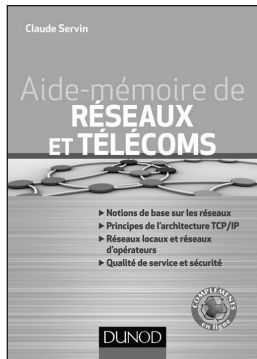


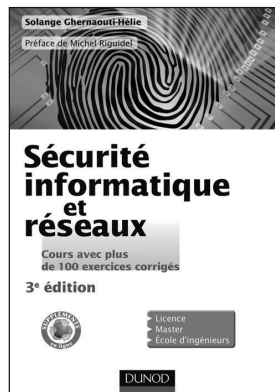
Réseaux Télécoms ^{et}

Consultez nos parutions sur dunod.com



Aide-mémoire de Réseaux et Télécoms
 Claude Servin
 416 pages
 Dunod, 2012

Sécurité informatique et réseaux
 3^e édition
 Solange Ghernaouti-Hélie
 368 pages
 Dunod, 2011



Réseaux et Télécoms

Claude Servin

Ancien responsable Réseaux et Télécoms
au sein du ministère de la Défense
et chargé de cours au Cnam de Paris

Préface de

Jean-Pierre Arnaud

Professeur au Cnam, titulaire de la chaire de Réseaux

4^e édition

DUNOD

Toutes les marques citées dans cet ouvrage sont des marques déposées par leurs propriétaires respectifs.

Maquette de couverture :
Barbary & Courte

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique

s'est généralisée dans les établissements



d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

© Dunod, Paris, 2003, 2006, 2009, 2013
ISBN 978-2-10-059258-6

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Préface

Le domaine des Télécommunications et des Réseaux est en pleine effervescence, chaque semaine qui s'écoule apporte sa moisson de nouvelles offres, d'annonces et de propositions de norme. Confronté à ce flux incessant de nouveautés, le praticien doit faire des choix qui s'avéreront stratégiques pour l'entreprise et structurants pour l'avenir de son système d'information. C'est dire l'importance de disposer de bases solides, seules aptes à évaluer sagement la pertinence des solutions proposées par les constructeurs de matériels et les éditeurs de logiciels. Encore faut-il s'entendre sur la constitution de cette base : il ne s'agit pas d'amasser des connaissances plus ou moins vagues ou plus ou moins utiles, mais de construire un socle sur lequel pourra s'appuyer une réflexion personnelle.

Dans la conjoncture actuelle, il n'est guère de tâche plus utile que de transmettre ces connaissances et d'enseigner les méthodes qui permettent d'en tirer profit. L'évolution technologique imposait une nouvelle édition des ouvrages de Claude Servin. Pour distinguer ce qui, dans cette multitude d'évolutions, est suffisamment assuré pour mériter d'être enseigné, il fallait la pratique du terrain d'un homme de réseaux. Il fallait aussi allier à cette expérience de l'ingénieur qui crée des projets celle de l'enseignant qui transmet les savoirs nécessaires à cette création.

Claude Servin possède assurément l'une et l'autre et c'est ce qui donne à son ouvrage un intérêt tout particulier. Ses lecteurs apprécieront une présentation simple des concepts les plus fondamentaux, débarrassés de tout hermétisme et orientés vers l'action et l'ingénierie, sans céder aux modes passagères ou aux complexités inutiles qui encombrant bien des manuels.

Ce sont ces qualités qui lui ont permis de s'inscrire avec réussite dans les enseignements dispensés au Conservatoire national des Arts et Métiers (Cnam) et de jouer le rôle de pivot vers des enseignements plus spécialisés.

Déjà inséré dans le monde du travail, le public du Cnam est exigeant, il vient y chercher une mise en perspective et une rigueur sans faille. Il ne saurait se satisfaire de l'autorité d'un enseignant qui ne pourrait faire preuve de sa capacité à maîtriser les enjeux technologiques actuels. Claude Servin a su les convaincre et, comme les auditeurs qui se pressent nombreux à ses cours et y trouvent l'impulsion pour un approfondissement ultérieur, je suis certain que le lecteur trouvera à la lecture de cet ouvrage un intérêt soutenu et qu'il sera son compagnon pendant

encore de longues années. Les manuels d'enseignement auxquels on continue de se référer une fois entré dans la vie active ne sont pas si nombreux : ayant personnellement l'expérience de la direction de sociétés dans le domaine des réseaux, je ne saurais faire à cet ouvrage un meilleur compliment que de dire qu'il fait partie de ceux-là.

Jean-Pierre ARNAUD
Professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers
Titulaire de la chaire de Réseaux

Table des matières

PRÉFACE	V
AVANT-PROPOS	XIX
PARTIE I • CONCEPTS FONDAMENTAUX	1
CHAPITRE 1 • L'INFORMATION ET SA REPRÉSENTATION	3
1.1 Généralités	3
1.1.1 Les flux d'information	3
1.1.2 Caractéristiques des réseaux de transmission	3
1.2 La représentation de l'information	5
1.2.1 Les différents types d'information	5
1.2.2 Le codage des informations	6
1.2.3 La numérisation des informations	11
1.3 La compression de données	20
1.3.1 Généralités	20
1.3.2 La quantification de la compression	21
1.3.3 La compression sans perte	21
1.3.4 Les codages à réduction de bande	22
1.4 Conclusion	34
CHAPITRE 2 • LES SUPPORTS DE TRANSMISSION	37
2.1 Généralités	37
2.2 Caractéristiques des supports de transmission	38
2.2.1 La bande passante et le système de transmission	38
2.2.2 L'impédance caractéristique	41
2.2.3 Le coefficient de vélocité	43

2.3	Les supports guidés	44
2.3.1	La paire torsadée	44
2.3.2	Le câble coaxial	49
2.3.3	La fibre optique	50
2.4	Les supports non guidés	55
2.4.1	Principe des liaisons hertziennes	55
2.4.2	Les faisceaux hertziens	60
2.4.3	Les liaisons satellitaires	61
2.5	Conclusion	63
CHAPITRE 3 • ÉLÉMENTS DE BASE DE LA TRANSMISSION DE DONNÉES		65
3.1	Introduction	65
3.2	L'organisation fonctionnelle et physique des échanges	66
3.2.1	L'organisation des échanges	66
3.2.2	L'organisation physique	66
3.3	Le mode d'adaptation au support	74
3.3.1	Généralités	74
3.3.2	La transmission en bande de base	75
3.3.3	La transmission en large bande	86
3.3.4	Les liaisons <i>full duplex</i>	92
3.3.5	Les dispositifs complémentaires	93
3.3.6	Exemples de modem	96
3.3.7	Principaux avis du CCITT	98
3.3.8	Comparaison transmission bande de base et large bande	100
3.4	La jonction DTE/DCE ou interface	100
3.4.1	Nécessité de définir une interface standard	100
3.4.2	Les principales interfaces	101
3.5	Conclusion	110
CHAPITRE 4 • NOTIONS DE PROTOCOLES		111
4.1	Généralités	111
4.2	Les types de liaisons et leur contrôle	112
4.2.1	La liaison point à point	112
4.2.2	Les liaisons multipoints	112
4.3	Les fonctions élémentaires	114
4.3.1	La délimitation des données	114
4.3.2	Le contrôle d'intégrité	116
4.3.3	Le contrôle de l'échange	125
4.3.4	Le contrôle de flux	134
4.4	La signalisation	137
4.4.1	Définition	137
4.4.2	La signalisation dans la bande	137
4.4.3	La signalisation hors bande	138

