

Jean-François  
Susbielle

# Internet multimédia et temps réel

Réseaux haut débit - terminaux fixes et mobiles  
routage et QoS - voix et audio/vidéo sur IP

- ▶ Réseaux : WDM, Sonet, Frame Relay, VPN, Ethernet, ATM
- ▶ Accès : ADSL, câble, GPRS, UMTS, LMDS, Bluetooth, satellites
- ▶ Terminaux : mobiles, PDA, WebPhones, WebTV, compression
- ▶ Routage et QoS : MPLS, DiffServ, RTP, RSVP, WFQ, IPv6
- ▶ Convergence : WAP, SS7, H.323, SIP, Megaco, T.120
- ▶ Applications : voix et fax sur IP, CTI, centres d'appels Web
- ▶ Streaming media : RealAudio, MP3, radios et TV interactives

# Table des matières

<b>AVANT-PROPOS</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 : À LA CONQUÊTE DU TEMPS RÉEL</b> .....	<b>1</b>
<b>1. On a parlé sur l'Internet</b> .....	<b>1</b>
1.1. Du courrier au multimédia .....	2
Historique .....	2
Applications : les trois âges de l'Internet .....	12
L'informatique centrée sur le réseau .....	19
Les chiffres de l'Internet .....	21
1.2. L'histoire du temps réel .....	21
Le temps des pionniers : 1974 – 1995 .....	22
Les logiciels PC-to-PC : 1995 – 1996 .....	24
Le temps des passerelles : 1997 – 1999 .....	36
Et maintenant ? câble, sans fil, terminaux et applications intégrées .....	41
<b>2. Le Protocole Internet</b> .....	<b>42</b>
2.1. Paquets contre circuits .....	42
La philosophie de l'Internet .....	42
La commutation de paquets .....	45
La commutation de circuits .....	50
Le routage dans l'Internet .....	52
2.2. Protocoles et adressage .....	55
IP version 4 .....	55
IP version 6 .....	59
UDP plutôt que TCP .....	63
L'adressage multicast .....	66
<b>3. Les défauts de la transmission IP</b> .....	<b>72</b>
Les principaux défauts .....	72
3.1. Les contraintes de temps : le délai et la gigue .....	74
La problématique du délai .....	74

L'analyse du délai .....	78
Réduire le délai .....	82
La gigue et la synchronisation .....	83
3.1 Les pertes de paquets.....	89
La congestion des routeurs.....	90
TTL dépassé.....	90
Arrivée hors délai (drop-out) .....	91
<b>4. Les organismes de standardisation .....</b>	<b>91</b>
4.1. Contrôler les standards .....	92
Participer aux instances de régulation.....	93
L'interopérabilité.....	94
Les différentes structures .....	95
4.2. Les organismes officiels.....	95
IETF : la normalisation de l'Internet .....	96
L'ISO : International Organisation for Standardization .....	98
L'ITU : International Telecommunication Union.....	99
L'ETSI : European Telecommunications Standard Institute .....	99
L'IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers .....	101
L'ECMA : European Computer Manufacturers Association .....	101
4.3. Les consortiums.....	101
Signalisation, technologies.....	102
Interopérabilité .....	104
Mobiles.....	106
Le World Wide Web Consortium .....	106
<b>CHAPITRE 2 : RÉSEAUX ET ACCÈS .....</b>	<b>107</b>
IP par-dessus tout .....	107
Vers le « large bande ».....	108
La conquête du dernier kilomètre .....	109
Téléphonie IP sur le câble .....	110
Multimédia IP sur réseaux mobiles.....	112
<b>1. IP sur les réseaux optiques .....</b>	<b>114</b>
1.1. WDM : des ressources illimitées.....	114
Le multiplexage en longueur d'onde .....	115
Réseaux et marchés .....	116
WDM dans l'air.....	117
1.2. IP sur SONET/SDH.....	118
SONET .....	118
SDH : Synchronous Digital Hierarchy .....	119
IP over SONET .....	120
1.3. IP to light : IP sur WDM .....	121
1.4. La commutation optique.....	122
<b>2. Les réseaux WAN et LAN .....</b>	<b>123</b>
2.1. L'ATM .....	124
Un réseau unificateur .....	124
La commutation de cellules .....	125
Architecture ATM.....	127
Les classes de services .....	127
L'avenir d'ATM : mode natif ou service de transport ?.....	129
2.2. Le Relais de Trames : Frame Relay .....	131

