès. Cette méthode est surtout conçue pour la transmission de données sensibles qui demandent une gestion de délai utilisé pour les applications temps réel telles que la voix ou la vidéo.

Remarque : Un réseau en mode ad-hoc utilise seulement le DCF alors qu'un réseau en mode infrastructure avec point d'accès utilise les deux techniques.

Autre problème de la couche MAC, spécifique au sans fil, celui du "nœud caché", où deux stations situées de chaque côté d'un point d'accès peuvent entendre toutes les deux une activité du point d'accès, mais pas de l'autre station, problème généralement lié aux distances ou à la présence d'un obstacle. Pour résoudre ce problème, le standard 802.11 définit sur la couche MAC un protocole optionnel de type RTS/CTS (Request to Send/Clear to Send). Lorsque cette fonction est utilisée, une station émettrice transmet un RTS et attend que le point d'accès réponde par un CTS. Toutes les stations du réseau peuvent entendre le point d'accès, aussi le CTS leur permet-il de retarder toute transmission prévue, la station émettrice pouvant alors transmettre et recevoir son accusé de réception sans aucun risque de collision. Du fait que le protocole RTS/CTS ajoute à la charge du réseau en réservant temporairement le support, il est généralement réservé aux plus gros paquets, dont la retransmission s'avérerait lourde du point de vue de la bande passante.

Enfin, la couche MAC 802.11 offre deux autres caractéristiques de robustesse : les sommes des contrôle CRC et la fragmentation des paquets. Pour chaque paquet, une somme de contrôle est calculée et rattachée afin d'assurer que les données n'ont pas été corrompues durant leur transit. Cette technique diffère d'Ethernet où les protocoles de niveau supérieur tels que TCP gèrent le contrôle d'erreur. La fragmentation des paquets permet de casser les gros paquets en unités de plus petite taille lorsqu'ils sont transmis par radio, ce qui s'avère particulièrement utile dans les environnements très congestionnés ou lorsque les interférences posent problème, puisque les gros paquets courent plus de risque d'être corrompus. Cette technique limite le risque de devoir retransmettre un paquet et améliore donc globalement les performances du réseau sans fil. La couche MAC est responsable de la reconstitution des fragments reçus, le traitement étant ainsi transparent pour les protocoles de niveau supérieur.

Tous ces mécanismes entraînent l'ajout aux trames Wi-Fi d'en-têtes, que les trames Ethernet ne possèdent pas. C'est pourquoi les réseaux Wi-Fi présentent des performances plus faibles que les réseaux locaux Ethernet.

3.3.3 Analyse des types de trames utilisés pour le protocole 802.11

Il y a trois principaux types de trames :

- *trames de données*, pour la transmission des données des données utilisateur
- *trame de contrôle*, pour contrôler l'accès au support (RTS, CTS, ACK)
- *trame de gestion*, transmises de la même façon que les trames de données pour l'échange d'informations de gestion, mais qui ne sont pas transmises aux couches supérieures

Chacun de ces trois types est subdivisé en différents sous-types, selon leurs fonctions spécifiques.

Format des trames

Toutes les trames 802.11 sont composées des composants suivants :

Préambule	En tête PLCP	Données MAC	CRC
-----------	--------------	-------------	-----

Figure 2.3 **Structure d'une trame Wi-Fi**

- **Préambule**

Il est dépendant de la couche physique et comprend :

- ✓ **Synch** : c'est une séquence de 80 bits alternant 0 et 1, qui est utilisée par le circuit physique pour sélectionner l'antenne appropriée (si plusieurs sont utilisées), et pour corriger l'offset de fréquence et de synchronisation.
- ✓ **SFD** : Le Start Frame Delimiter consiste en la suite de 16 bits 0000 1100 1011 1101, utilisée pour définir le début de la trame.

- **En-tête PLCP**

L'en-tête PLCP est toujours transmis à 1 Mbps et contient des informations logiques utilisées par la couche physique pour décoder la trame :

- ✓ **Longueur de mot du PLCP_PDU** : il représente le nombre d'octets que contient le paquet, ce qui est utile à la couche physique pour détecter correctement la fin du paquet.
- ✓ **Fanion de signalisation PLCP** : il contient seulement l'information concernant la vitesse de transmission entre la carte coupleur et le point d'accès

Nom		Description
802.11a	WiFi5	La norme 802.11a (baptisé Wi-Fi5) permet d'obtenir un haut débit (54 Mbps théoriques, 30 Mbps réels). La norme 802.11a spécifie 8 canaux radio dans la bande de fréquence des 5 GHz
802.11b	WiFi	La norme 802.11b est la norme la plus répandue actuellement. Elle propose un débit théorique de 11 Mbps (6 Mbps réels) avec une portée pouvant aller jusqu'à 300 mètres dans un environnement dégagé. La plage de fréquence utilisée est la bande des 2.4 GHz, avec 3 canaux radio disponibles. Cette technologie s'impose sur le marché aujourd'hui[20]
802.11c	Pontage 802.11 vers 802.1d	La norme 802.11c n'a pas d'intérêt pour le grand public. Il s'agit uniquement d'une modification de la norme 802.1d afin de pouvoir établir un pont avec les trames 802.11 (niveau <i>liaison de données</i>).
802.11d	Internationalisation	La norme 802.11d est un supplément à la norme 802.11 dont le but est de permettre une utilisation internationale des réseaux locaux 802.11. Elle consiste à permettre aux différents équipements d'échanger des informations sur les plages de fréquence et les puissances autorisées dans le pays d'origine du matériel.
802.11e	Amélioration de la QOS	La norme 802.11e vise à donner des possibilités en matière de qualité de service au niveau de la couche <i>liaison de données</i> . Ainsi cette norme a pour but de définir les besoins des différents paquets en terme de bande passante et de délai de transmission de telle manière à permettre notamment une meilleure transmission de la voix et de la vidéo.
802.11f	Itinérance (roaming)	La norme 802.11f est une recommandation à l'intention des vendeurs de point d'accès pour une meilleure interopérabilité des produits. Elle propose le protocole Inter-Access point roaming protocol permettant à un utilisateur itinérant de changer de point d'accès de façon transparente lors d'un déplacement, quelles que soient les marques des points d'accès présentes dans l'infrastructure réseau. Cette possibilité est appelée <i>itinérance</i> (ou roaming en anglais)

802.11g		<p>Extension du 802.11b(WiFi) pour gérer le haut débit identique à celui du 802.11a tout en utilisant la bande ISM de 2,4 GHz (54 M à 2,4GHz).</p> <p>La norme 802.11g offrira un haut débit (54 Mbps théoriques, 30 Mbps réels) sur la bande de fréquence des 2.4 GHz. La norme 802.11g a une compatibilité ascendante avec la norme 802.11b, ce qui signifie que des matériels conformes à la norme 802.11g pourront fonctionner en 802.11b</p>
802.11h		<p>La norme <i>802.11h</i> vise à rapprocher la norme 802.11 du standard Européen (HiperLAN 2, d'où le <i>h</i> de 802.11h) et être en conformité avec la réglementation européenne en matière de fréquence et d'économie d'énergie.</p>
802.11i		<p>La norme <i>802.11i</i> a pour but d'améliorer la sécurité des transmissions (gestion et distribution des clés, chiffrement et authentification). Cette norme s'appuie sur l'AES (<i>Advanced Encryption Standard</i>) et propose un chiffrement des communications pour les transmissions utilisant les technologies 802.11a, 802.11b et 802.11g.</p>
802.11j		<p>La norme <i>802.11j</i> est à la réglementation japonaise ce que le 802.11h est à la réglementation européenne</p>

3.5 La norme 802.11b

L'IEEE 802.11b définit un débit de transmission allant jusqu'à 11Mbit/s. Ils communiquent donc par les ondes radio parce que ces ondes ne sont pas affectées par les structures d'un bâtiment et qu'elles peuvent se réfléchir pour contourner les obstacles. Le débit du WLAN dépend de plusieurs facteurs, dont :

- le nombre d'utilisateurs,
- la portée des micro-cellules,
- les interférences,
- la propagation sur de multiples chemins (multipath),
- le support des standards,
- le type de matériel,
- les protocoles supplémentaires, les règles d'accès.

Ils réduisent en pratique la bande passante de 4 à 5 Mbps. Tout ce qui affecte le trafic des données sur les portions filaires du réseau, comme par exemple les goulets d'étranglement, affectera aussi la portion sans fil. Cela correspond globalement aux débits d'un réseau Ethernet 10 Mbps, car le débit maximal d'un réseau câblé ne peut qu'être atteint approximativement. Cependant, dans un Wireless LAN, plus la portée est grande plus le débit diminue. Dès les 30-150 m de distance le débit est de 5.5 Mbps puis chute à 2 Mbps et à 1 Mbps. La plus longue distance est atteinte à 1 Mbps (jusqu'à 400 m).

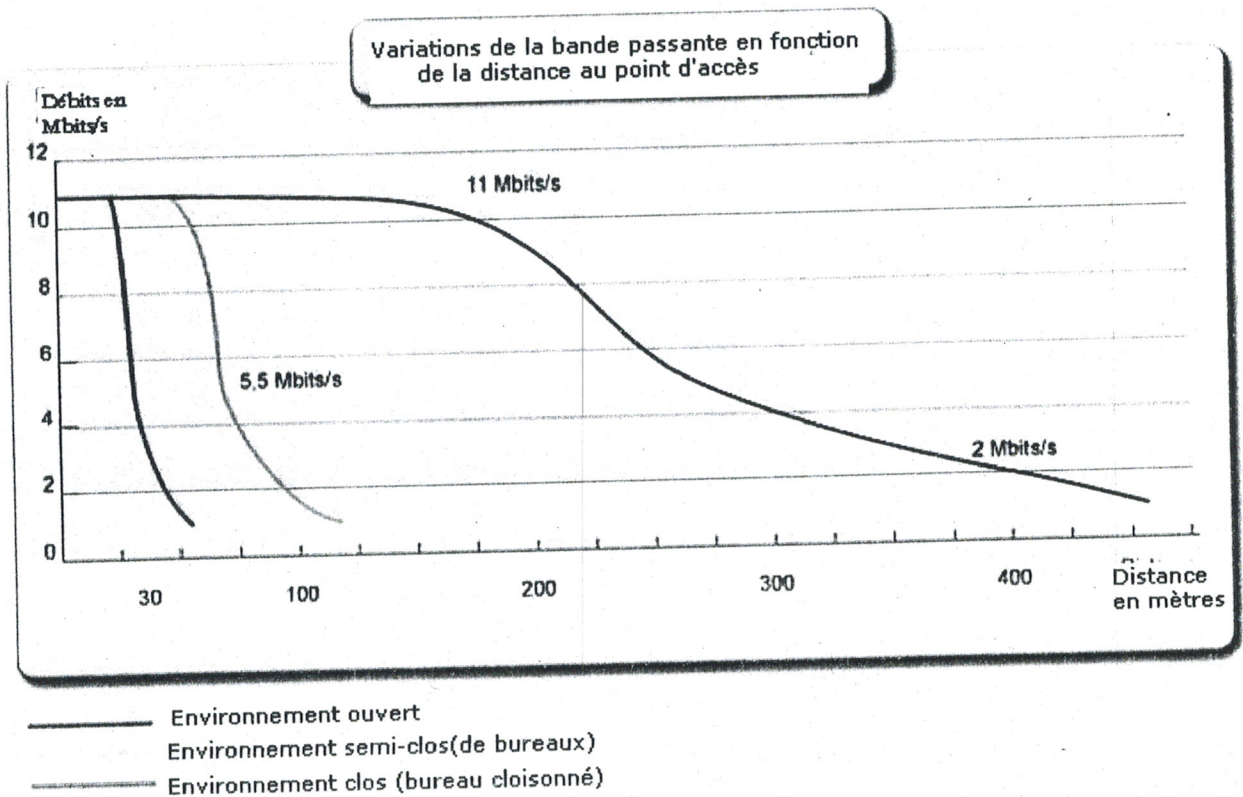


Figure 2.5 Variation de la bande passante en fonction de la distance au point d'accès

Les interférences sont dues à :

3.5.1 La Propagation Multiple

Les signaux radio propagés dans un environnement clos, "rebondissent" sur les surfaces réfléchissantes et semi-réfléchissantes telles que murs, cloisons, mobilier et équipements. Les signaux arrivent sur le récepteur de toutes les directions, mais avec des puissances variées et un étalement dans le temps dépendant de la longueur du trajet parcouru. Cette propagation multiple provoque l'affaiblissement (fading) du signal transmis. Pour réduire les effets de ce "fading", on utilise différentes techniques de diversité :

- **Diversité d'Antennes :**

On utilise deux antennes omnidirectionnelles (configuration de base). Ces antennes, utilisant la diversité spatiale, reçoivent des signaux provenant de différents parcours. Le modem sélectionne trame par trame l'antenne sur laquelle parvient le signal de meilleure qualité.

- **Diversité de Fréquences :**

On utilise la technique d'Étalement de Spectre à Sauts de Fréquences (FHSS). Cette technologie présente une forte résistance aux interférences. La bande de fréquence des 2.4 GHz utilisée par un réseau local sans fil peut être alors divisée en 37 canaux (ou sauts) de 1 MHz. La transmission radio est étalée sur l'ensemble des canaux utilisables, mais à un instant donné, seul un signal de 1 MHz est diffusé sur l'un des canaux. Les sauts interviennent plusieurs fois par seconde dans un ordre prédéfini spécifié par la séquence de sauts. Deux sauts consécutifs ne peuvent être proches de moins de 6 MHz. Toutes les stations d'une même cellule utilisent la même séquence de sauts et sont synchronisées. La présence d'une interférence n'affecte généralement pas plus de quelques canaux voisins les uns des autres. Elle pourra donc interrompre la transmission sur un saut précis, mais les chances qu'elle affecte également le saut suivant dans la séquence sont statistiquement nulles.

- **Diversité d'Access Points :**

L'architecture multi-cellulaire BreezeNET offre un recouvrement de zones de couverture. Les stations situées à l'intérieur de cette zone s'associent automatiquement avec le Point d'Accès leur assurant la meilleure réception.

3.5.2 Aux Fours à Micro-ondes

Les fours à micro-ondes émettent des radiations dans la bande des 2.4 GHz, et sont donc une source potentielle d'interférences. Il est recommandé de positionner les unités aussi loin que possible de ces appareils.

3.5.3 A la transmissions ISM

Les équipements utilisant la bande des 2.4 GHz peuvent causer des interférences. C'est le cas de certains matériels de diffusion radiophonique et de certains équipements médicaux. Des tests devront être effectués au cas par cas pour déterminer la nature et la gravité éventuelle de ces interférences.

3.6 **La sécurité**

La sécurité est le premier souci de ceux qui déploient les réseaux locaux sans fil. Etant donné que le support est partagé, tout ce qui est transmis et envoyé peut donc être intercepté. Le comité de 802.11

a apporté une solution en élaborant un processus appelé WEP (Wired Equivalent Privacy), dont les mécanismes s'appuient sur le chiffrement des données et l'authentification des stations.

Le principal, pour les utilisateurs, est d'être sûr qu'un intrus ne pourra pas :

- Accéder aux ressources du réseau en utilisant le même équipement sans fil
- Capturer le trafic du réseau sans fil (écoute clandestine)

Les deux règles de protection élémentaires sont :

- Cacher le nom du réseau, mais ceci est difficile. En effet, si un attaquant écoute le réseau suffisamment longtemps, il finira par voir passer le nom du réseau puisque tout utilisateur désirant se connecter doit donner ce nom.
- N'autoriser que les communications contrôlées par une liste d'adresses MAC. Seules les stations dont l'adresse est spécifiée dans cette liste peuvent accéder au réseau.

Pour résumer, 802.11 gère à la fois le contrôle d'accès sur la couche MAC (Couche 2 du modèle ISO) et les mécanismes de chiffrement WEP de manière à assurer aux LAN sans fil une sécurisation équivalente à celle des réseaux filaires. Pour le contrôle d'accès, un ESSID (également appelé WLAN Service Area ID) est programmé sur chaque point d'accès. Un client sans fil ne pourra s'associer à un point d'accès que s'il connaît l'identificateur de ce dernier. De plus, il est possible d'intégrer au point d'accès une table des adresses MAC, baptisée Access Control List, qui limitera l'accès aux clients dont l'adresse MAC figure dans la liste.

Différents mécanismes sont mis en œuvre pour garantir un minimum de sécurité sur le réseau Wi-Fi de base:

- Le cryptage WEP dont le but est d'offrir sur le réseau Wi-Fi une sécurité équivalente à celle du réseau filaire. Mais trop des failles ont été trouvées sur ce mécanisme.
Le WEP est caractérisé par :
 - Son algorithme de cryptage RC4
 - La longueur de la clé : 64/128
 - Le mode génération de clé : manuelle ou par « PassPhrase » ou « phrase secrète »
 - Type de codage : Hexadécimale ou Alphanumérique
- Le filtrage par adresse MAC (adresse unique qui caractérise chaque équipement réseaux) : permet de définir une liste d'équipement autorisé à se connecter au réseau ou une liste interdite sur le réseau.

- Les boutons d'associations : certains équipements intègrent des boutons « dits d'association » qui permettent de n'autoriser l'accès au réseau qu'en appuyant manuellement sur ce bouton. Ce qui apporte une sécurité supplémentaire.
- D'autres mécanismes d'authentifications (Radius ...) sont aussi mis en œuvre sur certains équipements ou dans une partie du réseau. Une architecture avec serveur d'authentification centralisé de type RADIUS (Remote Authentication Dial-In User Server) peut satisfaire à cette exigence. Le client n'a plus à se préoccuper du point d'accès auquel il est connecté.

Pour palier aux failles du WEP, et renforcer la sécurité d'une manière générale d'autres normes sont adoptés ou en cours d'adoption[22] parmi elles la norme 802.11i normalisée en juin 2004.

3.6.1 Le WEP

La solution de gestion de la confidentialité et l'authentification commercialisée avec les équipements Wi-Fi est le WEP.

Les trames transmises sur les réseaux sans fil sont protégées par un chiffrement. Pour le chiffrement des données, le standard définit l'utilisation optionnelle de l'algorithme PRNG (Pseudo-Random Number Generator) RC4 à clé partagée. Cette clé est obtenue par la concaténation d'une clé secrète de 40 ou 104 bits et d'un vecteur d'initialisation IV(Initialization Vector) de 24 bits (figure 2.6). Toutes les données envoyées et reçues pendant que la station et le point d'accès sont associés peuvent être chiffrées à l'aide de cette clé. De plus, lorsque le chiffrement est activé, le point d'accès émettra un paquet test chiffré à destination de tous les clients qui tenteront de s'associer à lui. Le client doit utiliser sa clé pour chiffrer la réponse correcte afin de s'authentifier et de pouvoir accéder au réseau.

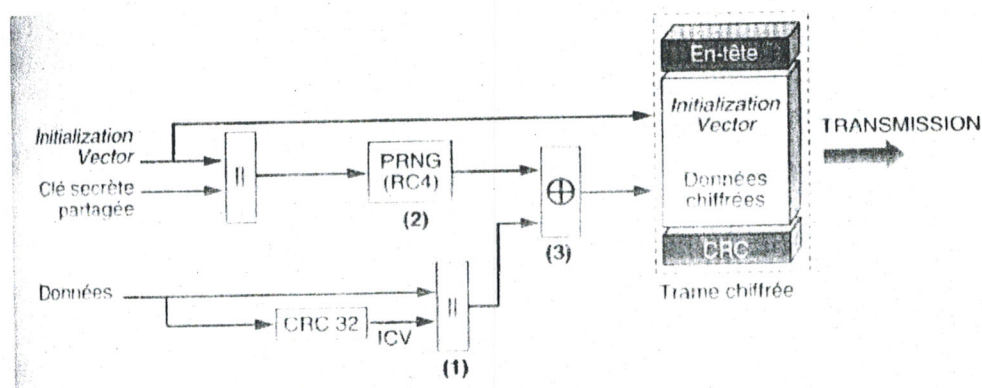


Figure 2.6 Chiffrement d'un paquet WEP

- Protection : l'attaque par force brute de cet algorithme est difficile par le fait que chaque trame est envoyée avec un vecteur d'initialisation qui relance le générateur de nombres pseudo aléatoires. Celui-ci est changé dynamiquement pour chaque trame.

- Autosynchronisation : l'algorithme se resynchronise pour chaque message. Ceci est nécessaire pour travailler en mode non connecté, où les paquets peuvent être perdus, comme dans tout réseau local.

Deux techniques d'authentification sont associées au WEP :

- Open System Authentication ou un terminal peut s'associer avec n'importe quel point d'accès et écouter toutes les données qui transitent au sein du BSS.
 - Shared Key Authentication qui est bien meilleure puisqu'il utilise une clé secrète partagée. Ce mécanisme se déroule en quatre étapes :
1. Une station voulant s'associer avec un point d'accès lui envoie une trame d'authentification.
 2. Lorsque le point d'accès reçoit cette trame, il envoie à la station une trame contenant 128 bits d'un texte aléatoire généré par l'algorithme WEP.
 3. Après avoir reçu la trame contenant le texte, la station la copie dans une trame d'authentification et la chiffre avec la clé secrète partagée avant d'envoyer le tout au point d'accès.
 4. Le point d'accès déchiffre le texte chiffré à l'aide de la même clé secrète partagée et le compare avec celui qui a été envoyé plus tôt. Si le texte est identique, le point d'accès lui confirme son authentification, sinon il lui envoie une trame d'authentification négative.

3.6.1.1 Failles du protocole

Chaque périphérique 802.11 utilise une clé qui est soit un mot de passe, soit une clé dérivée de ce mot de passe. La même clé est utilisée par tous les éléments accédant au réseau, le but est donc d'interdire l'accès à toutes les personnes ne connaissant pas ce mot de passe. La faille provient de la façon dont l'algorithme de chiffrement (RC4) est implémenté et plus précisément de la façon dont sont spécifiés les vecteurs d'initialisation (IV). Certaines cartes utilisent des IVs à 0 puis les incrémentent de 1 à chaque utilisation ; cela implique nécessairement des réutilisations de vecteurs et donc des flots de données similaires.

Outre le chiffrement faible (une clé WEP de 64 bits est composée d'une clé de chiffrement de 40 bits et d'un vecteur d'initialisation de 24 bits), la gestion statique des clés constitue un problème majeur : il faut environ cinq heures pour en épuiser toutes les combinaisons possibles. Tout un ensemble d'outils existe sur le net (Wep_crack, Wepdecrypt, AirSnort, etc.) pour mettre à mal, assez facilement, la sécurité des réseaux sans fil. Les longueurs de clés plus longues (à 128 ou 256 bits) ne sont en rien une solution. Elles ne font que requérir un peu plus de données à capturer.

