

Les exemples à télécharger sont disponibles à l'adresse suivante :
<http://www.editions-eni.fr>
Saisissez la référence ENI de l'ouvrage **RIHS-10RES** dans la zone de recherche
et validez. Cliquez sur le titre du livre puis sur le bouton de téléchargement.

Avant-propos

Chapitre 1

Présentation des concepts réseau

1. Historique	19
1.1 Débuts de l'informatique réseau	19
1.1.1 L'informatique centralisée	19
1.1.2 Le premier réseau informatique à grande échelle	21
1.1.3 Le développement d'une norme de fait : TCP/IP	23
1.1.4 L'informatique répartie.	25
1.2 Réseaux hétérogènes.	27
1.3 Réseaux informatiques actuels	28
1.4 Rencontre avec les réseaux informatiques	29
2. Principaux éléments d'un réseau	36
2.1 Client/serveur	37
2.1.1 Principes	37
2.1.2 Définitions	37
2.1.3 Le système d'exploitation réseau	45
2.2 Point de vue matériel	59
2.2.1 L'interconnexion.	59
2.2.2 Les protocoles de communication	59
3. Technologie des réseaux.	59
3.1 Définition d'un réseau informatique	59
3.2 Topologies de réseaux informatiques	60
3.2.1 Le réseau personnel.	60
3.2.2 Le réseau local	60

2 Réseaux informatiques

Notions fondamentales

3.2.3	Le réseau métropolitain	61
3.2.4	Le réseau étendu	61
3.3	Partage des ressources.	61
3.3.1	Les services de fichiers	62
3.3.2	Les services de gestion électronique de documents	66
3.3.3	Les services de base de données	67
3.3.4	Les services d'impression	70
3.3.5	Les services de messagerie et de travail collaboratif	71
3.3.6	Les services d'application	73
3.3.7	Les services de stockage	74
3.3.8	Les services de sauvegarde	94
3.3.9	Les protocoles de réplication entre baies.	98
3.3.10	WAAS et compression de flux.	100
3.4	Virtualisation	103
3.4.1	Introduction	103
3.4.2	Quelques notions de virtualisation	103
3.4.3	Solutions de virtualisation types.	107
3.4.4	Synthèse des technologies de virtualisation	110
3.4.5	Desktop as a Service.	113
3.5	Cloud computing	118
4.	Plan de continuité d'activité.	121
4.1	Disponibilité	121
4.1.1	La fiabilisation lors du stockage.	121
4.1.2	La fiabilisation des échanges	124
4.2	Confidentialité	125
4.2.1	La sécurisation du système de fichiers	125
4.2.2	La sécurisation des échanges	127
4.3	Redondance des données	128
4.3.1	La tolérance de pannes	128
4.3.2	Le miroir de disques	133
4.3.3	Le miroir de contrôleurs et de disques.	135
4.3.4	Les agrégats par bandes avec parité.	136
4.3.5	La neutralisation des secteurs défectueux.	139

4.4	Solutions de redondance serveur	139
4.4.1	La tolérance de pannes	140
4.4.2	La répartition de charge réseau	143
4.4.3	La configuration des cartes réseau en teaming	144
4.4.4	La virtualisation comme solution à part entière	146
4.5	Stratégie de sauvegardes	147
4.5.1	La sauvegarde complète	148
4.5.2	La sauvegarde incrémentale	148
4.5.3	La sauvegarde différentielle	148
4.5.4	Sanctuarisation des sauvegardes	149
4.5.5	Sauvegardes immuables	150
4.6	Continuité et reprise d'activité en cas de sinistre	150
4.6.1	Les principes	150
4.6.2	Le plan de continuité d'activité (PCA)	151
4.6.3	Le plan de reprise d'activité (PRA)	152

Chapitre 2

Normalisation des protocoles

1.	Modèle OSI	153
1.1	Principes	154
1.2	Communication entre couches	155
1.3	Encapsulation et modèle OSI	157
1.4	Protocoles	163
1.5	Rôle des différentes couches	164
1.5.1	La couche Physique	164
1.5.2	La couche Liaison (ou Liaison de données)	164
1.5.3	La couche Réseau	165
1.5.4	La couche Transport	166
1.5.5	La couche Session	166
1.5.6	La couche Présentation	167
1.5.7	La couche Application	167

4 Réseaux informatiques

Notions fondamentales

2. Approche pragmatique du modèle en couches	168
2.1 Niveau 1 - couche Physique	168
2.2 Niveau 2 - couche Liaison de données	169
2.3 Niveau 3 - couche Réseau	172
2.3.1 Les principes	172
2.3.2 L'adressage logique	172
2.3.3 La sortie du réseau logique	174
2.3.4 La transmission du datagramme sur l'interréseau	176
2.3.5 L'aiguillage du datagramme sur le routeur	179
2.4 Niveau 4 - couche Transport	181
2.4.1 Le mode connecté TCP	181
2.4.2 Le mode non connecté UDP	183
2.5 Niveau 5 et supérieurs	183
3. Normes et organismes	184
3.1 Types de normes	184
3.2 Quelques organismes de normalisation pour le réseau	184
3.2.1 American National Standards Institute (ANSI)	184
3.2.2 Union internationale des télécommunications (UIT)	186
3.2.3 Electronic Component Industry Association (ecia)	187
3.2.4 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)	188
3.2.5 ISO	190
3.2.6 Internet Engineering Task Force (IETF)	190