4.5	Étude détaillée du protocole HDLC	139
4.5.1	Généralités	139
4.5.2	La structure de la trame HDLC	140
4.5.3	Fonctionnement détaillé d'HDLC	142
4.5.4	Les différentes versions du protocole HDLC	146
4.5.5	HDLC et les environnements multiprotocoles	147
4.6	Conclusion	148
CHAPITRE 5 • MUTUALISATION DES RESSOURCES		149
5.1	Introduction	149
5.2	La quantification de trafic	149
5.2.1	Généralités	149
5.2.2	L'intensité de trafic et le taux d'activité	149
5.3	Les concentrateurs	153
5.3.1	Principe	153
5.4	Les multiplexeurs	154
5.4.1	Principe	154
5.4.2	Le multiplexage spatial	154
5.4.3	Le multiplexage temporel	157
5.4.4	Comparaison multiplexeur/concentrateur	162
5.5	Le multiplexage et l'accès à l'interface radio	162
5.5.1	Principe	162
5.5.2	Les techniques d'accès multiple	163
5.6	Le concept de réseau à commutation	167
5.6.1	Définitions	167
5.6.2	La classification des réseaux	167
5.6.3	La topologie physique des réseaux	170
5.6.4	Les réseaux à commutation	172
5.7	Conclusion	177
CHAPITRE 6 • LES RÉSEAUX À COMMUTATION DE PAQUETS		179
6.1	Généralités	179
6.2	Les performances de la commutation de paquets	179
6.3	Du mode datagramme au mode connecté	181
6.3.1	Principe	181
6.3.2	Les modes de mise en relation	183
6.4	Les notions d'adressage	185
6.4.1	Définition	185
6.4.2	L'adressage physique	185
6.5	La notion de nommage	189
6.5.1	Le nommage	189
6.5.2	La notion d'annuaire	190
6.6	L'acheminement dans le réseau	190
6.6.1	Définitions	190
6.6.2	Les protocoles de routage	191

6.7	Adaptation de la taille des unités de données	204
6.7.1	La notion de MTU	204
6.7.2	La segmentation et le réassemblage	204
6.8	La congestion dans les réseaux	206
6.8.1	Définition	206
6.8.2	Les mécanismes de prévention de la congestion	206
6.8.3	La résolution ou la guérison de la congestion	209
6.9	La voix dans les réseaux en mode paquet	209
6.9.1	Intérêt et contraintes	209
6.9.2	Le principe de la paquetsation de la voix	210
6.10	Conclusion	210
PARTIE II • LES ARCHITECTURES PROTOCOLAIRES		213
CHAPITRE 7 • LES ARCHITECTURES PROTOCOLAIRES		215
7.1	Introduction	215
7.2	Concepts de base	216
7.2.1	Principe d'une architecture en couches	216
7.2.2	Terminologie	217
7.3	L'organisation du modèle de référence	220
7.3.1	Concepts ayant conduit à la modélisation	220
7.3.2	Description succincte du modèle de référence	222
7.4	Conclusion	226
CHAPITRE 8 • INTRODUCTION À TCP/IP		227
8.1	Généralités	227
8.1.1	Origine	227
8.1.2	Principe architectural	228
8.1.3	Description générale de la pile et les applications TCP/IP	229
8.1.4	Les mécanismes de base de TCP/IP	230
8.1.5	Les instances de normalisation et de gestion	233
8.2	L'adressage dans le réseau logique	234
8.2.1	Principe de l'adressage IPv4	234
8.2.2	Les techniques d'adressage dans un réseau IP	235
8.3	Le routage dans le réseau IP	245
8.3.1	L'adressage d'interface	245
8.3.2	Le concept d'interface non numérotée	246
8.4	L'adressage dans IPv6 (RFC 4291)	246
8.4.1	Généralités	246
8.4.2	La notation IPv6	247
8.4.3	Les types d'adresse	248
8.4.4	Le plan d'adressage	248
8.4.5	Migration IPv4 vers IPv6	255
8.5	Conclusion	261

CHAPITRE 9 • TCP/IP ET LE NIVEAU LIAISON	263
9.1 Généralités	263
9.2 Les protocoles de liaison (point à point)	263
9.2.1 Généralités	263
9.2.2 SLIP (<i>Serial Line Internet Protocol</i> , RFC 1055)	264
9.2.3 PPP (<i>Point to Point Protocol</i>)	265
CHAPITRE 10 • TCP/IP ET LE NIVEAU RÉSEAU	277
10.1 Généralités	277
10.2 La structure du datagramme IP	277
10.3 Le contrôle de la fragmentation sous IP	281
10.4 D'IPv4 à IPv6	282
10.4.1 Les lacunes d'IPv4	282
10.4.2 Le datagramme IPv6	283
10.5 Les utilitaires de la couche réseau	287
10.5.1 Le protocole ICMP	287
10.5.2 La résolution d'adresse	291
10.5.3 Les utilitaires de configuration dans IPv4	294
10.5.4 L'autoconfiguration dans IPv6	297
10.6 IP et la mobilité	299
10.6.1 Généralités	299
10.6.2 Le principe de la mobilité sous IPv4	299
10.6.3 La mobilité dans IPv6 (RFC 3775)	304
10.6.4 Conclusion	305
10.7 L'encapsulation GRE	306
10.8 Conclusion	307
CHAPITRE 11 • TCP/IP ET LE NIVEAU TRANSPORT	309
11.1 Généralités	309
11.2 Les mécanismes de base de TCP	309
11.2.1 La notion de connexion de transport	309
11.2.2 Notion de multiplexage de connexion de transport	310
11.2.3 L'établissement de la connexion de transport	311
11.2.4 Le mécanisme contrôle de l'échange	313
11.3 TCP et les mécanismes associés	317
11.3.1 La structure du segment TCP	317
11.3.2 Le contrôle d'erreur	318
11.3.3 La « mémorisation » des données	319
11.4 Le contrôle de flux et de congestion	320
11.4.1 Définitions	320
11.4.2 Le contrôle de flux	321
11.4.3 Le contrôle de la congestion	322

