

# TCP/IP

Architecture  
Protocoles  
Applications

Douglas Comer

4<sup>e</sup> édition

DUNOD



INFORMATIQUES

# Table des matières

Avant-propos à l'édition française . . . . .	xxix
Avant-propos . . . . .	xxx
<b>Chapitre 1 – Introduction et présentation générale . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Plaidoyer pour l'interconnexion des systèmes . . . . .	1
1.2 Internet et TCP/IP . . . . .	2
1.3 Les services d'un internet . . . . .	3
1.3.1 Services de niveau application d'Internet . . . . .	4
1.3.2 Services de niveau réseau d'un internet . . . . .	6
1.4 Historique et perspectives d'Internet . . . . .	8
1.5 L'IAB, comité chargé de la coordination d'Internet . . . . .	11
1.6 La nouvelle structure de L'IAB . . . . .	12
1.7 L'ISOC . . . . .	14
1.8 Les RFC . . . . .	14
1.9 Standardisation des protocoles TCP/IP . . . . .	15
1.10 Évolutions et techniques futures . . . . .	15
1.11 Organisation de l'ouvrage . . . . .	16
1.12 Résumé . . . . .	17
1.13 Pour en savoir plus . . . . .	18
1.14 Exercices . . . . .	18
<b>Chapitre 2 – Principaux réseaux englobés dans un internet . . . . .</b>	<b>19</b>
2.1 Introduction . . . . .	19
2.2 Concepts fonctionnels de base des réseaux de transmission de données . . . . .	20
2.3 Les grands réseaux (WAN) et les réseaux locaux (LAN) . . . . .	22
2.3.1 L'adressage physique des réseaux . . . . .	23
2.4 Le réseau Ethernet . . . . .	24
2.4.1 Réseau Ethernet à câble fin (Thin Ethernet) . . . . .	27

2.4.2	Réseau Ethernet à paires torsadées (Twisted pair Ethernet)	28
2.4.3	La capacité de transmission d'Ethernet	29
2.4.4	Ethernet rapide (Fast Ethernet)	29
2.4.5	Ethernet 10/100	30
2.4.6	Ethernet Gigabit	30
2.4.7	Propriétés d'un réseau Ethernet	31
2.4.8	Détection de collision et reprise	31
2.4.9	Les adresses Ethernet	32
2.4.10	Format d'une trame Ethernet	34
2.4.11	Extension d'un réseau Ethernet avec des répéteurs	35
2.4.12	Extension d'un réseau Ethernet avec des ponts	36
2.5	Le réseau FDDI	37
2.5.1	Propriétés d'un réseau FDDI	38
2.5.2	Double boucle contrarotative	38
2.5.3	Format d'une trame FDDI	40
2.6	Technique ATM	41
2.6.1	Taille d'une cellule ATM	42
2.6.2	ATM : services réseaux en mode connecté	42
2.7	Technologies WAN : le réseau ARPANET	43
2.7.1	L'adressage ARPANET	47
2.8	L'action réseau de la NSF	47
2.8.1	Le réseau NSFNET fédérateur initial	47
2.8.2	Le second réseau NSFNET fédérateur (1988-1989)	49
2.8.3	Le réseau NSFNET fédérateur de 1989 à 1990	50
2.9	Le réseau ANSNET	51
2.10	Vers un grand réseau fédérateur (vBNS)	52
2.10.1	Réseaux fédérateurs commerciaux dans Internet	52
2.11	Autres réseaux susceptibles d'offrir un support à TCP/IP	52
2.11.1	Le réseau X25NET	52
2.11.2	Réseaux point à point	54
2.11.3	Le réseau téléphonique et le protocole dial-up IP	55
2.11.4	Les réseaux IBM Token Ring et proNET	56
2.11.5	Les technologies de réseaux sans fil	56
2.12	Résumé	57
2.13	Pour en savoir plus	58
2.14	Exercices	58
<b>Chapitre 3 – Concepts de base et modèle d'un internet</b>		<b>61</b>
3.1	Introduction	61
3.2	Interconnexion de niveau application	61
3.3	Interconnexion de niveau réseau	62
3.4	Propriétés d'un internet	64



3.5	Architecture d'un internet . . . . .	64
3.6	Interconnexion au moyen de routeurs . . . . .	65
3.7	Le point de vue de l'utilisateur . . . . .	66
3.8	Tous les réseaux sont équivalents . . . . .	68
3.9	Les questions sans réponse . . . . .	68
3.10	Résumé . . . . .	69
3.11	Pour en savoir plus . . . . .	69
3.12	Exercices . . . . .	70
<b>Chapitre 4 – Les classes d'adresses Internet . . . . .</b>		<b>71</b>
4.1	Introduction . . . . .	71
4.2	Identificateurs universels . . . . .	71
4.3	Le principe d'adressage d'origine . . . . .	72
4.4	Adresses et points d'accès aux réseaux . . . . .	74
4.5	Adresse réseau et adresse de diffusion dirigée . . . . .	74
4.6	Adresse de diffusion limitée . . . . .	75
4.7	Identificateur « 0 » signifiant « cet objet » . . . . .	76
4.8	Sous-adressage et sur-adressage . . . . .	76
4.9	Adresses IP de multidistribution . . . . .	77
4.10	Faiblesses de l'adressage Internet . . . . .	77
4.11	Notation décimale pointée . . . . .	79
4.12	Adresse de rebouclage . . . . .	80
4.13	Résumé des adresses particulières . . . . .	80
4.14	Autorité gérant l'adressage Internet . . . . .	81
4.15	Préfixes d'adresses réservés . . . . .	81
4.16	Un exemple . . . . .	82
4.17	L'ordonnancement des données sur Internet . . . . .	84
4.18	Résumé . . . . .	85
4.19	Pour en savoir plus . . . . .	86
4.20	Exercices . . . . .	86
<b>Chapitre 5 – Mappage des adresses IP et des adresses physiques (ARP) . . . . .</b>		<b>87</b>
5.1	Introduction . . . . .	87
5.2	La résolution des adresses . . . . .	87
5.3	Les types d'adresses physiques . . . . .	88
5.4	Résolution d'adresses par mappage direct . . . . .	89
5.5	Résolution d'adresses par mise en relation dynamique (ARP) . . . . .	90

