

PUJOLLE

# LES RÉSEAUX

9<sup>e</sup> ÉDITION

L'ère des réseaux cloud et de la 5G

EYROLLES

# Table des matières

---

## **PARTIE I**

---

<b>Les éléments de base des réseaux</b> .....	1
CHAPITRE 1	
<b>Introduction aux réseaux</b> .....	3
<b>Le paquet</b> .....	4
<b>Cloud, MEC, Fog et Skin</b> .....	5
<b>Les environnements de Cloud</b> .....	6
<b>Les nouvelles architectures réseau</b> .....	9
<b>Les réseaux sans fil</b> .....	12
<b>Les architectures réseau : distribution ou centralisation ?</b> .....	13
<b>Conclusion</b> .....	14
CHAPITRE 2	
<b>Les composants des réseaux</b> .....	15
<b>Transfert, commutation et routage</b> .....	15
<b>Le transfert de paquets</b> .....	18
Le modèle de référence .....	20
Commutation et routage .....	21
<b>Les réseaux informatiques</b> .....	22
<b>Les réseaux de télécommunications</b> .....	24
<b>Les réseaux de câblo-opérateurs</b> .....	26

<b>L'intégration des réseaux</b> .....	29
<b>Conclusion</b> .....	30
<b>CHAPITRE 3</b>	
<b>Réseaux virtuels et Cloud</b> .....	31
<b>La virtualisation de réseau</b> .....	31
Technologies de virtualisation de réseau .....	35
L'isolation .....	36
Utilisation de la virtualisation de réseau .....	39
Virtualisation d'équipements de réseau .....	40
NFV (Network Functions Virtualization) et normalisation de la virtualisation .....	40
<b>Les réseaux virtualisés</b> .....	42
<b>Conclusion</b> .....	45
<b>CHAPITRE 4</b>	
<b>L'intelligence dans les réseaux</b> .....	47
<b>Orchestrateurs et contrôleurs</b> .....	48
<b>Les agents intelligents</b> .....	54
Gestion d'un environnement complexe .....	55
Les systèmes multi-agents .....	56
Les systèmes d'agents réactifs .....	62
<b>Les agents réseau</b> .....	64
Les agents Internet .....	64
Les agents intranet .....	65
Les agents assistants ou bureautiques .....	65
Les agents mobiles .....	65
<b>Les réseaux actifs</b> .....	67
Les réseaux programmables .....	69
<b>Les réseaux autonomes</b> .....	71
Les réseaux autonomiques .....	71
<b>Conclusion</b> .....	74

## PARTIE II

<b>Les protocoles réseau</b> .....	75
CHAPITRE 5	
<b>Le niveau physique</b> .....	77
<b>Le médium physique</b> .....	77
Les équipements .....	83
<b>Le codage et la transmission</b> .....	85
La transmission en bande de base .....	87
<b>La modulation</b> .....	89
La modulation d'amplitude .....	90
La modulation de phase .....	90
La modulation de fréquence .....	91
<b>Les modems</b> .....	91
<b>Les multiplexeurs</b> .....	93
Multiplexages fréquentiel et temporel .....	93
Le multiplexage statistique .....	93
<b>La transmission</b> .....	95
<b>La numérisation des signaux</b> .....	96
Numérisation des signaux analogiques .....	98
<b>Détection et correction d'erreur</b> .....	102
La correction d'erreur .....	104
La détection d'erreur .....	106
<b>Architecture des routeurs</b> .....	107
<b>Architecture des commutateurs</b> .....	109
<b>Les passerelles</b> .....	111
<b>Les répéteurs</b> .....	113
<b>Les ponts</b> .....	113
<b>Les relais-routeurs</b> .....	116
Les routeurs multiprotocoles .....	116
Les gigarouteurs .....	116
Les bridge-routeurs .....	117

<b>Les pare-feu</b> .....	119
Les proxy .....	120
Les appliances .....	121
<b>Conclusion</b> .....	123
CHAPITRE 6	
<b>Le niveau trame</b> .....	125
<b>L'architecture de niveau trame</b> .....	126
Les fonctionnalités du niveau trame .....	126
L'adressage de niveau trame .....	128
<b>Les protocoles de niveau trame</b> .....	129
Le protocole PPP (Point-to-Point Protocol) .....	129
Le protocole ATM .....	130
L'en-tête de la trame ATM .....	131
La trame Ethernet .....	134
Le Label Switching .....	137
<b>Conclusion</b> .....	138
CHAPITRE 7	
<b>Les niveaux paquet et message</b> .....	139
<b>Le niveau paquet</b> .....	139
Les modes avec et sans connexion .....	141
Les principaux protocoles de niveau paquet .....	142
Les grandes fonctionnalités du niveau paquet .....	142
Autres fonctionnalités du niveau paquet .....	155
IP (Internet Protocol) .....	158
<b>Le niveau message</b> .....	165
Les fonctionnalités du niveau message .....	166
Les caractéristiques du niveau message .....	167
Les protocoles de niveau message .....	170
<b>Conclusion</b> .....	179