Origines et description.....	131
Fonctionnement.....	131
Le contrat de bande passante.....	133
Voice over FR.....	133
2.3. VPN : Virtual Private Network.....	134
Le Tunneling : principe.....	135
Accès et réseaux.....	135
Les protocoles des VPN.....	136
2.4. Les réseaux Ethernet.....	137
Description.....	137
Le Gigabit Ethernet : 1000BaseT.....	138
L'Ethernet commuté.....	139
QoS sur réseau locaux.....	139
2.5. Les nouvelles générations de routeurs.....	140
Augmentation du trafic externe.....	140
Routeurs Terabits et Switches rapides L3.....	140
<b>3. Les boucles d'accès filaires.....</b>	<b>142</b>
Les trois types d'accès.....	142
3.1. Fil de cuivre bande étroite : modem et RNIS.....	143
Le modem téléphonique.....	143
Le RNIS.....	146
3.2. ADSL : le fil de cuivre large bande.....	147
La technologie xDSL : Digital Subscriber Line.....	147
Débits et technologies.....	149
Adaptation du réseau à xDSL.....	151
Le marché du xDSL.....	152
G.Lite ADSL : interopérabilité et simplicité.....	152
3.3. Le câble.....	154
Architecture.....	154
Le standard PacketCable/DOCSIS : IP sur le câble.....	156
Le marché du modem câble.....	160
Modem câble ou xDSL ?.....	162
3.4. IP sur le réseau électrique.....	162
Digital PowerLine.....	163
Marchés, avantages.....	164
Réseau local sur le circuit électrique.....	164
<b>4. Les accès sans fil.....</b>	<b>164</b>
4.1. Le sans fil fixe : la boucle locale radio.....	165
LMDS : Local Multipoint Distribution Service.....	166
DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications).....	168
PHS : Personal Handyphone System.....	168
Bluetooth : le sans fil de proximité.....	168
Ethernet sans fil : IEEE 802.11.....	169
4.2. Le sans fil mobile : du GSM à l'UMTS.....	170
Les générations de téléphonie mobile.....	170
HSCSD, GPRS, EDGE : évolutions vers la génération 3.....	173
Entreprise : le mariage GSM et VoIP.....	174
UMTS : Universal Mobile Telecommunications System.....	175
4.3. Les satellites.....	177
Le satellite géostationnaire.....	177

Le satellite en orbite basse .....	178
Les satellites de téléphonie .....	181
Les satellites de diffusion de données multimédias .....	181
4.4. Les émetteurs stratosphériques.....	183
Sky Station .....	183
Skynet.....	185
Comparaison Satellite LEO – Ballon stratosphérique .....	185
<b>5. Les bus numériques.....</b>	<b>186</b>
5.1. IEEE 1394 .....	186
IEEE 1394 et le connecteur FireWire .....	186
Vitesses .....	186
Nombre de nœuds .....	187
Adressage .....	187
IP over 1394.....	188
5.2. USB : Universal Serial Bus.....	188
Description .....	188
Comparaison 1394 et USB.....	188
<b>CHAPITRE 3 : TERMINAUX ET GATEWAYS.....</b>	<b>189</b>
<b>1. La gateway RTC/IP.....</b>	<b>190</b>
1.1. Introduction .....	190
Les différents types de gateways .....	192
Les fonctions .....	192
Deux utilisations principales.....	192
1.2. Structure fonctionnelle .....	195
Les éléments fonctionnels.....	195
Signalisation : SS7, H.323, SIP.....	197
Écho, bruit de confort, et fax.....	199
Fonctions de gestion, applications .....	200
1.3. Performances .....	200
Le débit de sortie.....	201
Délais et pertes de paquets .....	201
Compression d'en-têtes.....	203
Les générations de gateways.....	203
1.4. Construction .....	204
Gateways d'entreprises : intégrées aux PABX, aux routeurs, ou séparées ?.....	205
Structure d'une gateway.....	207
Système d'exploitation.....	210
1.5. Offres et marchés.....	212
Le marché des gateways .....	212
Les spécifications techniques d'une gateway .....	212
Segmentation de l'offre.....	213
<b>2. Le terminal multimédia IP .....</b>	<b>214</b>
2.1. Formes et technologies .....	214
Changement d'époque.....	215
Classement des terminaux.....	216
Les systèmes d'exploitation pour terminaux multimédias .....	227
2.2. Structure du terminal de téléphonie IP .....	234
Le PC multimédia .....	234
Les gateways résidentielles.....	242