5.6	Cache de résolution d'adresses (Cache ARP) . . . . .	91
5.7	Délai d'expiration du cache ARP . . . . .	91
5.8	Les améliorations du protocole ARP . . . . .	93
5.9	ARP et les autres protocoles . . . . .	93
5.10	Implémentation du logiciel ARP . . . . .	94
5.11	Encapsulation et identification des datagrammes ARP . . . . .	96
5.12	Format des datagrammes ARP . . . . .	96
5.13	Résumé . . . . .	98
5.14	Pour en savoir plus . . . . .	99
5.15	Exercices . . . . .	99
<b>Chapitre 6 – Détermination d'une adresse IP au démarrage (RARP) . . . . .</b>		<b>101</b>
6.1	Introduction . . . . .	101
6.2	Le protocole de résolution inverse d'adresse (RARP) . . . . .	103
6.3	Déroulement des transactions RARP . . . . .	104
6.4	Fonctions des serveurs RARP . . . . .	105
6.5	Résumé . . . . .	106
6.6	Pour en savoir plus . . . . .	106
6.7	Exercices . . . . .	106
<b>Chapitre 7 – Protocole IP : la remise des datagrammes en mode non connecté . . . . .</b>		<b>109</b>
7.1	Introduction . . . . .	109
7.2	Internet : un réseau virtuel . . . . .	109
7.3	Architecture et philosophie d'un internet . . . . .	110
7.4	Organisation conceptuelle des services d'un internet . . . . .	110
7.5	La remise des datagrammes en mode non connecté . . . . .	111
7.6	À propos du protocole IP . . . . .	111
7.7	Le datagramme IP . . . . .	112
7.7.1	<i>Format d'un datagramme</i> . . . . .	113
7.7.2	<i>Type de service et services différenciés d'un datagramme</i> . . . . .	114
7.7.3	<i>Encapsulation du datagramme</i> . . . . .	117
7.7.4	<i>Taille du datagramme, MTU réseau et fragmentation</i> . . . . .	118
7.7.5	<i>Réassemblage des fragments</i> . . . . .	120
7.7.6	<i>Contrôle de la fragmentation</i> . . . . .	121
7.7.7	<i>Durée de vie d'un datagramme (TTL)</i> . . . . .	123
7.7.8	<i>Les champs complémentaires de l'en-tête du datagramme</i> . . . . .	123
7.8	Options d'un datagramme IP . . . . .	124
7.8.1	<i>Option enregistrement de route</i> . . . . .	126
7.8.2	<i>Option routage défini par la source</i> . . . . .	127

7.8.3	Option horodatage . . . . .	129
7.8.4	Traitement des options lors de la fragmentation . . . . .	130
7.9	Résumé . . . . .	130
7.10	Pour en savoir plus . . . . .	131
7.11	Exercices . . . . .	132
<b>Chapitre 8 – Protocole IP : le routage des datagrammes . . . . .</b>		<b>133</b>
8.1	Introduction . . . . .	133
8.2	Routage des datagrammes dans un internet . . . . .	133
8.3	Remise directe et indirecte . . . . .	135
8.3.1	Remise directe des datagrammes . . . . .	135
8.3.2	Remise indirecte des datagrammes . . . . .	136
8.4	Routage géré par des tables de routage . . . . .	137
8.5	Routage par sauts successifs . . . . .	138
8.6	Routage par défaut . . . . .	140
8.7	Routage d'ordinateur à ordinateur . . . . .	140
8.8	Algorithme de routage IP . . . . .	141
8.9	Routage par les adresses IP . . . . .	142
8.10	Gestion des datagrammes entrant . . . . .	143
8.11	Élaboration des tables de routage . . . . .	145
8.12	Résumé . . . . .	145
8.13	Pour en savoir plus . . . . .	146
8.14	Exercices . . . . .	146
<b>Chapitre 9 – Protocole IP : les messages d'erreur et de supervision (ICMP) . . . . .</b>		<b>149</b>
9.1	Introduction . . . . .	149
9.2	Protocole ICMP . . . . .	149
9.3	Compte rendu d'erreur vs correction d'erreur . . . . .	151
9.4	Remise des messages ICMP . . . . .	152
9.5	Format des messages ICMP . . . . .	153
9.6	Test d'accessibilité et d'état ( <i>ping</i> ) . . . . .	153
9.7	Messages de demande et de réponse d'écho . . . . .	154
9.8	Compte rendu de destination inaccessible . . . . .	155
9.9	Congestion et contrôle du flux des datagrammes . . . . .	156
9.10	Format d'une demande de limitation de production de la source . . . . .	157
9.11	Demande de modification de route par les routeurs . . . . .	158
9.12	Détection de routes circulaires ou excessivement longues . . . . .	160
9.13	Compte rendu de problème de paramètre . . . . .	161

