

Table des matières

Préface	XIII
Nouveautés de la sixième édition	XIII
Documents et fichiers complémentaires	XV
Liste d'acronymes	XVI
Remerciements	XVI
Remerciements pour la version française	XVII
1. Introduction	1
1.1 Usages des réseaux d'ordinateurs	1
1.1.1 Accès à l'information	2
1.1.2 Communications interpersonnelles	5
1.1.3 Commerce électronique	6
1.1.4 Loisirs et divertissements	6
1.1.5 L'Internet des objets (IdO, IoT)	7
1.2 Types de réseaux informatiques	8
1.2.1 Réseaux d'accès à haut débit	8
1.2.2 Réseaux d'accès sans fil et mobilité	9
1.2.3 Réseaux de fournisseurs de contenus (CDN)	12
1.2.4 Réseaux de transit	13
1.2.5 Réseaux d'entreprise	14
1.3 Technologies réseau locales et globales	15
1.3.1 Réseaux personnels (PAN)	15
1.3.2 Réseaux locaux (LAN)	16
1.3.3 Réseaux locaux domestiques	19
1.3.4 Réseaux métropolitains (MAN)	21
1.3.5 Réseaux étendus (WAN)	22
1.3.6 Interréseaux	26
1.4 Exemples de réseaux	27
1.4.1 L'Internet	27
1.4.2 Réseaux de téléphonie mobile	39
1.4.3 Réseaux locaux sans fil : WiFi 802.11	44

1.5	Protocoles réseau	48
1.5.1	Objectifs de conception	48
1.5.2	Hiérarchie de protocoles.	51
1.5.3	Connexion et fiabilité	55
1.5.4	Primitives de service.	58
1.5.5	Relations des services aux protocoles.	60
1.6	Modèles de référence.	61
1.6.1	Le modèle de référence OSI	61
1.6.2	Le modèle de référence TCP/IP	63
1.6.3	Critique du modèle et des protocoles OSI	66
1.6.4	Critique du modèle de référence TCP/IP.	68
1.6.5	Le modèle utilisé dans ce livre.	69
1.7	Standardisation	70
1.7.1	Standardisation et open source	70
1.7.2	Le Who's Who des télécommunications	71
1.7.3	Le Who's Who de la normalisation internationale	73
1.7.4	Le Who's Who des standards de l'Internet	75
1.8	Aspects juridiques, légaux et sociaux.	77
1.8.1	Liberté d'expression en ligne	77
1.8.2	Neutralité du Net.	78
1.8.3	Sécurité	79
1.8.4	Vie privée	80
1.8.5	Désinformation et infox.	82
1.9	Système métrique	82
1.10	Aperçu de la suite de cet ouvrage	83
	Résumé	85
	Exercices.	87
2.	La couche physique	93
2.1	Supports de transmission guidés : la transmission filaire.	94
2.1.1	Supports magnétiques.	94
2.1.2	Paire torsadée.	95
2.1.3	Câble coaxial	97
2.1.4	Courant porteur en ligne	98
2.1.5	Fibre optique.	99
2.2	Supports de transmission non guidés : la transmission sans fil.	105
2.2.1	Le spectre électromagnétique	106
2.2.2	Étalement de spectre par saut de fréquence (FHSS).	108
2.2.3	Étalement de spectre par séquence directe (DSSS)	108
2.2.4	Communication en bande ultra-large (UWB)	109

2.3	Exploitation du spectre.	110
2.3.1	Transmission radioélectrique	110
2.3.2	Transmission de micro-ondes	112
2.3.3	Transmission d'ondes infrarouges	113
2.3.4	Transmission d'ondes lumineuses	114
2.4	Des ondes aux bits	115
2.4.1	Bases théoriques de la transmission de données	115
2.4.2	Débit binaire maximal d'un canal de transmission	119
2.4.3	Modulation numérique	121
2.4.4	Multiplexage	129
2.5	Le réseau téléphonique commuté	137
2.5.1	Structure du réseau téléphonique	138
2.5.2	Boucle locale : modems, ADSL et fibre	141
2.5.3	Artères interurbaines et multiplexage	150
2.5.4	Commutation	157
2.6	Réseaux de téléphonie mobile/cellulaire	163
2.6.1	Concepts fondamentaux : cellules, relais et <i>paging</i>	163
2.6.2	Réseaux sans fil 1G : voix analogique	165
2.6.3	Réseaux mobiles 2G : voix numérique	167
2.6.4	GSM (<i>Global System for Mobiles</i>)	168
2.6.5	Réseaux mobiles 3G : voix et données numériques	172
2.6.6	Réseau 4G à commutation de paquets	176
2.6.7	Réseau 5G	178
2.7	Réseaux de télévision câblée	179
2.7.1	Système avec antenne collective (CATV)	179
2.7.2	Réseaux d'accès hybrides : coaxial-fibre (HFC)	180
2.7.3	DOCSIS	183
2.7.4	Partage de ressources DOCSIS : nœuds et minislots	184
2.8	Satellites de télécommunications	186
2.8.1	Satellites géostationnaires (GEO)	187
2.8.2	Satellites à orbite moyenne (MEO)	192
2.8.3	Satellites à orbite basse (LEO)	192
2.9	Comparaison entre réseaux d'accès	195
2.9.1	Accès réseau terrestres : câble, fibre et ADSL	195
2.9.2	Satellites <i>versus</i> réseaux terrestres	196
2.10	Réglementation et couches physiques	198
2.10.1	Politiques d'exploitation du spectre électromagnétique	198
2.10.2	Politiques relatives aux réseaux cellulaires	202
2.10.3	Avenir du système téléphonique RTC	203
	Résumé	206
	Exercices	208

