

## Préface

Qu'écrire d'original sur les réseaux alors que des milliers de livres leur sont consacrés ? C'est le défi relevé par les auteurs de cet ouvrage qui ont choisi de mettre en évidence les nombreux points communs des types de réseaux les plus marquants pour en dégager des méthodes et outils d'étude. Et cette démarche est nouvelle dans la littérature.

La notion et le terme même de réseau sont fortement usités depuis quelques dizaines d'années. Pourtant le mot est ancien. Son étymologie remonte au latin *retiolus*, diminutif de *retis* qui signifie « filet ». Le terme anglais *network* s'appuie sur le même « filet ». D'abord utilisé dans les domaines du textile, de la médecine et des fortifications militaires, le mot a servi à partir du XIX<sup>e</sup> siècle pour désigner l'ensemble des chemins, des routes, puis des voies ferrées qui parcourent une région ou un pays. Les technologies de l'information et de la communication lui ont donné cette place prépondérante aujourd'hui.

L'organisation du livre en trois parties, avec des prérequis correspondants énoncés dans l'introduction, répond bien à une préoccupation pédagogique et aux diverses attentes des lecteurs : ce livre n'est pas un roman, il ne nécessite pas une lecture linéaire.

La partie 1 présente quelques types de réseaux significatifs apportant des services de qualité croissante aux usagers dans leurs activités personnelles ou professionnelles. Elle décrit également la modélisation pour les réseaux à flux discrets, c'est-à-dire dans lesquels circulent des entités physiques ou des informations séparables et dénombrables. Cette modélisation est à la base de

la compréhension de phénomènes de retard et de déplacement géographique qui ne sont pas nécessairement intuitifs et que chacun a pu observer : pourquoi nous sommes bloqués dans un bouchon sur la route alors que nous ne constatons par la suite aucun accident ni rétrécissement des voies.

La partie 2 concerne les méthodes d'analyse et d'évaluation de performance. J'en ai utilisé intensément certaines dans mes travaux de recherche sur les réseaux de communication à temps contraint et en enseignement sur ces mêmes réseaux. De mon expérience, la simulation paraît toujours plus facile que les méthodes analytiques. Mais si elle est incontournable dans les cas complexes, elle conduit parfois à des résultats faux car le modèle n'est pas élaboré assez minutieusement, toutes les interactions ne sont pas simulées et certains paramètres peuvent être mal estimés.

La partie 3 décrit trois études sur des réseaux dont les finalités et les modes de fonctionnement sont très différents. Le cas du réseau social est particulièrement instructif. Ces études illustrent bien les gains en qualité de service apportés par certains réseaux ou à quels résultats non intuitifs les simulations peuvent conduire.

Des problématiques majeures ont fait leur apparition depuis quelque temps, en particulier celles de la sécurité et de l'impact environnemental, qui concernent particulièrement les réseaux. Si ce livre ne les aborde pas ou peu, il permet d'en mesurer l'importance par son éclairage sur l'organisation et le fonctionnement des réseaux.

Je termine en félicitant Jean-Paul Bourrières pour son idée et pour son travail de coordination de l'écriture de cet ouvrage. Je félicite également tous les auteurs qui ont contribué à celui-ci par leur apport de connaissances et de résultats d'études concrètes qui crédibilisent leurs méthodes et les outils présentés.

Bonne lecture.

Francis LEPAGE  
Professeur émérite  
CRAN-UMR 7039 – CNRS  
Université de Lorraine

## Introduction

L'omniprésence des réseaux dans l'organisation économique et sociale fait du concept de réseau un paradigme du monde contemporain. Les besoins en services divers (transports, énergie, consommation de biens manufacturiers, offre de soins, information et communication, etc.) impliquent les usagers dans un entrelacement de réseaux, qui sont autant de maillages de flux matériels et immatériels, au sein desquels le consommateur-citoyen est tantôt destinataire de biens et de services issus des industries, tantôt lui-même constituant de l'organisation (réseaux sociaux). Dans cet ouvrage, les auteurs se sont interrogés sur les invariants qui unifient les réseaux dans leur diversité, ainsi que sur les spécificités qui les différencient. Cet essai ambitionne de produire, dans une certaine mesure, une vision unifiante des réseaux et des problématiques d'analyse, de modélisation, et d'optimisation qui s'y rattachent, en proposant une grille de lecture qui distingue un niveau générique où ces systèmes trouvent une interprétation commune, et un niveau spécifique où des méthodes d'étude appropriées sont mobilisées. La présentation d'études de cas, volontairement issues de domaines fort éloignés, vise à illustrer le propos de l'ouvrage par des études concrètes.