Chapitre 3

Transmission des données couche physique

1. Rôle d'une interface réseau	191
1.1 Principes	191
1.2 Préparation des données	192
2. Options et paramètres de configuration	193
2.1 Adresse physique	193
2.2 Interruption	197
2.3 Adresse d'entrée/sortie	198

2.4	Adresse de mémoire de base	198
2.5	Canal DMA (Direct Memory Access)	198
2.6	Bus	198
2.6.1	Le bus PCI (Peripheral Component Interconnect)	200
2.6.2	Le bus USB	203
2.7	Connecteurs de câble réseau	207
2.7.1	Le connecteur RJ45	207
2.7.2	Le connecteur BNC	208
2.7.3	Les connecteurs fibre optique	209
2.7.4	Les connecteurs hybrides	211
2.8	Débits	212
2.9	Autres interfaces réseau	212
3.	Amorçage à partir du réseau	213
3.1	Principes	213
3.2	Protocoles	214
3.2.1	La liaison entre adresses physique et logique	214
3.2.2	Le protocole BOOTP	215
3.2.3	Le protocole DHCP	215
3.2.4	PXE	216
3.2.5	Wake-On-LAN : WOL	218
4.	Codage des données	222
4.1	Types de données et signaux	222
4.1.1	Le signal analogique	222
4.1.2	Le signal numérique	223
4.1.3	Les utilisations	224
4.2	Codage des données	224
4.2.1	Le codage des données numériques en signaux analogiques	224
4.2.2	Le codage des données numériques en signaux numériques	226
4.2.3	Les codages en ligne	226
4.2.4	Les codages complets	229

6 Réseaux informatiques

Notions fondamentales

4.3	Multiplexage de signaux	229
4.3.1	Le système bande de base	229
4.3.2	Le système large bande	230
4.3.3	Le multiplexage	230
5.	Conversion des signaux	232
5.1	Définitions	232
5.2	Modem	233
5.3	Codec	234
6.	Supports de transmission	235
6.1	Supports limités	235
6.1.1	La paire torsadée	236
6.1.2	Le câble coaxial	243
6.1.3	La fibre optique	246
6.1.4	Les critères de choix des différents médias	250
6.1.5	La Boucle Locale Optique Mutualisée	251
6.1.6	Les câbles sous-marins intercontinentaux	254
6.2	Supports non limités	255
6.2.1	L'infrarouge	256
6.2.2	Le laser	256
6.2.3	Les ondes radio terrestres	256
6.2.4	Les ondes radio par satellites	258
6.2.5	L'orbite terrestre basse	259
6.2.6	Les ondes radio suivant les fréquences	262

Chapitre 4

Éléments logiciels de communication

1.	Configuration de la carte réseau	267
1.1	Configuration matérielle	268
1.2	Configuration logicielle	268
1.3	Spécifications NDIS et ODI	271

2. Installation et configuration du pilote de carte réseau	273
2.1 Principes	273
2.2 Utilisation d'un outil fourni par le constructeur	274
2.3 Utilisation du système d'exploitation	275
2.3.1 Sous Windows	276
2.3.2 Sous Linux Red Hat	278
2.3.3 Sous macOS	283
2.3.4 Sur un smartphone Android	286
2.3.5 Tethering.	296
2.3.6 Sur un iPhone	306
3. Pile de protocoles	312
4. Détection d'un problème réseau	314
4.1 Connectique physique réseau	314
4.1.1 Le type de câble.	314
4.1.2 Le type de composants.	315
4.2 Configuration logicielle réseau	316

Chapitre 5 Architecture réseau et interconnexion

1. Topologies.	319
1.1 Principes	319
1.2 Topologies standards	319
1.2.1 Le bus.	319
1.2.2 L'étoile	320
1.2.3 L'anneau	321
1.2.4 L'arbre	322
1.2.5 Les topologies dérivées	322
1.2.6 Le cas des réseaux sans fil.	324
2. Choix de la topologie réseau adaptée	325

8 Réseaux informatiques

Notions fondamentales

3. Gestion de la communication	326
3.1 Sens de communication	326
3.1.1 Le mode simplex	326
3.1.2 Le mode half-duplex	327
3.1.3 Le mode full-duplex	327
3.2 Types de transmission	327
3.3 Méthodes d'accès au support	328
3.3.1 La contention	328
3.3.2 L'interrogation (polling)	330
3.3.3 Le jeton passant	330
3.4 Techniques de commutation	331
3.4.1 La commutation de circuits	331
3.4.2 La commutation de messages	332
3.4.3 La commutation de paquets	333
4. Interconnexion de réseaux	334
4.1 Principes	334
4.2 Composants d'interconnexion et modèle OSI	335
4.3 Description fonctionnelle des composants	336
4.3.1 Le répéteur	336
4.3.2 Le pont	338
4.3.3 Le commutateur	350
4.3.4 Le routeur	366
4.3.5 La passerelle	388
4.4 Choix des matériels de connexion appropriés	388
4.4.1 Le répéteur	389
4.4.2 Le pont	389
4.4.3 Le commutateur	389
4.4.4 Le routeur	390
4.4.5 La passerelle	390
4.5 Exemple de topologie réseau locale sécurisée	390