3. La couche liaison de données	215
3.1 Fonctions de la couche liaison de données	215
3.1.1 Services fournis à la couche réseau	216
3.1.2 Trame	219
3.1.3 Contrôle d'erreurs	223
3.1.4 Contrôle de flux	224
3.2 Détection et correction d'erreurs	224
3.2.1 Codes de correction d'erreurs	226
3.2.2 Codes de détection d'erreurs	232
3.3 Protocoles de liaison de données élémentaires	238
3.3.1 Hypothèses de simplification	238
3.3.2 Émission et réception élémentaires	239
3.3.3 Protocole simplex utopique	243
3.4 Augmentation de l'efficacité	251
3.4.1 Transmission bidirectionnelle, plusieurs trames en route	251
3.4.2 Protocoles full-duplex à fenêtre d'anticipation	254
3.4.3 Protocole à rejet sélectif	263
3.5 Exemples de protocoles pour la couche liaison	269
3.5.1 Paquets sur SONET	269
3.5.2 ADSL (<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>)	273
3.5.3 DOCSIS (transfert de données sur câble TV)	276
Résumé	278
Exercices	279
4. La sous-couche MAC de contrôle d'accès au canal	285
4.1 Le problème d'allocation du canal	286
4.1.1 Allocation statique d'un canal	286
4.1.2 Hypothèses pour l'allocation dynamique d'un canal	288
4.2 Protocoles de gestion d'accès multiples	290
4.2.1 ALOHA	290
4.2.2 Protocoles d'accès par écoute de porteuse (CSMA)	294
4.2.3 Protocoles sans collision	298
4.2.4 Protocoles à contention limitée	303
4.2.5 Protocoles de LAN sans fil	306
4.3 Ethernet	310
4.3.1 Couche physique de l'Ethernet classique	310
4.3.2 Protocole de sous-couche MAC de l'Ethernet classique	312
4.3.3 Performances d'Ethernet	316
4.3.4 Ethernet commuté	318
4.3.5 Fast Ethernet	321
4.3.6 Gigabit Ethernet	323
4.3.7 Ethernet 10 Gbit/s	327
4.3.8 Ethernet 40 Gbit/s et 100 Gbit/s	329
4.3.9 Rétrospective d'Ethernet	330

4.4	LAN sans fil (WLAN et Wi-Fi)	331
4.4.1	Architecture et pile de protocoles de 802.11	331
4.4.2	Couche physique de 802.11	333
4.4.3	Protocole de la sous-couche MAC de 802.11	336
4.4.4	Structure d'une trame de 802.11	344
4.4.5	Services associés aux LAN sans fil	345
4.5	Bluetooth	348
4.5.1	Architecture de Bluetooth	348
4.5.2	Applications de Bluetooth	349
4.5.3	Pile de protocoles de Bluetooth	351
4.5.4	Couche radio Bluetooth	352
4.5.5	Couches de liaison Bluetooth	352
4.5.6	Structure d'une trame Bluetooth	354
4.5.7	Bluetooth 5	355
4.6	DOCSIS	356
4.6.1	Présentation générale	356
4.6.2	Gestion de portée (<i>ranging</i>)	357
4.6.3	Affectation de bande passante de canal	357
4.7	Commutation au niveau liaison de données	358
4.7.1	Utilisations des ponts	359
4.7.2	Ponts d'apprentissage	360
4.7.3	Arbre recouvrant	364
4.7.4	Répéteurs, passerelles, hubs, routeurs, commutateurs et ponts	366
4.7.5	LAN virtuels (VLAN)	369
	Résumé	375
	Exercices	378
5.	La couche réseau	385
5.1	Aspects de conception de la couche réseau	386
5.1.1	Commutation de paquets en mode différé (<i>store-and-forward</i>)	386
5.1.2	Services fournis à la couche transport	387
5.1.3	Implémentation d'un service sans connexion	388
5.1.4	Implémentation d'un service avec connexion	390
5.1.5	Réseau de datagrammes <i>ou</i> réseau de circuits virtuels	391
5.2	Algorithmes de routage locaux	393
5.2.1	Principe d'optimalité	395
5.2.2	Algorithme du plus court chemin	396
5.2.3	Routage par inondation	399
5.2.4	Routage par vecteur de distance	401
5.2.5	Routage par informations d'état de lien	404
5.2.6	Routage hiérarchique	410
5.2.7	Routage broadcast	412
5.2.8	Routage multicast	414
5.2.9	Routage anycast	417