9.14	Synchronisation des horloges et estimation du temps de transit . . . . .	162
9.15	Demande d'information et réponse . . . . .	163
9.16	Obtention d'un masque de sous-réseau . . . . .	163
9.17	Découverte d'un routeur . . . . .	164
9.18	Sollicitation d'un routeur . . . . .	166
9.19	Résumé . . . . .	167
9.20	Pour en savoir plus . . . . .	167
9.21	Exercices . . . . .	168
<b>Chapitre 10 – L'agrégation d'adresses (CIDR) et le sous-adressage . . . . .</b>		<b>171</b>
10.1	Introduction . . . . .	171
10.2	Rappel de quelques faits . . . . .	171
10.3	Réduire le nombre de réseaux . . . . .	172
10.4	Les routeurs transparents . . . . .	173
10.5	Les Proxy ARP . . . . .	175
10.6	Le sous-adressage . . . . .	176
10.7	Souplesse du sous-adressage . . . . .	179
10.8	Le sous-adressage variable . . . . .	180
10.9	Implémentation du sous-adressage avec des masques . . . . .	181
10.10	Représentation des masques de sous-réseaux . . . . .	182
10.11	Le routage en présence de sous-réseaux . . . . .	183
10.12	L'algorithme de routage à sous-réseaux . . . . .	184
10.13	Un algorithme de routage unifié . . . . .	185
10.14	La gestion des masques de sous-réseaux . . . . .	186
10.15	La diffusion sur les sous-réseaux . . . . .	187
10.16	Réseaux anonymes ou non numérotés . . . . .	188
10.17	Adressage agrégé ou sur-adressage . . . . .	190
10.18	Effet du sur-adressage sur le routage . . . . .	191
10.19	Blocs d'adresses CIDR et bits de masques . . . . .	191
10.20	Blocs d'adresses et notation CIDR . . . . .	192
10.21	Exemple d'adressage CIDR . . . . .	193
10.22	Algorithmes de recherche de route en adressage CIDR . . . . .	194
10.22.1	<i>Le hachage en adressage traditionnel</i> . . . . .	195
10.22.2	<i>Recherche de route par identification de préfixe en adressage CIDR</i> . . . . .	195
10.22.3	<i>Structure d'arbre binaire</i> . . . . .	196
10.23	Routage par correspondance de route . . . . .	197
10.23.1	<i>Arbre Patricia et arbre à compression de niveaux</i> . . . . .	198
10.24	Blocs CIDR réservés pour les réseaux privés . . . . .	199



10.25	Résumé . . . . .	200
10.26	Pour en savoir plus . . . . .	200
10.27	Exercices . . . . .	201
<b>Chapitre 11 – Structuration en couches de protocoles . . . . .</b>		<b>205</b>
11.1	Introduction . . . . .	205
11.2	Nécessité d'avoir plusieurs protocoles . . . . .	205
11.3	Les couches conceptuelles de logiciels de communication . . . . .	207
11.4	Fonctionnalités des couches . . . . .	209
11.4.1	<i>Le modèle de référence à sept couches de l'ISO</i> . . . . .	209
11.5	X.25 et modèle OSI . . . . .	210
11.5.1	<i>Le modèle TCP/IP de structuration en couches</i> . . . . .	212
11.6	Différences entre structurations X.25 et TCP/IP . . . . .	214
11.6.1	<i>Fiabilité de la couche liaison vs fiabilité de bout en bout</i> . . . . .	214
11.6.2	<i>Localisation de l'intelligence et des prises de décision</i> . . . . .	215
11.7	Les principes de la structuration en couches . . . . .	216
11.7.1	<i>Structuration en couches dans un environnement TCP/IP</i> . . . . .	216
11.8	Structuration en couches en présence de sous-réseaux . . . . .	218
11.9	Deux frontières importantes du modèle TCP/IP . . . . .	220
11.9.1	<i>La limitation d'adressage de haut niveau</i> . . . . .	220
11.9.2	<i>Limites du système d'exploitation</i> . . . . .	221
11.10	Les inconvénients de la structuration en couches . . . . .	221
11.11	Le principe de base du multiplexage et du démultiplexage . . . . .	222
11.12	Résumé . . . . .	223
11.13	Pour en savoir plus . . . . .	224
11.14	Exercices . . . . .	224
<b>Chapitre 12 – Protocole de datagramme utilisateur (UDP) . . . . .</b>		<b>227</b>
12.1	Introduction . . . . .	227
12.2	Identifier la destination finale . . . . .	227
12.3	Le protocole de datagramme utilisateur (UDP) . . . . .	228
12.4	Format des messages UDP . . . . .	229
12.5	Pseudo-en-tête UDP . . . . .	230
12.6	Encapsulation UDP et couches de protocoles . . . . .	231
12.7	La structuration en couches et le calcul du total de contrôle UDP . . . . .	233
12.8	Multiplexage, démultiplexage et ports UDP . . . . .	234
12.9	Numéros de port réservés et non réservés . . . . .	235
12.10	Résumé . . . . .	237
12.11	Pour en savoir plus . . . . .	237
12.12	Exercices . . . . .	237