Le Web-Phone ou Screen-Phone .....	245
L'IP-Phone .....	247
2.3. Les terminaux mobiles .....	248
Vers le Media Phone .....	249
WAP : Wireless Application Protocol .....	254
Formatage et stockage des données .....	259
<b>3. La compression du signal .....</b>	<b>260</b>
3.1. La compression audio .....	261
La numérisation .....	261
Les techniques de compression .....	264
Les différents codeurs .....	266
Compression des silences et bruit de confort .....	269
3.2. Choisir un codec audio .....	271
Le compromis taille/délai/débit .....	271
La qualité audio .....	274
Standardisation et brevets .....	277
Quelques directions pour les codecs audio de téléphonie .....	279
3.3. La compression vidéo .....	280
La qualité vidéo .....	280
La compression des images .....	282
Les standards de compression .....	283

## **CHAPITRE 4 : LA QUALITÉ DE SERVICE .....**

<b>1. Vers l'Internet multimédia .....</b>	<b>289</b>
1.1. Les conditions de la Qualité de Service .....	290
Quelques recettes simples .....	290
Les stratégies de QoS .....	291
La connexion entre sous-réseaux .....	292
1.2. Tableau des solutions .....	292
Stratégies « de bout en bout » et stratégies « réseau » .....	293
L'Internet multimédia est-il plus « intelligent » ? .....	294
<b>2. RTP, le Real-time Transport Protocol .....</b>	<b>296</b>
Le développement du protocole RTP .....	296
2.1. Les grandes fonctions de RTP .....	297
Faciliter la transmission temps réel .....	297
Ce que RTP ne fait pas .....	298
2.2. Description du protocole RTP .....	300
Principes fondamentaux et lexique .....	300
Structure des champs fixes de l'en-tête RTP .....	304
Extension de l'en-tête RTP .....	307
2.3. RTCP, protocole de contrôle de RTP .....	308
Les principes de base .....	308
Le format des paquets RTCP .....	309
La fréquence de transmission des paquets RTCP, la « reconsidération » .....	309
2.4. RTCP : rapports de réception (SR, RR) .....	311
Description .....	311
Le rapport émetteur : SR (Sender's Report) .....	312
Le rapport récepteur : RR .....	314
Extension des rapports émetteur (SR) et récepteur (RR) .....	315