On peut dire en conclusion que :

- o La couche liaison de 802.11 n'offre aucune sécurité.
- o Il faut utiliser des protocoles de sécurité supplémentaires tel que WAP, SSL ou SSH et en aucun cas s'appuyer sur WEP pour assurer la sécurité.
- o Toutes les entités utilisant 802.11 doivent être considérées comme externes et donc placées à l'extérieur du firewall.
- o Il faut toujours avoir à l'esprit que toute personne se trouvant dans le rayon d'émission (et même au-delà grâce à des dispositifs amplifiants) peut être susceptible de communiquer sur le réseau en tant qu'utilisateur valide.

3.6.2 WPA

Pour palier aux faiblesses du WEP, la norme 802.11i intégrera plusieurs nouveautés: 802.1X, AES et TKIP. La norme 802.1X ne s'applique pas uniquement au réseau sans fil, elle est également utilisée en réseau filaire. Elle utilise un serveur d'authentification au lieu de la simple clé WEP. Chaque utilisateur sans fil possède ses propres nom d'utilisateur et mot de passe, exactement comme sur un réseau filaire classique.

AES (Advanced Encryption Standard) vient en parallèle du 802.1X et offre un système de chiffrement beaucoup plus évolué que le WEP. Mais cela nécessite l'utilisation d'une puce dédiée. Impossible donc de mettre à jour un matériel déjà existant. Sa compatibilité reste limitée au matériel équipé de cette puce.

TKIP (Temporal Key Integrity Protocol) est un mécanisme temporaire qui essaye de palier les défauts du WEP. Au lieu d'utiliser une clé fixe pour chiffrer les paquets de données, il génère régulièrement une nouvelle clé à partir de l'adresse MAC (adresse physique de la carte réseau, inscrite dans les composants) de la carte réseau ou du point d'accès. Cette solution est bien moins efficace que l'AES, mais tous les appareils existants peuvent en bénéficier en effectuant une simple mise à jour logicielle. Elle a vocation à disparaître avec l'arrivée de matériel compatible AES.

WPA (*Wi-Fi protected access*), un sous-ensemble de la future norme 802.11i. WPA fonctionne avec toutes les variantes de Wi-Fi : 802.11b (11 Mbit/s sur la bande des 2,4 GHz), 802.11a (54 Mbit/s sur la bande des 5 GHz) et le nouveau standard 802.11g (54 Mbit/s sur la bande des 2,4 GHz). Contrairement à 802.11i, il ne requiert pas la mise à jour du matériel, mais seulement celle du logiciel sur le point d'accès radio et sur le pilote de la carte réseau. WPA vise à améliorer deux faiblesses fondamentales de WEP : le chiffrement des données, afin d'assurer leur confidentialité, et l'authentification des utilisateurs.

Le principal avantage du WPA est qu'il permet un meilleur cryptage de données qu'avec le WEP car il utilise des clés TKIP (*Temporal Key Integrity Protocol*). Cela signifie qu'avec le WPA, la clé de chiffrement va fréquemment changer dans le temps. Il s'agit ici d'un procédé dit de "clé dynamique", à

l'inverse du WEP qui ne modifie pas cette durant toute la durée d'une connexion à un réseau sans fil Wi-Fi. Un procédé dit de "clé statique". Cette amélioration est totalement transparente pour l'utilisateur. Les clés WPA sont générées et distribuées de façon automatique par le point d'accès sans fil compatible WPA.

3.6.3 Conclusion

Le Wi-Fi est très sensible au brouillage. Cette vulnérabilité est intrinsèque à toutes les techniques de réseaux sans fil, techniques qui se prêtent aux attaques en déni de service sur les équipements du réseau, voire à la destruction physique de ces équipements dans le cas de bruits créés artificiellement dont la puissance dépasserait les tolérances admises[23].

S'y ajoutent des problèmes de saturation de fréquence ou de bande passante lorsque de trop nombreux terminaux sont connectés. Dans certaines conditions, le débit peut chuter considérablement, même sur des courtes distances dépourvues d'obstacles.

Par ailleurs, il est actuellement possible d'écouter et de s'introduire dans un réseau radio d'établissement depuis la rue, à l'aide d'un simple ordinateur portable équipé d'une carte 802.11b et d'un logiciel spécialisé disponible sur Internet. Ceci permet d'écouter des transmissions de données, voire de les falsifier, portant ainsi atteinte à la confidentialité et à l'intégrité des échanges.

Il est également important de préciser que l'option de chiffrement proposée, le WEP (Wired Equivalent Privacy), ne remplit pas les garanties de sécurité attendus ; des outils libres ou gratuits sont à disposition sur Internet pour passer outre cette protection peu efficace.

3.7 Utilisation du WIFI

- Couverture d'une salle difficile d'accès par câble
- Interconnexion de bâtiments
- Mise en place de réseau urbain de type communautaire
- Extension des réseaux filaires de bureau pour les utilisateurs nomades
- Point d'accès public à Internet de type « Hot Spot »

3.7.1 Bornes d'accès Wi-Fi dans les lieux de passage ou "Hot spots"

Les bornes d'accès au Wi-Fi généralement installés dans des lieux de passage à forte influence, tels que les aéroports, les gares, les complexes touristiques sont appelés Hot Spots (point chaud). L'installation de ces bornes ne nécessite pas d'autorisation lorsqu'elles sont raccordées directement à un réseau ouvert au public existant (en général un opérateur de télécommunications). Avec l'installation de ces bornes dans ces lieux de passage, ces nouveaux nomades peuvent accéder depuis leur PC portable ou leur PDA, à leur messagerie, à des sites Internet ou à l'ensemble des applications partagées de leur entreprise avec la même ergonomie qu'au bureau.

3.8 Les performances d'un Réseau WIFI

Les performances théoriques sont :

Portée : jusqu'à 300m de rayon de couverture sans obstacle (à la propagation des ondes)

Débits : variable de 1 à 54 Mbit/s (jusqu'à 11M pour le 802.11b, 22 M pour le 802.11b et 54 M pour le 802.11g)

Mais dans la pratique ses données sont fonction :

- de la qualité des équipements
- de l'environnement dans lequel les équipements sont déployés
- le nombre de clients Wi-Fi connectés à la fois au réseau

3.9 Avantages du Wi-Fi

Aujourd'hui, le monde de l'entreprise se caractérise par un fort développement de l'effectif nomade et une organisation de moins en moins hiérarchisée. Les employés sont équipés d'ordinateurs portables et passent plus de temps à travailler au sein d'équipes plurifonctionnelles et géographiquement dispersées.

La productivité des employés est pour une grande part générée au cours de réunions, et non pas sur le poste de travail. L'utilisateur doit pouvoir accéder au réseau ailleurs qu'à son poste et le WLAN s'intègre parfaitement dans cet environnement, offrant aux employés mobiles la liberté d'accès au réseau dont ils ont tant besoin. Avec un réseau sans fil, les employés peuvent accéder aux informations où qu'ils soient dans l'entreprise : salle de conférence, cafétéria ou agence distante. Le LAN sans fil présente également un intérêt non négligeable pour les directeurs informatiques, car il leur permet de concevoir, de déployer et d'améliorer le réseau sans se soucier de l'existence de câbles, et en s'épargnant bien des efforts et des dépenses.

Parmi les avantages que procure le Wi-Fi on peut citer :

- Internet haut débit avec mobilité garantie au bureau à domicile ou dans les espaces publics
- Possibilité de déplacer les postes de travail (en entreprise ou à domicile) n'importe où dans le bâtiment sans perdre la connectivité au réseau ou à Internet (sans contrainte de recâblage)
- Redéploiement facile du réseau en cas de déménagement
- Utilisation pratique avec les PC portables
- Intégration facile au réseau LAN existant pour offrir de la mobilité aux utilisateurs (aux employés)
- Une installation plus économique du réseau dans les endroits difficiles à câbler, bâtiments anciens et structures en béton armé
- Connexion des Access Point au backbone réseau pour offrir des accès réseaux et Internet dans des salles de réunions, cafétéria et dans les lieux publics
- Flexibilité d'aménagement des locaux

• Une mobilité génératrice de gains de productivité, avec un accès en temps réel aux informations, quel que soit le lieu où se situe l'utilisateur, pour une prise de décision plus rapide et plus efficace

- Avec le Wi-Fi on peut garder donc :
 - ✓ la liberté de mouvement dans les bâtiments domiciles et bureaux tout en restant connecté au réseau d'entreprise et à l'Internet
 - ✓ la connectivité au réseau d'entreprise ou à l'Internet en voyage, dans les transport en commun, sur les places publics (aéroports, hôtels, ...)

Les WLAN libèrent donc l'utilisateur de sa dépendance à l'égard des accès câblés au backbone, lui offrant un accès permanent et omniprésent. Cette liberté de mouvement offre de nombreux avantages dans de nombreux types d'environnements de travail tels que :

- accès immédiat entre le lit d'hôpital et les informations concernant le patient pour les médecins et le personnel hospitalier
- Un accès réseau simple et en temps réel pour les consultants et les auditeurs sur site
- Un accès étendu aux bases de données pour les chefs de service nomades, directeurs de chaîne de fabrication, contrôleurs de gestion ou ingénieurs du bâtiment
- Une configuration simplifiée du réseau avec un recours minime au personnel informatique pour les installations temporaires telles que stands d'exposition ou salles des conférences
- Un accès plus rapide aux informations client pour les fournisseurs de services et détaillants, résultant en un meilleur service et une satisfaction supérieure
- Un accès omniprésent au réseau pour les administrateurs, pour le support et le dépannage sur site
- Un accès en temps réel pour les réunions des groupes d'étude et des liens de recherche pour les étudiants

4. Les réseaux WIMAX

La nouvelle norme 802.16a, ou WiMAX (World Interoperability for Microwave Access) élargit la zone de diffusion des réseaux WiFi à plusieurs dizaines de kilomètres. Normalisée depuis avril 2002 par l'IEEE, elle permet la diffusion par ondes radio à l'échelle de réseaux métropolitains (MAN), soit une cinquantaine de kilomètres à la ronde et le transfert de données, de vidéos ou de communications vocales jusqu'à 70 mégabits/seconde. L'initiative WiMax est partie de l'idée de développer des liaisons

hertziennes concurrentes des techniques xDSL terrestres. La norme IEEE 802.16 a favorisé le développement de cette technologie

Bien que récente et non encore éprouvée, cette technologie fait déjà largement parler d'elle. Sur le même principe que le Wi-Fi, une borne WIMAX diffuse, via une bande hertzienne comprise entre 10 et 66 GHz, à une portée maximale théorique de 50 km. Une borne réceptrice dirige ensuite le signal vers un routeur ou un réseau local. Le débit ainsi obtenu est de 70 mégabits par seconde, soit 35 fois plus rapide que les plus performantes des connexions ADSL actuellement disponibles en France.

Le WIMAX est sécurisé par défaut : pour se connecter au réseau, les ordinateurs doivent être identifiés et autorisés au préalable. Il est complémentaire au WiFi en servant de liaisons point à point pour le transport de trafics issus de point d'accès WiFi. Et surtout, il offre une qualité de service qui permet de faire de la téléphonie sur IP.

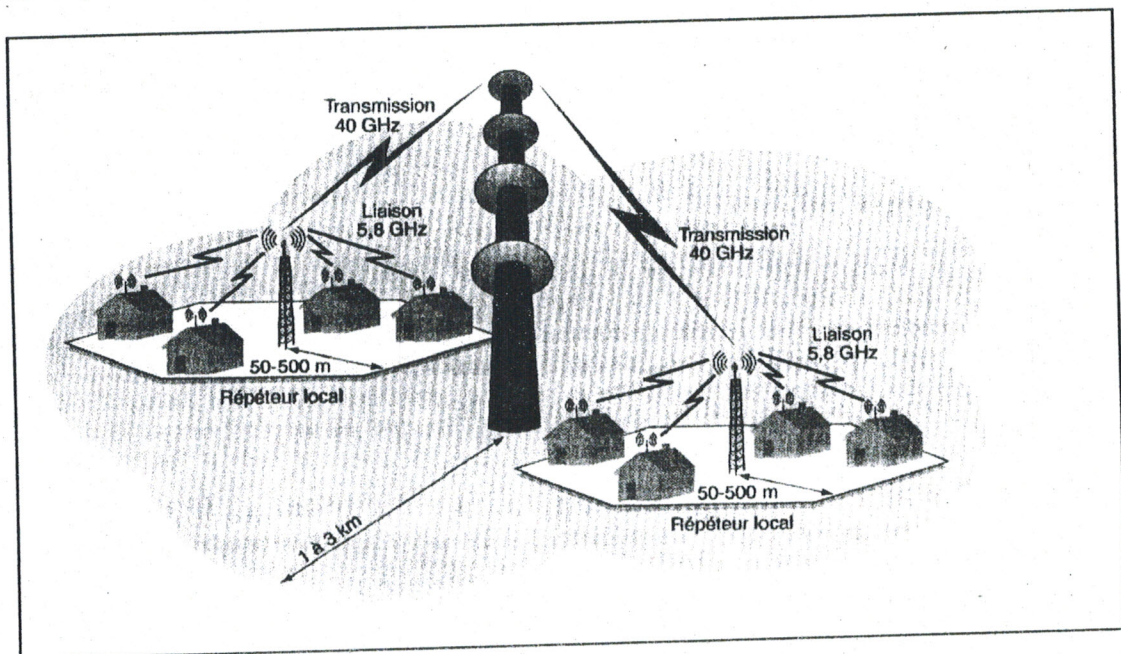


Figure 2.7 Réseau WiMax

La technologie 802.16 pourrait être une réponse adaptée aux besoins des pays en voie de développement, qui ne possèdent pas de réseau téléphonique ou câblé généralisé. Son faible coût d'installation, comparativement aux solutions alternatives actuelles (satellite, CPL...), pourrait également séduire les entreprises situées dans des zones non couvertes, dans les pays développés.

5. Les réseaux MESH

Mesh, terme anglais signifiant maille ou filet, s'applique à la topologie d'un réseau, où tous les hôtes de ce réseau (filaire ou non) sont connectés de proche en proche, sans hiérarchie centrale, formant ainsi une structure en forme de filet. Cela permet d'éviter d'avoir des points sensibles, qui en cas de

panne, coupent la connexion d'une partie du réseau. Si un hôte est hors service, ses voisins passeront par une autre route.

Ad-Hoc, prend ici le sens de « spontané » et s'applique au type de connexion [15]. C'est-à-dire qu'un PC qui se connecte à un réseau de type ad-hoc, fait parti instantanément du réseau.

Wifi, indique le type de connexion radio, mais d'autre technologie pourrait être utilisée.

Le principe de base est que chaque hôte devient routeur pour les autres.

Ce type de réseau ne nécessite pas de point d'accès, pas de routeur dédié et gère dynamiquement les associations et désassociations des hôtes. Principaux points forts :

- Rapidité de mise en place,
- coût,
- indépendance vis à vis des points d'accès (que ce soit d'ordre commercial ou technique).

L'inconvénient est la nécessité d'un maillage important, si un poste veut se connecter, il doit « accrocher » un voisin. Bien entendu il faut augmenter la portée des antennes, et faire en sorte que les postes soient en activité permanente. Ce type de réseau s'adapte à tout type de terminaux : détecteur, webcam, transmission radio et informatique.

Les futures applications sont nombreuses :

- dans le domaine militaire,
- dans le domaine des secours et des services d'urgence (mise en place d'hôpital de campagne...),

dans le domaine civil (connexion internet haut débit, réseaux citoyens...), de nombreuses villes développent des réseaux wifi ad-hoc, même la NASA développe un système de communication wifi ad-hoc pour des véhicules d'exploration de Mars.

5.1 MANET

Aujourd'hui la plupart des protocoles de routage spécifiques aux connexions Ad-Hoc et mobiles proviennent du groupe MANET (Mobile Ad-hoc NETWORK), créé par l'IETF en 1997.

Un réseau MANET se définit par des nœuds mobiles, possédant une ou plusieurs interfaces sans fil et disposant de fonction de routage. Cette fonction de routage permet à un paquet d'atteindre sa destination de nœud en nœud sans qu'il y ait de routeur désigné. D'autre part, le réseau est dynamique car les nœuds peuvent se déplacer et modifier constamment la topologie.

6. Les Ondes Wi-Fi et la santé

Tous comme les autres technologies sans fil, les WLAN doivent être conformes aux standards stricts définis par les gouvernements et l'industrie. On s'est beaucoup inquiété dans les industries qui font appel aux technologies sans fil des risques du sans fil pour la santé. A l'heure actuelle, aucune étude scientifique n'a permis de déterminer que les transmissions sans fil avaient un effet nuisible sur la santé. De plus, la puissance d'émission des LAN sans fil est limitée à moins de 100 mW par les

réglementations de la FCC, ce qui est nettement inférieur à la puissance des téléphones mobiles, alors qu'il est généralement admis que les risques causés par les transmissions radio sont corrélée à la puissance et à la proximité de l'émetteur.

Les rayonnements liés à l'utilisation du WIFI sont en effet négligeables par rapport à ceux auxquels nous sommes soumis quotidiennement, depuis des dizaines d'années, par les relais T.V, les relais F.M., téléphones portables , ceux des appareils électriques, etc.

De plus , la puissance rayonnée décroissant avec le carré de la distance, une borne WIFI placée à trois mètres correspond à un téléphone portable allumé à une distance de 10 mètres (ceux-ci sont dix fois plus puissants).

7. Conclusion

A l'origine, le WiFi a été conçu pour étendre les réseaux Ethernet des entreprises et le formidable essor que connaît actuellement les technologies sans fil (WLAN) et (WPAN), est certainement un phénomène majeur qui a marqué ces dernières années le domaine de l'accès sans fil.

Actuellement, cette utilisation reste majoritaire parce que les cartes WiFi sont de plus en plus souvent intégrées dans les ordinateurs portables dont les entreprises s'équipent en grand nombre.

Le marché des solutions mobiles et sans fil propose un nombre considérable de systèmes qui se diversifient quant aux technologies et standards utilisés (802.11, 15, 16 et 3G/4G). Leur convergence se dessine avec comme principal objectif d'offrir un roaming global intertechnologies inter-systèmes.

Pour ce qui est de la technologie WLAN, elle est en train de devenir l'une des principales solutions de connexion choisie par de nombreuses entreprises. Plusieurs standards sont en compétition mais aujourd'hui un consensus [22] émerge autour des normes IEEE 802.11b (WiFi) et IEEE 802.11a (WiFi 5).

Toutefois, des questions restent posées : quelle technologie devrait-on choisir WiFi, WiFi5 ou 802.11g ? Comment contrôler la mise en place de réseaux Wi-Fi ?

La quantité de spectre dans la bande 2.4GHz ainsi que dans la bande que 5GHz (5150-5350MHz) est insuffisante pour offrir un service de qualité dans les zones à forte concentration d'utilisateurs. Des avancements de la technologie WiFi sont donc attendus incessamment.

La visioconférence

La visioconférence est une technique de transmission de données vocales, informatiques, de signaux informatiques organisés utilisés pour la tenue de réunions ou de conférences à distance. Cette technique peut être exploitée pour la quasi totalité des actions de formation. Le concours de l'image est important car il est difficile dans la plupart des matières de diffuser un cours dépourvu de toute image.

1. Introduction

Jusqu'à aujourd'hui encore, la voix, la vidéo et les données circulent généralement sur des réseaux dédiés. Chacun de ces réseaux répond aux besoins particuliers des flux qu'il transporte : par exemple, la télévision utilise les satellites ou le hertzien car ces réseaux sont adaptés au mode haut débit en diffusion (une source vers n récepteurs), le téléphone passe par le réseau commuté qui répond bien aux problèmes de qualité de service et de temps réel et les données circulent sur Internet qui assure le transport au meilleur coût.

Cependant, grâce aux nouveautés technologiques tout ceci est en train d'être complètement bouleversé

- la micro-électronique et l'algorithmique font des progrès tels que le moindre PC peut maintenant coder et décoder les sons et les images, en temps réel, avec des niveaux de compression très efficaces (6kbs pour la voix par exemple).
- les réseaux IP se généralisent avec Internet mais également au sein des réseaux privés d'entreprises ou d'administrations, grâce à une offre en terme de débits qui croît exponentiellement.
- des protocoles "standards" se développent au-dessus d'IP pour assurer des besoins très variés (synchronisation, qualité de service, réservation de capacité).

Tous ces changements rendent aujourd'hui réalisables la circulation de voix et de vidéo sur IP en plus des flux de données. C'est ce que l'on appelle la "convergence". Les paquets de données, circulant sur IP, peuvent contenir, aussi bien du texte qu'un enregistrement sonore ou vidéo.

Au-delà de la convergence, on peut parler de multimédias quand tous ces flux son, vidéo, données sont organisés, synchronisés, cohérents entre eux, interagissent...

1.1 Définition

La visioconférence consiste à échanger de la voix, de la vidéo, et des données qui proviennent de transfert ou de partage d'applications (éditeur de texte, graphique et autres). Elle ne peut pas remplacer totalement des rencontres physiques mais apporte de nouveaux moyens de communication entre deux ou plusieurs collaborateurs.

C'est une technologie qui permet, depuis un micro-ordinateur, de parler avec un interlocuteur distant et de le voir en temps réel (par le biais d'une retransmission vidéo) dans une fenêtre virtuelle à l'écran. Elle permet aussi de travailler en commun sur des documents. Ce service consiste à ajouter l'image à une conférence téléphonique classique. Il peut concerner de deux à n utilisateurs, répartis derrière leurs ordinateurs personnels, ou rassemblés par petits groupes dans différentes salles spécialisées de visioconférence. Ce service de visioconférence est généralement couplé à un service de partage de documents bureautiques, un outil de "tableau blanc" (chacun écrit, dessine ou affiche ce qu'il veut dans une zone particulière de l'écran que tout le monde visualise à l'identique). Un dispositif de visioconférence se compose de :

- Une petite caméra vidéo,
- Un casque, un combiné téléphonique,
- un microphone et des haut-parleurs,
- de cartes d'extension pour la vidéo et la communication,
- Un CD-ROM contenant le logiciel de Visioconférence.

1.2 L'histoire de la visioconférence

Avant la visioconférence il y a eu la visiophonie dont les premières études et applications en France ont été réalisées par le CENT (Centre National d'Etude des télécommunications) Les premières applications commerciales de visioconférence et visiophonie n'apparaîtront qu'en 1984. Ce retard est dû au problème du débit (2 Mbit/s) exigé pour transmettre l'information vidéo et audio qui sera résolu par les algorithmes de codage et de compression utilisés dans codecs (codeur-décodeur).

Mais la visioconférence aura du mal à se développer pour des raisons de coût et de non-compatibilité des différents systèmes de visioconférence dont les codecs utilisent des algorithmes de codage propriétaires. Aussi, depuis 1991 les codecs se conformant à la norme H261 dominent le marché. Mais ce qui va faire chuter les prix c'est la compression/décompression par logiciel, solution moins coûteuse que le codec car le coût est allégé de la partie matérielle du codec.