<b>Chapitre 13 – Transport fiable en mode connecté (TCP)</b> . . . . .	239
13.1 Introduction . . . . .	239
13.2 Nécessité d'un service de remise fiable en mode connecté . . . . .	239
13.3 Propriétés des services de remise fiable . . . . .	240
13.4 Assurer la fiabilité . . . . .	242
13.5 Le concept de fenêtre glissante . . . . .	244
13.6 Le protocole de contrôle de transmission (TCP) . . . . .	246
13.7 Ports, connexions et extrémités de connexions . . . . .	247
13.8 Ouvertures actives et passives . . . . .	249
13.9 Segments, flots et numéros de séquence . . . . .	250
13.10 Taille de fenêtre variable et contrôle de flux . . . . .	251
13.11 Format des segments TCP . . . . .	252
13.12 Les données hors bande . . . . .	254
13.13 Option de taille maximale de segment . . . . .	255
13.14 Calcul du total de contrôle TCP . . . . .	256
13.15 Accusés de réception et retransmissions . . . . .	257
13.16 Temporisation et retransmission . . . . .	258
13.17 Mesure du temps d'aller-retour RTT . . . . .	260
13.18 Algorithme de KARN et augmentation des temporisations . . . . .	262
13.19 Adaptation à de grandes variations de délai . . . . .	263
13.20 Gérer la congestion . . . . .	266
13.21 Congestion et élimination des datagrammes . . . . .	268
13.22 Prévention de congestion par l'algorithme RED . . . . .	270
13.23 Établissement d'une connexion TCP . . . . .	273
13.24 Numéros de séquence initiaux . . . . .	274
13.25 Libération d'une connexion TCP . . . . .	275
13.26 Réinitialisation d'une connexion tcp . . . . .	276
13.27 Automate à nombre d'états fini de TCP . . . . .	276
13.28 Remise forcée de données . . . . .	278
13.29 Numéros de port TCP réservés . . . . .	278
13.30 Performances de TCP . . . . .	280
13.31 Syndrome de la fenêtre stupide et petits paquets . . . . .	280
13.32 Éviter le syndrome de la fenêtre stupide . . . . .	281
13.32.1 Éviter le syndrome du côté récepteur . . . . .	282
13.32.2 Accusés de réception retardés . . . . .	282
13.32.3 Éviter le syndrome côté émetteur . . . . .	283
13.33 Résumé . . . . .	285
13.34 Pour en savoir plus . . . . .	285
13.35 Exercices . . . . .	286

<b>Chapitre 14 – Routage : système central, pairs et algorithmes</b>	289
14.1 Introduction	289
14.2 L'origine des tables de routage	290
14.3 Routage à partir d'informations partielles	291
14.4 Architecture initiale et système central d'Internet	293
14.5 Les routeurs du système central	294
14.6 De l'architecture du système central aux réseaux fédérateurs pairs	297
14.7 Propagation automatique des informations de routage	299
14.8 Routage à vecteur de distance (Bellman-Ford)	300
14.9 Le protocole de passerelle à passerelle (GGP)	302
14.10 Factorisation des distances	303
14.11 Fiabilité des protocoles de routage	303
14.12 Le routage à état de lien (SPF)	304
14.13 Résumé	306
14.14 Pour en savoir plus	306
14.15 Exercices	307
<b>Chapitre 15 – Routage : protocole de routage externe (BGP) et systèmes autonomes</b>	309
15.1 Introduction	309
15.2 Limitations de l'architecture à routeurs centraux	309
15.3 Taille limite d'un groupe	310
15.4 Le problème des sauts supplémentaires	312
15.5 Le concept de réseau caché	313
15.6 Le concept de système autonome	314
15.7 Du système central au système autonome indépendant	315
15.8 BGP : le protocole de routage externe	316
15.9 Caractéristiques du protocole BGP	317
15.10 Fonctions de base et messages types de BGP	319
15.11 En-tête des messages BGP	319
15.12 Message BGP d'ouverture	320
15.13 Message BGP de mise à jour	321
15.14 Représentation condensée : adresse-masque des pairs	322
15.15 Les attributs de parcours	323
15.16 Message BGP de test d'activité	325
15.17 Information de routage du point de vue du récepteur	325
15.18 Principales restrictions des protocoles de routage externe	326

