

INFORMATION NUMÉRIQUE  
Traitement, interprétation, communication

Pierre Rolin - Laurent Toutain  
Géraldine Texier - Olivier Paul - Claude Chaudet

# Les réseaux

## Principes fondamentaux

2<sup>e</sup> édition

101010101

1010101011 01010101

1010101011

01010101

**L**avoisier  
hermes

Pierre Rolin – Laurent Toutain  
Géraldine Texier – Olivier Paul  
Claude Chaudet

# Les réseaux

## Principes fondamentaux

2<sup>e</sup> édition

**L**avoisier  
hermes

**Pierre Rolin** a été directeur de Télécom Sud Paris, adjoint au directeur de la recherche d'Orange Labs, il a enseigné dès 1980 les réseaux dans de nombreuses écoles en France dont Télécom Bretagne, ENSTA, INSTN, et à l'étranger.

**Laurent Toutain** est maître de conférences à Télécom Bretagne dans le département RSM (réseaux, sécurité, multimédia). Il se focalise sur les évolutions protocolaire et architecturale de l'internet liées à la conception de nouveaux services (*smart-grid*, vêtements intelligents...) après avoir travaillé sur le protocole IPv6.

**Olivier Paul** est maître de conférences à Télécom Sud Paris dans le département RST. Il enseigne dans les domaines des réseaux et de la sécurité informatique.

**Géraldine Texier** est maître de conférences Télécom Bretagne dans le département RSM (réseaux, sécurité, multimédia). Ses travaux de recherche portent sur le routage, en particulier le routage multicontraint et le routage interdomaine, mais aussi sur la qualité de service et la mesure dans les réseaux.

**Claude Chaudet** est maître de conférences à Télécom ParisTech au sein du département « Informatique et réseaux » où il est responsable des enseignements d'introduction aux réseaux. Ses travaux de recherche se situent dans les domaines de l'internet des objets, de la ville intelligente et de la sécurité.

Pour plus d'informations sur nos publications



[newsletters.lavoisier.fr](http://newsletters.lavoisier.fr)

*Direction éditoriale* : Emmanuel Leclerc  
*Édition* : Céline Poiteaux  
*Fabrication* : Estelle Perez  
*Couverture* : Isabelle Godenèche  
*Composition* : Nord Compo, Villeneuve-d'Ascq

© 2017, Lavoisier, Paris  
ISBN : 978-2-7462-4659-1

# Collection

## Information numérique

Traitement, interprétation, communication

dirigée par **Olivier Rioul**

Professeur, Télécom ParisTech,  
Université Paris-Saclay, Paris

### Comité éditorial :

**Gérard Blanchet**, Professeur émérite, Télécom ParisTech, Université Paris-Saclay, Paris.

**Isabelle Bloch**, Professeur, Télécom ParisTech, Université Paris-Saclay, Paris.

**Valérie Fernandez**, Professeur, Télécom ParisTech, Université Paris-Saclay, Paris.

**Benoît Geller**, Professeur, ENSTA ParisTech, Université Paris-Saclay, Paris.

# Table des matières

Préface .....	XI
---------------	----

## Chapitre 1 Approche informelle des réseaux

1. Principes généraux	2
<hr/>	
2. Réseau postal	3
<hr/>	
2.1. Protocole du cuisinier.....	4
2.2. Spécification informelle du protocole.....	6
2.3. Réseau téléphonique .....	12
2.4. Différents types de réseaux.....	13
2.5. Découpe en paquets.....	14
2.6. Notion d'adresses.....	15
2.7. Les différentes topologies.....	16