2. Les protocoles de visioconférence

Deux méthodes possibles permettent de faire de la visioconférence:

- par l'intermédiaire d'une ligne RNIS (ISDN en anglais). Cette méthode permet les communications avec presque tous les pays du monde. Un accès de base RNIS (Numeris) permet d'obtenir une communication de qualité : environ 25 images par seconde. Il s'agit de la méthode la plus économique si les deux sites ne sont pas en réseau.
- par l'intermédiaire d'un réseau TCP/IP local ou étendu. Les coûts de communication sont nuls dans le cas d'un réseau local. On peut utiliser un réseau étendu pour faire de la

visioconférence mais il faut posséder suffisamment de bande passante. Si on dispose d'un lien direct haute vitesse sur Internet, on peut également l'utiliser pour la visioconférence.

2.1. Rappel de quelques protocoles standard

- **RTP/RTCP**

Ces deux protocoles permettent la gestion du temps réel sur IP. Le réseau IP étant un réseau de données, les paquets d'information y circulant n'arrivent pas forcément à leur destinataire avec les mêmes intervalles de temps les séparant, qu'à leur émission à la source. Ce phénomène est appelé la gigue.

RTP (Real-time Transport Protocol) est un protocole de transport et de contrôle adapté aux applications qui présentent des propriétés temps réel. Il numérote les paquets IP contenant de la voix et de la vidéo, et ajoute également un "timestamp" qui indique l'instant exact d'émission de ce paquet IP à la source. Ainsi, quand ces paquets arrivent à leur destinataire, grâce à l'information véhiculée par RTP, il est possible de les reclasser dans l'ordre avec les bons intervalles entre eux. Il offre des moyens aux applications pour :

- reconstituer la base de temps des flux de données audio, vidéo et temps réel;
- détecter rapidement les pertes de paquets, et en informer la source dans des délais compatibles avec le service ;
- identifier le contenu des données et permettre leur transmission sécurisée

RTP est accompagné d'un second protocole n'assurant qu'un trafic de contrôle, RTCP (Real-time Transport Control Protocol). Celui-ci renvoie à l'émetteur un retour d'information (feedback) sur la qualité de la transmission, ainsi que d'autres informations utiles (figure 3.1). Par exemple dans le cas de conférences audio ou vidéo regroupant un grand nombre de participants, RTCP identifie les différentes sources. Il renseigne aussi sur le taux de perte (on privilégie le temps réel à l'intégrité des données transmises).

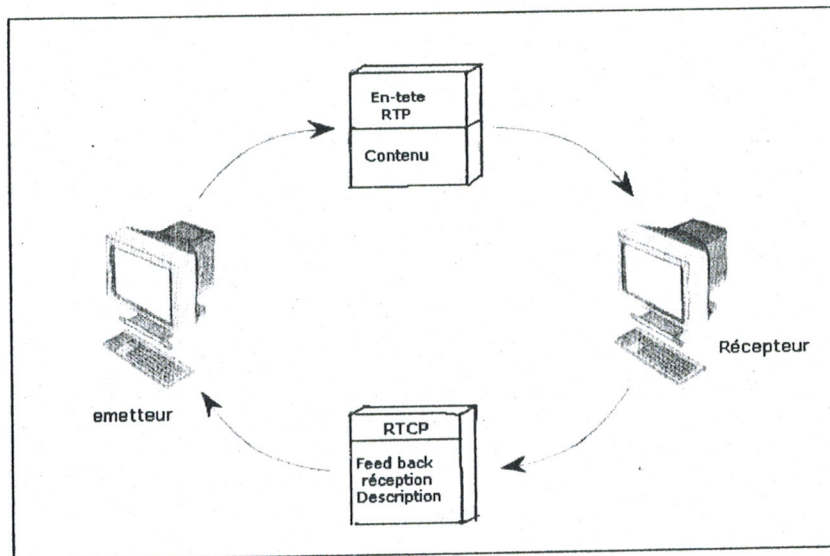


Figure 3.1 Les paquets RTP et RTCP

RTP peut être exploité sans RTCP. Il est conçu pour une exploitation dans un environnement multipoint. Il est fait pour gérer de larges conférences dans lesquelles plusieurs sources émettent en direction de nombreux participants.

- RTSP

RTSP (Real-time Streaming Protocol) est un protocole client-serveur qui appartient à la couche application du modèle OSI. Il définit les procédures à suivre pour le pilotage à distance des serveurs de médias (streaming medias) audio et vidéo. Il permet de contrôler la livraison de données avec des caractéristiques temps réel.

RTSP reprend le protocole de transfert HTTP (Hypertext Transfert Protocol) qui est conçu plutôt pour les données et n'est pas toujours approprié pour l'audio et la vidéo. Il est compatible avec le mode de diffusion multicast. Le protocole RTSP sert à établir et à contrôler un ou plusieurs flux synchronisés de médias continus (streaming), tels qu'audio ou vidéo. Il s'agit d'une variante des protocoles ci-dessus (real time streaming protocol), adaptée à la diffusion vidéo sur IP (une source vers n récepteurs).

- MULTICAST

Dans le cas de diffusion vidéo d'une source vers n récepteurs, il est intéressant pour optimiser la bande passante de transformer les n flux reliant chaque récepteur à la source vidéo en une structure arborescente : au niveau du serveur il n'y a qu'un flux sortant, et à chaque noeud IP du réseau, le flux peut être dupliqué, selon qu'il y a présence ou non, dans un des sous-réseaux en aval, d'un récepteur du flux en question.

- H320, H323

Il s'agit des standards de visioconférence. H323 concerne particulièrement les réseaux IP alors que H320 s'applique lui à la visioconférence sur RNIS.

- MPEG1, MPEG2, MPEG4, H263, H261, G711, G722, G723, G729

Il s'agit de divers codeurs audios et/ou vidéos avec différents niveaux de compression pour différentes qualités d'écoute et/ou de visualisation.

- T120

Cette norme permet le partage de documents.

- RSVP

RSVP (Resource reSerVation Protocol) est un protocole de signalisation qui permet d'émettre une demande d'allocation de bande passante à tous les nœuds sur le chemin d'un flot donné. Les messages RSVP sont envoyés à contre-courant du flot de données ; ils vont du récepteur vers l'émetteur et la communication ne se fait que dans un seul sens du destinataire vers l'émetteur. Les messages de réservation contiennent, pour chaque flot, les critères de QoS et la description des paquets concernés.

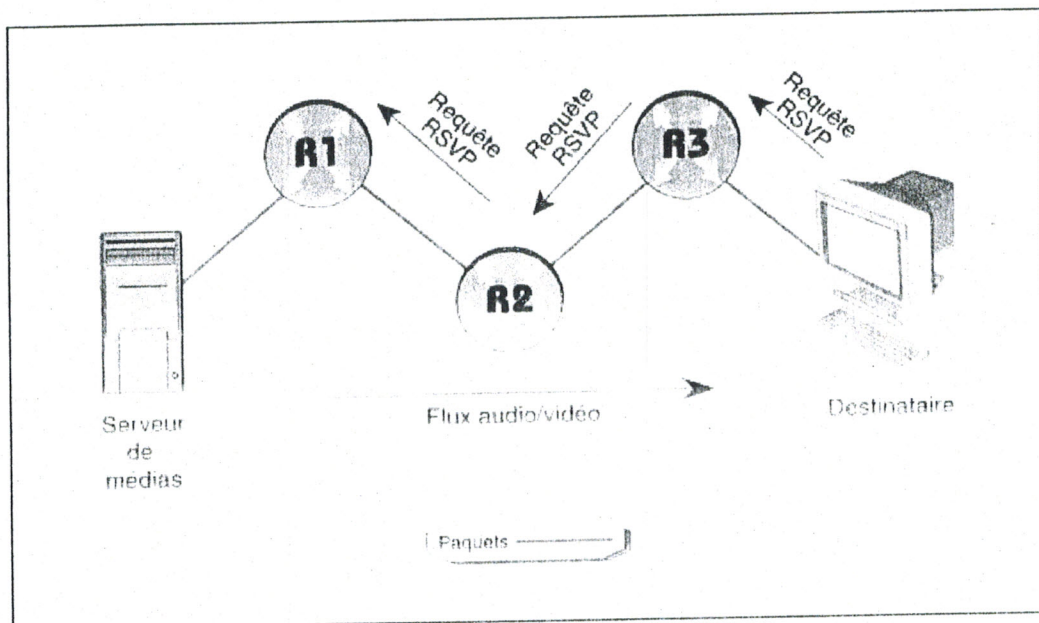


Figure 3.2 **Chemin d'une réservation RSVP**

R1, R2 et R3 sont des routeurs. RSVP fonctionne en mode non connecté avec ces derniers. Les terminaux de réception envoient des messages RSVP de contrôle aux routeurs pour :

- Mettre à jour dynamiquement la réservation lors de l'arrivée ou du départ d'un membre dans un groupe de diffusion multicast ;
- Modifier le chemin du routage ;
- Rafraîchir l'information du routeur.

- IPv6

La nouvelle génération d'IP possède par défaut des mécanismes similaires à la plupart de ceux identifiés ci-dessus (RSVP, multicast, priorisation)

2.2 Principales normes

Voici les normes principales qui régissent les communications en visioconférence:

- H320 : norme qui concerne les communications sur ligne RNIS. Elle est commune à tous les systèmes de visioconférence sur le marché, ce qui assure une interopérabilité.
- H323 : norme pour la visioconférence au travers du protocole TCP/IP. Elle permet à deux (ou plusieurs) postes qui sont en réseau, d'effectuer une visioconférence. Tiré de H320, elle définit comment les systèmes audio et vidéo peuvent communiquer sur des réseaux de paquets fonctionnant en mode sans connexion et sans garantie de qualité de service. L'adressage est souple (utilisation possible de numéro de téléphone, @IP, URL, @électronique,...)
- H324 : norme dédiée au RTC, pour les modems supérieurs à 28Kbits.
- T120 : norme qui permet de transférer des fichiers, partager des applications, partager un tableau blanc électronique et envoyer des messages.

Si on veut faire communiquer ensemble plusieurs sites, il faut en plus un MCU (Multi Conferencing Unit) ou pont multisite. Cet appareil répond soit à la norme H320 (RNIS) soit à la norme H323 (LAN). Il est composé de différents modules suivant les besoins particuliers. On peut utiliser une passerelle H323/H320 permettant de passer de l'un à l'autre.

Le multicast n'est actuellement pas supporté sur Internet par le protocole IPv4, en attendant son successeur IPv6 qui l'intégrera en natif. Ceci explique pourquoi il est impératif de faire transiter le multicast en l'encapsulant dans de l'unicast.

2.2.1 La norme AUDIO

Plusieurs qualités de son peuvent être utilisées dans le cadre de la norme H320.

- **G722** norme garantissant une très bonne qualité sonore mais elle demande beaucoup trop de bande passante pour être utilisable sur des connexions faible débits (<128 kbits/s).
- **G711** signal audio de 3.4KHz utilisant des bandes passantes allant de 32 à 64 kps

- **G728** signal audio de 3,4kHz codé sur 16kbps

2.2.2 La norme VIDEO

H261 : cette norme permet la visioconférence sur RNIS en utilisant un ou plusieurs canaux à 64 kps.

H263 plus performant que le codage H261 sur de faibles débits.

2.2.3 La norme de COMMUNICATIONS

H281 Pilotage des caméras à distance

2.2.4 La norme d'Unité de Contrôle Multimédia

H243 définit la procédure de communication et de contrôle d'une unité multipoint MCU.

G723.1 Double codec (codage/décodage) du signal audio pour transmission à 6,4Kbps et 5.3Kbps.

G729 codec du signal audio à 8/13 Kbps.

2.3 Modes d'utilisation de la visioconférence

Il y a trois principales façons d'utiliser la visioconférence :

1. Point à point
 2. Point à multipoint (mode broadcast)
 3. Multipoint
- Point à Point

La visioconférence en point à point : un site se connecte avec un seul autre site.

- La visioconférence en mode broadcast

Les visioconférences point à multipoint sont parfois appelées " mode broadcast " (mode diffusé). Ce réglage permet à un site privilégié de diffuser un message vers les autres sites, qui peuvent interagir et poser des questions. Si ces systèmes intègrent un pont, la communication est immédiate, sans réservation de pont multipoint. La réunion peut durer aussi longtemps que nécessaire et n'est pas restreinte à une tranche horaire. Les visioconférences point à multipoint sont, par exemple, idéales pour les stages d'entreprise ou lorsque le PDG désire s'adresser à certains employés.

- La visioconférence en multipoint

Pour les visioconférences en multipoint, les utilisateurs ont plusieurs options :

- Le pont multipoint externe
- le pont multipoint interne.

Les ponts ou MCU.

Un pont de conférence ou MCU (Multipoint Central Unit) est un système qui permet la mise en communication bidirectionnelle d'au moins 3 visioconférences.

Les différentes solutions de visioconférence sont dépendantes du type de réseau utilisé pour le transport des données. Le transport de l'image et du son peut se faire sur un réseau local, par ligne RNIS ou par réseau ATM. La norme H320 caractérise le réseau RNIS, alors que la norme H323 caractérise un réseau local et INTERNET.

▪ Visioconférence par RNIS

Le réseau RNIS a pour nom international ISDN ou Integrated Services Digital Network. Le RNIS apparaît comme un moyen de communication:

- Rapide (accès de base à 128Kbits/s)
- Normalisé (tous les éléments d'accès au RNIS sont spécifiés par des normes internationales)
- Intelligent (les centraux sont capables de gérer une signalisation bien plus riche que celle du téléphone classique, offre d'un grand nombre de services complémentaires)

Il offre la possibilité de joindre n'importe qui dans le monde du fait du raccordement au réseau téléphonique. C'est le système le plus utilisé à l'heure actuelle donc facilité de mise en oeuvre.

▪ Visioconférence par ATM

Le réseau ATM (Asynchronous Transfer Mode) est un réseau large bande à intégration de services. C'est le réseau idéal pour la visioconférence. C'est un réseau de haut débit avec possibilité de réserver une certaine bande passante pour garantir le flux des données. La fluidité est garantie ainsi qu'une haute définition des images. La difficulté d'utilisation réside dans sa disponibilité internationale. Seul les universités et les centres de recherches ont accès à ce type de réseau commun.

▪ Visioconférence par INTERNET

Le réseau de transmission de données avec le protocole IP pour Internet Protocol. Ce réseau n'offre pas de qualité de service, il est impossible de garantir la fluidité de la retransmission (perte de paquets d'information ou livraison en retard). Le débit est adaptatif, le trafic évolue en fonction du nombre d'utilisateurs et des applications en cours. Néanmoins, une panoplie d'outils se développe:

RTP (Transport en Temps Réel), IPv6 (Internet Protocol version 6), des routeurs appelés Gigarouteurs avec des débits de 700Gbps, des algorithmes de compression plus efficaces (MPEG4)

- visioconférence par satellite

La visioconférence par satellite est une visioconférence radiodiffusée par satellite. C'est en fait la télévision interactive entre personnes distantes ou groupes de personnes [29] distants. Vu son débit (216 Mb/s), elle est d'excellente qualité, mais très coûteuse. Vu les coûts, la visioconférence par satellite se fait rarement entre plus de deux sites.

3. L'architecture d'un système de visioconférence

3.1 Exemples d'architecture

1 - Le premier exemple d'architecture (figure 3.3) représenté ci-dessous permet la communication entre un équipement de visioconférence (N°1) et plusieurs équipements de visioconférence (N°2 et N°3) grâce au protocole IP multicast par l'intermédiaire d'un serveur réflecteur

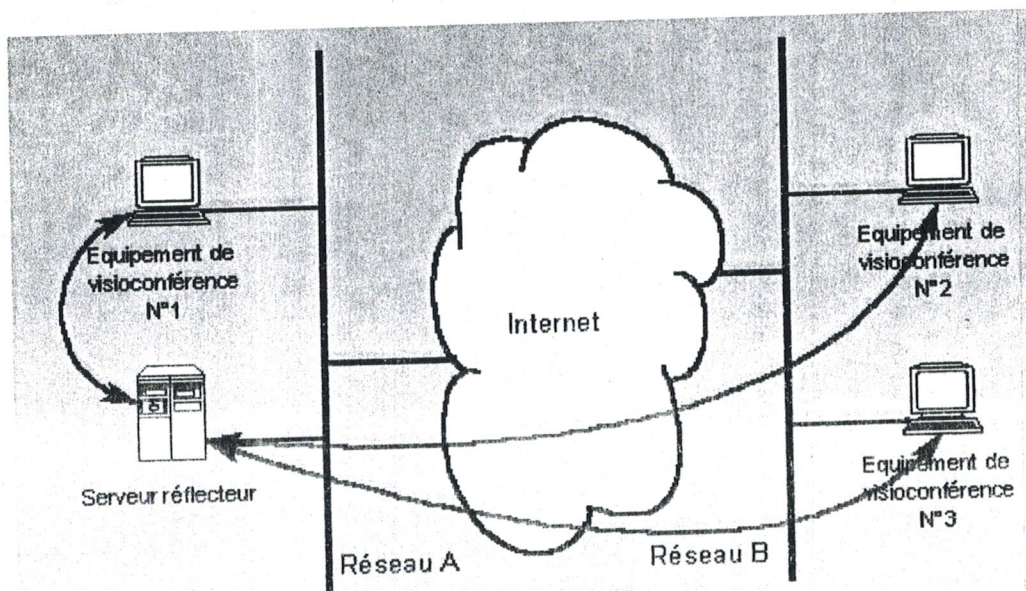


Figure 3.3 *Communication point à multipoint*

Pour tenir une visioconférence de groupe, on doit passer par un serveur, qu'on appelle un réflecteur, qui transmet l'image, la voix et la localisation des participants.

1-Ce deuxième exemple d'architecture (figure 3.4) montre la communication point à point entre l'équipement de visioconférence N°2 et N°3 via un réseau local.

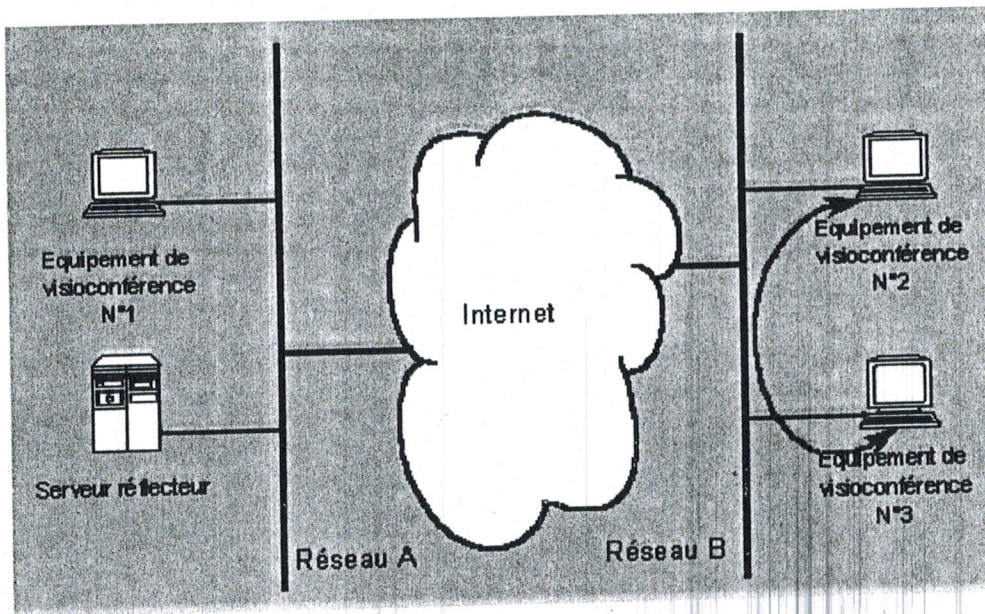


Figure 3.4 communication point à point

Dans le cas d'une visioconférence entre deux personnes, on n'a pas besoin de passer par l'intermédiaire d'un réflecteur. L'ordinateur de la personne contactée fait office de serveur. Pour contacter un interlocuteur directement, on doit connaître son adresse IP et avoir préalablement fixé un rendez-vous avec son interlocuteur sur Internet [27].

3.2 Structure d'un système de visioconférence (norme H320 de l'UIT)

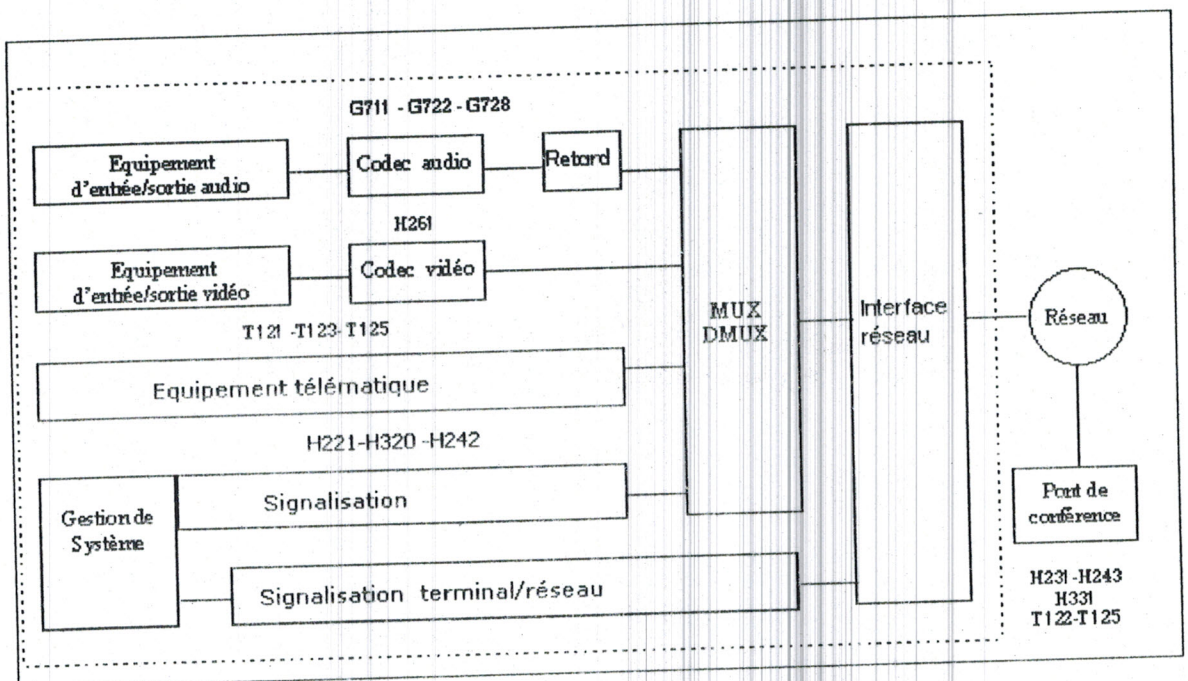


Figure 3.5 Structure d'un système de visioconférence

La recommandation H320 de l'UIT-T décrit les différents modules intervenants dans le cadre de la transmission des différents signaux. Ces signaux sont classés en quatre catégories:

- Les signaux audio: ils correspondent à un flux continu de signaux de nature analogique, ils sont numérisés et éventuellement compressés selon les recommandations G711 (64 kbit/s) G722 (48 ou 56 kbit/s) ou G728 (16 kbit/s).
- Les signaux vidéo: ils correspondent aussi à un flux continu de signaux analogiques; très exigeants en débits, ils sont numérisés et compressés selon la recommandation H261.
- Les signaux de données provenant d'équipements télématiques; ils englobent les images fixes, la télécopie ou tout autre type de transfert de documents ou de fichiers.
- Les signaux de gestion: il sont de deux types, ceux permettant de piloter multiplexeur/démultiplexeur et ceux destinés à la supervision du réseau.