15.19	Système d'arbitrage de route d'un internet	328
15.20	Message BGP de notification	330
15.21	Décentralisation de l'architecture internet	330
15.22	Résumé	331
15.23	Pour en savoir plus	332
15.24	Exercices	332
<b>Chapitre 16 – Routage dans un système autonome (RIP, OSPF, HELLO)</b>		
16.1	Introduction	335
16.2	Routes intérieures statiques et dynamiques	335
16.3	Le protocole d'informations de routage (RIP)	338
16.3.1	Historique de RIP	338
16.3.2	Fonctionnement de RIP	339
16.3.3	Résolution du problème de la convergence lente	342
16.3.4	Format des messages RIP1	344
16.3.5	Les conventions d'adressage RIP1	345
16.3.6	Interprétation et agrégation de route RIP1	346
16.3.7	Extension de RIP2	347
16.3.8	Format du message RIP2	347
16.3.9	La transmission des messages RIP1	348
16.3.10	Inconvénients du nombre de sauts dans RIP	348
16.4	Le protocole Hello	349
16.5	Métrique de délai et oscillations	350
16.6	Combinaison de RIP, Hello et BGP	352
16.7	Routage intersystèmes autonomes	353
16.8	Communication intersystèmes autonomes : gated	354
16.9	Le protocole SPF ouvert (OSPF)	354
16.9.1	Format des messages OSPF	356
16.9.2	Format des messages Hello d'OSPF	357
16.9.3	Format des messages OSPF de description de base de données	358
16.9.4	Format des messages OSPF de demande d'état de lien	359
16.9.5	Messages OSPF de mise à jour d'état de lien	359
16.10	Routage à partir d'informations partielles	361
16.11	Résumé	362
16.12	Pour en savoir plus	362
16.13	Exercices	363
<b>Chapitre 17 – Diffusion sélective (multicast)</b>		
17.1	Introduction	365
17.2	Diffusion au niveau physique	365

17.3	Origines physiques du multicast . . . . .	366
17.4	Multicast Ethernet . . . . .	367
17.5	La diffusion sélective au niveau IP . . . . .	367
17.6	Composants conceptuels . . . . .	368
17.7	Les adresses IP de multicast . . . . .	369
17.8	Sémantique des adresses de multicast . . . . .	370
17.9	Mise en correspondance des adresses de multicast IP et d'Ethernet . . . . .	372
17.10	Hôtes et remise multicast . . . . .	372
17.11	Portée de la diffusion sélective . . . . .	373
17.12	Extension du logiciel des hôtes pour supporter la diffusion sélective . . . . .	374
17.13	Le protocole de gestion de groupes de l'internet . . . . .	375
17.14	Mise en œuvre d'IGMP . . . . .	376
17.15	Transitions d'état d'appartenance aux groupes . . . . .	377
17.16	Structure des messages IGMP . . . . .	378
17.17	Acheminement en diffusion sélective et informations de routage multicast . . . . .	380
17.17.1	<i>Nécessité d'un routage dynamique</i> . . . . .	380
17.17.2	<i>Insuffisances du routage selon la destination</i> . . . . .	381
17.17.3	<i>Émetteurs quelconques</i> . . . . .	381
17.18	Modèles de routage multicast de base . . . . .	381
17.19	Conséquences de l'acheminement tronqué selon les chemins inverses . . . . .	383
17.20	Arbres de multicast . . . . .	384
17.21	Nature du routage multicast . . . . .	386
17.22	L'acheminement selon les chemins inverses . . . . .	386
17.23	Protocole de routage multicast à vecteur de distance . . . . .	388
17.24	Le programme mrouterd . . . . .	388
17.25	Protocoles alternatifs . . . . .	391
17.26	Core Based Tree (CBT) . . . . .	392
17.27	Multicast indépendant des protocoles (PIM) . . . . .	393
17.27.1	<i>PIM en mode dense</i> . . . . .	393
17.27.2	<i>Indépendance vis-à-vis des protocoles</i> . . . . .	394
17.27.3	<i>PIM en mode peu dense</i> . . . . .	394
17.27.4	<i>Passer des arbres communs aux arbres des plus courts chemins</i> . . . . .	395
17.28	Extensions d'OSPF pour la diffusion sélective . . . . .	396
17.29	Multicast fiable et explosion des accusés de réception . . . . .	397
17.30	Résumé . . . . .	399
17.31	Pour en savoir plus . . . . .	400
17.32	Exercices . . . . .	400



<b>Chapitre 18 – TCP/IP et réseaux ATM</b> . . . . .	403
18.1 Introduction . . . . .	403
18.2 Le matériel ATM . . . . .	404
18.3 Les grands réseaux ATM . . . . .	404
18.4 Vue logique d'un réseau ATM . . . . .	405
18.5 Les deux modèles de connexion ATM . . . . .	406
18.5.1 <i>Circuits virtuels permanents (CVP)</i> . . . . .	406
18.5.2 <i>Circuits virtuels commutés (CVC)</i> . . . . .	407
18.6 Chemins, circuits et identificateurs . . . . .	407
18.7 La cellule ATM . . . . .	408
18.8 Couches d'adaptation ATM (AAL) . . . . .	408
18.9 AAL5 (ATM Adaptation Layer 5) . . . . .	410
18.10 Convergence, segmentation et réassemblage avec l'AAL5 . . . . .	411
18.11 Encapsulation de datagrammes et taille MTU IP . . . . .	412
18.12 Type de paquet et multiplexage . . . . .	413
18.13 Mise en relation d'adresses IP dans un réseau ATM . . . . .	414
18.14 Concept de sous-réseau logique IP . . . . .	415
18.15 Gestion de la connexion . . . . .	416
18.16 Mise en relation des adresses dans un LIS . . . . .	417
18.17 Format d'un paquet ATMARP . . . . .	417
18.17.1 <i>Format des champs de longueur d'adresse ATM</i> . . . . .	418
18.17.2 <i>Codes opération utilisés avec le protocole ATMARP</i> . . . . .	420
18.18 Utilisation de paquets ATMARP pour trouver une adresse . . . . .	420
18.18.1 <i>Circuits virtuels permanents</i> . . . . .	420
18.18.2 <i>Circuits virtuels commutés</i> . . . . .	421
18.19 Gestion de la base de données du serveur . . . . .	422
18.20 Expiration des informations ATMARP dans un serveur . . . . .	422
18.21 Expiration des informations dans un ordinateur ou un routeur . . . . .	423
18.22 Les technologies de commutation IP . . . . .	423
18.23 Fonctionnement d'IP commuté . . . . .	424
18.24 Optimisation de la réexpédition IP . . . . .	424
18.25 Classification, flux et commutation à haut niveau . . . . .	425
18.26 Applications de la commutation . . . . .	426
18.27 Résumé . . . . .	426
18.28 Pour en savoir plus . . . . .	427
18.29 Exercices . . . . .	428