Analyse des rapports émetteur et récepteur .....	315
2.5. RTCP : description de la source SDES .....	315
Structure générale d'un paquet SDES.....	315
Le nom permanent : CNAME (Canonical Name) de SDES.....	316
Le nom d'utilisateur : NAME .....	317
Adresse e-mail : EMAIL.....	317
Numéro de téléphone : PHONE.....	318
Localisation géographique de l'usager : LOC .....	318
Nom d'application ou d'outil : TOOL .....	318
Extension privée : PRIV .....	318
Note spéciale : NOTE .....	319
2.6. RTCP : paquets « BYE » et « APP » .....	319
Le paquet « au revoir » : BYE .....	319
Le paquet spécifique d'une application : APP .....	320
2.7. L'avenir de RTP .....	320
<b>3. Les stratégies de « bout en bout » .....</b>	<b>321</b>
3.1. Restaurer le signal .....	321
Synchronisation.....	321
Boucher les trous.....	322
3.2. FEC, redondance et adaptation.....	323
La redondance FEC en flux séparé .....	323
La redondance FEC dans les paquets de contenu .....	324
Efficacité et limites .....	326
Les stratégies adaptatives.....	328
3.3. La compression d'en-tête .....	329
La pile d'en-têtes temps réel .....	329
Principe : éliminer la redondance.....	331
Fonctionnement.....	332
En-tête compressé .....	332
<b>4. RSVP : la réservation de ressources .....</b>	<b>333</b>
4.1. Présentation .....	334
Historique .....	334
Principe .....	336
RSVP est-il un protocole de type télécoms ?.....	337
Les limitations de RSVP .....	338
Les transitions entre réseaux .....	340
4.2. Fonctionnement .....	340
Architecture.....	340
Les types réservations .....	342
Composer une requête RSVP.....	343
La question du routage .....	343
Agrégation.....	345
4.3. Structure des messages .....	345
Catégories de messages.....	345
En-têtes RSVP.....	346
Contenu des messages RSVP.....	347
<b>5. Classes de Services et files d'attente .....</b>	<b>348</b>
5.1. Les services différenciés .....	349
La philosophie DiffServ.....	349
Fonctionnement.....	349
Les Classes de services .....	352

Correspondance des CoS entre elles .....	353
Gestion de la bande passante .....	353
5.2. Champs de classes de services, CoS.....	353
Octet TOS de l'en-tête IPv4.....	354
Indice de priorité d'IPv6.....	355
IEEE 802.1p : indice de priorité sur réseau local.....	356
5.3. La gestion des files d'attente .....	358
Les files d'attente .....	358
Interface de sortie .....	364
Taille des buffers de file d'attente.....	364
Le rejet sélectif de paquets .....	365
<b>6. Du routage à la commutation.....</b>	<b>368</b>
6.1. Rationaliser le routage .....	368
Les redondances de routage .....	369
Les traitements.....	370
Un routage basé sur la QoS .....	370
QOSPF : Quality Of Service Path First, le routage QoS.....	371
NHRP : Next Hop Resolution Protocol.....	372
BGP : routage entre sous-domaines .....	372
Agrégation .....	373
6.2. Commutation de labels et tags.....	373
Commutation IP sur la couche 2 (ATM).....	374
Le Tag Switching de Cisco .....	375
MPLS : Multi-Protocol Label Switching .....	376
6.3. La gestion globale du trafic .....	382
NetFlow de Cisco .....	382
Contrôle de trafic, Packet Shaping.....	383

## **CHAPITRE 5 : LA SIGNALISATION..... 385**

<b>1. Protocoles de signalisation.....</b>	<b>385</b>
1.1. Historique.....	385
Vers un standard commun .....	386
Que fait l'IETF ? .....	387
H.323 : la longue marche vers l'interopérabilité.....	389
MGCP : le contrôle des gateways .....	392
JAIN : Java in Advanced Intelligent Network .....	393
1.2. Quels protocoles pour la téléphonie IP ? .....	394
Tous les protocoles de signalisation.....	394
Comparaisons .....	395
<b>2. SS7 : réseaux intelligents .....</b>	<b>398</b>
2.1. Présentation.....	398
Le CTI à grande échelle .....	398
L'architecture de réseaux intelligents IN, Intelligent Networks .....	399
2.2. Structure d'un réseau SS7.....	400
Les couches de référence.....	401
La signalisation ISUP .....	402
Exemples de services réalisés avec SS7.....	403
<b>3. H.323 de l'ITU.....</b>	<b>404</b>
3.1. Présentation.....	404