Cet ouvrage comporte trois parties. La partie 1 « [Variété des réseaux et modélisation](#) », propose une analyse comparée des réseaux qui nous entourent, et présente les aspects généraux de modélisation qui prévalent dans un contexte d'ingénierie. Le lecteur trouvera dans le chapitre 1 une revue de la diversité des réseaux par une approche fonctionnelle, c'est-à-dire par les services rendus à l'utilisateur, dans le but de caractériser et classer les réseaux dont nous disposons aujourd'hui. On rappelle ensuite les contextes d'ingénierie qui se posent à propos des réseaux, ainsi que les enjeux de performance qui

les accompagnent en termes de qualité de service, de productivité, voire d'impact environnemental. L'ingénierie moderne est basée sur les modèles. Préalable aux raisonnements d'analyse et d'optimisation, la modélisation d'un système, ici d'un réseau, utilise des formalismes de représentation standardisée (IDEF, SADT, GRAI, automates à états, réseaux de Petri, réseaux de files d'attente, UML, etc.), partagés par un nombre plus moins important d'experts, faisant *de facto* de chaque formalisme un langage technique facilitant les échanges au sein d'une communauté de spécialistes. Néanmoins, l'exercice de modélisation ne constitue nullement un objectif en soi, ni une méthode de résolution de problèmes, mais seulement une représentation simplifiée d'un système réel, préalable aux raisonnements d'ingénierie qui s'y rapportent. Citons à ce propos la définition donnée, dans le domaine informatique, par l'OMG<sup>1</sup> : « A model represents some concrete or abstract thing of interest, with a specific purpose in mind », ce qui définit un modèle en tant que représentation d'une entité concrète ou abstraite permettant de raisonner sur cette entité. Plus spécifiquement, le focus du chapitre 2 porte sur les phénomènes qui régissent les flux, matériels ou non, qui se forment dans un réseau. Nous avons ciblé le chapitre sur le cas des flux discrets (de véhicules, de lots matériels, de paquets de données informatiques, etc.), dont la cinématique s'avère considérablement plus riche que ne l'est celle des flux continus (réseaux de distribution de fluides et d'énergie). En effet, les entités séparables qui constituent les flux discrets peuvent faire l'objet de traitements et de routages individualisés au sein du réseau, ce qui rend la modélisation des flux plus complexe. On présente les principaux phénomènes (synchronisation ressource-flux, congestion) qui déterminent la cinématique des flux discrets dans un réseau, ainsi que le processus de diffusion, qui s'applique plus spécifiquement aux flux discrets immatériels (réseaux de communication et d'information, réseaux sociaux numériques). Une revue des principaux formalismes de modélisation des flux discrets montre malheureusement qu'aucun de ces formalismes ne parvient, seul, à couvrir l'ensemble des besoins de modélisation tels qu'ils ressortent de ce qui précède, ce qui rend nécessaire une approche de modélisation hétérogène et multi-échelle. Au total, le chapitre 2 présente les aspects généraux de modélisation des flux discrets dans les réseaux les plus divers. Le niveau de technicité de ce chapitre se limite aux connaissances de base sur les graphes et les réseaux de Petri, DEVS, ainsi qu'aux bases de statistique et probabilités.

---

1. *Object Management Group.*

Sur la base d'un modèle jugé représentatif des phénomènes réels mis en œuvre dans un réseau, l'analyste aura à sa disposition l'état de l'art sur les méthodes d'évaluation et d'amélioration de performances. Comme dans la plupart des domaines scientifiques, on procèdera ici par des méthodes exactes, des heuristiques ou des techniques de simulation numérique, ou encore par une combinaison de ces différentes approches. Les méthodes exactes répondent à un idéal scientifique en pré-établissant une solution paramétrique, donc valable pour une classe de cas. Les points forts des méthodes exactes sont multiples :

- rapidité de l'évaluation de performance, par simple instanciation des valeurs des paramètres de solutions pré-établies ;
- facilitation du raisonnement d'ingénierie inverse qui consiste, pour un objectif de performance donné, à déterminer les valeurs des paramètres qui conduisent à la performance désirée ;
- plus globalement, apport d'une compréhension profonde du lien entre la configuration du système et les performances qui en résultent.