11.5	Les options de TCP	327
11.5.1	La taille des segments	327
11.5.2	L'option d'estampille horaire	328
11.5.3	Le TCP et les réseaux à haut débit	329
11.6	Le mode datagramme (UDP)	330
11.6.1	UDP dans IPv4	330
11.6.2	UDP dans IPv6	330
11.6.3	UDP-Lite (RFC 3828)	331
11.7	Conclusion	331
CHAPITRE 12 • TCP/IP ET LES APPLICATIONS		333
12.1	Introduction	333
12.2	Notions d'annuaire	333
12.2.1	Généralités	333
12.2.2	Le service de noms (DNS)	333
12.2.3	La généralisation de la notion d'annuaire	342
12.3	Le transfert de fichiers	345
12.3.1	TFTP (<i>Trivial File Transfer Protocol</i> , RFC 1350)	346
12.3.2	FTP (<i>File Transfert Protocol</i> , RFC 959)	347
12.4	L'émulation de terminal (Telnet)	349
12.4.1	Principe de Telnet	349
12.4.2	Les commandes et les modes de fonctionnement	349
12.5	Les notions de middleware	351
12.5.1	Définitions	351
12.5.2	Les exemples d'outils <i>middleware</i> dans TCP/IP	352
12.5.3	Internet et le <i>middleware</i>	354
12.6	La messagerie électronique	356
12.6.1	Introduction	356
12.6.2	Architecture du système de messagerie	357
12.6.3	La diffusion des messages	358
12.6.4	Les protocoles de messagerie	358
12.7	Conclusion	358
PARTIE III • MISE EN ŒUVRE		359
CHAPITRE 13 • INTRODUCTION AUX RÉSEAUX DE TRANSPORT		363
13.1	Généralités	363
13.2	Le plan de transmission	364
13.2.1	Généralités	364
13.2.2	La synchronisation des réseaux	365
13.2.3	La hiérarchie plésiochrone (PDH)	369
13.2.4	La hiérarchie synchrone (SDH)	371
13.2.5	La transmission optique	374

13.3	Le plan de service	375
13.3.1	Généralités	375
13.3.2	Introduction aux protocoles réseaux	376
13.3.3	Les réseaux d'opérateurs	381
13.4	L'accès aux réseaux, la boucle locale	383
13.4.1	Définition	383
13.4.2	Organisation de la distribution des accès	383
13.4.3	L'accès aux réseaux par liaison dédiée (ligne spécialisée)	384
13.4.4	La Boucle locale radio (BLR)	388
13.4.5	Les accès haut débit	389
13.4.6	Les courants porteurs	396
13.4.7	Les accès Ethernet	397
13.5	Conclusion	398
CHAPITRE 14 • LES PROTOCOLES DE CŒUR DE RÉSEAU		399
14.1	Le protocole X.25	399
14.1.1	Généralités	399
14.1.2	Le niveau X.25-1	400
14.1.3	Le niveau X.25-2	400
14.1.4	Le niveau X.25-3	400
14.2	Le relais de trames ou Frame relay	406
14.2.1	Généralités	406
14.2.2	Le format de l'unité de données	407
14.2.3	Les mécanismes élémentaires	408
14.3	L'ATM (<i>Asynchronous Transfer Mode</i>)	416
14.3.1	Généralités	416
14.3.2	La taille des unités de données ou cellules	417
14.3.3	Les mécanismes de base et le format de la cellule ATM	418
14.3.4	Les différentes couches du modèle	421
14.3.5	La qualité de service dans l'ATM	425
14.3.6	Le contrôle de flux et de congestion	427
14.4	Conclusion	428
CHAPITRE 15 • MPLS, <i>MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING</i>		431
15.1	Généralités	431
15.2	Du routage IP à la commutation IP	431
15.3	Le réseau MPLS	432
15.3.1	Le commutateur MPLS	432
15.3.2	Le principe de base d'un réseau MPLS	433
15.3.3	Les mécanismes particuliers	434
15.4	MPLS et les infrastructures existantes	436
15.4.1	Généralités	436
15.4.2	La gestion du TTL	437
15.4.3	MPLS et ATM	438

15.5	La construction des routes dans un réseau MPLS	439
15.5.1	Généralités	439
15.5.2	Le protocole LDP (RFC 3036)	440
15.6	MPLS et ingénierie de trafic (MPLS-TE)	442
15.7	Les VPN MPLS	443
15.7.1	Notions de base sur les VPN	443
15.7.2	Principe général des VPN MPLS	444
15.7.3	Topologie des VPN	447
15.8	G-MPLS (RFC 3945)	448
15.9	MPLS et IPv6 (6PE)	449
15.10	Conclusion	449
CHAPITRE 16 • LES RÉSEAUX LOCAUX ET MÉTROPOLITAINS		451
16.1	Introduction	451
16.1.1	Définition	451
16.1.2	Distinction entre réseau local et informatique traditionnelle	451
16.1.3	Principe général du partage de ressource	453
16.1.4	Les constituants d'un réseau local	454
16.1.5	Les réseaux locaux et la normalisation	456
16.2	Étude succincte des différentes couches	457
16.2.1	La couche physique	457
16.2.2	La sous-couche MAC	463
16.2.3	La couche liaison (LLC)	468
16.3	Aperçu des principales implémentations	472
16.3.1	L'anneau à jeton, IEEE 802.5	472
16.3.2	Le jeton adressé ou Token Bus, IEEE 802.4	473
16.3.3	Le réseau 100 VG AnyLAN, 802.12	474
16.4	Les réseaux métropolitains	476
16.4.1	Généralités	476
16.4.2	FDDI (<i>Fiber Distributed Data Interface</i>)	476
16.4.3	DQDB (<i>Distributed Queue Dual Bus</i>)	477
16.4.4	Ethernet métropolitain	478
16.5	Conclusion	480
CHAPITRE 17 • LES LAN « ETHERNET PARTAGÉ »		483
17.1	Introduction	483
17.2	Les caractéristiques générales des réseaux Ethernet/802.3	483
17.2.1	Le principe du CSMA/CD	483
17.2.2	La fenêtre de collision	484
17.2.3	L'algorithme du BEB	486
17.2.4	Le silence inter-message (IFG, InterFrame Gap)	487
17.2.5	Description des trames Ethernet/IEEE 802.3	487
17.2.6	Les erreurs	487