## Chapitre 2 Le modèle de référence ISO/OSI

1. Généralités	19
<hr/>	

<b>2. Principes de la structuration en couches</b>	<b>21</b>
<b>2.1. Définitions</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2. Description</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3. Entités homologues</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4. Communications entre entités homologues</b> .....	<b>27</b>
<b>2.5. Multiplexage sur un service</b> .....	<b>29</b>
<b>2.6. Interactions entre couches</b> .....	<b>30</b>
<b>2.7. Entité protocolaire et administration du réseau</b> .....	<b>33</b>
<b>2.8. Sécurité</b> .....	<b>34</b>
<b>3. Couches du modèle de référence ISO/OSI</b>	<b>34</b>
<b>3.1. Couche application (7)</b> .....	<b>35</b>
<b>3.2. Couche présentation (6)</b> .....	<b>36</b>
<b>3.3. Couche session (5)</b> .....	<b>37</b>
<b>3.4. Couche transport (4)</b> .....	<b>37</b>
<b>3.5. Couche réseau (3)</b> .....	<b>38</b>
<b>3.6. Couche liaison de données (2)</b> .....	<b>39</b>
<b>3.7. Couche physique (1)</b> .....	<b>39</b>
<b>4. Effet de l'empilement des couches sur les unités de données</b>	<b>40</b>
<b>5. Notion de format</b>	<b>42</b>
<b>5.1. Analyse d'un PDU</b> .....	<b>43</b>
<b>5.2. Analyse d'un PDU Ethernet</b> .....	<b>45</b>
<b>6. Normalisation</b>	<b>46</b>
<b>6.1. Organismes internationaux</b> .....	<b>48</b>
<b>6.2. Organismes européens</b> .....	<b>49</b>
<b>6.3. Organisme français</b> .....	<b>50</b>

6.4. Évolution de la normalisation .....	50
6.5. Acteurs de l'internet .....	51
7. Conclusion .....	52

---

## Chapitre 3

### Éléments de base des protocoles

1. Transport de l'information numérique .....	53
<hr/>	
1.1. Capacité de transmission .....	54
1.2. Supports physiques.....	55
1.3. Caractéristiques modulables d'un signal .....	57
2. Délimitation de l'information .....	60
<hr/>	
2.1. Délimitation .....	60
2.2. Transparence.....	62
3. Gestion des erreurs .....	62
<hr/>	
3.1. Mesure des erreurs.....	63
3.2. Codes de détection .....	64
3.3. Codes de correction.....	67
4. Gestion des pertes .....	70
<hr/>	
4.1. Détection chez l'émetteur .....	71
4.2. Détection chez le récepteur .....	76
5. Gestion des différences de ressources .....	79
<hr/>	
5.1. Protocoles réactifs .....	80
5.2. Protocoles préventifs.....	81

6. Un exemple de protocole : HDLC	83
6.1. Format des trames .....	83
6.2. Fonctionnement du protocole .....	86
7. Modélisation simple des protocoles	88
7.1. Automates à nombre fini d'états .....	89
7.2. Modélisation du protocole du bit alterné.....	90
7.3. Utilisation des automates .....	92
8. Conclusion	93

## Chapitre 4

### Internet

1. Les acteurs de l'internet	95
1.1. IETF .....	95
1.2. Fonction d'un groupe de travail de l'IETF .....	96
1.3. RFC.....	96
1.4. Gestion des adresses et des paramètres de protocoles.....	98
2. Protocoles de la famille IP	99
2.1. Mise en œuvre des protocoles TCP/IP .....	99
2.2. Équipements terminaux.....	100
2.3. Routeurs.....	101
2.4. Architecture de la couche IP .....	102
3. Adressage internet	103
3.1. Notation.....	105
3.2. Adresses IPv4 particulières .....	106



3.3. Adressage IPv4 par classes .....	106
4. Adressage hiérarchique .....	107
4.1. CIDR .....	107
4.2. Règles d'agrégations .....	108
4.3. Adresses pour les réseaux privés (RFC 1918) .....	109
5. Protocole IPv4 ( <i>internet protocol</i> ) (RFC 791, RFC 1122) .....	110
5.1. Format des datagrammes IPv4 .....	110
6. Protocole ICMP ( <i>internet control message protocol</i> ) (RFC 792) .....	115
6.1. Écho/commande Ping .....	116
6.2. Commande traceroute .....	116
7. Protocole IPv6 .....	117
8. Routage .....	118
8.1. Fonction de relayage .....	118
8.2. Protocole de routage .....	123
8.3. Dijkstra .....	126
8.4. OSPF .....	133
8.5. Messages échangés par OSPF .....	135
8.6. Internet et le routage entre les réseaux .....	137
8.7. BGP .....	139