Historique .....	404
Fonctionnalités .....	406
Interopérabilité entre réseaux .....	408
Protocoles de transport .....	409
3.2. La zone H.323 .....	410
Le terminal .....	410
La gateway .....	412
Le gatekeeper .....	413
Le MCU : l'Unité de Contrôle Multipoint (Multipoint Control Unit).....	416
T.120, le contrôle de conférence .....	419
H.323 Version 2 : première évolution.....	421
H.323 Version 3 (mai 1999) .....	422
3.3. Les limitations de H.323 .....	425
La traversée des firewalls.....	425
Temps d'établissement de l'appel.....	426
Signalisation DTMF et tonalités .....	427
Interopérabilité .....	427
Authentification, facturation .....	427
<b>4. SIP : Session Initiation Protocol.....</b>	<b>427</b>
4.1. Présentation .....	428
Éléments de base .....	428
Mobilité personnelle .....	430
Transport .....	431
Intégration aux autres protocoles de l'Internet .....	432
L'adressage SIP.....	432
4.2. Les messages SIP .....	434
Les requêtes.....	435
Les réponses .....	440
Confidentialité.....	445
SDP : Session Description Protocol.....	446
Exemple d'utilisation de SIP.....	447
4.3. Comparaison entre H.323 et SIP .....	449
<b>5. MGCP-MEGACO : Media Gateway Control .....</b>	<b>452</b>
5.1. Présentation .....	453
Historique .....	453
La genèse de MGCP.....	454
Les avantages de MGCP .....	455
Architecture.....	456
5.2. Les commandes MGCP .....	459
Description .....	459
Codes de réponses et d'erreurs.....	466
Adresses .....	467
5.3. MGCP face à H.323 et SIP.....	468
Comparaison entre MGCP et H.323 .....	468
Interface MGCP/H.323 .....	474
Interface MGCP/SIP .....	477
MEGACO, le protocole de l'IETF.....	479

## **CHAPITRE 6 : APPLICATIONS TEMPS RÉEL .....**

483

### **1. La convergence.....**

484

Les scénarios de la convergence .....	484
Convergence des technologies .....	485
1.1. Les avantages économiques.....	487
Utilisation rationnelle de la bande passante .....	487
Investissements, maintenance .....	488
1.2. Avantages structurels.....	490
IP over everything : intégration des réseaux .....	490
Architecture distribuée .....	491
« Voice is data » .....	492
« Everything over IP » : intégration des applications ?.....	492
Un terminal intelligent.....	495
Supériorité du codage.....	496
Quelques défauts structurels d'IP.....	497
Conclusions : quelle convergence ? .....	498
1.3. Les constructeurs et la convergence .....	499
Le nouveau paysage voix-données.....	499
Les regroupements de compétences .....	500
La guerre Lucent-Cisco .....	503
<b>2. Téléphonie longue distance .....</b>	<b>504</b>
Historique de la téléphonie.....	505
2.1. Les marchés et applications .....	506
Un marché de première ligne ?.....	506
Quelle clientèle pour la téléphonie sur IP ?.....	508
Les services Phone-to-Phone sont-ils encore concurrentiels ? .....	511
Le toll bypass : la connexion PABX-to-PABX.....	516
2.2. Opérateurs Phone-to-Phone .....	518
Les catégories d'opérateurs VoIP.....	518
La gestion des compensations : clearinghouse.....	522
Grossistes, bourse aux minutes, roaming .....	525
La structure de coûts des opérateurs de téléphonie IP .....	526
Le plan de numérotation.....	528
Réguler la téléphonie IP ? .....	530
Localisation des gateways .....	534
2.3. La téléphonie IP de bout en bout .....	535
Des connexions permanentes .....	536
Les messageries instantanées : la téléphonie IP intelligente.....	537
Les principales messageries instantanées.....	543
Les services à valeur ajoutée .....	547
Les communautés en réalité virtuelle.....	550
La confidentialité des communications.....	552
<b>3. Le fax sur IP .....</b>	<b>553</b>
3.1. Avantages économiques .....	554
Introduction .....	554
Les chiffres du fax .....	557
Pourquoi le fax reste-t-il populaire ?.....	558
Quel est l'avenir du fax ? .....	560
Les marchés du fax sur IP .....	562
3.2. Le fonctionnement temps réel T.38.....	563
La transmission entre le fax G3 et la gateway : le protocole T.30.....	563
La transmission entre gateways.....	564