## PARTIE III

<b>Les solutions réseau</b> .....	181
CHAPITRE 8	
<b>Les réseaux de niveau physique</b> .....	183
<b>Les réseaux optiques</b> .....	183
La fibre optique .....	183
Le multiplexage en longueur d'onde .....	186
Architecture des réseaux optiques .....	187
Signalisation et GMPLS .....	192
<b>Les interfaces de niveaux physiques</b> .....	193
Les interfaces avec le niveau physique .....	194
<b>MPLS-TP</b> .....	205
<b>Conclusion</b> .....	205
CHAPITRE 9	
<b>Les réseaux Ethernet</b> .....	207
<b>Les modes partagé et commuté</b> .....	207
<b>Les réseaux Ethernet partagés</b> .....	208
Caractéristiques .....	209
L'accès aléatoire .....	214
<b>Les réseaux Ethernet commutés</b> .....	217
<b>Ethernet pour les entreprises</b> .....	219
Le Fast Ethernet 100 Mbit/s .....	221
Le Gigabit Ethernet (GbE) .....	222
Le 10 Gigabit Ethernet (10GbE) .....	224
Le 100 Gigabit Ethernet (100GbE) .....	225
<b>Ethernet pour les opérateurs</b> .....	226
Ethernet Carrier Grade .....	228
<b>Ethernet pour les datacenters</b> .....	232
TRILL .....	233
VXLAN .....	233
<b>Conclusion</b> .....	234

Réseau overlay .....	307
Contrôle et gestion de MPLS .....	309
Plan de contrôle de GMPLS .....	310
<b>Conclusion</b> .....	311
CHAPITRE 12	
<b>Les réseaux SDN</b> .....	313
SDN (Software-Defined Networking) .....	314
<b>L'architecture ONF</b> .....	315
L'interface sud .....	320
L'interface nord .....	332
<b>Conclusion</b> .....	334
CHAPITRE 13	
<b>Le Cloud Networking</b> .....	335
<b>La virtualisation dans le Cloud Networking</b> .....	336
<b>Le Cloud-RAN</b> .....	340
<b>Les serveurs MEC</b> .....	341
<b>Les femto-datacenters</b> .....	347
<b>Les protocoles du Cloud Networking</b> .....	348
Les protocoles intradatacenter .....	348
Les protocoles interdatacenter .....	351
Les protocoles avec les utilisateurs .....	351
<b>Fog et Skin Networking</b> .....	352
<b>Conclusion</b> .....	353
CHAPITRE 14	
<b>Les réseaux open source</b> .....	355
<b>L'open source dans les réseaux</b> .....	355
<b>OPNFV</b> .....	357
Les releases d'OPNFV .....	361
<b>OSM</b> .....	366
<b>DPDK</b> .....	367

ODP .....	368
FD.io .....	369
<b>OpenStack</b> .....	371
OpenStack et l'environnement réseau .....	375
<b>Conclusion</b> .....	376

## PARTIE IV

<b>Les réseaux d'accès</b> .....	377
----------------------------------	-----

### CHAPITRE 15

<b>Les réseaux d'accès terrestres</b> .....	379
---	-----

<b>La fibre optique</b> .....	380
-------------------------------	-----

A-PON (ATM Over PON) .....	381
----------------------------	-----

E-PON (Ethernet Passive Optical Network) .....	383
--	-----

G-PON (Giga Passive Optical Network) .....	384
--	-----

<b>Les réseaux câblés (CATV)</b> .....	384
--	-----

<b>Les paires métalliques</b> .....	387
-------------------------------------	-----

La boucle locale métallique .....	387
-----------------------------------	-----

<b>Les accès xDSL</b> .....	388
-----------------------------	-----

Les modems ADSL .....	388
-----------------------	-----

Les modems VDSL .....	390
-----------------------	-----

Les DSLAM (DSL Access Module) .....	391
-------------------------------------	-----