## Chapitre 5

### Le transport de bout en bout sur internet

1. Multiplexage des applications : les numéros de port .....	146
2. Fragmentation .....	148

<b>3. Propriétés du canal de communication de niveau transport</b>	<b>149</b>
<b>3.1. Transport pour le temps réel : UDP (RFC 768)</b> .....	<b>149</b>
<b>3.2. Transport sans perte de données : TCP (RFC 793)</b> .....	<b>151</b>
<b>4. Le transport face aux erreurs de transmission</b>	<b>152</b>
<b>4.1. Correction des erreurs dans TCP</b> .....	<b>152</b>
<b>4.2. Calcul dynamique de la valeur des temporisateurs dans TCP</b> .....	<b>154</b>
<b>5. Démarrer et terminer une session TCP</b>	<b>156</b>
<b>5.1. Établissement et fin de la connexion TCP</b> .....	<b>158</b>
<b>6. Contrôle de congestion dans TCP</b>	<b>159</b>
<b>6.1. Mécanisme <i>slow start</i></b> .....	<b>162</b>
<b>7. Quelques mots sur la programmation</b>	<b>166</b>
<b>7.1. Envoyer-recevoir avec UDP</b> .....	<b>167</b>
<b>7.2. Communiquer avec TCP</b> .....	<b>172</b>
<b>Index</b> .....	<b>179</b>

# Préface

Le réseau internet joue un rôle considérable dans la vie quotidienne de tout un chacun ainsi que dans le fonctionnement des entreprises, bien que son utilisation soit souvent indirecte, via le web par exemple. Il n’y a absolument aucun domaine qui échappe à l’usage des réseaux et, prochainement, l’internet des objets ou les réseaux véhiculaires augmenteront encore la pénétration des réseaux au plus près de nos activités.

Les premiers grands réseaux câblés sont nés dans les années 1960 avec comme pionnier le réseau SITA<sup>1</sup> des compagnies aériennes, dès 1949, et le réseau SNA d’IBM. De nombreux réseaux ont vu le jour dans les années 1970 (DecNet, Cyclades, X25, DSA, etc.), inspirés par le projet Arpanet de DARPA (US DoD). La conception d’Arpanet fut conduite initialement par la Rand Corporation (1964-1967), puis poursuivie par les universitaires américains et la société Bolt Beranek & Newman, à la demande et sur financement de l’agence DARPA. C’est essentiellement au sein du projet Arpanet qu’ont été spécifiés les protocoles cœur d’internet – TCP/UDP/IP – mis dans le domaine public en 1983. La normalisation va aussi émerger au cours de cette décennie avec le modèle de référence ISO/OSI. Initialement, la plupart de ces réseaux avaient principalement pour but de fournir, via des terminaux, un accès distant à des ordinateurs, à une époque où les ordinateurs puissants étaient rares et très coûteux. Le Minitel a été un exemple typique de terminal réseau largement déployé en France. La normalisation dans le domaine des grands réseaux est coordonnée par l’ISO, l’UIT<sup>2</sup> (pour les réseaux d’opérateurs), et par l’IETF pour les travaux universitaires internet et post-internet. Les réseaux des constructeurs informatiques (SNA, DecNet, etc.) étant restés « propriétaires », ils finirent par disparaître au début des années 1990.

Ce fut aussi la fin de la transmission de la téléphonie par réseaux analogiques. Au cours des années 1980-1990, le paysage et les acteurs des télécommunications furent l’objet de profonds bouleversements, les réseaux numériques étant devenus incontournables pour transporter tous les flux voix, donnée, image, vidéo, à l’instar du réseau numérique à intégration de service (RNIS).

---

1. Jusqu’en 2000, SITA possédait le plus vaste réseau de télécommunications international qui couvrait 220 pays et territoires. Ce réseau a été revendu à France Télécom en novembre 2000 lors du rachat de la holding Equant, détenue à 35 % par SITA, par l’opérateur français qui a fusionné ce réseau avec celui de sa propre filiale internationale Global One.