En contrepartie, le point faible des méthodes exactes et, dans une moindre mesure, des méthodes approchées (heuristiques) de résolution, est d'exiger du cas considéré le respect des hypothèses qu'a nécessité la prérésolution théorique d'un problème général, ce qui réserve cette approche au cas des systèmes de faible complexité, ou appartenant à des classes de cas fortement typées. *A contrario*, les réseaux complexes nécessitent de recourir à une technique de *simulation*, dont les avantages et les limites sont à l'opposé de ceux des méthodes exactes. En effet, le point fort de la simulation est son applicabilité à l'évaluation de tout réseau, sous réserve d'avoir auparavant modélisé les principaux mécanismes de son fonctionnement. Cependant, le point faible de la simulation est l'absence de modèle inverse, ce qui prive l'analyste d'une compréhension profonde du lien entre la configuration du réseau et les performances qui en découlent. L'exploration de ce lien nécessite des campagnes empiriques de simulation itérative, qui peuvent se heurter à des contraintes de temps de calcul et de coût acceptables.

La partie 2, « [Méthodes d'analyse des réseaux et applications](#) », illustre l'alternative rappelée ci-avant. Le chapitre 3 rassemble les principales méthodes théoriques pour l'évaluation, voire l'optimisation, de la cinématique des flux discrets et des performances qui s'y rattachent, dans des réseaux peu complexes de type particulier. Il s'agit, d'une part, des réseaux à flux additifs répondant

à la loi des nœuds de Kirchhoff, et, d'autre part des réseaux à flux synchronisés dont on peut trouver des exemples dans les organisations *flow-shop* de production manufacturière. Nous traiterons ainsi un problème de dimensionnement d'atelier en exprimant le débit de production en fonction des temps d'opération des machines et du nombre de conteneurs en circulation. *A contrario*, le chapitre 4 présente les techniques générales de simulation utilisables pour l'analyse des réseaux, ainsi qu'une application spécifique à l'analyse du processus de propagation des flux dans les réseaux sociaux. La technicité des chapitres 3 et 4 requiert quelques prérequis de lecture (voir tableau I.1).

La partie 3, « *Études de cas* », illustre, par des exemples issus de projets, la similarité et les spécificités de l'ingénierie des réseaux dans des domaines variés : *Smart Grid*, logistique forestière, propagation d'informations dans un réseau social.

Pour chaque cas, nous présenterons au préalable une fiche signalétique du projet résumant :

- la fonction ou nature du service offert par le réseau ;
- le type de réseau : topologique (les nœuds représentent des lieux fixes) *versus* sociologique (les nœuds représentent des individus mobiles) ;
- le mode d'inclusion des utilisateurs : sont-ils des entités circulantes, sont-ils associés aux nœuds du réseau, si oui lesquels (nœuds sources, intermédiaires, terminaux) ?
- le caractère dédié ou non de l'infrastructure du réseau ;
- l'intermédiation éventuelle d'opérateurs ;
- la nature des flux (physiques *versus* immatériels, continus *versus* discrets) et l'unité de flux ;
- le mode de transport assurant les flux (ambient *versus* routage) ;
- le mode de pilotage (centralisé, embarqué, réparti) ;
- le contexte d'ingénierie relatif au projet présenté (conception, reconception, pilotage) et la problématique motivant l'étude (évaluation, optimisation) ;
- les outils d'analyse utilisés (résolution formelle, optimisation, simulation numérique).

Le tableau I.1 permettra au lecteur, le cas échéant, de se documenter préalablement à la lecture de certains chapitres.

		Titre	Connaissances prérequis
Partie 1	Chap. 1	Typologie des réseaux	–
	Chap. 2	Modélisation des réseaux à flux discrets	Graphes, réseaux de Petri, statistique et probabilités (bases)
Partie 2	Chap. 3	Méthodes exactes appliquées à l'analyse des flux dans les réseaux topologiques	Graphes, réseaux de Petri, statistique et probabilités
	Chap. 4	Techniques de simulation appliquées à l'analyse des réseaux sociologiques	Automates à états Langages à agents
Partie 3	Chap. 5	<i>Smart Grid</i>	Notions d'optimisation
	Chap. 6	Logistique forestière	Notions d'optimisation
	Chap. 7	Réseaux sociaux numériques multicouches	Simulation multi-agent, réseaux et processus

**Tableau I.1.** *Prérequis de lecture*