Les protocoles de l'ADSL .....	392
--------------------------------	-----

Le Multi-Play .....	393
---------------------	-----

La boucle locale électrique .....	396
-----------------------------------	-----

<b>Conclusion</b> .....	397
-------------------------	-----

### CHAPITRE 16

<b>Les réseaux d'accès hertziens</b> .....	399
--	-----

<b>Les normes des réseaux hertziens</b> .....	400
---	-----

<b>Typologie des réseaux hertziens</b> .....	402
--	-----

La boucle locale sans fil .....	402
---------------------------------	-----

Les systèmes WLL .....	403
------------------------	-----



Exemples de réseaux d'accès hertziens .....	404
L'allocation de ressources .....	407
Les techniques d'accès FCA .....	408
Les méthodes dynamiques DCA .....	413
<b>Les réseaux de mobiles</b> .....	413
Les générations de réseaux de mobiles .....	414
<b>La radio cognitive et les avancées technologiques</b> .....	420
<b>La boucle locale satellite</b> .....	422
<b>Le contrôle dans les réseaux de mobiles</b> .....	424
IP Mobile .....	424
Solutions pour la micromobilité .....	426
<b>Gestion du handover dans les réseaux hétérogènes</b> .....	427
Taxonomie des handovers .....	428
<b>UMA (Unlicensed Mobile Access)</b> .....	429
<b>Le multihoming</b> .....	431
Les protocoles de niveau réseau .....	432
Les protocoles de niveau transport .....	437
<b>IMS (IP Multimedia Subsystem)</b> .....	438
<b>NGN (Next Generation Network)</b> .....	443
<b>Conclusion</b> .....	444
<b>CHAPITRE 17</b>	
<b>Les small cells et les réseaux multisaut</b> .....	445
<b>Les réseaux small cells</b> .....	446
Les femtocells .....	446
Les hotspots .....	448
Les metrocells .....	450
Les microcells .....	450
<b>Passpoint</b> .....	452
Caractéristiques .....	452
<b>Les réseaux multisaut</b> .....	454
Les réseaux ad-hoc .....	455
Les réseaux mesh .....	462

Les réseaux VANET .....	463
<b>Les réseaux de backhaul</b> .....	464
<b>Radio logicielle et radio cognitive</b> .....	466
<b>Les cellules sur mesure</b> .....	467
<b>Conclusion</b> .....	468

## PARTIE V

<b>Les réseaux de mobiles et sans fil</b> .....	469
---	-----

### CHAPITRE 18

<b>Les réseaux de mobiles 1G à 5G</b> .....	471
---	-----

<b>Les cinq générations de réseaux de mobiles</b> .....	471
---	-----

<b>La 2G</b> .....	472
--------------------	-----

La mobilité dans les réseaux 2G .....	473
---------------------------------------	-----

<b>La 3G</b> .....	476
--------------------	-----

Le 3GPP .....	477
---------------	-----

L'UMTS .....	479
--------------	-----

<b>La 3G+</b> .....	491
---------------------	-----

Le HSDPA .....	492
----------------	-----

Le HSUPA .....	493
----------------	-----

Le HSOPA .....	494
----------------	-----

Le LTE .....	495
--------------	-----

<b>La 4G</b> .....	496
--------------------	-----

LTE Advanced .....	497
--------------------	-----

<b>La 5G</b> .....	503
--------------------	-----

<b>Conclusion</b> .....	512
-------------------------	-----

### CHAPITRE 19

<b>Les réseaux personnels</b> .....	513
-------------------------------------	-----

<b>WPAN</b> .....	513
-------------------	-----

<b>IEEE 802.15</b> .....	514
--------------------------	-----

<b>Bluetooth</b> .....	515
Communications .....	518
Techniques d'accès .....	521
<b>UWB</b> .....	523
L'interface radio .....	525
Complexité et énergie .....	527
<b>ZigBee</b> .....	528
Le niveau applicatif .....	530
<b>Wi-Fi personnel</b> .....	532
IEEE 802.11ad (WiGig) .....	532
IEEE 802.11ay .....	534
<b>WirelessHD</b> .....	534
<b>Li-Fi</b> .....	535
<b>Conclusion</b> .....	535
CHAPITRE 20	
<b>Les réseaux Wi-Fi</b> .....	537
<b>IEEE 802.11</b> .....	538
<b>Architecture Wi-Fi</b> .....	540
Couche physique .....	540
Couche liaison de données .....	541
<b>Techniques d'accès</b> .....	541
<b>Fonctionnalités</b> .....	544
Handovers .....	544
Sécurité .....	545
<b>Trames Wi-Fi</b> .....	552
<b>IEEE 802.11a, b et g</b> .....	553
<b>IEEE 802.11n</b> .....	555
<b>IEEE 802.11ac</b> .....	556
<b>IEEE 802.11af</b> .....	557
<b>Qualité de service</b> .....	558
<b>Équipements Wi-Fi</b> .....	561