L'ensemble de ces signaux, à l'exception de ceux destinés à la gestion du réseau sont multiplexés (démultiplexés en réception) selon la recommandation H221. Les informations doivent être compressées pour pouvoir être transportées sur une ligne à bas débit. Ce qui nous amène à parler du codage de l'information.

4. Codage de l'information

Le codage et la compression sont les deux composantes du succès du multimédia et notamment de l'intégration de la vidéo aux autres applications multimédias. Les progrès réalisés ces dernières années ont été très importants et des standards se sont mis en place. Les applications multimédias posent le problème de trouver le meilleur compromis entre complexité et temps réel. En effet, il faut tenir compte de trois paramètres importants :

- La qualité : La qualité de restitution se dégrade lorsqu'on augmente le taux de compression
- Le débit de sortie : ce débit diminue lorsqu'on augmente le taux de compression mais au détriment de la qualité.
- Le délai de codage : il correspond à la longueur de trame initiale et au temps de traitement des algorithmes. La vidéoconférence devant être transmise en temps réel est donc extrêmement sensible au délai. Celui-ci ne doit pas dépasser 200 millisecondes, pour préserver l'interactivité entre deux correspondants.

Le terminal de visioconférence doit effectuer deux opérations essentielles. Il doit effectuer une conversion analogique-numérique-analogique des signaux délivrés et repris par les périphériques (micro et caméra) en une information numérique. Cette information doit être compressée pour être transportée sur une ligne à bas débit, en l'état actuel des réseaux publics

1) convertisseur analogique-numérique-analogique : les périphériques de saisie et de restitution sont analogiques (même s'il existe des îlots de traitement numérique dans les caméras et les moniteurs) alors que le réseau est, lui, numérique.

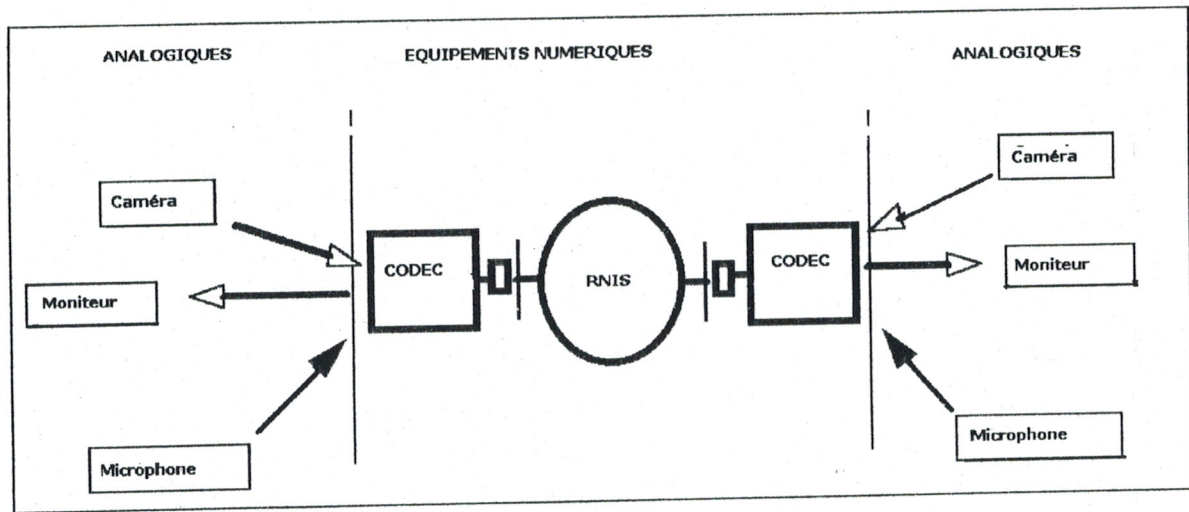


Figure 3.6 **Compression de l'information**

2) compresseur-décompresseur : le débit de la source est beaucoup plus important que le débit du canal d'où la nécessité de compresser

Le taux de compression appliqué par les codecs de visioconférence n'est pas fixe puisque la fréquence images varie. On distingue trois niveaux de compression des images fixes ou animées :

- Images fixes haute résolution : le taux de compression maximal est de trois fois. L'image compressée doit contenir toute l'information de départ. C'est le cas des images médicales ou scientifiques provenant de satellites
- Images fixes standards : le taux de compression maximal est de 20 à 50 fois. L'image compressée doit donner la même impression que l'image de départ.
- Vidéo : le taux de compression maximal est de 100 à 200 fois. Dans ces cas-là, le mouvement prime et selon l'utilisation des taux de compression très importants sont acceptés.

Seul le débit de ligne ne change pas dynamiquement (mais peut être augmenté par pas de 64 kbit/s) durant la session. Ce ratio de 140:1 qui est également le taux de compression du MPEG-1 permet de visualiser le fossé qui sépare le monde des haut-débits (le poids d'une seconde de vidéo professionnelle) et celui de réseaux comme Numéris, du bas-débit. Par observation, on peut dire qu'un terminal raccordé à un accès de base parvient à un ratio effectif oscillant entre 140:1 et 280:1. Une seconde d'image visiophonique non compressée et dans le format source adoptée par l'industrie (le CIF) pèse 18 Mbit à 15 images par seconde. Sur un accès de base, un canal B de 64 Kbit/s est réservé à la vidéo, on oscille bien entre un taux de 140 et de 280:1 selon la fréquence des images (de 7 à 15).

Il ne semble pas possible actuellement d'aller au-delà de ce taux de compression, dans des conditions de restitution acceptables pour la visioconférence, avec des techniques de compression en temps réel. Cependant, des progrès sont attendus avec les techniques de compression et de décompression numérique asymétriques de type fractales ou bien encore avec les nouveaux

développements de MPEG pour les bas débits (MPEG-4).

4.1 Le codage du son

La compression du signal audio est nécessaire à sa transmission sur l'Internet. Le réseau permet l'acheminement des paquets mais la bande passante est étroite. Donc avant transmission, l'information analogique audio subit trois transformations majeures. Elle est échantillonnée, quantifiée, compressée (sachant que lorsqu'on quantifie on compresse déjà l'information). Les paramètres à connaître lors des opérations de numérisation sont : la fréquence d'échantillonnage, le nombre de bits servant à coder les valeurs d'amplitude.

4.1.1 Échantillonnage

La valeur de l'amplitude du signal continu est mesurée à intervalles réguliers, appelés échantillons. Le théorème de Nyquist fournit la valeur minimale de la fréquence d'échantillonnage permettant d'assurer une reproduction fidèle d'un signal quelconque. Cette fréquence d'échantillonnage doit être au moins le double de la plus haute fréquence du signal à échantillonner. Ainsi, pour capturer la voix humaine qui évolue dans des fréquences comprises entre 40 Hz et 4 kHz il faut une fréquence d'échantillonnage de 8 kHz (8.000 échantillons par seconde).

4.1.2 le nombre de bits

L'amplitude du signal représenté dans chaque échantillon est quantifiée, c'est-à-dire représenté par un nombre traduisant une valeur finie. La finesse de l'interprétation numérique dépend de la profondeur de quantification. Plus la quantification est effectuée sur un byte de codage long (8, 16, 32, 64 bits) plus on multiplie les valeurs finies possibles, et ainsi, plus on analyse finement le signal continu. Un codage sur 8-bits donne 256 valeurs, un codage sur 16 bits 65.536.

Pour économiser la bande passante, chaque échantillon du téléphone numérique est codé sur huit bits. Cette technique s'appelle PCM pour Pulse Code Modulation ou MIC, Modulation d'Impulsions et Codage. Numériser le signal sur 8 bits revient à le mesurer avec une règle comportant 256 graduations. Le débit sera donc de 8 kHz x 8 bits soit 64 kbps.

4.1.3 Techniques de compression

Le codage PCM décrit ci-dessus mesure les échantillons indépendamment les uns des autres, de manière itérative. Le débit de sortie du codeur reste élevé. Pour réduire ce débit on utilise des techniques de compression. Il existe deux grands types de compression :

- Le codage différentiel
- Le codage par synthèse

- o *Le codage différentiel*

Cette méthode consiste à mesurer la différence entre deux échantillons. Celle-ci, étant plus petite que l'échantillon même, pourra être codée sur au plus 4 bits. Ce codage ne fait que supprimer une partie de la redondance de l'information reçue, efficacité limitée mais consomme très peu de temps CPU. L'AD-PCM (Adaptative Differential-PCM) se fonde sur ce principe

- o *Le codage par synthèse*

Pour atteindre des débits très bas, ce n'est pas une mesure compressée du signal qui est transmise mais des valeurs. Le signal est synthétisé c'est-à-dire décomposé en éléments constitutifs déjà connus. L'algorithme travaille sur un bloc de 100 ou 200 échantillons qui constitue la trame de codage. Le signal est modélisé par le codeur suivant plusieurs paramètres: caractéristiques du signal de départ, son énergie et une fonction d'excitation.

Une technique de codage joue sur le changement du pas de quantification, c'est-à-dire la précision du codage des échantillons. Une autre technique, prédictive, oppose une modélisation au signal réel. Ces méthodes de codage sont décrites dans les recommandations G.711, G.722, G.728 de l'UIT.

L'avantage du codage G.728 est de libérer de la bande passante pour le transfert de données de nature informatique des applications de travail coopératif. C'est pourquoi il est retenu par les intégrateurs de kits visiophoniques sur micro-ordinateurs. Les applications de travail coopératifs (transfert de fichiers et tableau blanc) nécessitant d'ouvrir un canal de données plus important, deux dernières recommandations de la série G ont été récemment ratifiées : la G.729 à un débit de 8 kbit/s et G.723.1 à des débits de 5,3 et 6,3 kbit/s. La raison est également de permettre le transport du son pour la téléphonie sur les réseaux bas débits

4.2 Le codage de la vidéo

Bien que l'audio et la vidéo soient des médias temps réel, les contraintes sont différentes. La vidéo numérique non compressée est trop volumineuse pour s'accommoder des bas débits. La lisibilité d'une image dépend de plusieurs facteurs qui sont : la définition, le contraste et la luminance, la taille de la fenêtre et le nombre d'images par seconde.

Les algorithmes de codage tirent parti des caractéristiques psychosensorielles de l'oeil humain pour se débarrasser des informations qui ne sont pas perçues ou qui sont redondantes. Ces techniques, dites de compression numérique, agissent à la fois sur les éléments constitutifs de l'image vidéo (interpolation de pixels) et sur le train d'images, c'est-à-dire la séquence vidéo (interpolation d'images). La plupart des algorithmes de compression, que ce soit H.261, H263, JPEG ou MPEG, divisent l'image en blocs 8 x 8 pixels.

La compression vidéo vise à supprimer :

- La redondance spatiale, c'est-à-dire la répétition d'une même information à l'intérieur d'une trame ;
- La redondance temporelle, c'est-à-dire la répétition d'une information dans deux trames successives.

4.2.1 Réduction des information par sous échantillonnage de la couleur

Les informations à coder sont constituées du signal de luminance Y et des signaux de chrominance U et V. La numérisation de la vidéo s'effectue avec le modèle YUV, pour lequel :

- Y est le signal de luminance ($Y = 0,3 R + 0,59 V + 0,11 B$),
- U la différence de couleur exprimée à partir du bleu ($U = B - Y$),
- et V la différence de couleur exprimée à partir du rouge ($V = R - Y$) L'oeil étant moins sensible aux informations colorées qu'à l'intensité lumineuse, on peut ne coder les composantes couleurs qu'un pixel sur deux ou un pixel sur 4 ou encore 1 pixel sur 2 mais seulement 1 ligne sur 2 (4:2:0).

4.2.2 Réduction des informations redondantes

Une image, prise indépendamment des autres, présente des zones uniformes plus ou moins grandes dans lesquelles les pixels ont des valeurs très voisines, voire semblables : c'est la redondance spatiale. En l'éliminant par codage, il est possible de réduire la quantité d'informations à transmettre. Dans une séquence vidéo, la différence entre une image et la suivante est relativement faible, sauf lors d'un changement de plan : c'est la redondance temporelle. Autrement dit, la position d'un bloc de pixels varie généralement peu d'une image à l'autre. C'est cette variation qui est codée par compensation de mouvement et prédiction.

Le transport de la vidéo est dépendant du type d'application, c'est-à-dire si elle est interactive ou non. Dans le cas d'une application interactive, le délai aller-retour est limité à 600 ms. Dans le cas d'une application de vidéo unidirectionnelle, le délai peut être de 5 s, et même plus. Dans ce cas, le client attend devant son écran pendant quelques secondes.

4.2.3 Le codage H.261

Pour tirer parti de ces redondances, les images ne sont pas traitées et compressées de la même façon. Une séquence vidéo H.261 est composée de deux types d'images :

- les images Intra (I)
- les images Prédicatives (P)

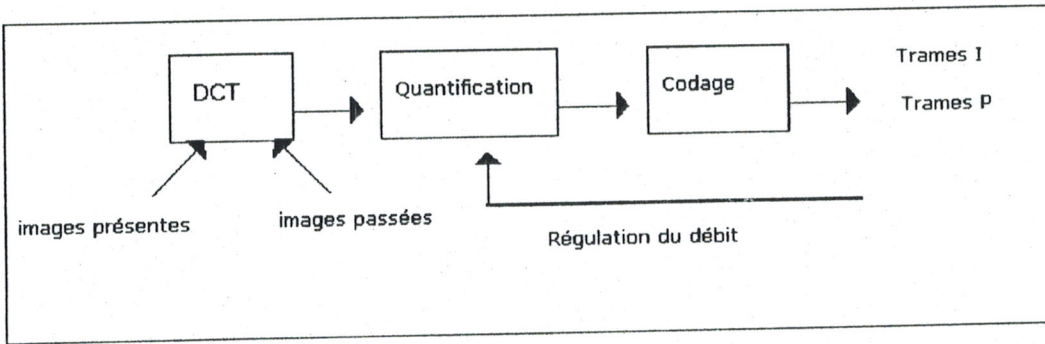


Figure 3.7 Principes du codage H.261

Les images Intra, dites intra-trame, sont codées intégralement, sans aucune référence aux images voisines de la séquence vidéo. C'est la redondance spatiale qui est exploitée et éliminée à l'aide d'une Transformation en Cosinus Discret ou DCT (Discret Cosinus Transform). Cette opération est réalisée après analyse de l'image en trois plans (Y, Cr, Cb). Chacun de ces plans est décomposé après numérisation en blocs de 8x8 pixels. Ils sont ensuite transformés par la DCT en une matrice fréquentielle. Les coefficients résultants sont classés et organisés en fonction de l'amplitude et de la fréquence des signaux vidéo de chaque pixel.

La technique de compression consiste à appliquer la DCT (Discrete Cosine Transform), suivie d'une quantification et d'un codage Huffman, ainsi qu'une compensation optionnelle du mouvement. La figure suivante présente la structure du système de codage.

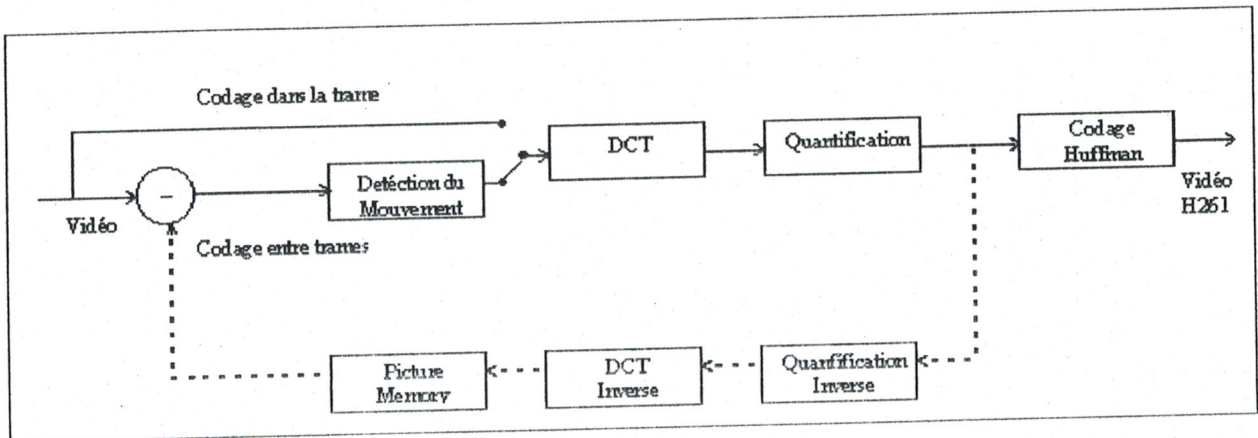


Figure 3.8 Système de Codage Vidéo H.261

Ces coefficients sont ensuite quantifiés. La profondeur de quantification ou seuillage qui détermine le taux de compression est variable en fonction du contenu de chaque bloc. Les détails fins, moins perceptibles à l'œil, seront sous-quantifiés au profit des détails plus grossiers, afin d'éviter l'apparition d'effets de pixélisation de certaines zones de l'image. De même, les points isolés sont codés de façon grossière car l'œil se satisfait de les voir et cela quelle que soit leur intensité. Ces mots de code binaires sont alors soumis au codage statistique dit à longueur variable ou VLC (Variable Level Coding) qui consiste à coder les informations les plus fréquentes à l'aide de mots

binaires courts et les informations les plus rares à l'aide de mots longs. Les images Intra constituent les images de référence à partir desquelles est réalisé le décodage.

Les images Prédicatives exploitent à la fois la redondance spatiale et la redondance temporelle des images d'une séquence vidéo. Elles sont codées à partir de l'image I ou P précédente à l'aide de vecteurs de mouvement. Les images sont découpées en blocs de 16x16 pixels. Les vecteurs de mouvement sont ensuite calculés en fonction du déplacement de chacun de ces blocs de pixels d'une image à la suivante puis codés en DPCM (Differential Pulse Code Modulation), c'est-à-dire que seule la différence entre les vecteurs de l'image n et les vecteurs de l'image n+1 est prise en compte. Ces valeurs sont ensuite soumises au codage à longueur variable (VLC).

4.2.4 Le codage MPEG

Le standard MPEG (Moving Pictures Experts Group) est le plus important pour le transport des images animées. Comme H.261, il utilise des algorithmes de compression inter- et intra-trames.

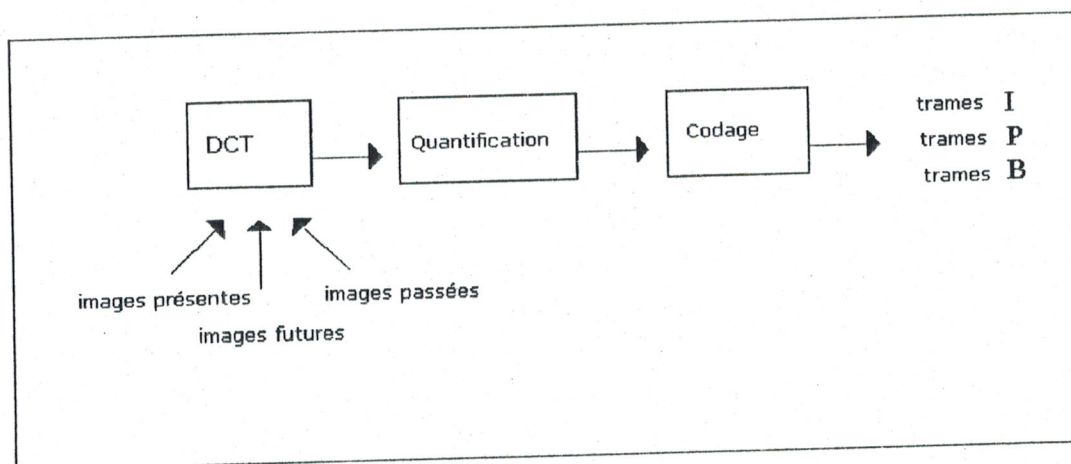


Figure 3.9 Principe du codage MPEG

Le codage MPEG utilise trois types de trames, I,P,B, qui se différencient par les techniques de compression utilisées ; codage interne (Intra-coded, ou I frames), codage de façon prédictive (Predictive coded, ou P frames) et codage de façon prédictive bidirectionnelle (Bi-directional predictive coded, ou B frames).

- Les trames I se servent d'une compression spatiale utilisant des transformées en cosinus discrètes, ou DCT, n'ayant aucune référence à d'autres trames ;
- Les trames P utilisent une compression DCT et une compensation de mouvement, ou MC (Motion Compensation), avec des références aux précédentes trames I ou P ;
- Les trames B utilisent une compression DCT et une interpolation MC avec les trames I et P précédentes et suivantes.

Ce sont les trames I qui contiennent le plus d'information originale. Elles ne doivent pas être perdues. Viennent ensuite dans l'ordre décroissant de leur contenu d'information, les trames P puis les trames B (voir figure 3.9)

4.2.4.1 MPEG-4

MPEG-4 est plus qu'un simple standard. Il représente une plate-forme universelle et globale pour tous les échanges multimédias. Apparu en 1998, il est bien adapté aux bandes passantes très étroites avec des débits allant de 64 kps à 2 Mps. Il est conçu pour être indépendant des réseaux et des protocoles de transport. Son objectif est de proposer un standard très large dans le domaine de l'audiovisuel pour les années 2000. Cette nouvelle norme prend en compte le contenu des signaux audiovisuels et un accès simple et universel au réseau et au terminal. Il apporte des améliorations par rapport à MPEG-2 qui consistent à :

- reconnaître et identifier des objets, mesurer l'intérêt de chaque objet en fonction du service qui doit être rendu et coder les objets en fonction des objectifs. Ce codage permet donc de dégrader certains objets non essentiels et d'adapter la quantité d'informations à transmettre,
- hiérarchiser des flux c'est-à-dire que chaque objet peut être codé en un ensemble de flux comportant une priorité suivant son importance. Cette solution permet de dégrader plus ou moins les images en supprimant les flux secondaires,
- à universaliser l'accès en adaptant l'image à la qualité du terminal et à acheminer le flux sur n'importe quel réseau en adaptant la compression.