2. Union Internationale des Télécommunications (organisme des Nations Unies).

Les réseaux locaux (LAN) sont apparus au cours des années 1960, dans les systèmes embarqués militaires, avec le réseau US MIL-1553B et le réseau français Digibus. Ethernet<sup>®</sup>, inventé en 1973, par Boggs et Metcalfe<sup>3</sup> au sein de la société Xerox, marque leur véritable essor. Dans les années 1980, afin de concurrencer l'accord DIX (Digital, Intel, Xerox) qui annonçait déjà le succès phénoménal de la technologie Ethernet<sup>®</sup>, devenue norme IEEE et ISO, plusieurs réseaux locaux furent annoncés, soumis à normalisation, avant de disparaître plus ou moins rapidement (le Token Ring d'IBM, le Token Bus soutenu par GM, Factor, Fieldbus, FDDI, DQDB, etc.). L'IEEE a joué, et joue encore, un rôle décisif dans la normalisation des réseaux locaux, rejointe par l'ETSI, notamment pour les réseaux locaux radio mobiles (technologies WiFi, LTE,...). On peut par exemple se reporter aux normes IEEE 802.11p et ETSI ITS-G5 pour les communications véhicules-infrastructures et intervéhiculaires.

Le déploiement massif des réseaux locaux au cours des années 1980, principalement dans les entreprises<sup>4</sup>, accompagne l'explosion des micro-ordinateurs (en nombre comme en puissance de calcul). Il va permettre le déploiement massif des protocoles internet, les seuls protocoles non « propriétaires » implantés sur toutes les machines (souvent par des développements libres, d'origine universitaire). Cette décennie verra la naissance ou l'ancrage des principaux concepts qui sous-tendent les technologies et usages d'aujourd'hui, par exemple la messagerie, le modèle client-serveur, le modèle transactionnel, les bases de données distribuées, les systèmes d'exploitation distribués, etc., en bref, tout ce qui concerne le partage explicite ou implicite de ressources locales et/ou distantes, technologiques et/ou humaines. Le modèle en couche ISO/OSI prouvera sa robustesse pour ce qui concerne les réseaux câblés. En revanche, il sera progressivement remis en cause avec l'avènement des réseaux locaux sans fils, pour lesquels le « compactage » des couches (*cross-layer*) est inévitable si l'on vise l'optimisation des performances. Les années 1990 voient l'avènement de nombreuses ruptures technologiques. Les technologies optiques multiplient par un facteur 1 000 la capacité de transmission des liaisons cœur de réseau. La technologie ADSL accroît considérablement le débit des lignes téléphoniques qui relient les particuliers aux réseaux. Les réseaux locaux sans fils WiFi connaissent un succès quasi immédiat, de même que le réseau téléphonique GSM complètement numérique qui offre un canal de transmission de données. L'image aussi passe au numérique avec les normes JPEG et surtout MPEG. Il devient possible de recevoir et visualiser un film sur son ordinateur. La véritable rupture d'usage se produit au début des années 1990, avec l'invention au CERN et la diffusion du logiciel libre Mosaic<sup>5</sup> et donc du concept de navigateur avec son langage de description de données HTML. Les utilisateurs d'ordinateurs personnels déjà très nombreux disposent soudain

---

3. Robert Metcalfe (1946-), co-inventeur d'Ethernet, est à l'origine de la société 3Com qui, dans les années 1980, a joué un rôle essentiel vis-à-vis de l'évolution d'Ethernet<sup>®</sup> et sa montée en débit, de 10 Mb/s à plusieurs Gb/s aujourd'hui.

4. Les déploiements étant effectués au sein des entreprises, le phénomène « réseau local » ne fut pris en compte que tardivement par les opérateurs du monde des télécommunications. La disparition des PABX était en marche.

5. Publié en 1993 alors que, 3 ans après son lancement, le World Wide Web développé par le CERN ne comptait que 200 sites, Le projet Mosaic est alors dirigé par Joseph Hardin, les principaux développeurs étant Eric J. Bina (programmation) et Marc Andreessen (programmation et support). Il n'est pas le premier navigateur web graphique, puisque précédé par quelques autres, dont le navigateur appelé « WorldWideWeb », mais il est le premier navigateur à avoir affiché les images (GIF et XBM) dans les pages web elles-mêmes, puis à supporter les formulaires interactifs dans les pages.

sur leur écran d'un outil simple leur permettant de consulter des données du monde entier. Le World Wide Web passe du statut de réseau universitaire au statut de réseau universel. Dans les années 2000, grâce aux téléphones mobiles « intelligents » (smartphones) et à l'avènement des réseaux 3G puis 4G, le réseau (internet et web) devient une facilité accessible au plus grand nombre.