Points d'accès.....	562
Contrôleurs.....	563
Ponts.....	565
Antennes.....	567
<b>Conclusion</b> .....	570
<b>CHAPITRE 21</b>	
<b>L'Internet des objets</b> .....	571
<b>Les réseaux longue distance</b> .....	572
Sigfox.....	573
LoRa.....	574
<b>Les réseaux de la 5G</b> .....	576
<b>Les réseaux PAN et LAN</b> .....	577
<b>Les réseaux de capteurs</b> .....	580
<b>RFID</b> .....	582
Utilisation des RFID.....	583
La technologie RFID .....	584
EPCglobal.....	584
Sécurité des RFID .....	585
Mifare.....	586
<b>NFC</b> .....	586
La clé mobile .....	587
Le paiement sans contact NFC.....	588
<b>L'Internet des objets dans le médical</b> .....	590
<b>L'Internet des objets dans le domicile</b> .....	591
<b>Le marketing de proximité</b> .....	592
Les mécanismes du marketing de proximité .....	592
Plate-forme pour le marketing de proximité fondé sur la géolocalisation.....	595
<b>Conclusion</b> .....	596

## PARTIE VI

<b>Contrôle, gestion, sécurité et énergie</b> .....	599
CHAPITRE 22	
<b>VLAN et VPN</b> .....	601
<b>Les VLAN</b> .....	601
Fonctionnement des VLAN .....	603
<b>Les VPN</b> .....	607
Architecture des VPN .....	607
Catégories de VPN .....	607
VPN de niveaux trame, paquet et application .....	609
VPN fonctionnels .....	615
<b>Conclusion</b> .....	617
CHAPITRE 23	
<b>La gestion et le contrôle</b> .....	619
<b>La gestion de réseau</b> .....	621
Gestion Internet avec SNMP .....	622
Gestion par le Web .....	628
Gestion par le middleware .....	631
Le modèle DME .....	634
SLA (Service Level Agreement) .....	635
<b>Le contrôle de réseau</b> .....	638
Le contrôle de congestion .....	639
Le contrôle de flux dans les réseaux IP .....	641
Le contrôle de flux dans IP .....	644
<b>La signalisation</b> .....	646
Caractéristiques .....	646
Fonctionnement .....	647
Le protocole RSVP .....	649
<b>SIP (Session Initiation Protocol)</b> .....	653
Entités .....	653
Scénarios de session .....	660
SDP (Session Description Protocol) .....	661

NSIS (Next Steps In Signaling) .....	664
<b>Conclusion</b> .....	664
<b>CHAPITRE 24</b>	
<b>La sécurité et l'identité</b> .....	667
<b>Les services de sécurité</b> .....	668
Les mécanismes de chiffrement .....	669
Les algorithmes de chiffrement .....	670
Solutions de chiffrement .....	672
Les certificats .....	673
L'authentification .....	674
L'intégrité des données .....	674
La non-répudiation .....	675
<b>Caractéristiques des algorithmes de sécurité</b> .....	675
Les algorithmes de chiffrement .....	675
La performance temporelle .....	677
Les algorithmes d'authenticité .....	678
Les algorithmes d'authentification .....	679
Autres mécanismes d'authentification .....	681
<b>Exemples d'environnements de sécurité</b> .....	684
PGP (Pretty Good Privacy) .....	684
L'infrastructure PKI .....	684
Les virus .....	687
<b>L'identité</b> .....	688
Les systèmes de gestion des identités .....	689
Vie privée .....	690
<b>La sécurité par carte à puce</b> .....	690
<b>La sécurité dans l'environnement IP</b> .....	693
Les attaques par Internet .....	694
Les parades .....	696
<b>IPsec (IP sécurisé)</b> .....	698
L'en-tête d'authentification .....	700
L'en-tête d'encapsulation de sécurité .....	701
SSL (Secure Sockets Layer) .....	703

<b>Les protocoles d'authentification</b> .....	705
PPP (Point-to-Point Protocol) .....	705
EAP (Extensible Authentication Protocol) .....	712
RADIUS (Remote Authentication Dial-In User Server) .....	719
<b>Les pare-feu</b> .....	720
La sécurité autour du pare-feu .....	724
<b>La sécurité du SDN</b> .....	726
<b>Conclusion</b> .....	733
CHAPITRE 25	
<b>Les réseaux « green »</b> .....	735
<b>La consommation énergétique des réseaux hertziens</b> .....	735
Stratégies de réduction de la consommation des réseaux hertziens .....	738
<b>La consommation énergétique des réseaux terrestres</b> .....	740
Stratégies de réduction de la consommation des réseaux terrestres .....	741
<b>Conclusion</b> .....	745
CHAPITRE 26	
<b>Généralités futures</b> .....	747
<b>Les réseaux participatifs</b> .....	747
<b>La concrétisation</b> .....	748
<b>Les réseaux morphware</b> .....	751
<b>Le pilotage automatique</b> .....	753
<b>La blockchain</b> .....	754
<b>Conclusion</b> .....	755
<b>Index</b> .....	757