Chapitre 6

Couches basses des réseaux locaux

1. Couches basses et IEEE.....	393
1.1 Différenciation des couches.....	393
1.2 IEEE 802.1.....	394
1.3 IEEE 802.2.....	395
1.3.1 Les principes de Logical Link Control (LLC).....	395
1.3.2 Les types de service.....	396
2. Ethernet et IEEE 802.3.....	396
2.1 Généralités.....	396
2.2 Caractéristiques de couche physique.....	397
2.2.1 Les spécificités d'Ethernet.....	397
2.2.2 Les spécificités de Fast Ethernet.....	404
2.2.3 Le gigabit Ethernet.....	406
2.2.4 Le 10 gigabit Ethernet.....	407
2.2.5 Le 40/100 gigabit Ethernet.....	408
2.2.6 Récapitulatif.....	410
2.3 En-tête de trame Ethernet.....	411
2.4 Les cartes hybrides Ethernet/SAN.....	412
3. Token Ring et IEEE 802.5.....	414
3.1 Configuration du réseau.....	414
3.2 Autoreconfiguration de l'anneau.....	418
4. Wi-Fi et IEEE 802.11.....	419
4.1 Présentation.....	419
4.2 Normes de couche physique.....	420
4.2.1 802.11b.....	421
4.2.2 802.11a.....	422
4.2.3 802.11g.....	422
4.2.4 802.11n.....	422
4.2.5 802.11ac.....	423
4.2.6 802.11ad.....	425
4.2.7 802.11ah - Wi-Fi HaLow.....	427

10 Réseaux informatiques

Notions fondamentales

4.2.8	802.11ax - High Efficiency WLAN (HEW)	428
4.2.9	802.11be - Extremely High Throughput (EHT)	429
4.2.10	Normes et logos Wi-Fi	430
4.3	Matériels	432
4.3.1	La carte réseau	432
4.3.2	L'équipement d'infrastructure	432
4.3.3	Les périphériques Wi-Fi	434
4.4	Architecture	434
4.5	Sécurisation	435
4.5.1	Introduction	435
4.5.2	WEP	438
4.5.3	WPA/WPA 2	439
4.5.4	WPA 3	441
4.6	Usages	444
4.7	En-tête de trame Wi-Fi	445
5.	Bluetooth et IEEE 802.15	446
5.1	Historique	447
5.2	Standardisation	447
5.3	Réseau Bluetooth	451
5.4	Classes d'équipements	452
6.	Autres technologies	453
6.1	Autres standards de l'IEEE	453
6.1.1	802.16	454
6.1.2	802.17	454
6.1.3	802.18	455
6.1.4	802.19	455
6.1.5	802.21	455
6.1.6	802.22	455
6.1.7	802.24	456
6.2	Infrared Data Association (IrDA)	456
6.2.1	Le protocole IrDA DATA	457
6.2.2	Le protocole IrDA CONTROL	459

6.3	Courant porteur en ligne (CPL)	460
6.3.1	Les principes	460
6.3.2	Le fonctionnement	463
7.	L'univers des objets connectés, IoT	465
7.1	Introduction	465
7.2	Évolution des objets connectés	467
7.3	Accès aux objets connectés	469
7.4	Problèmes soulevés par les objets connectés	470

Chapitre 7

Protocoles des réseaux MAN et WAN

1.	Interconnexion du réseau local	473
1.1	Usages du réseau téléphonique	473
1.2	Réseau numérique à intégration de services (RNIS)	475
1.2.1	Les principes	475
1.2.2	Le rapport au modèle OSI	476
1.2.3	Les types d'accès disponibles	477
1.3	Ligne spécialisée (LS)	478
1.3.1	Les principes	478
1.3.2	Les débits	478
1.4	Techniques xDSL	479
1.4.1	Les principes	479
1.4.2	Les différents services	480
1.4.3	Les offres « quadruple play »	482
1.5	Câble public	484
1.6	Plan très haut débit en France (THD)	484
1.7	WiMAX	487
1.7.1	La boucle locale radio	487
1.7.2	La solution WiMAX	487
1.8	Réseaux cellulaires	489
1.8.1	Les principes	489
1.8.2	Les débuts	491

12 ————— Réseaux informatiques

Notions fondamentales

1.8.3	L'évolution vers le transport de données.	492
1.8.4	La troisième génération (3G) de téléphonie cellulaire . .	494
1.8.5	La quatrième génération (4G)	495
1.8.6	La cinquième génération (5G)	497
1.9	Fiber Distributed Data Interface (FDDI)	506
1.9.1	Les principes	506
1.9.2	La topologie.	506
1.9.3	Le fonctionnement	507
1.10	Asynchronous Transfer Mode (ATM)	509
1.10.1	Les principes	509
1.10.2	Le relais de cellule	509
1.10.3	La régulation du trafic	510
1.10.4	Les types de services	511
1.10.5	La topologie et les débits	511
1.11	Synchronous Optical Network (SONET) et Synchronous Digital Hierarchy (SDH).	512
1.11.1	L'historique	512
1.11.2	Les caractéristiques de SDH.	513
1.11.3	Les débits.	513
1.12	X.25	514
1.13	Relais de trame	516
1.14	MPLS	517
1.14.1	Origine.	517
1.14.2	Les principes	518
1.14.3	Le circuit virtuel et l'étiquetage	519
1.14.4	Le routage	519
2.	Accès distant et réseaux privés virtuels.	520
2.1	Utilisation et évolution	520
2.2	Protocole d'accès distant	521
2.3	Réseau privé virtuel	521
2.3.1	L'établissement de la connexion	521
2.3.2	L'authentification.	522
2.3.3	Le chiffrement.	523