Cette réalité suscite un intérêt grandissant chez les nouveaux acteurs du numérique (Google et Apple étant les tout premiers), qui investissent progressivement l'industrie des media et inventent les nouvelles stratégies fondées sur la publicité, sur leurs plateformes d'achat (musique, navigation personnalisée, etc.), et sur les plateformes de mise en relation. En conséquence, les entreprises modifient profondément leurs propres modèles économiques et leurs modes d'intervention, en généralisant les approches B2B (*business to business*) et B2C (*business to customer*). Les plateformes de commerce en ligne, de diffusion de films, etc., connaissent un succès foudroyant. En parallèle, apparaissent des initiatives non marchandes. Ainsi, Wikipédia permet la création quasi illimitée, par les internautes eux-mêmes, d'articles de diffusion de la connaissance sur presque tous les sujets. Également, pour qui dispose d'une connexion Internet, les premiers services gratuits de téléphonie et de visiophonie, fondés sur IP permettent de se passer des opérateurs. Skype connaît un immense succès.

La décennie 2010 voit la confirmation des (r) évolutions en matière de services et surtout d'usages destinés aux particuliers, avec les approches C2C (*customer to customer*), les outils permettant à tout un chacun de créer des blogs, l'explosion des réseaux sociaux (Facebook, LinkedIn, Twitter, etc.), les jeux en réseau, la réalité virtuelle. Grâce aux objets personnels mobiles (tablettes, PC ultra-portables, mais surtout smartphones), la connectivité devient permanente si on le souhaite. Le réseau devient quasi invisible, à l'instar du réseau électrique. On accède à des services, sans nécessairement savoir « où » ils sont fournis. Les services fondés sur l'infonuage (*cloud computing*) et la géolocalisation (GPS, Galileo, Glonass, etc.) sont de type perpétuel (*anywhere anytime*). Ce qui exacerbe les risques d'invasion de la vie privée et de sécurité/confidentialité des données personnelles, en plus de la sécurité du réseau lui-même. La protection contre les attaques intentionnelles, les intrusions, le piratage, les dénis d'accès, les inondations, ainsi que l'anonymisation des requêtes, des noms et adresses, l'impossibilité de traçage – un véritable enjeu dans le domaine de la mobilité terrestre individuelle –, sont des sujets d'importance capitale pour lesquels il faut s'attendre à des innovations majeures, tant techniques que sociétales. Avec l'internet des objets et les réseaux d'énergie intelligents (*smart-grids*), il ne sera plus nécessaire de demander des services au réseau, le réseau, omniprésent, assurera ceux dont nous aurons souhaité vouloir disposer. En attendant l'éventuelle arrivée des réseaux corporels (*body area networks*).

Ce bref survol donne une idée de l'ampleur des sujets qui relèvent du domaine des réseaux, notamment d'internet. Il n'était pas envisageable pour les auteurs de les traiter tous en détail. Chaque technologie, chaque famille d'application, renvoie à des champs d'études complexes, qui nécessitent des ouvrages spécifiques. Ainsi, par exemple, ne sont pas abordées les questions relatives à l'administration des réseaux, à la sécurité, aux réseaux dits cachés (*dark nets*). Les auteurs de cet ouvrage d'introduction aux réseaux ont délibérément choisi de traiter uniquement des principes et

technologies cœur de l'internet. L'ouvrage fournit les bases permettant d'étudier tous les autres sujets.

Dans le chapitre 1 est présenté le principe même d'un service de communication numérique par paquets. Les notions de rendement, débit utile, délai de transit, délai d'acheminement, etc., sont expliquées, tandis que la problématique de l'adressage et différents modes de constructions sont décrits. Le chapitre 2 présente le modèle de référence ISO/OSI et les concepts d'entités homologues, de protocoles, de message. Le chapitre 3 présente la problématique de communication sur une voie physique et la notion de protocole. Les structures de messages (ou enveloppes protocolaires) et les mécanismes protocolaires sont décrits et illustrés dans le cas de LAP-B. Le chapitre 4 décrit le protocole IP et les mécanismes de routage. Enfin, le chapitre 5 décrit les deux services de transport TCP et UDP, les mécanismes protocolaires et le mode de gestion des congestions de TCP. Le modèle client-serveur et la programmation de communications dans les langages C, Python et Java y sont abordés.