4.2.5 Différence entre MPEG et H.261

H.261 ET MPEG reprennent les mêmes techniques de transformation du signal d'amplitude en une information de fréquences (Transformation en Cosinus Discret ou DCT). Le codage H.261, algorithme plus ancien et moins puissant que MPEG, ne reconnaît que deux types d'images, les Intras et les Prédicatives, et ne reconnaît pas l'existence des images Bidirectionnelles, fortement compressées.

H.261 applique une compression spatiale intra-image et temporelle inter-image. Lors du codage intra-image, la compression par DCT est utilisée comme dans du JPEG. Lors du codage inter-image, la compensation de mouvement sert à calculer la différence entre les images passées et présentes. A ces différences, généralement de faible amplitude, est appliquée une DCT.

Comme MPEG-1, la recommandation H.261 est associée à un format source dont la définition est issue d'un compromis entre les formats de télévision NTSC et PAL. Seule la moitié des pixels par ligne est codée et une seule trame (balayage progressif) est affichée. Ce sont également les spécifications du Source Intermediate Format (SIF) du MPEG-1. Pour régler les problèmes d'incompatibilité entre les fréquences de trames des différents standards internationaux, deux formats ont été définis :

- CIF : le Common Intermediate Format ;
- QCIF ou Quarter CIF qui représente en taille le quart de l'image CIF.

Ce dernier est employé en visioconférence pour représenter la tête et les épaules des participants. Pour des séquences plus larges, c'est le format CIF qui sera préféré.

Pour H.261, deux formats d'images, le Common Intermediate Format (CIF) et le Quart de CIF (QCIF), sont définis. Le QCIF qui est obligatoire et le CIF optionnel dans la recommandation H.261. Le premier est le plus souvent dédié aux très faibles débits.

4.3 Pourquoi H.261 et pas MPEG pour la visioconférence ?

MPEG-1 est conçu pour un débit fixe correspondant au taux de transfert du CD-rom simple vitesse (1,5 Mbit/s) alors que H.261 a été conçu pour le RNIS avec des débits compris entre 64 kbit/s et 2 Mbit/s. parcequ'il n'est pas souvent possible sur ce type de réseaux de garantir un flux MPEG-1 de 25 images par secondes H.261 est utilisé en visioconférence. Il est capable d'adapter le débit de source à celui du canal en variant les seuils de quantification. Ainsi, si la mémoire tampon de transmission est presque pleine, la profondeur de quantification est réduite et moins d'informations sont codées générant une image de moins bonne qualité. De la même façon, lorsque la mémoire est presque vide, la profondeur de quantification est augmentée et plus d'informations sont codées générant une meilleure image. Avec l'ajustement de la quantification on observe que la qualité de l'image visiophonique est dégradée lorsqu'il y a des changements rapides devant la caméra. Le mieux est encore de les éviter en maîtrisant les éléments d'environnement (fond neutre et fixe) et en demandant à son interlocuteur de limiter les déplacements.

5. Normalisation

La normalisation tient une part importante de ce qu'il faut connaître des techniques liées à la visioconférence. Son rôle est de garantir l'interopérabilité des équipements entre eux, au moins sur les fonctions de base.

Ainsi l'évolution des usages a rendu nécessaire l'élargissement du champ de la normalisation. Aujourd'hui, la visioconférence ne peut plus être réduite au simple face à face à distance mais concerne également les échanges de données informatiques. C'est le champ de la série T.120. Il a fallu définir une norme adaptée aux échanges multipoint de données multimédias et surtout garantir la transparence des réseaux de transport, que ceux-ci soient de nature synchrone ou asynchrone, et des plates-formes informatiques.

- Les domaines de normalisation de H.320 et de T.120 :

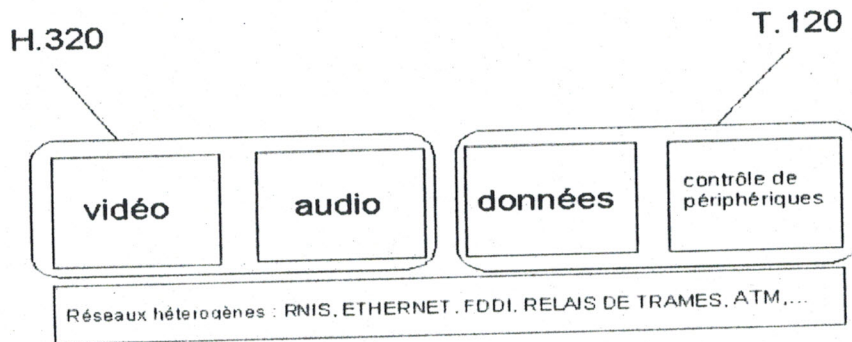


Figure 3.10 *Domaine de normalisation de H.320 et de T.120*

5.1 La visioconférence sur IP

La normalisation H.32x s'étend aux réseaux locaux (H.323) mais également au réseau téléphonique commuté public (H.324) et à l'ATM (H.321). On parle actuellement beaucoup de la version H.323 pour les réseaux utilisant le protocole universel d'Internet (IP).

H.323 reprend la structure de H.320 en particulier pour le codage du son : G.711, G.722, G.728 avec deux dernières recommandations davantage adaptées aux bas débits : G.729 et surtout G.723.1 (5,3 et 6,3 kbit/s). Le codage de la vidéo reprend H.261 et utilise également H.263 plus efficace dans les bas débits. Le multiplexage et la transmission s'appuient sur les protocoles temps réel de l'Internet RTP et RTCP.

Une zone H.323 sur le réseau local correspond à une architecture client-serveur constituée de quatre composants majeurs : les postes clients, un serveur de communication (gatekeeper), un serveur passerelle (gateway), et dans certains cas un contrôleur multipoint (MCU).

5.1.1 Un terminal H.323 ou client H.323

Il doit supporter H.245, l'équivalent de H.242 pour la gestion et le contrôle du canal, Q.931 pour les procédures de signalisation et d'établissement d'appels entre terminaux, RAS (Registration-Admission-Status) pour la gestion du trafic entre le client H.323 et le serveur de communication. T.120 pour les échanges de données est optionnel.

- Le client H.323 :

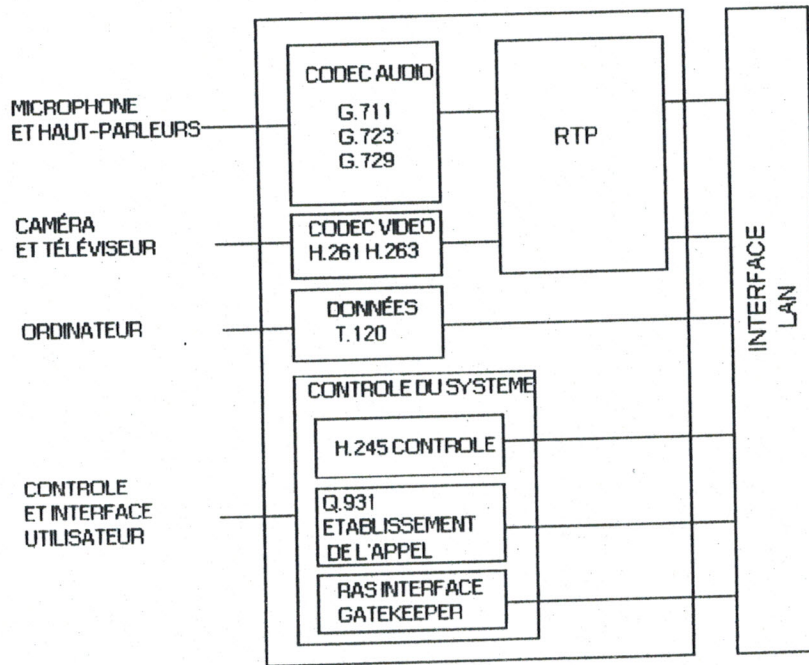


Figure 3.11 **Protocoles des terminaux H.323**

5.1.2 Le serveur de communication (Gatekeeper)

Il définit une zone H.323 sur le réseau dont il gère le trafic, le routage LAN, et l'allocation de la bande passante. Il est chargé de la surveillance d'une zone H.323. Il communique avec les terminaux, la gateway ou le MCU par l'intermédiaire de leur interface RAS.

5.1.3 La passerelle (gateway)

Cet équipement reste en option puisqu'il est utilisé pour l'interconnexion du LAN (H.323) et du MAN RNIS (H.320) par exemple, mais aussi vers le RTCP (H.324) ou l'ATM (H.321). Ses principales fonctions sont la transformation des formats de transmission (H.325 en H.221) et des procédures de communication (H.245 et H.242).

5.1.4 Le contrôleur multipoint (MCU)

Il peut être utilisé en mode centralisé comme un réflecteur multicast ou en mode décentralisé entre postes clients. Les deux modes peuvent être cumulés.

5.1.5 Le codec vidéo H.263

Le codage H.263 est plus efficace que H.261 puisqu'il utilise la prédiction de mouvements et une table de codage Huffman optimisée pour les bas débits. Cinq formats d'image sont définis. Certains sont en option d'autres sont obligatoires. H.261 et H.263 supportent tous deux le format QCIF pour être interopérables.

- Les formats vidéo pour la visioconférence:

Format d'image visioconférence	Taille d'image en pixels	H.261	H.263
sub-QCIF	128 x 96	en option	obligatoire
QCIF	176 x 144	obligatoire	obligatoire
CIF	352 x 288	en option	en option
4CIF	702 x 576	-	en option
16CIF	1408 x 1152	-	en option

5.1.6 Les conférences H.323 sur les réseaux IP

IP est un protocole très simplifié qui engendre une grosse perte en ligne. Le taux de perte peut atteindre 50 % sur les liaisons fréquentées non suffisamment dimensionnées. C'est donc au protocole TCP de faire la reprise avec tous ses mécanismes de réémission. Or, lorsque le taux de perte de paquets atteint 5%, le débit n'est plus constant du tout et cela devient incompatible avec de la transmission de vidéo en temps réel.

De plus, les paquets ne sont pas horodatés par IP ou TCP. Cela est évidemment problématique pour la synchronisation. C'est à une application supérieure de faire le travail, ce qui engendre encore des dérives temporelles.

H.323 utilise à la fois les protocoles de l'Internet qui sécurisent la communication (contrôle d'intégrité des données) et donc orientés connexion (TCP) et sans connexion (UDP). TCP sert au transport des informations de service comme H.245. UDP limitant au minimum les informations de contrôle, donc plus rapide au routage, transporte la vidéo et le son ainsi que le canal RAS.

Pour les conférences multipoint, H.323 utilise d'autres protocoles mis au point par l'IETF, l'IP multicast et le RTP pour le streaming de la vidéo sur l'Internet. RTP au dessus d'IP multicast permet, comme cela a été vu plus haut, d'horodater et de numéroter les paquets UDP pour synchroniser de la vidéo. La buffering des paquets UDP par le client H.323 permet ensuite d'éliminer les redondances, d'ordonner les paquets de séquence, de synchroniser le son et la vidéo, et d'avoir une lecture continue de la vidéo en absorbant les latences du réseau. Les produits de visioconférence H.323 peuvent être utilisés sur le Mbone d'Internet (H.323 utilise RTP). Enfin, une bande passante suffisante et constante étant la condition pour avoir des services vidéo sur un réseau IP, les produits H.323 utilisent également le protocole RSVP (Resources Reservation Protocole) bien que celui-ci ne soit pas obligatoire dans H.323.

- Les protocoles utilisés par H.323 (en option et obligatoires) :

DONNEES			INFORMATIONS DE CONTROLE ET DE SIGNALISATION	AUDIO	VIDÉO
T.SHARE	T.126	T.127	H.245 Q.931 RAS	G.711 G.722 G.728 G.723 G.729	H.261 H.263
T.124				RTP RTCP	
T.122 T.125					
T.123					
TCP				UDP	
IP					
LAN					

Figure 3.12 **Protocoles utilisés par H323 sur les réseaux IP**

5.1.7 Les conférences H.323 sur les réseaux IP

TCP est un protocole trop lent pour envisager de faire du temps réel sur IP. UDP (User Datagram Protocol) est un protocole de niveau 4 plus simple et plus rapide que TCP. Il convient bien aux applications vidéos temps réel comme la visioconférence. Son en-tête de 8 octets (cinq fois moins que pour TCP) est simplifiée à l'extrême : il ne contient que le port de la source (voie logique de l'application supérieure), le port de la destination, la longueur des données (le datagramme IP) et 2 octets de checksum (en option). UDP se contente en fait de multiplexer et de démultiplexer selon les numéros de voies logiques les informations qui sortent ou arrivent des applications.

UDP est un transport non fiable. Il n'y a plus d'acquittement des paquets et donc plus de réémission ni de contrôle de congestion. Tout ceci permet d'accélérer le processus de communication. Ce sera aux applications supérieures de gérer les pertes de paquets (non pas en sécurisant mais en optimisant). Cependant, UDP ne donne pas d'informations sur le séquençement des paquets. De plus, à l'instar de IP et de TCP, UDP n'offre pas l'horodatage des données. Cela signifie que UDP ne permet pas de gérer la synchronisation et la remise en ordre des informations. Cette fonctionnalité, indispensable à la gestion de la diffusion vidéo, doit être implémenté sur les couches supérieures par des protocoles type RTP.

5.1.8 Les limites de la visioconférence sur IP: protocoles et débits

La croissance de la visioconférence sur Internet reste directement liée à l'augmentation de la disponibilité et de la capacité d'Internet. Pourtant, il ne s'agit pas simplement d'augmenter la bande passante des réseaux physiques qui constituent le réseau mondial. Comme nous venons de le dire, Internet est un réseau conçu pour les échanges de données informatiques et n'est pas sans poser de problèmes aux applications de visioconférence. Les phénomènes de gigue, qui font des solutions actuelles de visioconférence sur Internet des prototypes de qualité médiocre, peuvent être partiellement contournés par l'évolution des protocoles de communication. En succédant à IP v.4, IP v.6 est en mesure d'offrir les réponses aux problèmes de trafic vidéo. Cependant, la pénurie des débits ne sera en rien une affaire réglée.

Les protocoles pour la source et le destinataire existent. Les protocoles réseaux sont en cours d'implémentation. Il s'agira pour le réseau, à savoir les routeurs IP, d'implémenter et d'exploiter complètement le protocole. Le flow label et les indices de priorité permettront de préserver l'intégrité d'un flux et de tenir compte des contraintes de temps en routant et en détruisant avec plus de discernement. Cependant, il faut que la bande passante suive et que parallèlement de nouveaux algorithmes de compression avec des taux de compression importants sans fortes dégradations soient optimisés pour Internet.

Actuellement, le manque de qualité de service freine le développement de la visioconférence sur IP. Il faut compter absolument sur une disponibilité des débits des liaisons qui sont très disparates sur l'Internet. La QoS (qualité de service) est l'atout majeur dont disposent aujourd'hui les systèmes de visioconférence sur RNIS.

Toutefois, les évolutions des réseaux IP nous montrent qu'il est techniquement possible de disposer d'une qualité de service. Dans un futur proche, on pourrait disposer par exemple de flux priorisés.

5.2 T.120 : le contrôle de conférence

T.120 propose un ensemble de procédures pour le contrôle des échanges de données temps réel et multipoint. Cet ensemble de normes définit un cadre de spécifications communes pour les applications de travail coopératif, les outils logiciels de partage d'application, de tableau blanc, de transfert de fichiers, appartenant à un univers encore largement propriétaire. T.120 prend en compte l'environnement informatique actuel, c'est à dire des usages multipoint sur des plateformes et des réseaux hétérogènes. Son cadre d'intervention dépasse largement celui de la visioconférence et intéresse également les secteurs de la vidéo interactive, du jeu en réseau et des échanges entre professionnels du graphisme.

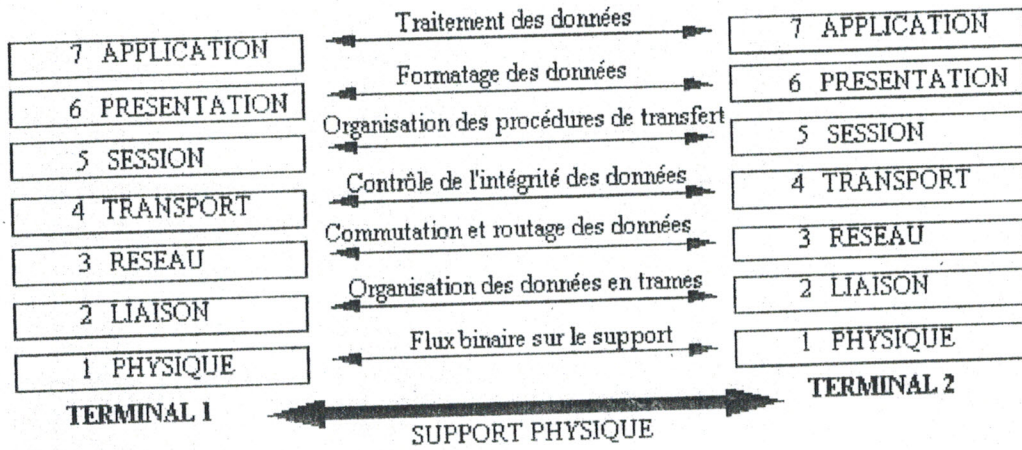
Les couches basses du T.120 spécifient des mécanismes indépendants de l'application, de la plateforme et du réseau, pour rendre des services de communication multipoint à toute application

capable de les exploiter. Ces recommandations T.122, T.123, T.124, T.125 sont indépendantes des applications et leur fournissent un service fiable de communication de données multipoint. Les couches hautes du T.120 définissent les protocoles pour les applications de conférence spécifiques comme le tableau blanc (T.126) et le transfert de fichiers binaires (T.127).

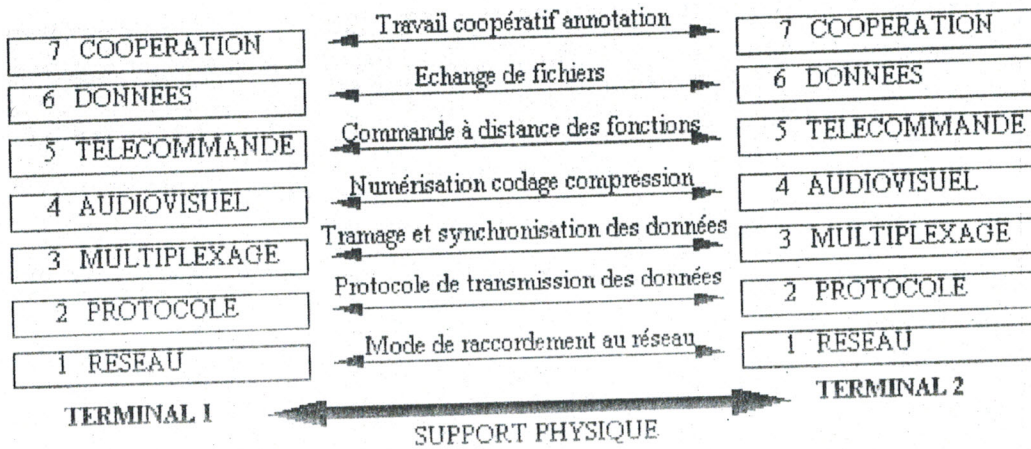
- **T.122** : Définition d'un service de communication multipoint pour les systèmes audiographiques et audiovisuels. Un tel service doit accepter toute communication multipoint en duplex intégral sur tous les réseaux spécifiés par la recommandation T.123.
- **T.123** : Piles de protocoles pour les applications de téléconférence audiographique et audiovisuelle pour les contrôleurs multipoint et les terminaux. Les profils sont bâtis selon le type de réseau identifié.
- **T.124** : Cette recommandation définit un cadre général pour la gestion et le contrôle des conférences pour les terminaux et les contrôleurs multipoint. Elle concerne toutes les fonctions génériques de gestion comme les procédures d'établissement et la fermeture des conférences, le protocole d'application pour la réservation et les services élémentaires de gestion de téléconférences multipoint comme par exemple la gestion de liste de participants et d'autres fonctions sophistiquées comme le mode de conduite de la conférence.
- **T.125** : Cette recommandation définit un protocole fonctionnant à travers une hiérarchie de domaines de communication multipoint. Elle spécifie le format des messages et des procédures de protocole et leur échange sur un ensemble de réseaux hétérogènes. Le but est d'implémenter le service de communication multipoint défini dans la recommandation T.122.
- **T.126** : Partage de données de collaboration, dont les partages d'images sur tableau blanc, information par affichage graphique et échange d'images. L'objectif de cette recommandation est de définir un protocole pouvant être utilisé par le plus grand nombre d'applications qui réclament une interopérabilité lors d'échange d'une information graphique dans un environnement avec plusieurs constructeurs. Cette recommandation peut être employée par des applications faisant appel aux fonctions simples de tableau blanc, d'échange d'images annotées mais également à des fonctions plus avancées comme la prise de main à distance et le partage d'écran.
- **T.127** : Transfert de fichiers binaires multipoint. Cette recommandation donne les mécanismes qui facilitent la diffusion et la recherche de un ou plusieurs fichiers simultanés.
- **T.128** : Cette recommandation (appelée également T.share) offre un ensemble de fonctions qui peuvent être utiliser pour la gestion du trafic (routage, identification, calcul) des flux vidéo et audio par avec commande à distance et sélections des sources. Protocole de gestion de haut niveau pour les conférences multimédias.

5.3 Interopérabilité des équipements

Pour juger de l'interopérabilité des équipements la connaissance des principales recommandations de l'UIT est obligatoire. Nous proposons une grille d'analyse permettant rapidement de juger ce qui est interopérable, depuis le réseau jusqu'à l'application de visioconférence. Le modèle OSI pour l'interconnexion des systèmes ouverts est tout à fait adapté à cette analyse des systèmes de visioconférence.



Une répartition adaptée du modèle OSI également en sept couches permet d'analyser rapidement le niveau d'interopérabilité de deux terminaux de visioconférence.



5.3.1 La couche 1 ou "réseau"

C'est à ce niveau que se définit le mode de raccordement au réseau de communication. Quatre réseaux sont à considérer :

Le réseau téléphonique commuté (RTC) concerne en priorité les systèmes de visioconférence grand public du fait du faible débit de ligne. L'augmentation des débits sur paires téléphoniques (modems 56 kbit/s et modems xDSL) pourrait être un facteur de développement de la visioconférence sur RTC. La normalisation des services audiovisuels sur des débits inférieurs à 64 kbit/s sur le RTC est en cours à l'IUT-T : H324.

La majorité des systèmes de visioconférence sont raccordés au réseau numérique à intégration de services (RNIS ou ISDN en anglais). Ce mode de raccordement nécessite au minimum un accès de base à 128 kbit/s. Dans le cas où l'on souhaite une communication supérieure à ce débit, un inverseur multiplexeur doit être ajouté. Le multiplexage des flux audiovisuels est traité au niveau de la couche 3. Les services audiovisuels sur des débits inférieurs à 2 Mbit/s ont été en priorité normalisés pour le RNIS avec la recommandation H.320.