Chapitre 8

Protocoles des couches moyennes et hautes

1. Principales familles de protocoles	525
1.1 IPX/SPX	525
1.1.1 L'historique	525
1.1.2 Les protocoles	526
1.2 NetBIOS	527
1.2.1 L'historique	527
1.2.2 Les principes	528
1.2.3 Les noms NetBIOS	529
1.3 TCP/IP	533
1.3.1 L'historique	533
1.3.2 La suite de protocoles	534
1.3.3 Le rapport au modèle OSI	535
1.3.4 L'adoption en entreprise	535
2. Protocole IP version 4	536
2.1 Principes	536
2.2 Adressage	536
2.2.1 L'adresse IPv4	536
2.2.2 Le masque	537
2.2.3 Les classes d'adresses	538
2.2.4 Les adresses privées	542
2.2.5 Les adresses APIPA	542
2.3 L'adressage sans classe	543
2.3.1 Les principes	543
2.3.2 La notation CIDR	544
2.3.3 Le rôle du masque en réseau	546
2.3.4 La décomposition en sous-réseaux	552
2.3.5 La factorisation des tables de routage	559
3. Protocole IP version 6	561
3.1 Introduction	561
3.2 Principes	562

14 Réseaux informatiques

Notions fondamentales

3.3	Structure d'une adresse IP	563
3.3.1	Catégories d'adresses	563
3.3.2	Portée d'une adresse	564
3.3.3	Adresse unicast	565
3.3.4	Formalisme	566
3.3.5	Identifiant EUI-64	568
3.3.6	Adresses réservées	570
3.3.7	Décomposition des plages par l'IETF	572
3.3.8	Découpage des catégories	575
3.3.9	Autoconfiguration des adresses IPv6	580
3.4	Tunnels	583
3.4.1	Introduction	583
3.4.2	Types de tunnels	584
3.5	Organismes d'attribution d'adresses	589
3.6	En-tête IPv6	591
4.	Autres protocoles de couche internet	592
4.1	Internet Control Message Protocol (ICMP)	592
4.2	Internet Group Management Protocol (IGMP)	595
4.3	Address Resolution Protocol (ARP) et Reverse Address Resolution Protocol (RARP)	596
4.4	Internet Protocol Security (IPsec)	597
4.5	Liste des numéros de protocoles de couche internet	598
5.	Voix sur IP (VoIP)	599
5.1	Principes	599
5.2	Quelques définitions importantes	599
5.3	Avantages	601
5.4	Fonctionnement	603
5.4.1	Le protocole H323	603
5.4.2	Les éléments terminaux	603
5.4.3	Les applications	604
6.	Protocoles de transport TCP et UDP	605
6.1	Transmission Control Protocol (TCP)	605
6.2	User Datagram Protocol (UDP)	606

7. Couche applicative TCP/IP	606
7.1 Services de messagerie	606
7.1.1 Simple Mail Transfer Protocol (SMTP)	606
7.1.2 Post Office Protocol 3 (POP3)	608
7.1.3 Internet Message Access Protocol (IMAP)	609
7.2 Services de transfert de fichiers	610
7.2.1 HyperText Transfer Protocol (HTTP)	610
7.2.2 File Transfer Protocol (FTP) et Trivial FTP (TFTP)	613
7.2.3 Network File System (NFS)	617
7.3 Services d'administration et de gestion réseau	620
7.3.1 Domain Name System (DNS)	620
7.3.2 Dynamic Host Configuration Protocol v.4 (DHCPv4) .	631
7.3.3 Telnet	645
7.3.4 Network Time Protocol (NTP)	646
7.3.5 Simple Network Management Protocol (SNMP)	649
7.4 Services d'authentification	658
7.4.1 Méthodes d'authentification	658
7.4.2 NTLM	659
7.4.3 Kerberos	662
7.4.4 SAML 2.0	669
7.4.5 OpenID Connect	670

Chapitre 9

Principes de sécurisation d'un réseau

1. Compréhension du besoin en sécurité	671
1.1 Garanties exigées	671
1.2 Dangers encourus	672
1.2.1 La circulation des données	672
1.2.2 Les protocoles Réseau et Transport	673
1.2.3 Les protocoles applicatifs standards	673
1.2.4 Les protocoles de couches basses	674
1.2.5 Le risque au niveau logiciel	674