17.3	Les différentes versions d'Ethernet	488
17.3.1	Présentation	488
17.3.2	L'Ethernet épais, IEEE 802.3 10Base5	490
17.3.3	L'Ethernet fin, IEEE 802.3 10Base2	490
17.3.4	L'Ethernet sur paires torsadées, IEEE 802.3 10BaseT	491
17.3.5	L'Ethernet à 100 Mbit/s	493
17.3.6	Le Gigabit Ethernet	495
17.3.7	Le 10 Gigabit Ethernet	500
17.4	Conclusion	502
CHAPITRE 18 • ETHERNET COMMUTÉ ET LES VLAN		503
18.1	Ethernet commuté	503
18.1.1	Introduction	503
18.1.2	Principe de l'acheminement dans les commutateurs	505
18.1.3	Notion d'architecture des commutateurs	508
18.1.4	Contrôle de flux dans les commutateurs	509
18.1.5	Commutation et trafic multicast	510
18.1.6	Le STP (Spanning Tree Protocol) ou arbre recouvrant	512
18.2	Les réseaux virtuels ou VLAN (<i>Virtual Local Area Network</i>)	516
18.2.1	Principes généraux des VLAN	516
18.2.2	Les différents niveaux de VLAN	518
18.2.3	L'identification des VLAN (802.1Q)	519
18.2.4	Les VLAN dans les réseaux d'opérateurs	524
18.3	Conclusion	527
CHAPITRE 19 • LES RÉSEAUX SANS FIL		529
19.1	Introduction	529
19.1.1	Généralités	529
19.1.2	La problématique de l'accès aux réseaux sans fil	529
19.1.3	L'architecture générale des réseaux sans fil	532
19.1.4	Les réseaux 802.11	534
19.2	Les réseaux IEEE 802.15-1 (Bluetooth)	550
19.3	Conclusion	554
CHAPITRE 20 • INTERCONNEXION DES RÉSEAUX		555
20.1	généralités	555
20.1.1	Définition	555
20.1.2	Notions de conversion de service et de protocole	555
20.1.3	L'encapsulation ou <i>tunneling</i>	556
20.2	Les éléments d'interconnexion (relais)	560
20.2.1	Définitions	560
20.2.2	Les répéteurs	560
20.2.3	Les ponts	562
20.2.4	Les routeurs	565

20.3	Les techniques de routage	569
20.3.1	Généralités	569
20.3.2	Le routage vecteur-distance, RIP	570
20.3.3	Le routage à état des liens (OSPF)	573
20.3.4	Le routage inter-domaine	583
20.4	Le <i>multicast</i> et le routage <i>multicast</i>	584
20.4.1	Introduction au <i>multicast</i>	584
20.4.2	Rappel sur l'adressage <i>multicast</i>	585
20.4.3	Le multicast dans IPv4	587
20.4.4	Multicast IPv6	589
20.4.5	Internet et le <i>multicast</i>	590
20.5	Les passerelles applicatives	591
CHAPITRE 21 • NOTIONS DE QUALITÉ DE SERVICE		593
21.1	Notions de qualité de service	593
21.1.1	Généralités	593
21.2	Mise en œuvre de la QoS	594
21.2.1	Integrated Services	594
21.2.2	Differentiated Services	595
21.2.3	La QoS dans MPLS	598
21.2.4	InterServ/RSVP et DiffServ, lequel choisir ?	598
21.3	Notion de gestion des files d'attente dans les routeurs	598
21.4	Mise en œuvre dans les réseaux d'opérateur	601
21.5	Conclusion	602
CHAPITRE 22 • INTRODUCTION À LA TÉLÉPHONIE		605
22.1	Principes de base	605
22.1.1	Le réseau téléphonique	605
22.1.2	Principe d'un poste téléphonique	606
22.1.3	Principe du raccordement d'utilisateur	607
22.1.4	La mise en relation usager/usager	607
22.1.5	La numérotation	608
22.1.6	La signalisation	610
22.2	L'évolution de la téléphonie, le RNIS	611
22.2.1	De l'accès analogique à l'accès numérique	611
22.2.2	L'accès au réseau	611
22.2.3	La signalisation et le réseau RNIS	613
22.2.4	L'évolution du RNIS	613
22.3	Les autocommutateurs privés	614
22.3.1	Généralités	614
22.3.2	Architecture d'un PABX	614
22.3.3	Les services et applications vocales	615
22.4	L'installation d'abonné	619
22.4.1	Généralités	619
22.4.2	Définition de l'accès au réseau	620

22.5	Les réseaux privés de PABX	621
22.5.1	Principes généraux	621
22.5.2	La signalisation et type de liens	622
22.6	La téléphonie et la mobilité	624
22.6.1	Généralité	624
22.6.2	Le GSM	625
22.6.3	La donnée et la téléphonie mobile	628
22.6.4	De la 3G à la 4G	629
22.6.5	L'Internet mobile	632
22.7	Conclusion	632
CHAPITRE 23 • LA TÉLÉPHONIE SUR IP		633
23.1	Introduction à la ToIP	633
23.1.1	Généralités	633
23.1.2	ToIP ou VoIP ?	634
23.1.3	L'apport de la ToIP : la convergence	636
23.1.4	Une nouvelle application IP, la téléphonie	636
23.2	Du PABX à l'IPBX	637
23.2.1	Introduction	637
23.2.2	Principe de l'établissement d'appel	638
23.2.3	L'aspect protocolaire	639
23.2.4	La signalisation	642
23.3	ToIP, la mise en œuvre	657
23.3.1	L'approche Centrex privé	657
23.3.2	Problématique du Centrex privé	658
23.4	La qualité de service	663
23.4.1	Généralités	663
23.4.2	Appréciation de la qualité de la voix	664
23.4.3	Appréciation de l'interactivité de la communication	664
23.4.4	Les éléments de QoS	665
23.4.5	Mesure de la qualité de service	669
23.5	L'impact sur l'infrastructure réseau	670
23.5.1	Impact sur l'accès au WAN	670
23.5.2	Impact sur le LAN	671
23.6	Conclusion	673
CHAPITRE 24 • ADMINISTRATION DES RÉSEAUX - PRINCIPES GÉNÉRAUX		675
24.1	Généralités	675
24.1.1	Définition	675
24.1.2	Principe général	675
24.1.3	Structure d'un système d'administration	676
24.2	L'administration vue par l'ISO	676
24.2.1	Généralités	676
24.2.2	Les différents modèles	677

24.3	L'administration dans l'environnement TCP/IP	680
24.3.1	Principes généraux	680
24.3.2	Les MIB	681
24.3.3	Le protocole SNMP	683
24.4	SNMP et ISO	685
24.5	Les plates-formes d'administration	685
24.5.1	Les outils d'administration des couches basses	685
24.5.2	Les hyperviseurs	685
24.5.3	Les systèmes intégrés au système d'exploitation	686
24.6	Conclusion	686
CHAPITRE 25 • LA SÉCURITÉ DES SYSTÈMES D'INFORMATION		687
25.1	Généralités	687
25.2	La protection des données	688
25.2.1	Notions de cryptographie	688
25.3	La sécurisation des échanges	694
25.3.1	L'usurpation d'identité	694
25.3.2	Exemple d'infrastructure de sécurité, la PKI	694
25.3.3	La sécurité et le protocole de transmission	696
25.4	La protection du réseau	700
25.4.1	Les menaces	700
25.4.2	La protection de l'intranet	701
25.4.3	La protection des accès, les VPN	709
25.5	Exemple : sécurisation d'un système de ToIP	712
25.5.1	Les pertes de service	712
25.5.2	Protection du système	713
25.6	Conclusion	716
ANNEXES		717
A.	Normalisation	718
B.	Abaques d'Erlang	720
C.	Liste des abréviations et sigles utilisés	722
INDEX		731