Il est de plus en plus fréquent de proposer une application de visioconférence sur réseau local d'entreprise ou LAN en complément d'outils de travail collaboratif. Cette ressource installée sur un certain nombre de stations du réseau local permet des communications entre utilisateurs en mode local et en mode distant lorsqu'un accès au RNIS est prévu. Dans ce cas, un routeur LAN/RNIS est nécessaire.

5.3.2 La couche 2 ou "protocole"

Il faut non seulement indiquer les caractéristiques du support physique pour communiquer sur une liaison numérique mais également préciser le protocole selon lequel les terminaux dialoguent et les données sont transmises. Pour chacun des réseaux définis dans la couche 1, des indications sur le protocole employé doivent être fournies.

Pour le RTC, aucun protocole n'est à spécifier puisque les signaux sont transportés sous une forme analogique. Néanmoins, les modems font, depuis longtemps, l'objet d'une normalisation internationale.

Les protocoles de transmissions des données informatiques sont appliqués à la visioconférence sur les réseaux locaux

5.3.3 La couche 3 ou "multiplexage"

Dans le cadre de H.320, les données sont organisées en trames normalisées H.221. Il y a vérification de la synchronisation des données transmises.

5.3.4 La couche 4 ou "audiovisuelle"

La numérisation, le codage et la compression des signaux audio et vidéo sont définis au niveau de la couche 4. Les deux recommandations UIT concernant la compression des images vidéo pour la visioconférence sont H.261 et H.263. Cinq codecs audio sont normalisés par l'UIT pour des bandes passantes et des débits différents. La norme G711 définit un codec pour les signaux audio de 300 à 3 000 Hz à un débit de 64 kbit/s, G722 de 50 à 7 000 Hz à 64, 56, ou 48 Kbit/s, G728 de 50 à 3 400 Hz à 16 kbit/s, G.729 à 8 kbit/s et G.723.1 à 5,3 et 6,3 kbit/s.

5.3.5 La couche 5 ou "télécommande"

Les procédures de commande à distance de la caméra et de commutation de sources d'images se trouvent dans cette couche 5.

La normalisation au sein de l'UIT est récente. La H281 normalise les commandes de contrôle et le pilotage des caméras distantes. Dans la nouvelle série T120 de recommandations, la T128 gère en temps réel les flux audio et vidéo avec une boîte à outils de fonctions pour le routage des flux, l'identification, la télécommande des équipements et la sélection des sources. La norme T124 fournit un système générique de contrôle de conférence. La gestion des systèmes multipoint a aussi ses propres normes H231 et H243. Dans la série T120, la norme T125 définit les protocoles qui hiérarchisent les procédures d'échange d'une conférence multipoint. L'architecture générale d'une telle conférence est décrite dans la norme T122.

5.3.6 La couche 6 ou " données "

Des données numériques peuvent être échangées simultanément à une visioconférence entre les terminaux distants. Il s'agit de fichiers binaires qui sont alors téléchargés en cours de session visiophonique. Une norme de transmission de données existe déjà, la norme H224. Dans la série T120, la recommandation T127 définit le protocole le transfert de fichiers binaires dans une architecture multipoint.

5.3.7 La couche 7 ou " coopération "

Le travail coopératif et l'annotation de documents en direct, les fonctions de tableau blanc, peuvent être dépendantes du codec de visioconférence ou du logiciel de partage d'application lui-même généralement fortement intégré dans le système d'exploitation du micro-ordinateur.

6. Les applications de la visioconférence sur Internet

Plusieurs applications peuvent bénéficier de l'utilisation d'un système de visioconférence. En outre, de nouvelles applications peuvent être mises en place.

6.1 *La Télé-Ingénierie*

La télé-ingénierie est déjà actuellement une application importante de la visioconférence. En l'utilisant, les usines et les entreprises d'ingénierie peuvent réduire les possibilités d'erreurs, ou encore éviter des coûts importants de déplacements.

L'attrait principal de la télé-ingénierie pour les entreprises est la réduction du temps pour mettre un nouveau produit sur le marché, au moyen de prototype, modélisation et design pendant des sessions de visioconférence entre plusieurs sites.

6.2 *L'Apprentissage à Distance*

L'apprentissage à distance est une application adaptée à l'enseignement spécialisé, dans les universités ou comme une option à bas coût pour la formation continue des professionnels. L'apprentissage à distance permet aux enseignants d'envoyer des schémas, images et autres ressources visuels aux étudiants dans différents sites en même temps. Il offre aussi l'interactivité permettant aux étudiants de prendre la parole pour poser des questions ou y répondre.

L'apprentissage à distance est donc un nouveau moyen pour augmenter la participation et la compréhension des étudiants.

6.3 La Diffusion de Séminaires et Conférences

La diffusion de séminaires et de conférences soit pour l'apprentissage à distance ou la formation continue, soit dans les entreprises, permet toujours l'accès aux informations spécialisées pour les apprenants distants. L'utilisation d'une salle de visioconférence et de diffusion simultanée est dans ces cas envisageables.

6.4 La Conférence Personnelle

La conférence personnelle est basée sur l'interaction personne à personne, en utilisant des PC ou des stations de travail. De tels systèmes de visioconférence utilisent des interfaces graphiques multi-fenêtres pour permettre la visualisation du correspondant et de documents distants ainsi que la coédition de ces documents, c'est-à-dire l'édition simultanée d'un document.

La conférence personnelle répond donc au besoin d'interaction personnelle et d'échange de documents entre correspondants distants, en permettant une interactivité à plusieurs niveaux : la visualisation de la personne à qui on parle au téléphone, en même temps qu'on travaille sur un même document.

6.5 Les Réunions de Travail

La visioconférence permet aux groupes de travail dispersés de prendre des décisions collectives et d'échanger différents points de vue, de façon à réagir efficacement dans un marché où les conditions changent rapidement.

L'utilisation de la conférence personnelle étendue à plusieurs participants permet des démonstrations en temps réel, la présentation d'objets ou d'informations enregistrées en vidéocassettes, l'expression visuelle des idées, le dessin de schémas, les annotations et l'utilisation simultanée d'applications familières.

6.6 Le Télétravail

La visioconférence permet à deux personnes distantes travaillant sur un même projet d'échanger des documents et de les commenter en direct en utilisant un tableau blanc (application partagée) qui leur permet d'interagir en temps réel sur les documents présentés.

Certains systèmes de visioconférence sont conçus pour permettre à plusieurs groupes de personnes de participer à une réunion où qu'ils se trouvent. D'autres systèmes sont prévus pour que deux personnes discutent de projets depuis leur bureau. Dans chaque cas, les conférenciers reçoivent des images animées, s'entendent clairement et ont l'impression d'être face à face. C'est pourquoi la visioconférence génère un environnement dans lequel les idées, les connaissances et l'inspiration peuvent circuler entre collègues, et où les décisions se prennent plus vite. Il en résulte un meilleur travail d'équipe et un objectif mieux ciblé - sans besoin de se déplacer

6.7 La Téléchirurgie

Spécialité de la télémédecine qui consiste à manipuler du matériel médical contrôlé à distance. Une caméra remplace la vision directe du téléchirurgien. Cette opération se traduit par une action toujours à distance, du médecin sur son patient, parfois par l'intermédiaire d'un robot et d'un système informatique. Le système de visioconférence permet de transmettre les images vidéos et d'instaurer le dialogue entre les praticiens se trouvant à plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de kilomètres. La visioconférence permet aussi d'organiser, en temps réel, des staffs entre médecins. Elle permet la discussion interactive des cas cliniques en se basant sur les images médicales et les informations échangées. La téléchirurgie permet de retransmettre dans les services de soins, des interventions effectuées dans les blocs opératoires évitant la présence de nombreuses personnes dans ces secteurs sensibles.

7. Avantages de la visioconférence

7.1. Economie de temps

La durée des réunions traditionnelles est le plus souvent de deux heures, rarement plus de quatre. Il en résulte que les participants passent généralement plus de temps en déplacement qu'en réunions. Au temps du déplacement lui-même s'ajoute encore le temps nécessaire à l'arrangement des horaires, les réservations, les paiements et les remboursements de frais occasionnés par les déplacements.

7.2. Economie d'argent

Une ou deux heures de visioconférence coûtent beaucoup moins cher que les dépenses résultant des déplacements de chacun des participants, surtout si l'on compte les frais d'hôtel (inévitables au-delà d'une certaine distance) et les coûts indirects (temps de travail perdu en déplacement, en formalités administratives, ...).

7.3. Participation accrue

Les réunions ou formations par visioconférence augmentent le nombre de leurs participants, car on compte parmi eux un bon nombre de personnes qui n'auraient pas eu le temps ou l'argent nécessaire à un déplacement. La visioconférence augmente donc considérablement l'impact des réunions et formations.

7.4. Fréquence accrue

L'économie de déplacement offerte par la visioconférence a aussi pour effet de permettre l'organisation de réunions plus fréquentes de personnes coopérant de façon durable, non seulement en raison du moindre coût, mais aussi de l'économie du temps de déplacement : on est plus facilement et rapidement disponible pour une visioconférence de 2 heures que pour un déplacement de 2 jours. Les réunions ou formations par visioconférence peuvent donc être

organisées plus fréquemment et dans des délais beaucoup plus brefs que des réunions traditionnelles nécessitant un déplacement.

8. le MBone

La visioconférence IP mise sur une disponibilité des liaisons. Les débits des réseaux IP doivent donc être adaptés en fonction du trafic afin d'éviter tout risque de coupure du son ou éventuellement de la vidéo. Il existe de forte inégalité, les sites ne disposent pas tous de débit adapté. En général, plus le débit d'accès des sites sera élevé, moins il y aura de risque. Deux technologies de visioconférence IP sont disponibles :

- Les systèmes H323
- Le MBone

Les premiers ayant été étudiés plus haut, nous allons maintenant nous intéresser au MBone

8.1 Définition du MBone

MBone (*virtual Multicast Backbone On the interNET*), appelé aussi Multicast Backbone, est un réseau virtuel qui utilise Internet pour véhiculer un trafic multicast IP. C'est une technologie qui a été inventée pour combler les carences de l'Internet classique en matière de transmission de données multimédia en temps réel. L'objectif des concepteurs de MBone est de permettre un multicasting en temps réel; l'avantage étant de réduire l'utilisation des ressources CPU de chaque machine hôte ainsi que le trafic réseau.

Il se situe au-dessus de la couche IP du réseau Internet pour supporter le routage multicast IP entre des machines. En utilisant l'infrastructure des réseaux actuels, MBONE évite le besoin d'avoir des réseaux dédiés pour la communication multimédia. Cette technique de communication permet à un même paquet d'information émis par une source d'être reçu par plusieurs destinataires. C'est une infrastructure qui permet de diffuser des données à des groupes d'abonnés et d'optimiser l'utilisation des réseaux (donc d'économiser de la bande passante). Le MBone est donc naturellement bien adapté aux applications de visioconférence consommatrices en débit et susceptibles de regrouper plusieurs utilisateurs.

Sur le backbone Internet, étant donné que les équipements routeurs ne supportent pas actuellement le routage de paquets multicast IP, il est nécessaire de les encapsuler dans des paquets unicast IP pour les transmettre au moyen d'une liaison dite tunnel. Mais dès leurs arrivées sur le tunnel, ils sont désencapsulés puis diffusés directement par les interfaces des routeurs. L'ordinateur destinataire, équipé d'un logiciel supportant le routage multicast IP, est chargé de la diffusion de ces paquets entre le réseau local et le réseau distant. L'ensemble des ordinateurs des divers sites reliés entre eux par des liaisons tunnel forme le réseau MBONE. L'information transmise par MBONE est acheminée dans le réseau Internet de manière standard

8.2 Multicast IP

Le trafic ordinaire sur IP est *unicast*. Ceci signifie que pour une source donnée, il existe une seule destination. Quand une source envoie un paquet unicast à une destination, le trafic traverse un ensemble d'aiguillages (" routeurs ") pour arriver à sa destination finale. Seul le noeud de destination récupère et garde le paquet ; les autres hôtes ne sont pas concernés.

Le trafic *multicast* permet d'envoyer un paquet vers plusieurs destinations sans le dupliquer. Deux notions sont à avoir :

- le message envoyé ne le sera qu'à un groupe fermé de destinataires qui auront fait la demande de participer à ce groupe,
- un seul paquet sera envoyé de routeurs multicast (ou "m-routers") en routeurs multicast, ceci permet une réelle économie de bande passante, les routeurs diffusant sur leur réseau local ce paquet vers les destinataires finaux de celui-ci.

Le MBone, au niveau physique du réseau, est constitué de l'ensemble des routeurs multicast reliés entre eux par des " tunnels " permettant la retransmission des paquets marqués multicast. Ce principe de transmission par encapsulation entre "m-routers" est appelé "tunneling ". Pour éviter que les paquets, répliqués de routeur en routeur, ne circulent indéfiniment, un temps de vie (Time-To-Live : TTL) est attribué à chaque paquet. A chaque passage dans un routeur multicast, le TTL du paquet est décrémenté de une unité. A chaque tunnel entre deux routeurs[30] est associé un seuil (threshold). Si le TTL d'un paquet est plus petit que ce seuil, le paquet n'est pas redistribué vers le tunnel et donc vers un autre routeur.

La technique du multicast IP permet la transmission d'une ou plusieurs sources à plusieurs destinations. La vidéoconférence est une application basée sur cette technique.

MBONE est une implémentation du système de multicast IP permettant de partager des informations entre quiconque raccordé à Internet et à l'intérieur d'un groupe donné. Le réseau ainsi réalisé est dit virtuel dans la mesure où il n'y a plus de lien avec l'adressage direct d'Internet. Le multicast IP est basé sur le protocole IGMP (Internet Group Management Protocol). Ce protocole permet à une station de s'enregistrer dynamiquement pour recevoir différents types de trafic multicast IP. Toute station voulant accéder à un groupe prend l'adresse multicast IP de ce groupe et appartient à ce pseudo réseau, tant qu'elle ne le quitte pas. Les adresses IP multicast ont leur premier octet compris entre 224 et 239 (classe D).

8.3 Historique du MBone

Le MBone, **M**ulticast **B**ack**B**ONE, a été créé au début des années 90, pour pouvoir transmettre l'audio et la vidéo sur Internet pour les réunions de l'Internet Engineering Task Force (IETF). Par la suite, de nombreux chercheurs ont commencé à utiliser le MBone et à fabriquer les outils nécessaires et à améliorer le protocole.

De nos jours, le MBone permet de retransmettre des colloques et d'importantes réunions via Internet en gardant une très bonne qualité visuelle et sonore.

Mais il faut savoir que le Mbone ne sert pas qu'à transmettre de l'image et du son, mais aussi de partager un tableau blanc ou des applications. Il ne faut pas non plus perdre de vue que le réseau Mbone n'est qu'un réseau de tests, n'existant que pour les expérimentations multicast.

Quelques dates importantes:

- fin des années 80 : les premières expérimentation de multicast ont eut lieu sur le réseau DARTnet.
- 1992 : implémentation d'un routeur multicast sous Unix.
- 1992 : première diffusion audio pour une conférence de l'IETF.
- 1993 : première diffusion vidéo

En Europe, le Mbone est un projet réservé à la communauté académique, financé par la Communauté Européenne. Ce réseau est relié directement au Mbone américain.

8.4 Applications de visioconférence du Mbone

Le Mbone (Multicast Backbone) est une infrastructure réseau permettant de diffuser des informations (vidéo, voix, données) à des groupes d'abonnés en optimisant l'utilisation des réseaux (donc d'économiser de la bande passante). Les protocoles utilisés sont basés sur l'IP multicast. Le réseau MBONE permet à la communauté des utilisateurs reliés au réseau Internet de participer à des conférences audio/vidéo à partir de leur poste de travail. Le Mbone est donc bien adapté pour les applications de visioconférence consommatrices en débit.

9. Conclusion

La visioconférence est le moyen de communication d'avenir. Standardisée depuis les années 90, cette méthode permet d'entretenir le dialogue, de rapprocher les personnes, de résoudre une problématique d'éloignement, et par dessus tout, permet de faire passer par l'image tout ce que la voix seule ne permet pas.

La multiplication des offres d'accès à l'Internet haut-débit par satellite ou via l'ADSL est en train d'opérer une véritable révolution. Ainsi, la visioconférence se développe de plus en plus sur le réseau IP (Internet Protocol), grâce à l'arrivée des normes haut débit.

Mais Il ne suffit pas d'avoir de très hauts débits pour résoudre les problèmes de transport des applications multimédia en temps réel et les protocoles doivent prendre en compte les demandes différentes de qualité de service suivant les diverses applications.

Historiquement, les applications spécifiques telles que la télé-médecine et l'enseignement à distance ont alimenté l'intérêt pour la visioconférence. Elle permet, en temps réel, d'organiser des staffs entre médecins. Ainsi, toute pièce au CHU peut devenir une salle de visioconférence. Deux passerelles permettent de diffuser des séances empruntant le réseau informatique du CHU pour les acheminer vers l'extérieur.

LA TELEMEDECINE

C'est la partie de la médecine qui utilise la transmission par télécommunication d'informations médicales (images, comptes-rendus, enregistrements,..), en vue d'obtenir à distance un diagnostic, un avis spécialisé, une surveillance continue d'un malade, une décision thérapeutique.

1. Introduction

Les nouvelles technologies de communication électronique ont depuis longtemps fait leur chemin en médecine aussi. Ainsi, la télémédecine, déjà largement répandue, permet-elle une diffusion simple, indépendante de la distance et rapide d'informations et de connaissances.

Parler des technologies de l'information et de la communication dans le champ sanitaire et social, c'est évoquer une nouvelle organisation des soins en réseaux utilisant informatique et télécommunications c'est-à-dire la télémédecine. Celle-ci résulte du croisement de deux mondes totalement différents, la médecine avec sa culture millénaire, et l'informatique, l'internet, les réseaux sécurisés qui n'explorent véritablement que depuis une décennie.

La télémédecine est un outil formidable proposé aux professionnels de santé qui introduit une autre façon de travailler, un autre mode de compagnonnage : nouvelle forme de pratique médicale coopérative entre professionnels distants, en temps réel ou différé, elle nécessite le consentement du patient.

Quelles que soient les typologies de la télémédecine, il est clair que l'enjeu majeur de la télémédecine est de favoriser et d'accompagner une évolution des pratiques médicales. C'est le passage d'un exercice médical isolé, individualiste, caractérisé par le colloque singulier, à une pratique médicale collective, coordonnée, reposant sur le partage de l'information médicale et le partage des connaissances.

Ces nouvelles pratiques ont pour conséquence d'introduire un certain bouleversement dans les organisations traditionnelles, d'impliquer la transparence et la visibilité des pratiques. Un nombre croissant d'actes de soins s'effectue ou s'effectuera à distance dans les prochaines années. Mais ce n'est qu'un outil complémentaire qui ne remplace pas la consultation traditionnelle - médecin-patient-.

Tél(é)- Du grec *têle* [télé-], loin de, à distance.

Télé-assistance chirurgicale, télé-échographie, télé-pathologie... L'ensemble des nouvelles pratiques médicales intégrant les technologies de communication à distance annonce l'avènement de la télémédecine et une profonde mutation des usages de santé.

Depuis l'établissement d'un diagnostic jusqu'à l'opération chirurgicale, tout acte médical peut aujourd'hui s'envisager à distance. Les perspectives offertes par la télémédecine permettent d'imaginer que demain chacun pourra, partout et à tout moment, bénéficier des techniques médicales les plus pointues. Elles laissent également envisager une diminution des dépenses de santé (éviter des déplacements), l'accès aux soins par tous (y compris auprès des experts lorsque

ceux-ci ne sont pas sur place), et une meilleure gestion des ressources (les experts sont rares), grâce notamment à l'accélération du déploiement du haut débit.

En particulier, dans le secteur de la chirurgie, elle permet l'accès direct et étendu à l'échange d'opinions entre spécialistes et donc l'obtention immédiate de secondes opinions compétentes. La télé-médecine permet d'apporter le savoir à n'importe quel endroit, soutenant ainsi l'enseignement et la recherche et renforçant le professionnalisme dans les domaines diagnostique et thérapeutique. Parmi les technologies de télé-médecine, la téléconsultation et le téléteaching sont déjà bien établis. On connaît moins bien le télémonitoring qui consiste en l'assistance et la surveillance à distance d'activités invasives (par exemple pendant une opération laparoscopique) au moyen d'un échange on line d'image et de son avec l'opérateur.

Les développements non moins spectaculaires des technologies computerisées en robotique ont, parallèlement aux possibilités de la télé-médecine susmentionnées, apporté des progrès incontestés au moins pour les interventions chirurgicales de haute précision. On ne saurait dès lors s'étonner que la liaison entre télé-médecine et chirurgie robotique ne s'est pas faite attendre, conduisant à la téléchirurgie, grâce à la nouvelle technique ATM de transfert des données. Cette technologie permet le transfert d'image sur une distance de plus de 1000 km dans un délai de seulement 155 millisecondes, donc nettement inférieur aux 330 millisecondes qui ne doivent pas être dépassées au risque d'entraver la réaction du chirurgien.

Ainsi est-il désormais théoriquement possible, sous pilotage à distance, de procéder dans chaque hôpital à des interventions hautement complexes et de la compétence de peu de chirurgiens seulement.

Rappelons le succès total de l'Opération Lindbergh, une intervention de téléchirurgie réalisée par une équipe chirurgicale [31], le professeur Marescaux et son équipe, [31] située à New-York sur une patiente hospitalisée à Strasbourg. Cette première mondiale dans l'histoire de la chirurgie, a été possible grâce à des délais de transmission liés à la distance parfaitement maîtrisés. En effet, la liaison entre le robot et le chirurgien était assurée par un service à haut débit sur fibre optique. Cette intervention de 45 minutes, qui a eu lieu le 19 septembre 2001, a consisté en une ablation de la vésicule biliaire. La patiente de 68 ans était sous narcose dans une salle d'opération à Strasbourg. Les bras (stériles) du robot furent introduits dans sa cavité abdominale. Le chirurgien était à New York, assis à la console du robot et dirigeait sur l'écran les bras du robot qui œuvrait à Strasbourg pour une cholécystectomie laparoscopique qui fut exécutée sans complication.

Cette première mondiale a ainsi ouvert la voie à la téléchirurgie. Le bilan de l'expérience permet d'imaginer que demain, comme l'a déclaré le professeur Marescaux, "Tout chirurgien expert pourra participer à une opération chirurgicale se déroulant n'importe où sur le globe".