16 Réseaux informatiques

Notions fondamentales

2. Outils et types d'attaques	675
2.1 Ingénierie sociale	675
2.2 Écoute réseau	684
2.3 Analyse des ports	685
2.4 Codes malveillants	687
2.5 Programmes furtifs	688
2.6 Ransomware	689
3. Notions de sécurisation sur le réseau local	690
3.1 Services de la sécurité	690
3.1.1 Le contrôle d'accès au système	690
3.1.2 La gestion des habilitations	691
3.1.3 L'intégrité	691
3.1.4 La non-répudiation	692
3.2 Authentification	692
3.2.1 L'identification	693
3.2.2 L'authentification par mot de passe	697
3.2.3 L'authentification avec support physique	698
3.2.4 L'authentification par caractéristique humaine	699
3.3 Confidentialité	700
3.3.1 Le chiffrement à clés symétriques	701
3.3.2 Le chiffrement à clés asymétriques	702
3.4 Protection des données utilisateur	705
3.4.1 Protection de l'amorçage du disque	707
3.4.2 Chiffrement des disques locaux	711
3.4.3 Chiffrement des disques USB	713
3.5 Outils d'investigation liés à la sécurité	715
3.5.1 Vérification d'URL	715
3.5.2 Vérification de pièce jointe	718
3.5.3 Obtention d'informations complémentaires	720
4. Sécurisation de l'interconnexion de réseaux	726
4.1 Routeur filtrant	727
4.2 Translateur d'adresse	727
4.3 Pare-feu	728

4.4 Proxy	729
4.5 Zone démilitarisée	730

Chapitre 10

Dépannage du réseau

1. Méthode d'approche	733
2. Exemples de diagnostic de couches basses	734
2.1 Matériels	735
2.1.1 Le testeur de câbles	735
2.1.2 Le réflectomètre	736
2.1.3 Le multimètre numérique	737
2.2 Analyse de trames	737
2.3 Autres problèmes avec Ethernet	739
2.3.1 L'unicité de l'adresse MAC	739
2.3.2 La configuration physique de la carte réseau	739
2.3.3 Les paramètres de communication	739
2.4 IPX et Ethernet	740
2.5 Autres problèmes liés à la fibre	740
3. Utilisation des outils TCP/IP adaptés	741
3.1 Principes	741
3.2 Exemples d'utilisation des outils	741
3.2.1 arp	741
3.2.2 Neighbor Discovery Table	744
3.2.3 ping	744
3.2.4 tracert/traceroute	746
3.2.5 ipconfig/ip address	748
3.2.6 netstat	751
3.2.7 Identification d'une adresse IP	753
3.2.8 Géolocalisation d'une adresse IP	754
3.2.9 nbtstat	754
3.2.10 nslookup	756

18 Réseaux informatiques

Notions fondamentales

4. Outils d'analyse des couches hautes	759
4.1 La boîte à outils sysinternals	759
4.2 Analyse de requêtes applicatives	766
4.3 Analyse de requêtes web	767

Annexes

1. Conversion du décimal (base 10) vers le binaire (base 2)	771
1.1 Vocabulaire utilisé	771
1.2 Conversion à partir de la base 10	772
2. Conversion du binaire (base 2) vers le décimal (base 10)	774
3. Conversion de l'hexadécimal (base 16) vers le décimal (base 10) . .	775
4. Conversion de l'hexadécimal (base 16) vers le binaire (base 2) . . .	777
5. Glossaire	778

Index	801
-----------------	-----

Chapitre 1 Introduction

1. Institutions et régulations : les piliers du développement de la norme Wi-Fi 7	13
1.1 L'importance croissante de la connectivité sans fil.	13
1.2 Les acteurs clés du développement des normes Wi-Fi	16
1.2.1 L'IEEE : le moteur de l'innovation des normes Wi-Fi	16
1.2.2 La Wi-Fi Alliance : garantir l'interopérabilité et la certification.	17
1.2.3 Les régulateurs mondiaux : gérer le spectre et les fréquences	18
1.2.4 L'IETF : les protocoles qui soutiennent le Wi-Fi.	19
2. Évolutions passées, limites présentes : comprendre le chemin vers la norme Wi-Fi 7	20
2.1 Rétrospective des normes Wi-Fi précédentes	20
2.1.1 Les premières générations : Wi-Fi 1 à Wi-Fi 4.	20
2.1.2 Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac) : le saut vers le gigabit théorique.	21
2.1.3 Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) : une première réponse aux environnements densément peuplés	21
2.1.4 Wi-Fi 6E : l'extension vers la bande 6 GHz	22
2.2 Limites des normes Wi-Fi précédentes	23
2.2.1 Une bande passante encore insuffisante.	23
2.2.2 Latence et applications en temps réel	23
2.2.3 Efficacité spectrale limitée par l'OFDMA	24
2.2.4 Gestion des environnements denses et de la congestion.	24
2.2.5 Interopérabilité et coexistence avec des appareils hérités	24
2.3 Pourquoi la norme Wi-Fi 7 était-elle nécessaire ?	25
2.3.1 Une augmentation drastique de la bande passante	25
2.3.2 L'amélioration de l'efficacité spectrale avec la modulation 4096-QAM	26
2.3.3 L'Opération Multi-Lien (MLO) : la clé de voûte de la norme Wi-Fi 7	26
2.3.4 Une latence optimisée pour les applications critiques	27

2 ————— La norme Wi-Fi 7

Conception, évolutions et défis d'intégration des réseaux sans-fil

2.3.5 Une meilleure gestion des environnements denses et de la congestion	27
2.3.6 L'explosion de l'Internet des objets (IoT) et ses défis.	28