Avant-propos

Aujourd'hui avec Internet et le concept de mobilité, l'accès à l'information est permanent, une ère nouvelle est née : celle de la communication. Cette révolution n'a été rendue possible que par une formidable évolution des technologies, des progrès réalisés dans le traitement du signal, dans le transport des données et surtout par multiplication des moyens d'accès. Cette mutation incessante du monde des télécommunications nécessite de la part de tous les acteurs du domaine de solides notions de base pour la comprendre, s'y adapter et non la subir.

C'est l'objectif de cet ouvrage que d'apporter à l'ingénieur, au technicien et à l'étudiant toutes les bases nécessaires à la maîtrise de ce vaste domaine que sont aujourd'hui les réseaux. Ainsi, à partir de l'information et de sa représentation en machine, *Réseaux et Télécoms* apporte à tous les connaissances indispensables à la compréhension, à la conception, à la mise en œuvre et la maintenance des réseaux.

Au seuil d'une nouvelle édition de nombreuses questions se posent : quelles sont les technologies devenues obsolètes, quelles sont celles qui vont demain dominer ? L'étude d'X.25, du Frame Relay... de toutes ces techniques vieillissantes doit-elle être abandonnée ? Le modèle ISO est-il encore d'actualité ? Même si ces différentes techniques sont obsolètes les principes sur lesquels elles reposent ont fondé les solutions actuelles qui en dérivent et déterminent celles à venir¹.

Intégralement revue, cette édition intègre les nouvelles technologies qui émergentes hier sont aujourd'hui réalité, c'est ainsi que les techniques de migration vers IPv6 font l'objet d'importants développements. Plus que par le passé, cette édition constitue une base de savoirs indispensables aux techniciens réseau et aux étudiants.

Conservant le même plan que les éditions précédentes, la première partie est consacrée à l'étude des **concepts fondamentaux** : la représentation des données, les techniques de base de la transmission de données avec le développement des techniques radios et la mutualisation des ressources qui trouve sa concrétisation dans le concept de réseau sont étudiées en détail.

La deuxième partie formalise ces concepts en décrivant le **principe des architectures protocolaires** de réseaux. Après un bref aperçu du modèle OSI, l'étude de TCP/IP, de son évolution et d'IPv6 y tiennent une place importante.

1. « *Quand vous délibérez, prenez dans le passé des exemples pour l'avenir : ce qui est déjà connu vous fera juger de ce que vous ne connaissez pas encore* » Isocrate, *Discours de la morale*, IV^e siècle avant Jésus Christ.

La troisième partie est consacrée à la **mise en œuvre des techniques** étudiées précédemment dans la réalisation de réseaux de transport d'information (réseaux longue distance) et de la diffusion de celle-ci (réseaux locaux). L'étude des protocoles X.25, Frame Relay a été maintenue mais réduite, une large place a été octroyée à MPLS et au concept de VPN. Les réseaux locaux avec ou sans fil, la commutation et les réseaux virtuels (VLAN) avec évidemment la migration des techniques Ethernet dans les réseaux métropolitains sont étudiés en détail. Enfin, les notions d'interconnexion et de qualité de service concluent cette partie.

La quatrième partie est dédiée à l'**étude des réseaux voix** et à celle de la convergence de la voix, de la donnée et des images qui trouve sa concrétisation dans la téléphonie sur IP.

Enfin, la cinquième partie conclut cet ouvrage par l'étude de l'**administration** des réseaux, de la **sécurité** des réseaux.

Partie I

Concepts fondamentaux

1	L'information et sa représentation	3
1.1	Généralités	3
1.2	La représentation de l'information	5
1.3	La compression de données	20
1.4	Conclusion	34
2	Les supports de transmission	37
2.1	Généralités	37
2.2	Caractéristiques des supports de transmission	38
2.3	Les supports guidés	44
2.4	Les supports non guidés	55
2.5	Conclusion	63
3	Éléments de base de la transmission de données	65
3.1	Introduction	65
3.2	L'organisation fonctionnelle et physique des échanges	66
3.3	Le mode d'adaptation au support	74
3.4	La jonction DTE/DCE ou interface	100
3.5	Conclusion	110
4	Notions de protocoles	111
4.1	Généralités	111
4.2	Les types de liaisons et leur contrôle	112
4.3	Les fonctions élémentaires	114
4.4	La signalisation	137
4.5	Étude détaillée du protocole HDLC	139

4.6	Conclusion	148
5	Mutualisation des ressources	149
5.1	Introduction	149
5.2	La quantification de trafic	149
5.3	Les concentrateurs	153
5.4	Les multiplexeurs	154
5.5	Le multiplexage et l'accès à l'interface radio	162
5.6	Le concept de réseau à commutation	167
5.7	Conclusion	177
6	Les réseaux à commutation de paquets	179
6.1	Généralités	179
6.2	Les performances de la commutation de paquets	179
6.3	Du mode datagramme au mode connecté	181
6.4	Les notions d'adressage	185
6.5	La notion de nommage	189
6.6	L'acheminement dans le réseau	190
6.7	Adaptation de la taille des unités de données	204
6.8	La congestion dans les réseaux	206
6.9	La voix dans les réseaux en mode paquet	209
6.10	Conclusion	210

1 L'information et sa représentation

1.1 GÉNÉRALITÉS

1.1.1 Les flux d'information

L'évolution des besoins et des applications informatiques conduit à l'acheminement, dans un même réseau des données informatiques traditionnelles (comme le texte), de la voix et de la vidéo. Transporter sur un même réseau des flux d'information de natures différentes nécessite que chacun d'eux ait une représentation physique identique et que le système de transmission ait la capacité de prendre en compte les contraintes spécifiques à chaque type de flux (figure 1.1).

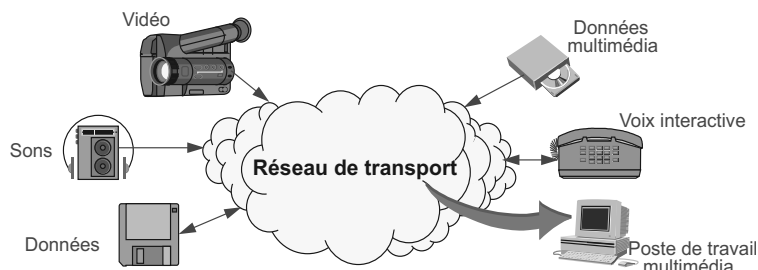


Figure 1.1 Réseau et différents flux d'information.