<b>Chapitre 19 – IP et la mobilité</b> . . . . .	431
19.1 Introduction . . . . .	431
19.2 Mobilité, routage et adressage . . . . .	431
19.3 Prise en compte de la mobilité par le protocole IP . . . . .	432
19.3.1 <i>La transparence</i> . . . . .	432
19.3.2 <i>L'interopérabilité avec IPv4</i> . . . . .	432
19.3.3 <i>L'extensibilité</i> . . . . .	432
19.3.4 <i>La sécurité</i> . . . . .	433
19.3.5 <i>La macro-mobilité</i> . . . . .	433
19.4 Principe de fonctionnement de l'IP mobile . . . . .	433
19.5 L'adressage du mobile . . . . .	434
19.6 Découverte de l'agent extérieur . . . . .	435
19.7 Procédure d'enregistrement d'un mobile . . . . .	437
19.8 Format du message d'enregistrement . . . . .	437
19.9 Communication avec un agent extérieur . . . . .	439
19.10 Transmission et réception des datagrammes au mobile . . . . .	439
19.11 Le problème du chassé-croisé . . . . .	440
19.12 Communication avec les ordinateurs du réseau de domiciliation . . . . .	442
19.13 Résumé . . . . .	443
19.14 Pour en savoir plus . . . . .	444
19.15 Exercices . . . . .	444
<b>Chapitre 20 – Réseaux privés virtuels (VPN)</b> . . . . .	447
20.1 Introduction . . . . .	447
20.2 Réseau privé et réseau hybride . . . . .	447
20.3 Un réseau privé virtuel (VPN) . . . . .	449
20.4 Adressage et routage dans un VPN . . . . .	450
20.5 Un VPN avec adressage privé . . . . .	451
20.6 La translation d'adresses réseau (NAT) . . . . .	453
20.7 Création de la table de translation d'adresses . . . . .	454
20.8 NAT à multi-adresses . . . . .	456
20.9 NAT à mappage de port (NAPT) . . . . .	456
20.10 Interaction entre NAT et ICMP . . . . .	458
20.11 Interaction entre NAT et les applications . . . . .	458
20.12 Domaines d'adresses conceptuels . . . . .	459
20.13 SLIRP et Masquerade . . . . .	460
20.14 Résumé . . . . .	460
20.15 Pour en savoir plus . . . . .	461
20.16 Exercices . . . . .	462

<b>Chapitre 21 – Le modèle d’interaction client-serveur</b> . . . . .	465
21.1 Introduction . . . . .	465
21.2 Le modèle client-serveur . . . . .	465
21.3 Exemple simple : le serveur d’écho UDP . . . . .	466
21.4 Le service d’horodate . . . . .	468
21.4.1 Représentation des date et heure . . . . .	468
21.4.2 Dates locale et universelle . . . . .	469
21.5 Complexité des serveurs . . . . .	469
21.6 Serveur RARP . . . . .	471
21.7 Les alternatives au modèle client-serveur . . . . .	471
21.8 Résumé . . . . .	473
21.9 Pour en savoir plus . . . . .	473
21.10 Exercices . . . . .	474
<b>Chapitre 22 – L’interface des sockets</b> . . . . .	475
22.1 Introduction . . . . .	475
22.2 Le paradigme des entrées/sorties et des accès réseau d’Unix . . . . .	476
22.3 Enrichir Unix avec des E/S réseau . . . . .	476
22.4 Le concept de socket . . . . .	477
22.5 Création d’un socket . . . . .	478
22.6 Héritage et terminaison des sockets . . . . .	479
22.7 Spécification des adresses locales . . . . .	480
22.8 Connexion des sockets avec l’adresse de destination . . . . .	481
22.9 Émission d’informations sur un socket . . . . .	482
22.10 Réception d’informations sur un socket . . . . .	484
22.11 Allocation des adresses de socket local et distant . . . . .	486
22.12 Demander et définir des options de socket . . . . .	486
22.13 Définition de la taille de la file d’attente associée à un serveur . . . . .	487
22.14 Comment un serveur accepte une connexion . . . . .	488
22.15 Serveurs gérant plusieurs services . . . . .	489
22.16 Demander et définir les noms des ordinateurs . . . . .	490
22.17 Demander et définir le nom de domaine interne d’un ordinateur . . . . .	491
22.18 Appels à la bibliothèque de sockets . . . . .	491
22.19 Procédures de conversion en représentation réseau standard . . . . .	493
22.20 Procédures de manipulation d’adresses . . . . .	494
22.21 Accéder au système de noms de domaine . . . . .	495
22.22 Obtenir des informations relatives aux ordinateurs . . . . .	497