Chapitre 2

Conception et validation de la norme Wi-Fi 7

1. Introduction	31
2. Phases d'écriture et révision des drafts	32
2.1 Phase de proposition initiale	32
2.1.1 Rôle de l'IEEE et des groupes de travail.	32
2.1.2 Validation des propositions	34
2.2 Rédactions des drafts	34
2.3 Phase de discussion et harmonisation technique	35
2.4 Phase de test et de validation.	37
2.5 Vote et approbation finale	39
2.6 Publication de la norme	40
2.7 Évolution des différentes versions des drafts	43
2.7.1 Draft 0.1 (septembre 2020) : la phase de fondation.	43
2.7.2 Draft 1.0 (mai 2021) : introduction des premières fonctionnalités majeures	44
2.7.3 Draft 2.0 (mai 2022) : consolidation des fonctionnalités.	44
2.7.4 Draft 3.0 (janvier 2023) : premières améliorations sur le MLO	45
2.7.5 Draft 4.0 (juillet 2023) : finalisation de l'agrégation de canaux et de l'interopérabilité.	46
2.7.6 Draft 5.0 (janvier 2024) : vers la finalisation	46
2.7.7 Draft 6.0 (décembre 2024) : la version finale	47
2.7.8 Version future.	48
2.8 Technologies proposées et rejetées	49
2.8.1 Full Duplex	49
2.8.2 NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access).	50

2.8.3	Une modulation plus élevée, pourquoi se limiter à 4096QAM ?	53
3.	Collaborations internationales et contributions	55
3.1	Un écosystème collaboratif à l'échelle mondiale	55
3.1.1	La nécessité d'une collaboration mondiale	56
3.1.2	Rôle des réunions plénières et des téléconférences.	56
3.1.3	Importance des tests d'interopérabilité mondiaux.	57
3.1.4	Coordination entre les acteurs industriels et les régulateurs.	58
3.1.5	Une dynamique de collaboration renforcée par la complexité technique.	58
3.2	Régulateurs mondiaux et gestion du spectre	59
3.2.1	Les différentes approches régionales	59
3.2.2	Harmonisation mondiale : un objectif encore lointain	60
3.2.3	Les défis de l'utilisation d'une bande de fréquence sans licence	60
3.2.4	L'impact de ces régulations sur les performances	61
3.3	Implication des universités et des laboratoires de recherche	61
3.3.1	Gestion des interférences : un défi clé pour les environnements denses	62
3.3.2	Les algorithmes Multi-Link Operation : une innovation cruciale	62
3.3.3	Amélioration des débits grâce à des techniques de modulation avancée.	63
3.3.4	Des tests en laboratoire qui poussent les limites de Wi-Fi 7	64
3.4	Un avenir tourné vers de nouvelles collaborations.	65
4.	Défis et obstacles rencontrés	65
4.1	Limites liées à l'implémentation matérielle.	65
4.1.1	Gestion multi-bande avec MLO et charge accrue sur les processeurs.	66
4.1.2	Amélioration des récepteurs pour la modulation 4096 QAM	68

4 — La norme Wi-Fi 7

Conception, évolutions et défis d'intégration des réseaux sans-fil

4.2	Optimisation des réseaux dans des environnements spécifiques	71
4.2.1	Réseaux industriels et environnements critiques : priorité à la fiabilité et à la latence	72
4.2.2	Réseaux résidentiels et IoT : gestion des appareils et optimisation de la consommation énergétique	73
4.3	Contraintes d'énergie et d'efficacité	74
4.3.1	Le défi de la compatibilité ascendante avec Wi-Fi 5 et Wi-Fi 6	74
4.3.2	Tests et impact des infrastructures existantes	75
4.3.3	Solutions mises en place pour la gestion de la rétrocompatibilité	75
4.3.4	Compromis et limitations dans les environnements mixtes	76
4.4	Défis de la coexistence avec d'autres technologies sans fil	77
4.4.1	Le défi du partage du spectre et des interférences	77
4.4.2	Tests et évaluation de la coexistence	79
4.4.3	Solutions pour améliorer la coexistence des technologies sans fil	79
4.4.4	Compromis et limitations de la coexistence	80

Chapitre 3

Le Multi-Link Operation

1.	Présentation du MLO	81
1.1	MLSR (Multi-Link Single Radio) - un seul lien actif	85
1.2	EMLSR (Enhanced Multi-Link Single Radio) - un MLSR amélioré	85
1.3	MLMR (Multi-Link Multiple Radio) - l'exploitation simultanée de plusieurs liens	86
1.4	MLMR STR - la performance maximale	86
1.5	MLMR NSTR - une alternative plus accessible	87

2. Architecture des dispositifs Multi-Lien (MLD)	89
2.1 Présentation des dispositifs Multi-Lien (MLD)	89
2.2 Structure MAC et PHY des dispositifs MLD :	
une architecture unifiée	91
2.2.1 La sous-couche MAC supérieure (Upper MAC)	93
2.2.2 La sous-couche MAC inférieure (Lower MAC)	93
2.2.3 Coordination entre les couches MAC supérieure	
et inférieure	94
2.2.4 Coordination via l'entité de gestion de la MAC	95
2.2.5 Optimisation de la qualité de service (QoS)	
par Mappage TID-to-Link	97
2.3 Structure PHY des MLD : affiliation, isolation	
et gestion dynamique des liens	97
2.3.1 Affiliation des liens et transmission multi-bande	97
2.3.2 Isolation et réduction des interférences en mode STR	
et NSTR	98
2.3.3 Gestion dynamique des ressources PHY	98
2.3.4 Optimisation des performances	99
2.4 Gestion des liens dans les MLD	100
2.4.1 Enjeux de la gestion dynamique des liens	100
2.4.2 Stratégies de choix de canaux dans les MLD	102
2.4.3 Basculement automatique des liens	
pour une résilience optimale	104
2.4.4 Adaptation de la charge et équilibrage	106
2.4.5 Limitations et défis de la gestion des liens	
dans les MLD	109
3. Modes de fonctionnement du MLO	111
3.1 Mode simultané et non-simultané : STR et NSTR	113
3.1.1 Définitions et principes fondamentaux	113
3.1.2 Le mode STR	115
3.1.3 Le mode NSTR	117
3.1.4 Comparaison entre les modes STR et NSTR	118