Afin de qualifier ces différents flux vis-à-vis du système de transmission, nous définirons succinctement les caractéristiques essentielles d'un réseau de transmission¹. Ensuite, nous examinerons le mode de représentation de ces informations. Enfin, nous appliquerons les résultats aux données, à la voix et à l'image pour en déduire les contraintes de transfert spécifiques à chaque type de flux.

1.1.2 Caractéristiques des réseaux de transmission

Notion de débit binaire

Les systèmes de traitement de l'information emploient une logique à deux états dite « binaire ». Pour y être traitée, l'information doit être traduite en symboles compréhensibles et manipulables par ces systèmes. Selon le type d'information à transformer, l'opération qui consiste à transformer les données en éléments binaires s'appelle le **codage** ou la **numérisation**.

1. Ces différentes notions seront revues et approfondies dans la suite de cet ouvrage.

On appelle débit binaire (D) le nombre d'éléments binaires, ou nombre de bits, émis sur le support de transmission pendant une unité de temps. Le débit binaire est généralement la grandeur utilisée en premier pour qualifier un système de transmission ; il s'exprime par la relation :

$$D = \frac{V}{t}$$

avec D (débit) en bits² par seconde (bit/s),
 V volume à transmettre exprimé en bits,
 t durée de la transmission en secondes.

Le débit binaire mesure le nombre d'éléments binaires transitant sur le canal de transmission pendant l'unité de temps (figure 1.2).



Figure 1.2 Schématisation d'un système de transmission.

Notion de rapport signal sur bruit

Durant la transmission, les signaux électriques peuvent être perturbés par des phénomènes électriques ou électromagnétiques d'origine externe désignés sous le terme générique de **bruit**. Le bruit est un phénomène qui dénature le signal et qui est susceptible d'introduire des erreurs d'interprétation du signal reçu (figure 1.3).

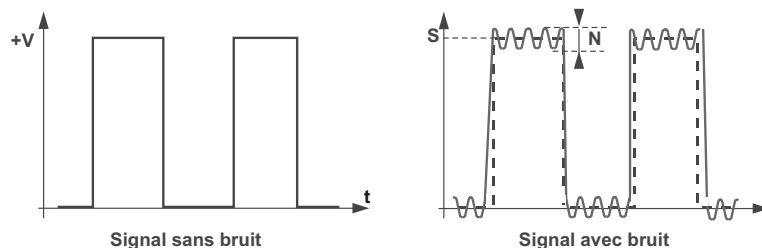


Figure 1.3 Signal pollué par le bruit.

Les capacités de transport d'information (débit) sont directement liées au rapport entre la puissance du signal utile et celle du signal de bruit. Ce rapport, appelé rapport signal sur bruit (**SNR**, *Signal Noise Ratio* que nous noterons S/N), s'exprime en décibels (dB³), formule dans laquelle S représente la puissance électrique du signal transmis et N la puissance du signal parasite ou bruit affectant le canal de transmission :

$$S/N_{dB} = 10 \log_{10} (S/N)_{(en\ puissance)}$$

2. L'unité officielle de débit est le bit/s (invariable). L'abréviation bps pouvant être confondue avec *byte* par seconde ne sera pas utilisée dans cet ouvrage. Rappelons que le terme bit provient de la contraction des termes « *binary digit* ».

3. Le décibel ou dB (10^e du Bel) est une unité logarithmique sans dimension. Elle exprime le rapport entre deux grandeurs de même nature. Le rapport signal/bruit peut aussi s'exprimer par le rapport des tensions, la valeur est alors $S/N_{dB} = 20 \log_{10} (S/N)_{(en\ tension)}$.

Notion d'erreur et de taux d'erreur

Les phénomènes parasites (bruit) perturbent le canal de transmission et peuvent affecter les informations en modifiant un ou plusieurs bits du message transmis, introduisant ainsi des erreurs dans ce dernier (figure 1.4).

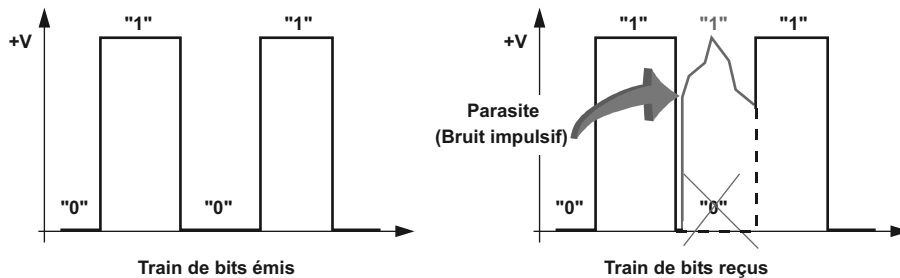


Figure 1.4 Effet d'une erreur sur le train binaire.

On appelle **taux d'erreur binaire** (T_e ou **BER**, *Bit Error Rate*) le rapport du nombre de bits reçus en erreur au nombre de bits total transmis.

$$T_e = \frac{\text{Nombre de bits en erreur}}{\text{Nombre de bits transmis}}$$

Notion de temps de transfert

Le temps de transfert, appelé aussi temps de transit ou temps de latence, mesure le temps entre l'émission d'un bit, à l'entrée du réseau et sa réception en sortie de ce dernier. Ce temps prend en compte le temps de propagation sur le ou les supports et les différents temps de traitement dans les éléments actifs du réseau (nœuds).

Dans un réseau, le temps de transfert n'est pas une constante, il varie en fonction de la charge du réseau. Cette variation est appelée gigue ou *jitter*. Le temps de transfert conditionne le bon fonctionnement des applications interactives, sa variation conditionne la restitution correcte des flux vidéo et voix.

Notion de spectre du signal

Le mathématicien français Joseph Fourier (1768-1830) a montré que tout signal périodique de forme quelconque peut être décomposé en une somme de signaux élémentaires sinusoïdaux (fondamentale et harmoniques) superposés à une valeur moyenne (composante continue) éventuellement nulle. L'ensemble de ces composantes constitue le spectre du signal ce qui correspond à la bande de fréquences occupée par le signal (largeur de bande).