5.3	Gestion du trafic dans la couche réseau	419
5.3.1	Gestion de la congestion	419
5.3.2	Techniques de gestion de trafic	422
5.4	Qualité de service	437
5.4.1	Exigences de qualité des applications	437
5.4.2	Surapprovisionnement	439
5.4.3	Ordonnancement des paquets	440
5.4.4	Services intégrés	448
5.4.5	Services différenciés	451
5.5	Interconnexion de réseaux	454
5.5.1	Concept d'interréseau	454
5.5.2	Différences entre les réseaux	455
5.5.3	Équipements d'interconnexion hétérogènes	456
5.5.4	Connexion par tunnel sur réseaux hétérogènes	459
5.5.5	Routage interréseau	461
5.5.6	Fragmentation et taille des paquets	462
5.6	Contrôle de réseau par logiciel (SDN)	466
5.6.1	Présentation générale	466
5.6.2	Plan de contrôle SDN : un contrôle centralisé	468
5.6.3	Plan de données SDN : des matériels programmables	469
5.6.4	Télémetrie réseau programmable	472
5.7	Couche réseau dans Internet	473
5.7.1	Protocole IPv4	475
5.7.2	Adresses IP	479
5.7.3	IPv6	493
5.7.4	Protocoles de contrôle Internet	503
5.7.5	Commutation par étiquettes et MPLS	509
5.7.6	Protocole OSPF	512
5.7.7	Protocole BGP	518
5.7.8	Diffusion multicast sur Internet	525
5.8	Réglementation de la couche réseau	526
5.8.1	Conflits d'appairage	526
5.8.2	Priorités d'utilisation du trafic	527
	Résumé	528
	Exercices	530

6. La couche transport	537
6.1 Service de transport	537
6.1.1 Services fournis aux couches supérieures	537
6.1.2 Primitives du service de transport	539
6.1.3 Sockets de Berkeley	542
6.1.4 Exemple de programmation de socket : un serveur de fichiers Internet.	545
6.2 Éléments de protocoles de transport	549
6.2.1 Adressage	550
6.2.2 Établissement d'une connexion.	553
6.2.3 Libération d'une connexion.	559
6.2.4 Contrôle de flux et d'erreur	564
6.2.5 Multiplexage	569
6.2.6 Reprise après incident.	570
6.3 Contrôle de congestion.	573
6.3.1 Allocation de bande passante souhaitable	573
6.3.2 Régulation du taux d'envoi	578
6.3.3 Particularités des réseaux sans fil	582
6.4 Protocole de transport Internet : UDP.	584
6.4.1 Introduction à UDP	584
6.4.2 RPC : appel de procédure à distance	586
6.4.3 Protocoles de transport en temps réel : RTP et RTCP.	589
6.5 Protocole de transport Internet : TCP	595
6.5.1 Introduction à TCP	595
6.5.2 Modèle de service TCP	596
6.5.3 Protocole TCP	599
6.5.4 En-tête du segment TCP.	600
6.5.5 Établissement d'une connexion TCP	604
6.5.6 Libération de la connexion TCP	606
6.5.7 Gestion de la connexion TCP	606
6.5.8 Fenêtre de TCP	609
6.5.9 Gestion du temporisateur TCP	613
6.5.10 Contrôle de gestion TCP	616
6.5.11 TCP Cubic	627
6.6 Protocole de transport et gestion de congestion.	628
6.6.1 QUIC (<i>Quick UDP Internet Connections</i>)	628
6.6.2 BBR : contrôle de congestion et débit de sténose	629
6.6.3 Quel avenir pour TCP ?	631

6.7	Performances des réseaux	632
6.7.1	Problèmes de performances.	632
6.7.2	Mesure des performances d'un réseau	633
6.7.3	Mesure du débit des réseaux d'accès	634
6.7.4	Mesure de la qualité d'expérience utilisateur QoE	635
6.7.5	Conception d'hôtes pour des réseaux à haut débit.	636
6.7.6	Traitement rapide des segments	639
6.7.7	Compression d'en-tête	643
6.7.8	Protocoles des réseaux longs à haut débit	645
	Résumé	649
	Exercices	651