22.23	Obtenir des informations relatives aux réseaux . . . . .	498
22.24	Obtenir des informations relatives aux protocoles . . . . .	499
22.25	Obtenir des informations relatives aux services réseau . . . . .	499
22.26	Un exemple de client . . . . .	500
22.27	Un exemple de serveur . . . . .	502
22.28	Résumé . . . . .	505
22.29	Pour en savoir plus . . . . .	506
22.30	Exercices . . . . .	506
<b>Chapitre 23 – Amorçage et autoconfiguration (BOOTP, DHCP)</b> . . . . .		<b>509</b>
23.1	Introduction . . . . .	509
23.2	Nécessité d'une alternative à RARP . . . . .	510
23.3	Utiliser IP pour déterminer une adresse IP . . . . .	511
23.4	La stratégie de retransmission de BOOTP . . . . .	512
23.5	Format des messages BOOTP . . . . .	512
23.6	La procédure de démarrage en deux temps . . . . .	514
23.7	La zone réservée aux constructeurs . . . . .	515
23.8	Nécessité d'une configuration dynamique . . . . .	516
23.9	Configuration dynamique . . . . .	516
23.10	Affectation dynamique d'adresses IP . . . . .	517
23.11	Obtenir plusieurs adresses . . . . .	518
23.12	États d'acquisition des adresses . . . . .	519
23.13	Résiliation anticipée . . . . .	520
23.14	Renouvellement de bail . . . . .	521
23.15	Format des messages DHCP . . . . .	522
23.16	Options DHCP et types de messages . . . . .	523
23.17	Surcharge d'option . . . . .	524
23.18	DHCP et les noms de domaine . . . . .	524
23.19	Résumé . . . . .	525
23.20	Pour en savoir plus . . . . .	526
23.21	Exercices . . . . .	526
<b>Chapitre 24 – Le système de noms de domaine (DNS)</b> . . . . .		<b>529</b>
24.1	Introduction . . . . .	529
24.2	Des noms de machines . . . . .	529
24.3	Un espace de noms « à plat » . . . . .	530
24.4	Les noms hiérarchiques . . . . .	531



24.5	Délégation d'autorité pour le choix des noms	532
24.6	Responsabilité d'un sous-domaine	533
24.7	Noms de domaine des internets TCP/IP	534
24.8	Noms de domaines officiels et officieux d'Internet	535
24.9	Éléments nommés et syntaxe des noms	538
24.10	Résolution des noms en adresses	539
24.11	Résolution des noms de domaine	541
24.12	Traduction efficace	542
24.13	Utilisation de caches : la clé de l'efficacité	542
24.14	Format des messages du serveur de noms de domaine	544
24.15	Structure des noms condensés	547
24.16	Abréviation des noms de domaine	547
24.17	Résolution inverse	549
24.18	Demandes de références	549
24.19	Types d'objets et enregistrements de ressources	550
24.20	Obtenir la responsabilité d'un sous-domaine	551
24.21	Résumé	552
24.22	Pour en savoir plus	552
24.23	Exercices	553
<b>Chapitre 25 – Applications : la connexion à distance (TELNET, rlogin)</b>		<b>555</b>
25.1	Introduction	555
25.2	Traitement informatique à distance	555
25.3	Le protocole Telnet	557
25.4	Prendre en compte l'hétérogénéité	559
25.5	Transmission des fonctions de contrôle au site distant	561
25.6	Obliger un serveur à lire une fonction de contrôle	563
25.7	Les options de TELNET	563
25.8	Négociation des options de TELNET	565
25.9	rlogin (Unix BSD)	565
25.10	Résumé	567
25.11	Pour en savoir plus	567
25.12	Exercices	567
<b>Chapitre 26 – Applications : accès et transfert de fichiers (FTP, TFTP, NFS)</b>		<b>569</b>
26.1	Introduction	569
26.2	Accès et transfert de fichiers	569