1.2 LA REPRÉSENTATION DE L'INFORMATION

1.2.1 Les différents types d'information

Les informations peuvent être réparties en deux grandes catégories selon ce qu'elles représentent et les transformations qu'elles subissent pour être traitées dans les systèmes informatiques. On distingue :

- ❑ Les **données discrètes**, l'information correspond à l'assemblage d'une suite d'éléments indépendants les uns des autres (suite discontinue de valeurs) et dénombrables (ensemble fini). Par exemple, un texte est une association de mots eux-mêmes composés de lettres (symboles élémentaires).
- ❑ Les **données continues ou analogiques** (figure 1.5) résultent de la variation continue d'un phénomène physique : température, voix... Un capteur fournit une tension électrique qui varie de manière analogue à l'amplitude du phénomène physique à analyser : signal analogique. Dans un intervalle déterminé (bornes) aussi petit soit-il, le signal analogique peut toujours prendre une infinité de valeurs. Par exemple pour passer 10 °C à 11 °C, la température prend, entre ces deux valeurs, une infinité de valeurs sans aucune discontinuité entre elles (fonction continue).

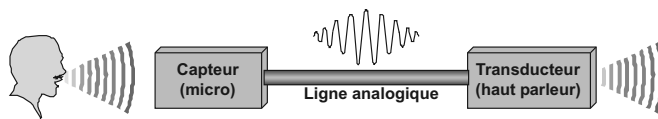


Figure 1.5 Signal analogique.

Pour être traitées par des équipements informatiques, ces informations doivent être représentées par une valeur binaire (**codage à la source**). Le codage à la source est plus spécifiquement appelé codage de l'information pour les informations discrètes et numérisation de l'information pour les informations analogiques.

1.2.2 Le codage des informations

Définition

Coder l'information consiste à faire correspondre (bijection) à chaque symbole d'un alphabet (élément à coder) une représentation binaire (mot code). L'ensemble des mots codes constitue le code (figure 1.6). Ces informations peuvent représenter un ensemble de commandes d'une machine-outil, des caractères alphanumériques... Seuls seront traités ici les codages alphanumériques utilisés dans les systèmes de traitement de données. Ces codes peuvent contenir :

- Des chiffres de la numérotation usuelle [0..9] ;
- Des lettres de l'alphabet [a..z, A..Z] ;
- Des symboles nationaux [é, è,...] ;
- Des symboles de ponctuation [, ; : . ? ! ...] ;
- Des symboles semi-graphiques [■ || ¶] ;
- Des commandes nécessaires au système [saut de ligne, saut de page, etc.].

Les différents types de code

Le codage des différents états d'un système peut s'envisager selon deux approches. La première, la plus simple, considère que chacun des états du système est équiprobable. La seconde prend en compte la fréquence d'apparition d'un état. Ceci nous conduit à définir deux types de code : les codes de longueur fixe et ceux de longueur variable.

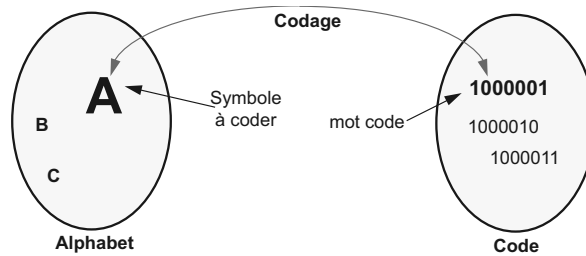


Figure 1.6 Principe du codage des données.

► Les codes de longueur fixe

Notion de quantité d'informations

Chaque état du système est codé par un certain nombre de bits (n), appelé longueur du code, longueur du mot code ou encore code à n moments. Ainsi,

- avec 1 bit, on peut coder 2 états (0,1)
- avec 2 bits, on peut coder 4 états (00, 01, 10, 11)
- avec 3 bits, on peut coder 8 états (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111)

D'une manière générale :

avec n bits, on peut coder 2^n états

Le nombre d'états pouvant être codés par un code de n bits s'appelle puissance lexicographique du code que l'on note :

$$P = 2^n$$

En généralisant, le nombre de bits nécessaires pour coder P états est n , tel que :

$$2^{(n-1)} < P \leq 2^n$$

En se rappelant que le logarithme d'un nombre N est le nombre par lequel il faut élever la base pour retrouver ce nombre ($N = \text{base}^{\log N}$), par exemple, le logarithme de 8 à base 2 est 3 car $2^3 = 8$; on peut alors écrire :

$$P = 2^n \text{ soit } n = \log_2(P)$$

Dans cette formule, le nombre de bits (n) représente la quantité d'information (Q) d'un mot du code. Lorsque dans un système, tous les états sont équiprobables ou considérés comme tel, la quantité d'information apportée par la connaissance d'un état est la même quel que soit l'état connu ; le codage qui en résulte est alors dit à longueur fixe.

L'information élémentaire est représentée par deux valeurs équiprobables (0 ou 1, pile ou face...), la quantité d'information apportée par la connaissance de l'un des états est :

$$Q = \log_2(2) = 1 \text{ shannon ou 1 bit.}$$

La quantité d'information Q s'exprime en shannons⁴ ou plus simplement en bits. Le bit est la quantité d'information qui correspond au lever de doute entre deux symboles équiprobables.

4. Les premiers travaux sur la théorie de l'information sont dus à Nyquist (1924). La théorie de l'information fut développée par Shannon en 1949. Les principes établis à cette époque régissent toujours les systèmes de transmission de l'information.

Lorsque tous les états ne sont pas équiprobables, la quantité d'information est d'autant plus grande que la probabilité de réalisation de l'état est faible. Si p est la probabilité de réalisation de l'état P , la quantité d'information apportée par la connaissance de P est :

$$Q = \log_2(1/p)$$

Application

En supposant équiprobable l'apparition de chaque lettre, combien de bits sont nécessaires pour coder toutes les lettres de l'alphabet et quelle est la quantité d'information contenue dans la représentation codée d'une lettre ?

Le nombre de bits nécessaires, pour coder P valeurs, est donné par la relation :

$$2^{(n-1)} < P \leq 2^n \quad \text{si } P = 26 \quad \text{on a } 2^4 < 26 \leq 2^5$$

soit un code d'une longueur 5 bits pour coder les 26 éléments. La quantité d'information contenue dans un mot code est de 5 bits.

Cependant, la quantité d'information apportée par la connaissance d'un caractère n'est que de :

$$Q = \log_2(1/p)$$

où p représente la probabilité d'apparition d'un symbole. Ici $p = 1/26$

$$Q = \log_2(26) = 3,32 \log_{10}(26) = 3,32 \times 1,4149 = 4,69 \text{ shannons ou bits}$$

Les principaux codes de longueur fixe

Les codes usuels utilisent cinq éléments (code Baudot), sept éléments (code ASCII appelé aussi CCITT n° 5 ou encore IA5) ou huit éléments (EBCDIC).

Le code Baudot, code télégraphique à cinq moments ou alphabet international n° 2 ou encore CCITT n° 2, était utilisé dans le réseau télex. Le code Baudot autorise 2^5 soit 32 caractères, ce qui est insuffisant pour représenter toutes les lettres de l'alphabet (26), les chiffres (10) et les commandes (Fin de ligne...). Deux caractères particuliers permettent la sélection de deux pages de codes soit au total une potentialité de représentation de 60 caractères.