3.3. Le mode « Store and Forward » T.37.....	568
Numérotation.....	568
Transport du fax sur IP.....	569
Le destinataire.....	569
L'accusé de réception.....	570
<b>4. Entreprise : VoIP contre CTI .....</b>	<b>571</b>
4.1. Le CTI .....	571
La lente conquête de la téléphonie.....	572
L'arrivée du CTI .....	575
4.2. VoIP : voix sur le réseau de données .....	580
Le softswitch ou IP-BX.....	581
Des applications natives.....	583
L'arbitrage avantages-risques .....	585
4.3. TAPI 3.0 et les API de téléphonie .....	588
Les différentes interfaces .....	589
TAPI 3.0.....	590
Fonctionnalités de TAPI 3.0 .....	592
Utiliser les objets TAPI.....	592
H.323 TSP.....	594
Conférences IP multicast .....	595
TAPI 3.0 et la Qualité de Service .....	598
Exemple de syntaxe : TAPI 3.0 .....	599
<b>5. La téléphonie et le Web.....</b>	<b>600</b>
5.1. Architecture .....	602
Une seule ligne sans VoIP .....	602
VoIP sur la boucle locale .....	604
Gateway dans le centre d'appels, PC-to-Phone .....	606
VoIP de bout en bout .....	608
Deux lignes séparées.....	610
5.2. Le centre d'appels sur le Web .....	611
Qu'est-ce qu'un centre d'appels ?.....	611
Structure d'un centre d'appels .....	613
Le marché du Call Center .....	615
Web et commerce électronique.....	616
Intégrer la téléphonie au site Web.....	617
Un vendeur sur le Web.....	619
L'agent virtuel.....	620
<b>CHAPITRE 7 : MÉDIAS EN FLUX CONTINUS STREAMING MEDIAS.....</b>	<b>621</b>
<b>1. Fonctionnement.....</b>	<b>621</b>
1.1. Architecture .....	622
Les différents éléments .....	622
Temps réel.....	624
Avec ou sans logiciel serveur ?.....	625
Le transport .....	627
1.2. Gérer les congestions.....	630
Les contraintes .....	630
Buffer de débit.....	631
Protéger les flux TCP.....	634
1.3. Marchés .....	636

Le multimédia IP à la demande .....	637
Nouveaux métiers .....	638
La concurrence du MIDI .....	640
L'interactivité grand public .....	641
L'ubiquité : les Web Cams .....	642
<b>2. La distribution de musique .....</b>	<b>643</b>
2.1. MP3 : MPEG Layer 3 .....	645
Un nouveau modèle économique .....	645
Fonctionnement de MP3 .....	648
MPEG-2 AAC : Advanced Audio Coding .....	651
MPEG-4 .....	651
Quel avenir pour MP3 ? .....	652
Concurrents .....	654
2.2. SDMI : Secure Digital Music Initiative .....	657
Urgence .....	657
SDMI : le respect des droits d'auteurs .....	659
Les principes de fonctionnement de SDMI .....	661
Quel avenir pour SDMI ? .....	664
<b>3. Les logiciels de diffusion .....</b>	<b>664</b>
3.1. Real Networks .....	664
Présentation .....	667
Les technologies .....	668
Les marchés .....	671
3.2. Windows Media .....	671
Présentation .....	671
Gestionnaire de droits : Windows Media Rights Manager .....	673
Adaptation du débit : Intelligent Streaming .....	675
Les différents codecs .....	676
L'encodage Windows Media Services .....	677
<b>4. Protocoles et langages .....</b>	<b>678</b>
4.1. SMIL : la synchronisation multimédia .....	678
Présentation .....	678
Architecture .....	680
<b>5. RTSP : le Real-time Streaming Protocol .....</b>	<b>682</b>
Présentation .....	682
Fonctionnalités .....	684
Les messages RTSP .....	686
Les requêtes .....	688
Les réponses .....	691
<b>ANNEXE : POUR EN SAVOIR PLUS .....</b>	<b>695</b>
<b>GLOSSAIRE .....</b>	<b>705</b>
<b>INDEX .....</b>	<b>713</b>