7. La couche application. 657

7.1	DNS	657
7.1.1	Historique et aperçu	658
7.1.2	Processus de résolution du DNS	658
7.1.3	Espace de noms hiérarchique du système DNS	661
7.1.4	Requêtes et réponses DNS	665
7.1.5	Résolution de nom.	672
7.1.6	Le DNS en pratique	673
7.1.7	DNS et confidentialité.	674
7.1.8	Cybersquattage	676
7.2	Messagerie électronique	677
7.2.1	Architecture et services	678
7.2.2	Agent utilisateur	680
7.2.3	Formats de messages.	682
7.2.4	Transfert de messages	688
7.2.5	Remise finale	693
7.3	Le Web (<i>World Wide Web</i>)	696
7.3.1	Présentation de l'architecture	697
7.3.2	Pages Web statiques	706
7.3.3	Pages Web dynamiques et applications Web	707
7.3.4	HTTP et HTTPS	711
7.3.5	Web et vie privée	724
7.4	Streaming audio et vidéo	728
7.4.1	Principe de l'audio numérique	730
7.4.2	Principes de la vidéo numérique.	733
7.4.3	Streaming de données enregistrées	736
7.4.4	Streaming en temps réel (direct)	744
7.5	Distribution de contenus	754
7.5.1	Contenu et trafic internet	756
7.5.2	Fermes de serveurs et serveurs Web mandataires	758
7.5.3	Réseaux de distribution de contenu	762
7.5.4	Réseaux P2P	767
7.5.5	Évolution d'Internet	773
	Résumé	776
	Exercices	778

8. Sécurité des réseaux	783
8.1 Fondamentaux de la sécurité réseau	785
8.1.1 Principes fondamentaux de sécurité	787
8.1.2 Fondamentaux des stratégies d'attaque	789
8.1.3 Des menaces aux solutions	790
8.2 Ingrédients principaux d'une attaque	792
8.2.1 Reconnaissance/repérage	792
8.2.2 Reniflage et furetage (<i>sniffing</i> et <i>snooping</i>)	794
8.2.3 Usurpations autres que ARP (<i>spoofing</i>)	796
8.2.4 Perturbations et dommages	809
8.3 Pare-feu et systèmes de détection d'intrusion (IDS)	813
8.3.1 Pare-feu	813
8.3.2 Détection et prévention d'intrusion (IDS)	816
8.4 Cryptographie	820
8.4.1 Introduction à la cryptographie	821
8.4.2 Les deux principes fondamentaux de la cryptographie	824
8.4.3 Chiffres par substitution	826
8.4.4 Chiffres par transposition	827
8.4.5 Masques jetables (<i>one-time pad</i>)	829
8.5 Algorithmes à clé symétrique	834
8.5.1 DES : le standard de chiffrement de données	835
8.5.2 AES (<i>Advanced Encryption Standard</i>)	836
8.5.3 Modes de chiffrement	838
8.6 Algorithmes à clé publique	842
8.6.1 RSA	844
8.6.2 Autres algorithmes à clé publique	846
8.7 Signatures numériques	847
8.7.1 Signatures à clé symétrique	847
8.7.2 Signatures à clé publique	849
8.7.3 Condensats de messages	851
8.7.4 Attaque de l'anniversaire	853
8.8 Gestion des clés publiques	855
8.8.1 Certificats	856
8.8.2 X.509	858
8.8.3 Infrastructures à clés publiques	859
8.9 Protocoles d'authentification	862
8.9.1 Authentification fondée sur une clé secrète partagée	863
8.9.2 Clé partagée : l'échange de clés de Diffie-Hellman	868
8.9.3 Authentification par centre de distribution de clés	870
8.9.4 Authentification par Kerberos	873
8.9.5 Authentification par cryptographie à clé publique	876

8.10	Sécurité des communications	877
8.10.1	IPsec	877
8.10.2	Réseaux privés virtuels	881
8.10.3	Sécurité des réseaux sans fil	883
8.11	Sécurité du courrier électronique	887
8.11.1	PGP (<i>Pretty Good Privacy</i>)	887
8.11.2	S/MIME	892
8.12	Sécurité du Web	892
8.12.1	Menaces	892
8.12.2	Sécurité du nommage et DNSSEC	893
8.12.3	SSL / TLS	897
8.12.4	Exécution de code non garanti	901
8.13	Problèmes sociaux	903
8.13.1	Vie privée	903
8.13.2	Liberté d'expression	907
8.13.3	Copyright	910
	Résumé	913
	Exercices	916
	Bibliographie	925
	Index	927