Cet ouvrage s'adresse aux étudiants et aux ingénieurs qui souhaitent s'initier aux principes des réseaux et à leurs mécanismes. Son objectif est de mettre en évidence les principes de conception qui sont appliqués dans tous les systèmes communicants. Cet ouvrage est le support des MOOC « Principe des réseaux de données » diffusé sur FUN, et « Digital Network Essentials » diffusé sur edX.org. Les exercices et travaux pratiques associés aux différents chapitres de l'ouvrage sont disponibles dans ces deux cours en ligne. Ces travaux pratiques proposés en ligne permettent d'apprendre à utiliser un analyseur de réseau (outil indispensable aux techniciens du réseau), à construire un schéma de réseau et son plan d'adressage, etc. Des travaux dirigés permettent de vérifier la bonne compréhension des différentes notions décrites dans l'ouvrage.

Gérard LE LANN  
Directeur de Recherche émérite, INRIA  
Prix Willis Lamb 2012, Académie des Sciences



Le réseau internet a pris une place considérable aussi bien dans la vie quotidienne que dans le fonctionnement des entreprises, créant ainsi le substrat pour l'économie dite numérique. Aucun domaine n'échappe à l'usage des réseaux et, prochainement, grâce à l'internet des objets entre autres, les réseaux seront au plus près de nos activités. Internet est désormais le réseau intégrateur de tous les services tels que transmission de données, téléphonie, vidéo, loisirs, commerce, industrie du futur, objets connectés, *smart-grid*, etc.

Cet ouvrage d'introduction aux réseaux a pour principal objectif de mettre en évidence les principes de conception qui sont appliqués dans tous les systèmes communicants, tout en mettant l'accent sur les trois protocoles qui sont au cœur d'internet : TCP, UDP et IP.

Sont expliqués, illustrés et présentés en détail :

- le modèle en couche dit ISO/OSI ;
- les concepts d'entités homologues, de protocoles, de message, etc. ;
- les notions de rendement, débit utile, délai de transit, délai d'acheminement ;
- la problématique de l'adressage et différents modes de constructions ;
- les structures de messages (ou enveloppes protocolaires) et les mécanismes protocolaires dans le cas de LAP-B et de TCP/IP ;
- les mécanismes de routage ;
- le modèle client-serveur et la programmation de communications dans les langages C, Python et Java.

Cette nouvelle édition entièrement revue peut également servir de support « écrit » aux MOOC « Principe des réseaux de données » diffusé sur France Université Numérique, et « Digital Network Essentials » diffusé sur edX.org. Les exercices et travaux pratiques associés aux différents chapitres de l'ouvrage sont disponibles dans ces deux cours en ligne : ils permettent d'apprendre à utiliser un analyseur de réseau (outil indispensable aux techniciens du réseau) et à construire un schéma de réseau et son plan d'adressage. Des travaux dirigés permettent de vérifier la bonne compréhension des différentes notions décrites dans l'ouvrage.

Pratique, didactique et abondamment illustré, ce livre s'adresse aux étudiants et aux ingénieurs qui souhaitent s'initier aux principes des réseaux et à leurs mécanismes.

**Pierre Rolin** a été directeur de Télécom Sud Paris, adjoint au directeur de la recherche d'Orange Labs, il a enseigné dès 1980 les réseaux dans de nombreuses écoles en France dont Télécom Bretagne, ENSTA, INSTN, et à l'étranger.

**Laurent Toutain** est maître de conférences à Télécom Bretagne dans le département RSM (réseaux, sécurité, multimédia).

**Géraldine Texier** est maître de conférences à Télécom Bretagne dans le département RSM (réseaux, sécurité, multimédia).

**Olivier Paul** est maître de conférences à Télécom Sud Paris dans le département RST.

**Claude Chaudet** est maître de conférences à Télécom ParisTech au sein du département « Informatique et réseaux ».