6 ————— La norme Wi-Fi 7

Conception, évolutions et défis d'intégration des réseaux sans-fil

3.2	Mode multi-bande et intra-bande	121
3.2.1	Présentation	122
3.2.2	Quelles différences y a-t-il entre les deux modes ?	122
3.2.3	Le mode multi-bande	124
3.2.4	Le mode intra-bandes	125
3.3	Mode adaptatif et mode statique de répartition des flux	128
3.3.1	Présentation	128
3.3.2	Le mode statique de répartition des flux.	129
3.3.3	Le mode adaptatif de répartition des flux.	130
3.3.4	La surveillance du réseau avec le mode adaptatif	132
3.4	Enjeux et défis du MLO	134
3.4.1	La gestion des interférences	134
3.4.2	La consommation énergétique et l'optimisation des ressources avec le MLO	135
3.4.3	Impact sur la latence et la qualité de service	137
3.5	Choix du mode en fonction des scénarios d'utilisation	138
3.5.1	Réalité virtuelle en Haute Définition (VR/AR) dans un espace domestique	138
3.5.2	Réseau IoT à faible consommation énergétique dans une usine	139
3.5.3	Environnement de bureau à haute densité avec visio-conférence et cloud computing	139
3.5.4	Jeux vidéo en ligne sur un réseau domestique avec plusieurs utilisateurs	140
3.5.5	Déploiement d'un réseau public Wi-Fi dans un centre commercial	140
4.	Méthodes de sélection et d'allocation dynamique des liens	141
4.1	Objectifs et enjeux de la sélection dynamique des liens	141

4.2	Paramètres clés pour la sélection et l'allocation des liens	143
4.2.1	La qualité de la liaison	143
4.2.2	La latence	145
4.2.3	La charge des canaux	145
4.2.4	Le type de trafic et la qualité de service	146
4.2.5	La gestion des interférences et des collisions	147
4.2.6	Le Channel Load Report.	148
4.3	Mécanismes d'allocation et de répartition dynamique des flux	149
4.3.1	L'équilibrage de charge dynamique	150
4.3.2	Algorithmes de répartition des flux.	151
4.3.3	Changement de bande de fréquence (Seamless Handover)	159
4.3.4	Le TID-To-Link-Mapping (TTLM)	160
5.	Cadre de sécurité.	163
5.1	Procédures d'association multi-lien	163
5.1.1	Découverte et négociation des capacités multi-lien	164
5.1.2	Authentification multi-lien	164
5.1.3	Établissement et configuration des liens actifs.	165
5.1.4	Innovations en matière de sécurité des trames.	165
5.1.5	Étapes d'associations	166
5.2	Gestion des clés dans un contexte multi-lien	168
5.2.1	Initialisation des clés lors de l'association MLO.	168
5.2.2	Utilisation des clés dans les communications	171
5.2.3	Mise à jour et rotation des clés	173
5.2.4	Gestion des clés pour les liens dynamiques	174
5.3	Protection des données multi-lien	177
5.3.1	Le risque d'interception et d'écoute clandestine	177
5.3.2	Le risque de falsification de données	179
5.3.3	Le risque d'attaques par rejeu.	180
5.3.4	Le risque de compromission de liens affiliés	182

8 ————— La norme Wi-Fi 7

Conception, évolutions et défis d'intégration des réseaux sans-fil

Chapitre 4

Les évolutions de la couche PHY

1. Introduction	185
2. Débits et modulation	186
2.1 Élargissement des capacités spectrales	188
2.1.1 Dépendance à la bande des 6 GHz et disponibilité spectrale	189
2.1.2 Le rôle des sous-porteuses	189
2.1.3 Risque accru d'interférences	191
2.1.4 Environnements denses et défis de réutilisation des canaux.	192
2.1.5 Compatibilité et coexistence avec les équipements hérités	192
2.2 Évolutions de la modulation	193
2.2.1 Avantages et limitations du 4096-QAM.	195
2.2.2 Utilisation pratique de la modulation 4096-QAM.	197
2.3 Les nouveaux index MCS.	198
2.3.1 Évolution des MCS dans Wi-Fi 7.	198
2.3.2 Index MCS 14 et 15	199
2.4 Optimisations liées à l'utilisation du Multi-RU	201
2.4.1 Allocation simultanée et dynamique des RU	202
2.4.2 Flexibilité pour les charges asymétriques	203
2.4.3 Avantages techniques du Multi-RU	203
2.5 Applications concrètes	205
2.5.1 Robotique industrielle : Cobots dans une usine connectée.	205
2.5.2 Systèmes de vision industrielle pour inspection qualité.	207
3. Gestion du spectre	208
3.1 La fragmentation spectrale	209
3.1.1 Problématique.	209
3.1.2 Solutions apportées par la norme Wi-Fi 7.	209