26.3	Accès partagé en ligne . . . . .	570
26.4	Le partage par transfert de fichiers . . . . .	571
26.5	FTP : principal protocole de transfert de fichiers de TCP/IP . . . . .	572
26.6	Caractéristiques du protocole FTP . . . . .	572
26.7	Modèle de traitement de FTP . . . . .	573
26.8	Allocation des numéros de port TCP . . . . .	574
26.9	FTP du point de vue de l'utilisateur . . . . .	575
26.10	Un exemple de session FTP anonyme . . . . .	577
26.11	TFTP : protocole simple de transfert de fichiers . . . . .	578
26.12	NFS : système de fichiers en réseau . . . . .	581
26.13	Mise en œuvre de NFS . . . . .	581
26.14	Appel de procédure distante (RPC) et représentation de données (XDR) . . . . .	581
26.15	Résumé . . . . .	583
26.16	Pour en savoir plus . . . . .	584
26.17	Exercices . . . . .	584
<b>Chapitre 27 – Applications : le courrier électronique (SMTP, POP, IMAP, MIME)</b> . . . . .		<b>587</b>
27.1	Introduction . . . . .	587
27.2	Le courrier électronique . . . . .	587
27.3	Noms de boîtes aux lettres et alias . . . . .	589
27.4	Expansion des alias et réexpédition du courrier . . . . .	589
27.5	Relations entre l'interconnexion des réseaux et le courrier . . . . .	591
27.6	Les standards du service de courrier électronique de TCP/IP . . . . .	593
27.7	Adresses électroniques . . . . .	594
27.8	Adresses de pseudo-domaines . . . . .	595
27.9	SMTP : protocole simple de transfert de messages . . . . .	596
27.10	Protocoles de récupération de courrier . . . . .	598
	27.10.1 <i>Post Office Protocol (POP3)</i> . . . . .	599
	27.10.2 <i>Internet Message Access Protocol (IMAP4)</i> . . . . .	599
27.11	MIME : Extension au courrier électronique pour les données non ASCII . . . . .	600
27.12	Messages MIME multiples . . . . .	601
27.13	Résumé . . . . .	602
27.14	Pour en savoir plus . . . . .	603
27.15	Exercices . . . . .	603

32.5	Sécurité IP (IPsec)	668
32.6	L'en-tête d'authentification IPsec	668
32.7	L'association de sécurité	670
32.8	Encapsulation des informations de sécurité IPsec	670
32.9	En-têtes d'authentification et en-têtes mouvants	671
32.10	Tunnels IPsec	672
32.11	Algorithmes de sécurité exigés	672
32.12	Sockets sûrs	673
32.13	Garde-barrière et accès à un internet	673
32.14	Connexions multiples et maillons les plus faibles	673
32.15	Implémentation d'un garde-barrière et matériel haute vitesse	674
32.16	Filtres au niveau paquet	674
32.17	Sécurité et spécification de filtrage de paquets	676
32.18	Conséquences de la restriction des accès pour les clients	677
32.19	Accéder à des services à travers un garde-barrière	677
32.20	Les détails d'une architecture de garde-barrière	678
32.21	Réseau souche	679
32.22	Autre implémentation d'un garde-barrière	680
32.23	Monitoring et connexions	681
32.24	Résumé	682
32.25	Pour en savoir plus	682
32.26	Exercices	683
<b>Chapitre 33 – L'évolution de TCP/IP (IPv6)</b>		<b>685</b>
33.1	Introduction	685
33.2	Pourquoi modifier TCP/IP et Internet ?	686
33.3	Nouvelles politiques	686
33.4	Les raisons de changer IPv4	686
33.5	Vers une nouvelle version d'IP	687
33.6	Nom du futur IP	688
33.7	Caractéristiques d'IPv6	688
33.8	Forme générale d'un datagramme IPv6	689
33.9	Format de l'en-tête de base IPv6	690
33.10	En-têtes d'extension	692
33.11	Analyse d'un datagramme IPv6	692
33.12	Fragmentation et réassemblage IPv6	693
33.13	Conséquence de la fragmentation de bout en bout	694

33.14 Routage de la source IPv6 . . . . .	695
33.15 Options d'IPv6 . . . . .	695
33.16 Taille de l'espace d'adressage d'IPv6 . . . . .	697
33.17 Notation hexadécimale pointée IPv6 . . . . .	697
33.18 Trois types d'adresses IPv6 de base . . . . .	698
33.19 Diffusion <i>vs</i> multipoint . . . . .	699
33.20 Choix d'implémentation et diffusion simulée . . . . .	700
33.21 Affectation de l'espace d'adressage IPv6 . . . . .	700
33.22 Codage des adresses IPv4 et transition . . . . .	701
33.23 Adresse non spécifiée et adresse de rebouclage . . . . .	702
33.24 Hiérarchie des adresses point à point . . . . .	703
33.25 Structure d'adresse point à point globale agrégeable . . . . .	704
33.26 Identificateurs d'interface . . . . .	705
33.27 Hiérarchie supplémentaire . . . . .	706
33.28 Adresses locales . . . . .	706
33.29 Autoconfiguration et renumérotation . . . . .	707
33.30 Résumé . . . . .	707
33.31 Pour en savoir plus . . . . .	708
33.32 Exercices . . . . .	708
<b>A – Guide thématique des RFC . . . . .</b>	<b>711</b>
A.1 Introduction . . . . .	711
A.2 Importance des RFC caractéristiques des hôtes et des passerelles . . . . .	712
A.3 Des RFC et des chiffres . . . . .	713
A.4 Comment obtenir un RFC par Internet ? . . . . .	713
A.5 Naviguer parmi les RFC . . . . .	714
A.6 Classement des RFC par thèmes . . . . .	714
<b>B – Glossaire des termes et abréviations . . . . .</b>	<b>775</b>
B.1 Terminologie TCP/IP . . . . .	775
B.2 Glossaire des termes et abréviations par ordre alphabétique . . . . .	776
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>813</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>823</b>