Télé-assistance chirurgicale, télé-échographie, télé-pathologie... L'ensemble des nouvelles pratiques médicales intégrant les technologies de communication à distance annonce l'avènement de la télé-médecine et une profonde mutation des usages de santé. Depuis l'établissement d'un diagnostic jusqu'à l'opération chirurgicale, tout acte médical peut aujourd'hui s'envisager à distance.

Les perspectives offertes par la télémédecine permettent d'imaginer que demain chacun pourra, partout et à tout moment, bénéficier des techniques médicales les plus pointues. Elles laissent également envisager une diminution des dépenses de santé (éviter des déplacements), l'accès aux soins par tous (y compris auprès des experts lorsque ceux-ci ne sont pas sur place), et une meilleure gestion des ressources (les experts sont rares), grâce notamment à l'accélération du déploiement du haut débit partout en France. Avec le développement de tels services, combinés à la maîtrise des réseaux haut-débit, France Télécom se positionne de plus en plus comme un acteur de services majeur sur le secteur de la Santé.

1.1 Définition

Pour résumer on peut dire que la télémédecine est donc une forme de pratique médicale et coopérative mettant en rapport à distance un patient et un médecin ou plusieurs professionnels de la santé grâce aux technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technique permet d'abolir les distances et d'éviter les déplacements et hospitalisations parfois inutiles, et ceci afin de réaliser l'acte médical le plus approprié dans un environnement favorable. Il faut insister sur le fait que la télémédecine n'a pas vocation à produire des soins, mais elle est un outil d'organisation des soins.

2. Problématique

Ce thème a pour cible privilégiée deux domaines d'application pour lesquels la recherche en Télémédecine constitue un défi majeur : la Télémédecine spécialisée, qui vise à mettre en relation les professionnels de la santé (médecins, personnels soignants,...), et la télésurveillance de malades chroniques susceptibles de se retrouver à tout moment en situation d'urgence vitale. Il vise à améliorer la qualité des décisions thérapeutiques, et par conséquent des soins, par un "accès à la bonne information, où il faut et quand il faut".

La télémédecine repose sur une infrastructure matérielle et logicielle comportant des systèmes d'information répartis dotés de systèmes communicants ayant pour but, chaque fois que cela est possible, de "mouvoir" les informations plutôt que le patient ou l'expert médical, tout en assurant la qualité des soins. Elle implique toutes les situations où l'information peut-être échangée électroniquement entre les acteurs de soins, sans jamais perdre de vue le diagnostic et sa mise à jour, le suivi des traitements associés aux moyens de monitoring du patient.

Donc le problème réside dans la mise à jour, la gestion et l'utilisation des dossiers médicaux et de santé multimédia distribués qui, rendus disponibles en tout lieu (à l'hôpital, dans l'ambulance, au domicile du patient) permettent d'accéder à l'ensemble des informations concernant le patient. Ceci passe par la modélisation de l'environnement décisionnel du médecin (modélisation des domaines d'information, structuration et représentation des formes complexes de l'information médicale dans un contexte multi-acteurs), la définition de protocoles universels d'échanges informatisés de données biomédicales semi-structurées, la mise au point de méthodes de transformation des données du patient en informations (traitement du signal, systèmes experts et reconnaissance de formes), le développement d'outils apportant une aide à la gestion des informations (en particulier, gestion de la surcharge d'information) et une adaptabilité du système aux pratiques du médecin (spécifiques à chacun d'entre eux) et au cas particulier du malade

(Interfaces graphiques intelligentes, pilotables aussi bien par l'utilisateur que par les données), et la création de stations de travail cliniques permettant des présentations synthétiques intelligentes de données médicales dynamiques en vue du suivi (distant) de populations à risques.

Le Docteur Jean-Pierre THIERRY, dans son rapport auprès du Ministère de l'Industrie, a fait état de trois types de télémédecine :

- o la télémédecine vraie où le médecin est éloigné de son patient,
- o la télémédecine d'expertise entre médecins de compétences distinctives
- o et la télémédecine de réseaux de soins. On trouve donc dans cette spécialité de nombreuses applications : téléconsultation, télésurveillance, télé-expertise, téléformation. L'un des avantages est la création d'un réseau d'imagerie médicale, via Internet. Les clichés numérisés peuvent être vus en temps réel par un généraliste

2.1 Risques liés au tiers technologique

Les expériences de télémédecine, notamment de télédiagnostic et de télésurveillance, font intervenir un tiers technologique qui peut générer de nouveaux risques et de nouvelles responsabilités. Les prestataires des offres technologiques doivent, dans la mise en place de leur outils et lors des modes d'utilisation, fournir des conseils et tenir compte des patients qui bénéficient de l'offre technologique apportée ; cela afin d'assurer, entre autres, une sécurité optimale des informations stockées ou échangées.

La responsabilité du prestataire des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) est également engagée [33]. Une fois de plus, le rôle et le champ de compétences de chaque acteur dans la mise en place et l'utilisation d'une offre en termes de technologies de l'information doivent être clairement définis.

La télémédecine utilise les technologies Internet. Il y a des problèmes de performance (débit), et de sécurité, qui préoccupent fortement les médecins. Certains rajoutent un autre obstacle : le contact médecin patient privilégié par le corps médical. Le patient est un partenaire, et non un contestataire qui aurait un avis opposable à celui de son médecin

3. Technologie utilisée

3.1 Les technologies de communication utilisables en télémédecine

Quatre types de technologies, qui sont eux-mêmes combinables, sont souvent employés en télémédecine :

- Communication téléphonique vocale en temps réel, par liaison filaire ou radioélectrique;
- Système d'enregistrement et d'envoi : télécopie, courriel en mode texte, ou avec une image jointe, ou avec un fichier d'images en mode JPEG, MPEG ou DICOM ;
- Visioconférence en temps réel ;
- Systèmes de formation basés sur la Toile avec utilisation de réseau à distribution de contenu (CDN) en streaming media.

La technologie aujourd'hui permet donc le transfert d'images médicales autant fixes que dynamiques et les Inforoutes offrent maintenant des moyens efficaces et rapides qui respectent les critères essentiels de sécurité et de confidentialité. Ces moyens offrent donc de nouvelles perspectives dans l'organisation des soins de santé, particulièrement à l'égard de l'accessibilité aux soins de spécialité.

3.1.2 Les moyens

La mise en place d'un réseau à haut débit permettra donc dans un premier temps de:

- numériser, compresser les images échocardiographiques sans en altérer la qualité
- associer la visioconférence pour dialoguer en temps réel.

3.2 Les normes de télé-médecine

La télé-médecine recouvrant un vaste domaine de technologies et d'applications, l'établissement de normes s'avère difficile. La visioconférence et l'informatique de gestion n'ont pas été conçues pour des applications médicales, lesquelles requièrent une bonne qualité de service, une bonne efficacité, un bon niveau de sécurité et de confidentialité et des investissements raisonnables.

Un diagnostic médical ne s'obtient encore par une simple manipulation de logiciel. L'évaluation objective réclame l'examen de plusieurs critères et des mesures précises. La télé-médecine exige une adaptation de tous les moyens existants pour atteindre ses buts. Des normes techniques, cliniques et de formation, ainsi que des protocoles médicaux sont indispensables pour atteindre le degré de sécurité, de compatibilité et d'efficacité nécessaire à la télé-médecine.

On estime que les normes en télé-médecine seront en mesure d'améliorer les soins de santé dans les quatre domaines suivants :

- amélioration des tâches administratives ;
- renforcement des infrastructures de gestion ;
- Formation ;
- amélioration de la qualité et de l'efficacité des soins.

3.3 Un réseau répondant à un triple besoin

le professeur LARENG , spécialiste à l'origine en anesthésie réanimation, a fondé le SAMU, et est aujourd'hui, entièrement voué à la télé-médecine. Directeur de l'Institut Européen de Télé-médecine, Président de la Société Européenne de Télé-médecine (installée au CHU Toulouse) ce professeur précise les conditions du succès. Pour que ce système devienne pérenne et actif, il doit répondre à trois besoins.

- Le premier est lié à la complémentarité des compétences : Il faut que celui qui a besoin d'un conseil puisse le demander à celui susceptible de le lui donner et, si ce n'est pas suffisant, solliciter un avis ailleurs. Pour cela, le réseau doit être gradué et coordonné.

- Deuxième besoin : la pluridisciplinarité. Plusieurs disciplines peuvent intervenir simultanément. Que le radiologue puisse obtenir l'avis d'un neurologue, par exemple.
- Troisièmement, le système doit permettre à un petit établissement de s'équiper avec du matériel fiable, car les compétences de l'interprétation des images produites par ce matériel pourront être réalisées ailleurs avec sécurité. Le réseau contribue ainsi à l'aménagement du territoire. Les hôpitaux de moyenne importance peuvent garder leurs malades et ceux-ci y gagnent en qualité de vie. Tout cela suppose de fonctionner en réseau : c'est pour cela que nous voulons impliquer le plus grand nombre d'établissements, en associant public et privé. Et il faut un activateur à ce réseau, c'est le rôle du coordonnateur, pour que l'équipement ne finisse pas à la cave".

4. Applications de la télé médecine et technologies de communication

4.1 Applications

On distingue cinq types d'applications :

4.1.1 la Téléconsultation : consultation, diagnostic et suivi du patient à distance

Il s'agit de l'évaluation d'un patient, ou des données concernant un patient, sans interaction physique directe, via un système de télécommunication. Le champ de la téléconsultation est vaste ; on citera les demandes de seconde opinion auprès d'un confrère, l'organisation d'une prise en charge en urgence, l'orientation d'un patient et l'arrangement d'un transfert éventuel, mais également les soins primaires si le médecin n'est pas disponible... On distingue deux types de téléconsultation :

- la téléconsultation de type I : un patient consulte un médecin par un réseau de communication interposé.
- la téléconsultation de type II : le médecin consulté sollicite un avis diagnostic (télédiagnostic) et/ou thérapeutique (téléexpertise) auprès d'un autre praticien situé à distance.
 - Télédiagnostic : Transfert des données d'un examen diagnostic pour aide à l'interprétation. La télépathologie et la téléradiologie sont les activités les plus fréquentes et les plus développées, au point que " ces activités ne sont pas vues comme des innovations mais comme des routines.
 - Téléexpertise : Aide à la décision médicale apportée à un médecin par un autre médecin situé à distance, à partir des éléments d'information de caractère multimédia qui lui sont transmis par un dispositif télématique. Lorsque les téléconsultations concernent spécifiquement une pathologie, on parlera par exemple de télécardiologie, ou de télédermatologie.

- **La télé-échographie robotisée**

Autre application de la médecine à distance, la télé-échographie robotisée (TER) permet à un échographiste de réaliser un examen à distance sur un patient présent sur un autre site. Le spécialiste pilote à distance un robot qui porte une sonde échographique et lui renvoie en temps réel non seulement les images échographiques, mais aussi les sensations fines du toucher, une dimension indispensable pour un examen en finesse. A tout instant de l'examen, l'expert dispose d'une vision d'ensemble de la scène, peut dialoguer en visiophonie avec le patient et le personnel présent, tout en visualisant les images échographiques temps réel. Grâce à une sonde virtuelle qu'il tient à la main, il reçoit un retour d'information sur la pression exercée par la sonde réelle sur le patient. Dans le cas d'un examen prénatal, il peut ainsi sentir le ventre de la maman, comme s'il pratiquait un examen traditionnel

- **La télépathologie : examen microscopique à distance et en temps réel**

La Télépathologie est un service de télé expertise temps réel qui permet à un médecin d'être aidé dans son diagnostic par un anapathe (anatomopathologiste) distant : l'anapathe peut procéder en temps réel et à distance à un examen microscopique de tissu. Par exemple, au cours d'une opération, le chirurgien effectue un prélèvement afin de le faire analyser immédiatement par un anapathe exerçant sur un autre site. L'expert consulté intervient aussitôt comme s'il était réellement présent dans le bloc opératoire. Il procède à l'examen de la pièce opératoire dont il reçoit l'image, tout en dialoguant avec l'équipe chirurgicale et fait part immédiatement des conclusions de son analyse. Ce système fait gagner un temps précieux et permet de définir immédiatement la stratégie opératoire qui convient. La solution de télé pathologie peut s'appliquer aussi hors du cadre d'une intervention chirurgicale. Elle peut favoriser le travail de collaboration entre laboratoires, faciliter la transmission en évitant les envois (postaux ou autres) de prélèvements, et garantir ainsi rapidité et sécurité des examens.

4.1.2 Le télémonitoring ou la télésurveillance : surveillance du patient à domicile

Un appareillage particulier permet d'enregistrer, en général à domicile, des paramètres physiologiques sur le patient puis de les transmettre au médecin concerné. Il s'agit par exemple de surveiller un taux de diabète, une tension artérielle ou en obstétrique d'observer les contractions utérines et le rythme cardiaque fœtal.

Elle consiste à recueillir des paramètres de surveillance avec possibilité d'intervention en cas de nécessité et permet le maintien du patient à proximité ou au niveau de son lieu de vie dans le cadre d'une prise en charge nécessitant une surveillance médicale.

En France, l'une des expériences les plus illustratives est la Télédialyse [34] (réalisation de séances d'hémodialyses à distance), dans un contexte d'augmentation de la prévalence de patients en Insuffisance Rénale Terminale (IRT) et de difficultés en termes de démographie médicale.

L'objectif de cette application est de permettre la réalisation de séances de dialyse à proximité du lieu de vie ou de prise en charge des patients concernés (maisons de retraites, centres hospitaliers de moyen ou long séjour), tout en assurant une surveillance médicale de qualité. Ceci pour permettre une réduction du temps de trajet et la continuité de la vie sociale, notamment chez

les patients les plus dépendants. La "dialyse de proximité" est réalisée à moins de 30 kilomètres du lieu de vie. La surveillance médicale des patients dialysés était assurée par l'équipe de néphrologues du centre hospitalier le plus proche situé à 75 kilomètres par visio-phonoassistance permanente. La transmission de l'information vidéo et sonore avait comme support le réseau Régional. La téléassistance était réalisée grâce à un logiciel, permettant de consulter à tout moment de la séance de dialyse les paramètres médicaux de surveillance du patient. Ce procédé est associé à une communication interactive vidéo-sonore entre le patient accompagné d'une infirmière au centre hospitalier. La satisfaction du personnel soignant et des patients quant à l'efficacité de la télé-dialyse était appréciable. Une économie significative en termes de coûts de transports était notifiée

4.1.3 La Téléchirurgie : opération assistée à distance par ordinateur

Il est important de comprendre que les robots médicaux sont des instruments sophistiqués aux mains des chirurgiens, qui permettront d'améliorer les procédures médicales et chirurgicales dans le futur, mais qui n'ont pas vocation à remplacer le médecin ou chirurgien. Les robots médicaux actuels ont été bien souvent conçus pour reproduire les gestes humains. Ils sont encore peu présents dans les hôpitaux, car ils ne présentent pas suffisamment d'avantages par rapport aux procédures traditionnelles en regard de leur coût. La recherche en robotique médicale cherche à développer des systèmes d'aide au geste médical ou chirurgical qui permettent de réaliser des gestes aujourd'hui impossibles.

4.1.4 Les Réseaux de soins

Transfert d'informations médicales entre professionnels de santé d'une part et entre patients et médecins d'autre part.

On assiste désormais à la mise en place de réseaux régionaux, reliant entre eux des hôpitaux afin qu'ils mettent leurs compétences en commun et puissent créer des pôles d'excellence. Chaque hôpital pourra ainsi se spécialiser dans certaines pathologies au lieu de devoir posséder une panoplie complète de spécialistes.

4.1.5 la Téléformation ou télé-éducation: formation médicale à distance.

Il s'agit d'un service de formation s'adressant à des étudiants ou à des professionnels de santé et par lequel ils peuvent avoir accès à un savoir-faire ou à des connaissances, quelle que soit leur localisation. On peut, par exemple, utiliser ce système pour réaliser une base de données médicale consultable par tous et à tout moment sur le web. Les internes en chirurgie peuvent assister à des opérations sans être physiquement présents dans la salle d'opération, ce qui résout certains problèmes d'hygiène et d'organisation de l'espace opératoire

- **Téléconférence, téléstaff**

Concrètement, le téléstaff s'accompagne de la transmission en temps réel d'images fixes ou mobiles grâce au branchement d'un matériel adéquat. Les spectateurs peuvent donc suivre les explications de l'intervenant tout en disposant d'un support visuel. Chacun peut intervenir, le système donne priorité à la commande vocale.

À l'issue de chaque visioréunion, il est demandé aux sites participants de remplir un questionnaire général (satisfaction quant au déroulement de la réunion, conditions techniques et organisationnelles ; bénéfice retiré en terme d'apport pédagogique, aide au diagnostic, aide à la décision ; liste des participants) et une " fiche d'observation " pour chaque observation présentée (type de pathologie, support de présentation utilisé, transfert envisagé avant la réunion, devenir de la patiente après). Ces documents sont télécopiés à l'unité de télémédecine qui assure un suivi régulier du fonctionnement du réseau.

- **Avantages**

- Élargissement de la population pouvant assister au staff, tant du point de vue du nombre que des professions représentées.
- Un fort impact en termes de formation continue, cela permet de voir des pathologies rares et complexes, et d'assister en direct à la prise de décision.
- Permet de débattre sur les pratiques. Les discussions ne se limitent pas à des cas rares, il arrive régulièrement que des protocoles soient étudiés.
- L'émergence d'une dynamique relationnelle positive permet de combattre le sentiment d'isolement professionnel et conduit à un décloisonnement des structures.
- Les professionnels restent disponibles pour leur service. Ainsi, ils ne sont pas tenus d'assister à la totalité de la visioconférence. C'est une solution très flexible

La téléconférence pluridisciplinaire est une application qui gagne en importance et permet le partage de l'expertise et de la formation.

4.2 Technologies de communication au service de la santé

Au cœur des dispositifs technologiques utilisés dans toutes les solutions de télémédecine, on trouve :

le haut débit, la visioconférence multi-sites, la transmission et le partage d'images en temps réel entre plusieurs sites distants.

- **Chirurgie à distance**

Sur le plan médical, la réalisation d'une opération à distance découle des techniques de la chirurgie mini-invasive, permettant de réaliser un acte chirurgical guidé par l'introduction d'une caméra sans recours à l'ouverture, et de la chirurgie assistée par ordinateur.

La performance de l'Opération Lindbergh a été rendue possible par la mise en réseau en haut débit sur fibre optique de tous les équipements reliant les deux continents : visioconférence, ordinateur, robot, caméra endoscopique, voix sur IP.

Malgré la distance, la performance du système a permis au chirurgien d'opérer de façon quasi instantanée, avec un décalage d'à peine 150 millisecondes entre son geste pour diriger les bras manipulateurs du robot et la vision de son action sur l'écran...

• Télé-échographie robotisée

La solution développée en télé-échographie robotisée, fruit de cinq années de travail en recherche et développement, comporte plusieurs innovations :

- le traitement du geste, utilisant côté expert un bras manipulateur avec retour d'effort et côté patient, un robot porte-sonde échographique.
- le traitement des images médicales sous plusieurs formats, adaptable au réseau de transport utilisé.
- le transport temps réel synchronisé des flux de contrôle du robot et d'imagerie médicale.

L'ensemble du système repose sur une architecture robotique légère, compliant, adaptée à la télé-échographie robotisée. Toutes ces fonctionnalités sont intégrées sur une seule plate-forme matérielle : un PC traite le geste, les imageries médicales et la visiophonie

Le système de télé-échographie collaborative intègre quatre services de télécommunications : la visiophonie multisites, la transmission et le partage multi-utilisateurs d'images médicales en temps réel, et la reproduction exacte - à des centaines de kilomètres - du geste du médecin sur le patient avec les sensations du toucher.

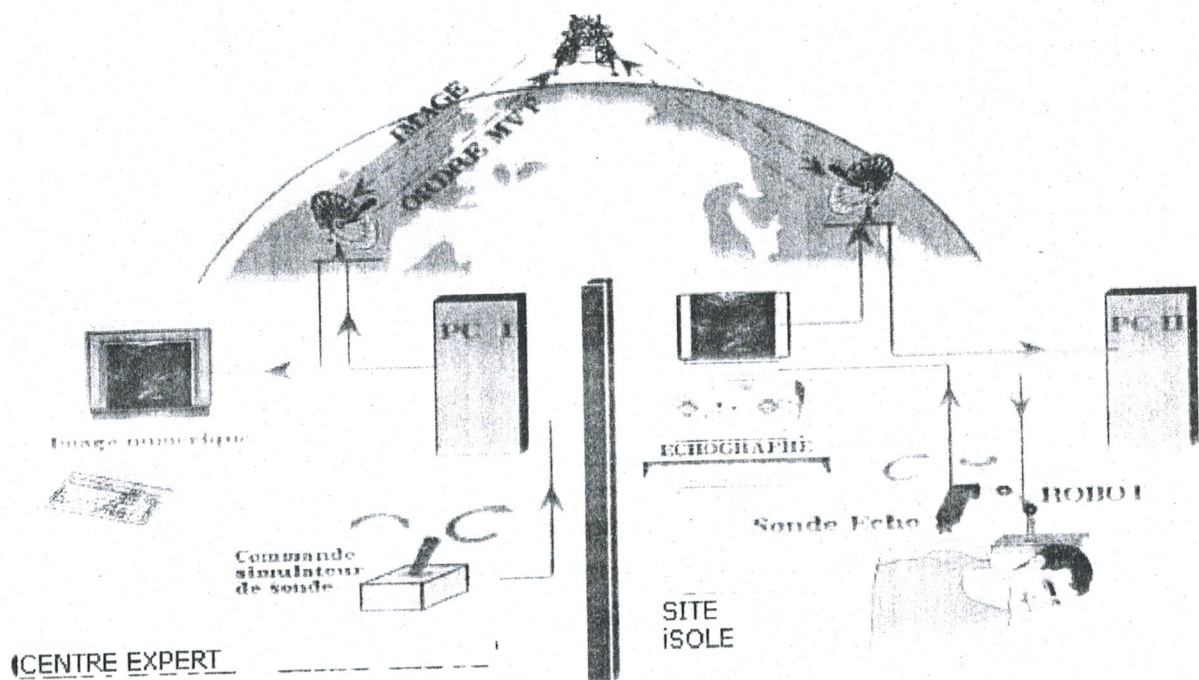


Figure 4.1 Télé-échographie robotisée

• Télécompagnonnage

Deux chirurgiens travaillent en collaboration à distance, au travers d'un environnement robotisé. Quatre services de télécommunications sont nécessaires pour mettre en œuvre le télécompagnonnage chirurgical :

- commande du geste chirurgical : le robot assure l'enregistrement du geste exécuté par le chirurgien expert sur une console maître et sa reproduction sur des bras articulés de la console esclave où se trouve le chirurgien non spécialisé ;
 - contrôle visuel du champ opératoire : deux caméras endoscopiques enregistrent les mouvements du robot dans le champ opératoire et les restituent en 3D sur l'écran de contrôle du chirurgien expert ;
 - échange vocal entre les chirurgiens : un système de téléphonie privative assure aux chirurgiens les échanges techniques ;
 - visioconférence d'ambiance du bloc opératoire : une caméra enregistre les images d'ambiance de la salle de commande et le bloc opératoire afin de faciliter les échanges entre les chirurgiens
- Ces informations sont multiplexées et agrégées puis transmises par une liaison satellite haut débit qui garantit une très bonne qualité de service.