Le code **ASCII** (figure 1.7), *American Standard Code for Information Interchange*, dont la première version date de 1963, est le code générique des télécommunications. Code à sept moments, il autorise 128 caractères (2^7). Les 32 premiers symboles correspondent à des commandes utilisées dans certains protocoles de transmission pour en contrôler l'exécution. La norme de base prévoit des adaptations aux particularités nationales (adaptation à la langue). Ce code, étendu à huit moments, constitue l'alphabet de base des micro-ordinateurs de type PC.

Le code **EBCDIC**, *Extended Binary Coded Decimal Interchange Code*, est un code à huit moments, d'origine IBM, il est utilisé dans les ordinateurs du constructeur, il a aussi été adopté par d'autres constructeurs pour leurs calculateurs.

BITS				b ₇	0	0	0	0	1	1	1	1
				b ₆	0	0	1	1	0	0	1	1
				b ₅	0	1	0	1	0	1	0	1
b ₄	b ₃	b ₂	b ₁		0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	NUL	DLE	SP	0	à	P		p
0	0	0	1	1	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q
0	0	1	0	2	STX	DC2	"	2	B	R	b	r
0	0	1	1	3	ETX	DC3	£	3	C	S	c	s
0	1	0	0	4	EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t
0	1	0	1	5	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
0	1	1	0	6	ACK	SYN	'	6	F	V	f	v
0	1	1	1	7	BEL	ETB	(7	G	W	g	w
1	0	0	0	8	BS	CAN)	8	H	X	h	x
1	0	0	1	9	HT	EM	.	9	I	Y	i	y
1	0	1	0	A	LF	SUB	:		J	Z	j	z
1	0	1	1	B	VT	ESC	,	;	K		k	é
1	1	0	0	C	FF	ES	<		L	ç	l	ù
1	1	0	1	D	CR	GS	"		M	§	m	è
1	1	1	0	E	SO	RS	>		N	^	n	¨
1	1	1	1	F	SI	US	/	?	O	-	o	DEL

Symbole	Signification		Symbole	Signification	
ACK	<i>Acknowledge</i>	Accusé de réception	FS	<i>File Separator</i>	Séparateur de fichiers
BEL	<i>Bell</i>	Sonnerie	GS	<i>Group Separator</i>	Séparateur de groupes
BS	<i>Backspace</i>	Retour arrière	HT	<i>Horizontal Tabulation</i>	Tabulation horizontale
CAN	<i>Cancel</i>	Annulation	LF	<i>Line Feed</i>	Interligne
CR	<i>Carriage Return</i>	Retour chariot	NAK	<i>Negative Acknowledge</i>	Accusé de réception négatif
DC	<i>Device control</i>	Commande d'appareil auxiliaire	NUL	<i>Null</i>	Nul
DEL	<i>Delete</i>	Oblitération	RS	<i>Record Separator</i>	Séparateur d'articles
DLE	<i>Data Link Escape</i>	Caractère d'échappement	SI	<i>Shift IN</i>	En code
EM	<i>End Medium</i>	Fin de support	SO	<i>Shift Out</i>	Hors code
ENQ	<i>Enquiry</i>	Demande	SOH	<i>Start Of Heading</i>	Début d'en-tête
EOT	<i>End Of Transmission</i>	Fin de communication	SP	<i>Space</i>	Espace
ESC	<i>Escape</i>	Échappement	STX	<i>Start Of Text</i>	Début du texte
ETB	<i>End of Transmission Block</i>	Fin de bloc de transmission	SYN	<i>Synchronous idle</i>	Synchronisation
ETX	<i>End Of Text</i>	Fin de texte	TC	<i>Transmission Control</i>	Commande de transmission
FE	<i>Format Effector</i>	Commande de mise en page	US	<i>Unit Separator</i>	Séparateur de sous-article
FF	<i>Form Feed</i>	Présentation de formule	VT	<i>Vertical Tabulation</i>	Tabulation verticale

Figure 1.7 Code ASCII.

► Les codes de longueur variable

Lorsque les états du système ne sont pas équiprobables, la quantité d'information apportée par la connaissance d'un état est d'autant plus grande que cet état a une faible probabilité de se réaliser. La quantité moyenne d'information apportée par la connaissance d'un état, appelée **entropie**, est donnée par la relation :

$$H = \sum_{i=1}^{i=n} p_i \log_2 \left(\frac{1}{p_i} \right)$$

où p_i représente la probabilité d'apparition du symbole de rang i .

L'entropie représente la longueur optimale du code des symboles du système. Déterminons la longueur optimale du code (entropie) pour le système décrit par le tableau suivant. À des fins de simplicité, chaque état est identifié par une lettre.

État	Probabilité
E	0,48
A	0,21
S	0,12
T	0,08
U	0,06
Y	0,05

$$H = - [0,48 \log_2(0,48) + 0,21 \log_2(0,21) + 0,12 \log_2(0,12) + 0,08 \log_2(0,08) + 0,06 \log_2(0,06) + 0,05 \log_2(0,05)]$$

$$H = - 3,32 [0,48 \log_{10}(0,48) + 0,21 \log_{10}(0,21) + 0,12 \log_{10}(0,12) + 0,08 \log_{10}(0,08) + 0,06 \log_{10}(0,06) + 0,05 \log_{10}(0,05)]$$

$$H = 2,09 \text{ bits}$$

Le codage optimal devrait conduire à construire un code dont la longueur moyenne serait de 2,09 bits, alors que l'utilisation d'un code à longueur fixe nécessite 3 bits pour coder les six états de ce système ($2^2 < 6 \leq 2^3$).

Il n'existe pas de code qui permette d'atteindre cette limite théorique. Cependant, Huffman a introduit en 1952 une méthode de codage (codage d'entropie) qui prend en compte la fréquence d'occurrence des états et qui se rapproche de cette limite théorique.

La construction du code de Huffman de cet exemple comporte sept étapes (figure 1.8) :

1. Dénombrer les différents états du système et créer la table des symboles.
2. Classer ces symboles par ordre des fréquences décroissantes (occurrence).
3. Réaliser des réductions successives en rassemblant les deux occurrences de plus petite fréquence en une nouvelle occurrence.
4. Insérer la nouvelle occurrence obtenue dans la table et trier celle-ci à nouveau par ordre décroissant.
5. Poursuivre les réductions jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'élément (répétition des étapes 3, 4, 5).
6. Construire l'arbre binaire en reliant chaque occurrence à la racine.
7. Établir le code en lisant l'arbre construit du sommet aux feuilles et en attribuant par exemple la valeur 0 aux branches basses et 1 aux branches hautes.