3.2 Réduction des interférences	211
3.2.1 Réduction des interférences liées à la coexistence des réseaux	212
3.2.2 Réduction des interférences dans les lieux à haute densité	213

Chapitre 5 Les évolutions de la couche MAC

1. Introduction	217
2. Optimisation de la fiabilité des transmissions	218
2.1 1K Block Acknowledgement	219
2.1.1 Fonctionnement	219
2.1.2 Avantages techniques du 1K Block Acknowledgement	221
2.1.3 Défis et considérations d'implémentation	221
2.2 Compression des Block Acknowledgements (512 MPDU)	222
2.2.1 Fonctionnement	223
2.2.2 Avantages	224
2.3 Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ)	225
2.3.1 Automatic Repeat reQuest (ARQ)	225
2.3.2 Le fonctionnement du HARQ	226
2.3.3 Les différents types de HARQ	227
2.3.4 Le soft combining	229
3. L'augmentation de la capacité et de l'efficacité spectrale	230
3.1 Mécanismes multi-utilisateurs pour une meilleure allocation spectrale	230
3.1.1 Maximiser l'utilisation du spectre avec le MRU	230
3.1.2 Réduire les interférences grâce à la signalisation	232
3.2 Réduction des interférences au niveau MAC	233
3.2.1 Réduction des interférences intra-réseau	234
3.2.2 Réduction des interférences inter-réseaux	235
3.2.3 Défis et gains globaux grâce à la combinaison SCS et EPCS	237

10 ————— La norme Wi-Fi 7

Conception, évolutions et défis d'intégration des réseaux sans-fil

3.3	Synchronisation et coordination avancées	238
3.3.1	Défi 1 : Collisions dans les transmissions OFDMA	239
3.3.2	Défi 2 : Coordination dans des environnements denses .	243
3.3.3	Résultats attendus	245
4.	Priorisation des flux critiques	246
4.1	Réduire les collisions pour les flux critiques	247
4.1.1	Fonctionnement de la Restricted Service Period	247
4.1.2	Limites et considérations	248
4.2	Garantir une qualité de service (QoS) améliorée	249
4.2.1	Réduire la latence grâce à la hiérarchisation des flux . .	250
4.2.2	L'allocation dynamique des ressources spectrales	251
4.2.3	Les mécanismes de signalisation MAC	253
4.3	Prioriser les communications d'urgence	254
4.3.1	Architecture et signalisation du NSEP	255
4.3.2	Fonctionnement opérationnel	257
4.3.3	Gains mesurés grâce au NSEP	259
5.	Conclusion	261

Chapitre 6

Conclusion

1.	Introduction	265
2.	Récapitulatif des apports de la norme Wi-Fi 7	267
2.1	Performances améliorées	267
2.2	Expérience utilisateur transformée	269
2.2.1	Environnement grand public : réinventer le quotidien numérique	269
2.2.2	Industrie 4.0 : maximiser l'efficacité et la productivité . .	270
2.2.3	Santé connectée : améliorer les soins médicaux	272
2.2.4	Éducation et télétravail : soutenir la collaboration et l'apprentissage	273
2.2.5	Infrastructures urbaines : smart cities et transport connecté	274

3. Limites identifiées et défis à relever	275
3.1 Défis techniques de Wi-Fi 7	275
3.1.1 Complexité accrue	275
3.1.2 Interférences et saturation	278
3.2 Limites des cas d'usage	280
3.2.1 Cas critiques non adressés	280
3.2.2 IoT et couverture longue distance	283
3.3 Normes alternatives pour l'IoT	284
4. Vision pour la norme Wi-Fi 8	289
4.1 Calendrier de la norme Wi-Fi 8	290
4.1.1 Processus de normalisation	290
4.1.2 Impact sur l'industrie	292
4.2 Innovations technologiques envisagées	293
4.2.1 La Coordination Multi-AP	293
4.2.2 Amélioration de la fiabilité	295
4.2.3 Intégration avec la 5G	297
4.3 Usages et scénarios concrets	299
4.3.1 Réseaux immersifs	299
4.3.2 Automatisation industrielle	300
4.4 Défis pour l'adoption	302
4.4.1 Régulation et allocation du spectre	302
4.4.2 Compatibilité et transition	304
4.5 Conclusion	306
5. Autres normes émergentes et leur complémentarité	308
5.1 Wi-Fi HaLow (802.11ah)	308
5.1.1 Présentation	308
5.1.2 Présentation de cas d'usages	310
5.2 WiGig : 802.11ad et 802.11ay	312
5.2.1 Description technique	312
5.2.2 Cas d'usage	314

12 _____ **La norme Wi-Fi 7**

Conception, évolutions et défis d'intégration des réseaux sans-fil

6. Conclusion générale et perspectives	317
6.1 Un résumé des avancées techniques	317
6.2 Des défis qui bouleversent l'usage traditionnel	319
6.3 Diversité et complémentarité des normes	320
6.4 Un avenir dans la continuité	322
Index	325