• Télépathologie

La mise en œuvre du système de télépathologie fait appel à quatre services intégrés qui s'appuient sur un réseau haut débit xDSL :

- pilotage à distance d'un microscope motorisé en agissant sur la platine, la tourelle et le focus,
- visioconférence entre les deux sites,
- transports des images hautes résolutions de la caméra du microscope,
- archivage des images et des comptes rendus dans un dossier patient électronique.

Le personnel du bloc opératoire est relié par un service de visioconférence au laboratoire où l'anatomopathologiste va réaliser en temps réel son examen microscopique à distance.

Une lame comportant le prélèvement de tissu est déposée sur un microscope motorisé doté d'une caméra. Pour effectuer ses observations, l'expert pilote à distance le microscope pour déplacer la lame selon l'angle de vision désiré.

Selon les experts, la pratique de l'acte médical à distance va s'intensifier dans les dix prochaines années. Une projection réaliste compte tenu de l'évolution constante des technologies, en particulier dans les secteurs de la robotique des réseaux et de l'informatique communicante.

5. La téléchirurgie

L'apprentissage de la chirurgie traditionnelle s'effectue par compagnonnage au cours de la formation initiale. Il consiste en l'apprentissage d'une gestuelle, la reconnaissance de plans de dissection, l'établissement d'un choix, de la bonne attitude thérapeutique. Les gestes de base sont peu évolutifs mais la transformation rapide des instruments, des technologies et des procédures chirurgicales (sutures mécaniques, chirurgie mini invasive) oblige le chirurgien à une mise à niveau permanente. Nous pouvons penser que beaucoup de chirurgiens s'initieront à

l'avenir à partir de simulateurs reliés par Internet à un enseignant qui contrôlera ce que fait l'élève.

Les trente dernières années ont vu naître des systèmes médicaux d'aide au diagnostic toujours plus performant. La plupart de ces outils sont basés sur de l'imagerie (scanner, IRM, échographie 3D, endoscope) et ont un rôle informatif sur les lésions et pathologies. Au niveau des actes médicaux et jusque dans les années quatre vingt les médecins ne disposaient, pour opérer, que de leurs mains et d'outil assez simple (scalpel, pince, aiguille). Ce n'est que dans les années quatre vingt dix, que l'on a vu naître dans les blocs opératoires des outils bien plus évolués agissant sur le patient. Des robots médicaux ont en effet été développés, offrant aux médecins de nouvelles perspectives en terme de perception des pathologies, de précision dans le geste médical ou encore d'entraînement

Evolution de l'acte chirurgical

Depuis quelques années, plusieurs révolutions chirurgicales ont eu lieu :

- 1988 : avènement de la chirurgie mini-invasive, permettant de réaliser l'acte chirurgical guidé par l'introduction d'une caméra sans avoir recours à une ouverture de l'abdomen ou du thorax.
- 1996 : chirurgie assistée par ordinateur. Cette chirurgie consiste à interposer entre le chirurgien et son malade une interface d'ordinateur permettant d'analyser les gestes du chirurgien, de les démultiplier, de les sécuriser, puis de les transmettre à un télémanipulateur qui réalise l'intervention chirurgicale. L'intelligence artificielle sécurise le geste opératoire et le rend plus précis.
- 7 septembre 2001 : la télé-chirurgie.

Aujourd'hui, la chirurgie mini-invasive a envahi les salles d'opération et l'imagerie séduit de plus en plus les chirurgiens. Les technologies des télécommunications qui se développent à un rythme fulgurant sont maintenant à leur tour sur le point de révolutionner la chirurgie. L'utilisation par la



médecine de ce type de technologie en pleine expansion s'appelle la téléchirurgie. Elle peut être définie comme un système électronique par lequel le chirurgien consultant reçoit ses patients pour une consultation à distance de son lieu d'exercice, lorsque cela s'avère nécessaire. Par exemple, un patient est pris en charge dans un hôpital de proximité. Le praticien peut se poser la question d'un éventuel transfert vers un service de soins spécialisés. Avec le système mis en place, il constitue le dossier radiologique, avec un scan si nécessaire, lui associe le dossier clinique sous forme d'une fiche suiveuse et transfère le tout vers le site impliqué en matière de référence. Le praticien avertit le neurochirurgien qu'il va effectuer un envoi. Le dossier est stocké sur la station de

réception. Dès que le chirurgien est disponible, il peut ainsi aller consulter les images et la fiche suiveuse, téléphoner au praticien si nécessaire, et retourner sa réponse par voie électronique,

assurant la traçabilité de l'échange. Qu'il y ait ou non transfert, le chirurgien va donner son avis, conseiller éventuellement sur l'indication thérapeutique. Cet échange favorise la formation de l'ensemble des médecins au niveau régional.

La téléchirurgie permet de retransmettre dans les services de soins, des interventions effectuées dans les blocs opératoires évitant la présence de nombreuses personnes dans ces secteurs sensibles. Elle se compose de :

- ✓ la chirurgie assistée par un robot ou chirurgie robotisée
- ✓ de la téléchirurgie de compagnonnage

5.1 La téléchirurgie de compagnonnage

La dimension d'échange et de collaboration est au centre de toutes les expérimentations menées en télé-médecine. Les médecins ont commencé à partager les images fixes, puis les images animées, et à présent ils vont vers le partage du geste que l'on peut appeler télé-compagnonnage. Ainsi la téléchirurgie pourrait permettre à un chirurgien de confier une tâche trop ardue à un confrère plus familiarisé avec le geste à effectuer.

Une révolution qui permet d'envisager des interventions en chirurgie humanitaire, militaire ou dans l'espace. Ces performances exigent une robotique sophistiquée mais surtout des liaisons à très haut débit pour une transmission ultra-rapide (moins de 200 millisecondes) d'images haute résolution. La plupart des transferts lointains se font par satellites qui, du fait de leur balayage du globe quasi total, désenclavent les bateaux, les plates-formes pétrolières, les régions isolées des villes notamment en Afrique. D'énormes progrès sont réalisés pour " faire parler les images " c'est-à-dire en extraire l'information pertinente.

Le télécompagnonnage chirurgical ou la collaboration à distance entre confrères a pour objectif de permettre à un chirurgien spécialisé d'apporter son expertise à un collègue exerçant sur un site distant. Dans des circonstances où une population se trouve en situation d'éloignement - par exemple sur une île, une plate-forme pétrolière, un front armé, un navire... - un seul chirurgien ne peut répondre à toutes les pathologies auxquelles il est susceptible d'être confronté.

Le bloc opératoire situé dans la zone isolée est doté d'un équipement chirurgical robotisé. L'opération réalisée par le praticien local est accompagnée à distance et en temps réel par le spécialiste. Celui-ci guide les gestes opératoires de son confrère en télécommandant les bras du robot chirurgical. Ce qui nous amène à parler de chirurgie robotisée.

5.2 Chirurgie robotisée

La chirurgie telle qu'on la connaît maintenant est amenée à disparaître, notamment grâce au développement phénoménal des moyens de l'information dans le domaine chirurgical. Il sera désormais possible, avant d'opérer un malade, de créer son « clone digital » à partir de ses images médicales (scanner, l'IRM...). On pourra pratiquer l'opération de façon simulée sur ce clone pour ensuite opérer le patient grâce à la chirurgie assistée par ordinateur, c'est à dire la robotique. La

robotique est une interface entre le chirurgien et son malade, il y a donc déjà une notion de distanciation. Pourquoi alors ne pas envisager la chirurgie à distance, abolir les barrières géographiques.

Médecine interventionnelle et chirurgie nécessitent des mouvements complexes. Une intervention sera, dans l'avenir, planifiée et robotisée. Les mouvements complexes du geste à réaliser seront effectués par un robot muni de commandes par micro-actionneurs, agissant de façon très précise. *La télérobotique est le bras moderne du chirurgien qui reste contrôlé et dirigé par lui.*

L'appareillage médical du futur repose sur une maîtrise combinée des domaines de capteurs, de vision par ordinateur, de robotique, de réalité virtuelle, du traitement de signal et des images, de manière à développer des équipements microtechniques, optiques et informatiques pour la santé, en particulier, des outils de navigation, de guidage et de positionnement avant et pendant les interventions. La salle d'intervention du futur intégrera les diverses opérations (éclairage, acquisition des images, planification et exécution des tâches, ...) qui seront commandées et mesurées par le biais de l'informatique.

Cette télémanipulation se faisait jusqu'alors par l'intermédiaire d'un câble de quelques mètres reliant dans le même bloc opératoire le chirurgien à son patient. Tout le défi était d'imaginer que cette chirurgie pourrait ne plus avoir de limites de distance.

Néanmoins, les chercheurs dans ce domaine s'étaient toujours heurtés à une limite technique car il était impossible de réduire le temps de latence entre le geste du chirurgien et le retour sur l'image du geste effectué. Ainsi l'utilisation d'un satellite, à l'origine d'un délai de 600 millisecondes, interdisait tout geste chirurgical fiable.



le pr J.Marescaux
à New-york(photo
n°1)

en train d'opérer
sa patiente (photo
n°2) située à
Strasbourg



Figure 4.2 Opération Lindbergh

Opérer à distance était un challenge technologique car il était tenu pour impossible de partager le geste chirurgical à distance. De l'avis général, la téléchirurgie se serait limitée à la téléconcertation préopératoire, c'est-à-dire au fait de discuter ensemble du dossier d'un malade, et au mieux au "télémentoring" : un chirurgien plus expert donne des conseils à un chirurgien qui opère via un système de visioconférence.

L'opération Lindbergh a démontré que la chirurgie, domaine qui nécessite un "compagnonnage" constant pour améliorer ses techniques, dispose d'une nouvelle opportunité étonnante : n'importe quelle équipe chirurgicale plus experte qu'une autre dans un domaine donné peut aider une deuxième équipe chirurgicale quelle que soit sa localisation géographique. Cette opération a été menée du début jusqu'à la fin uniquement pour montrer qu'il n'y avait pas d'obstacle technique au partage du geste opératoire.

le partage de la connaissance, de la préparation et du geste chirurgical à distance ont été très certainement l'une des plus grandes mutations de la médecine et de la chirurgie de ce siècle.

tout le monde sait que pour une technique donnée certains chirurgiens ont plus d'expérience que d'autres, et le meilleur moyen d'élever le niveau de la chirurgie, c'est de collaborer avec plus expert que soi. Les technologies permettant le partage du geste chirurgical deviendront rapidement incontournables.

5.2.1 Exemples de robots médicaux

5.2.1.1 L'endoscope à commande vocale.

AESOP (Automated Endoscopic System for Optimal Positioning) est le seul robot à commande vocale. Comme son nom l'indique, AESOP (*figure 1*) n'est qu'un système de déplacement et de maintien d'un endoscope utilisé lors d'interventions chirurgicales mini-invasives. Sa grande originalité réside dans sa commande vocale. Le chirurgien enregistre sa voix sur une carte ensuite insérée dans l'AESOP avant chaque opération. De cette manière, le système n'est capable d'obéir qu'à un seul chirurgien éliminant les risques de mauvaise utilisation. L'AESOP permet d'organiser différemment l'équipe chirurgicale en libérant un assistant[38]. Ce type d'instruments à commande vocale laisse entrevoir des perspectives : commande de la position de la table opératoire, de l'éclairage du site opératoire ou des lumières d'ambiance de la salle par exemple.



Figure 4.3 L'endoscope à commande vocale AESOP

5.2.1.2 CASPAR

Le robot CASPAR (Computer Assisted Surgical Planning And Robotics) est utilisé pour la chirurgie osseuse et articulaire (*figure 2*). Il permet de réaliser des opérations telles que la pose d'une prothèse de hanche et bientôt de genou ou le remplacement des ligaments croisés.

D'un point de vue technique, CASPAR est un robot issu de l'industrie électronique doté de 6 articulations, de manière à reproduire aussi fidèlement que possible les mouvements du bras humain. La sécurité opératoire est assurée soit par le chirurgien qui peut stopper le robot à tout moment, soit par le robot lui-même qui, grâce à un capteur de mouvement ultra sensible, peut détecter le moindre mouvement de l'os sur lequel il est en train d'opérer. S'il détecte un mouvement du patient, le robot s'arrête et s'éloigne.



Figure 4.4 CASPAR un robot dédié à la chirurgie orthopédique.

Le chirurgien lance le programme de planification contenant toutes les données relatives au patient et CASPAR débute son travail. Il fraise l'os suivant les données de la planification avec une précision impossible pour la main humaine (quelques dixièmes de millimètre). Le logement de la prothèse étant exactement adapté à l'implant, la surface de contact entre l'os et la prothèse est de très grande qualité, ce qui réduit considérablement les risques de fissure, de cassure ou d'éclatement de la tige osseuse.

Les atouts majeurs de l'utilisation de robots chirurgicaux [39] sont, la précision du geste, sa sécurité ainsi qu'une réduction significative de la douleur et de la durée d'hospitalisation. Ces avantages se font tout d'abord au bénéfice du chirurgien mais, les conséquences de l'amélioration du geste chirurgical profitent au patient.

Grâce aux nouvelles technologies, on assiste à trois niveaux de progrès :

- un confort indéniable pour l'opéré avec des incisions minimales ;
- une précision des gestes pour le chirurgien accompagné d'un robot qui ne tremble pas ;
- la possibilité de transmettre l'image et de poursuivre l'opération à distance. En plus d'une parfaite retransmission des images, le robot doit renvoyer au chirurgien la tension de la paroi qu'il incise ou qu'il suture.

Avec un système de couplage robot-simulateur, les médecins vont s'entraîner sur une anatomie virtuelle établie à partir d'images scannées sur le patient telles que les propose l'Institut de Recherche contre les Cancers de l'Appareil Digestif (IRCAD). "En alliant robot et simulation, nous finirons par mettre le programme dans la machine qui fera l'opération avec un maximum de qualité" estime Christian Cabrol (cardiologue-chirurgien, Pitié-Salpêtrière) qui voit également la télé-médecine comme un moyen de former directement des jeunes médecins en Afrique ou en Asie par rapport aux pathologies locales. Ainsi la télé-médecine se retrouve au carrefour de progrès communs issus du développement des échanges.

L'imagerie médicale devrait conduire dans un futur relativement proche à de nombreux outils médico-chirurgicaux via l'étape de reconstruction 3D (modèle géométrique), comme l'illustre l'endoscopie virtuelle.

Quand elles ne sont pas basées sur le cheminement dans les bioconduits, les nouvelles techniques opératoires minimisent l'accès anatomique au site par le biais de petites incisions pour insérer un endoscope et des instruments chirurgicaux ; d'où le nom de *chirurgie minimalement invasive* ou chirurgie mini-invasive. Ces nouvelles techniques imposent un apprentissage. Les robots

interviennent dans la formation chirurgicale au moyen des simulateurs. Ces systèmes sont similaires aux systèmes téléchirurgicaux où l'utilisateur interagit avec le manipulateur mais, en simulation, un modèle informatique remplace le robot chirurgical et le patient. Les simulateurs permettent non seulement à l'utilisateur novice de se former à une technique chirurgicale dans des conditions réalistes, mais aussi au spécialiste de répéter une intervention délicate avant de la réaliser sur le patient lui-même.

Ces systèmes d'environnement virtuel auraient pour avantages potentiels :

- une réduction des coûts comparativement à l'entraînement sur cadavres ou sur animaux ;
- une diminution des contraintes de temps et de performance, comparativement à la formation conventionnelle sur le patient ;
- une amélioration du recueil de l'ensemble des actions effectuées durant chaque intervention permettant aux chirurgiens en formation de revoir ces données pour analyser la technique, et aux formateurs d'évaluer les progrès et le niveau d'habileté.

5.2.2 Conclusion

Comme nous venons de le voir, la chirurgie assistée par ordinateur prend deux directions différentes, à savoir la robotisation passive où le robot ne fait que seconder le chirurgien, et la robotisation active dans laquelle le robot autonome accomplit de façon indépendante certaines sous-tâches. Malgré tout, certaines contraintes limitent les perspectives de développement de la robotisation car l'erreur n'est pas permise et la fiabilité doit être totale.

Cependant cette grande mutation technologique dans le domaine chirurgical conduit à imaginer de nombreuses applications futures :

- o Elle démontre tout d'abord la possibilité de partager le geste chirurgical à distance, réalisant ainsi l'une des plus belles applications positives de la « mondialisation ».
- o Elle révolutionne le concept de l'éducation chirurgicale puisqu'elle permet d'imaginer le maintien d'un cordon ombilical entre un jeune chirurgien et une équipe chirurgicale plus entraînée.
- o Elle permet d'envisager la possibilité, pour un pays en voie de développement, de bénéficier de l'expertise d'équipes renommées permettant d'élever le niveau des soins.
- o Elle suscite l'espoir prochain de la réalisation d'actes chirurgicaux dans l'espace.
- o Elle permet enfin d'imaginer en la combinant avec les techniques de réalité virtuelle et de simulation préopératoire, une nouvelle ère où la chirurgie à distance deviendra semi-automatisée voire automatisée.

6. Objectifs visés par la télémédecine

La télémédecine a plusieurs indications, que ce soit pour avoir un avis consultatif dans une démarche diagnostique ou dans une démarche thérapeutique. Elle vise à dispenser des soins d'égale qualité à tous, y compris aux populations vivant dans les zones rurales. L'utilisation de logiciels adaptés devrait permettre de gérer avec efficacité les références contenues dans le dossier des patients. Les cas ambigus (doute sur les maladies rares, ou l'éventualité d'une maladie orpheline, etc.) pourront bénéficier d'un second avis médical de façon à recevoir un traitement efficace. La formation médicale continue et l'enseignement pourront être améliorés et mieux diffusés, en particulier dans le cas des patients des zones rurales. L'aide aux premiers secours, la surveillance des contagions et la collaboration internationale pourront être améliorées, grâce à la création de bases de données régionales et nationales. Le flux énorme de données généré par un tel projet nécessite l'emploi de méthodes de gestion éprouvées afin de pouvoir dispenser à tous, rapidement et efficacement, des soins de santé aux coûts les plus bas.

L'Union Internationale des Télécommunications (UIT) et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) ont signé un accord en 1995 pour l'introduction de technologies de communication et d'informatique qui facilitent la fourniture de services de santé et de soins. Dans le contexte des pays en voie de développement, la télémédecine concerne essentiellement la consultation et l'assistance thérapeutique à distance, entre hôpitaux, centre de santé des zones rurales et médecins itinérants. Mais aussi, elle doit impliquer nécessairement des actions de formation et de transfert de technologie entre le nord et le sud, pour contribuer à la maîtrise des outils par les pays bénéficiaires et éviter la dépendance des centres de compétence occidentaux.

6.1 Répondre à l'urgence

Vidéo interactive et transmission informatisée de dossiers médicaux s'avèrent particulièrement utiles dans les situations d'urgence où il faut pouvoir parer au plus pressé dans le minimum de temps. Même après dix ans de formation un seul médecin ne peut pas tout savoir. Ces techniques facilitent alors l'examen à plusieurs spécialistes d'un même patient, lui évitant ainsi d'être transféré de services en services ou de repasser inutilement les mêmes examens. Une véritable panacée quand l'on sait qu'il faut parfois recourir à plusieurs dizaines de spécialistes pour un seul cas.

6.2 L'intérêt de la télémédecine pour le monde en développement.

Les pays du sud ont des besoins de soins de santé très importants, mais les coûts de distribution de ces soins sont augmentés par l'insuffisance d'infrastructure, d'équipement, de personnel médical et de formation. Dans ces pays, la télémédecine serait bien adaptée et très rentable, comme l'illustrent ces exemples :

- la formation à distance évite des déplacements intercontinentaux coûteux,
- des unités mobiles reliées à des hôpitaux peuvent apporter des soins sur une zone dépourvue d'infrastructure hospitalière,
- des terminaux portables peuvent équiper des médecins itinérants pour les zones isolées.

Les difficultés d'implantation de la télémédecine restent encore nombreuses et expliquent le petit nombre de projets de développement en cours :

- certains pays ont des problèmes de base (médicaments, pandémies, conflits régionaux) qui ne permettent pas d'envisager l'utilisation de technologies de l'information dans l'immédiat,
- l'absence d'investissement initial pour amorcer des études de faisabilité et des expérimentations, qui pourraient servir de plate-forme ensuite à des initiatives privées pour des services opérationnels et rentables, paralyse toute initiative,
- la nécessité d'une implication des gouvernements locaux et de partenariats nord/sud, passe d'abord par une phase de sensibilisation et de démonstration, qui demande aussi des investissements,
- l'adaptation des solutions technologiques du nord aux pays du sud, qui tient compte de la faible densité de réseaux de télécommunication, des difficultés de transport et d'apport en énergie, des besoins accrus de maintenance ou encore de sécurisation des équipements, est à nouveau une source de dépenses supplémentaires,
- là où la technologie et les logiciels peuvent être adaptés, les coûts ne peuvent être supportables que dans une approche à grande échelle d'implantation de la télémédecine.

Dans les pays à développement intermédiaire, la télémédecine se justifie donc sous réserve que les travaux préliminaires d'étude, de sensibilisation et d'adaptation des solutions existantes soient financés avec l'aide des fonds publics de développement, dans un contexte international d'implantation à grande échelle. L'Internet à haut débit est porteur d'applications dont l'usage permettrait une avancée dans le développement : la télémédecine et la formation à distance. Au Sénégal, plusieurs projets de télémédecine ont d'ailleurs été initiés notamment avec des expériences d'opérations chirurgicales suivies à distance par de grands chirurgiens européens, ou encore le programme d'équipement de médecins de village en valises médicales bourrées de technologie qui permettront de transmettre, via les satellites, des échographies.

7. Contribution de la télémédecine

7.1 Santé-Partenaires : un réseau d'experts radiologues au service de l'Afrique

L'association Santé-Partenaires a été créée à Marseille en février 2002 afin de développer un projet de téléexpertise radiologique avec les pays d'Afrique francophone. A l'initiative de ce projet se trouve un groupe d'une quinzaine de spécialistes en imagerie radiologique de Marseille, Lyon ou Paris qui ont développé ce réseau de façon entièrement bénévole.

Grâce au logiciel gratuit Dicomworks, développé par les Drs Boussel et Puech (membres de l'association), les images radiologiques sont transmises vers le serveur de Santé-Partenaires à Marseille, puis si nécessaire vers un des experts du réseau. Dicomworks a été spécialement adapté