

Routes et Réseaux : Un Tour d'Horizon

A. Chaintreau*

Time stamp : 24 mai 2007, 21:14

Résumé

Ce document correspond à trois séances de cours sur le routage dans les réseaux, donnés à l'École Normale Supérieure pour les étudiants de première année. C'est une "introduction rapide à la recherche", qui part de zéro et décrit les principes des protocoles utilisés dans les réseaux, ainsi que les techniques mathématiques pour les analyser.

Il ne demande aucune connaissance préalable sur les algorithmes, il est seulement requis que le lecteur possède quelques notions élémentaires de probabilité (pour les sections 6 et 7) ; des notions classiques d'algèbre linéaire peuvent être utiles pour comprendre le cadre des résultats de la section 3, mais elles ne sont pas indispensables.

N.B. : La teneur des exercices commentés est indiquée de la manière suivante.

(\rightarrow) "élémentaire" : Ceci ne signifie pas que la réponse est évidente mais qu'elle tient en une seule phrase, qui est une application immédiate d'un résultat du cours.

Il est conseillé de revoir le cours si la réponse n'apparaît pas en quelques minutes.

(\curvearrowright) "intermédiaire" : la réponse à cette question ne va pas de soi, mais elle découle des résultats connus par un effort raisonnable.

(\curvearrowleft) "tortueux" : cette question nécessite soit de faire intervenir une notion plus avancée, soit de suivre un raisonnement particulièrement long ou astucieux. Il s'agit souvent de thème d'ouverture.

Il est conseillé de ne pas passer trop de temps les questions tortueuses.

	Date	Intervenant(s)	Contenu
Routage 1	23 mars	A. Chaintreau	Graphes, Algorithmes et Algèbres (§2-§3)
TD 1	30 mars	A. Chaintreau	Applications (§2-§3)
Routage 2	30 mars	A. Chaintreau	Protocole de routage (§4)
TD 2	6 avril	A. Chaintreau	Applications (§4)
Routage 3	27 avril	R. Teixeira	Routage inter-domaine (§2-§3)
TD 3	4 mai	A. Chaintreau	Convergence de politique d'opérateurs

*augustin.chaintreau@thomson.net

Table des matières

1 Motivation	4
1.1 Bibliographie synthétique	5
2 Algorithmes de graphe	6
2.1 Le problème du plus court chemin	6
2.2 longueur positive : un algorithme glouton	7
2.2.1 Implémentation et complexité	8
2.3 longueur générale : potentiel	11
2.3.1 Potentiel et relaxation par arc	12
2.3.2 Algorithmes dans le cas général	13
2.3.3 Equation de Bellman (exercice commenté)	16
2.4 Problèmes conjoints (exercices commentés)	16
2.4.1 le cas sans circuit : un algorithme linéaire	16
2.4.2 Le cas de toutes les sources	17
2.4.3 Le cas d'une source à un ensemble cible	18
Avant de tourner la page	18
3 Méthodes algébriques	19
3.1 Pourquoi et où utiliser une algèbre?	19
3.2 Axiomes et convergence	20
3.2.1 Définitions	20
3.2.2 Régularité et convergence	21
3.2.3 Pré-ordre, diïdes	22
3.3 Algorithmes	24
3.3.1 Un algorithme général	24
3.3.2 Cas d'un algorithme glouton (exercice commenté)	24
3.4 Applications (exercices commentés)	25
3.4.1 fiabilité	25
3.4.2 Le problème des k chemins optimaux	25
3.4.3 Chemins quasi optimaux	26
3.4.4 Dioïde d'endomorphismes	26
Avant de tourner la page	27
4 Intra-domaine : Le Routage bien tempéré	28
4.1 Vecteurs de distance : calcul distribué	28
4.1.1 relaxation synchrone	29
4.1.2 relaxation asynchrone	29
4.1.3 mesure de la complexité (exercice commenté)	31
4.1.4 comptage à l'infini, et comment l'éviter	32
4.1.5 terminaison (exercice commenté)	33
4.2 Etats de liaison : connaissance partagée	34
4.2.1 Annoncer un événement : Inondation	34
4.2.2 Annoncer le dernier événement : numéro de séquence	35
4.2.3 Annoncer le dernier événement sans numéro de séquence	35

4.3	Les protocoles de routages les plus courants	37
	Avant de tourner la page	38
5	Inter-domaine : Politiques d'opérateurs	39
5.1	Pourquoi étudier l'inter-connection?	39
5.2	Routage politique	40
5.2.1	Les principes	40
5.2.2	Les règles	40
5.2.3	Contre-exemples et pannes célèbres	40
5.2.4	Le protocole actuel	40
5.3	Convergence de routage politique (exercice commenté)	40
	Avant de tourner la page	44
6	Routage exotique 1 : Réseaux sans routeurs	44
6.1	Contexte	44
6.2	Extension des protocoles classiques (AODV, OLSR).	44
6.3	Nouveaux paradigmes	44
7	Routage exotique 2 : Réseaux applicatifs	45
7.1	Contexte	45
7.2	Approche "structurée"	45
7.3	Approche "non-structurée"	45
A	Terminologie de théorie des graphes	47
A.1	Definitions	47
A.2	Les différentes représentations d'un graphe	47
A.2.1	Représentations algébriques	47
A.2.2	Représentations machines	47
B	Réponses des exercices commentés	48

1 Motivation

“Trouver sa route” est non seulement un problème courant, mais une brique de base pour la plupart des mécanismes de communication. C’est l’exemple type d’une tâche qui réclame une coordination au delà d’une source et de la destination d’un échange d’information. Cette coordination, qui peut être plus ou moins bonne entre tous les noeuds d’un réseau, est le sujet de ces notes de cours.

L’esprit de ce cours est une “introduction rapide à la recherche”, ses objectifs sont : (1) introduire les problèmes et les résultats fondamentaux (convergence, efficacité, ou au contraire résultat négatif) ; (2) décrire les principes essentiels d’organisation des protocoles de communication, les liens entre les domaines de recherche actuels (cf. Fig. 1) ; (3) offrir des exemples types de techniques de preuve pour *mettre la main à la pâte* sans attendre.

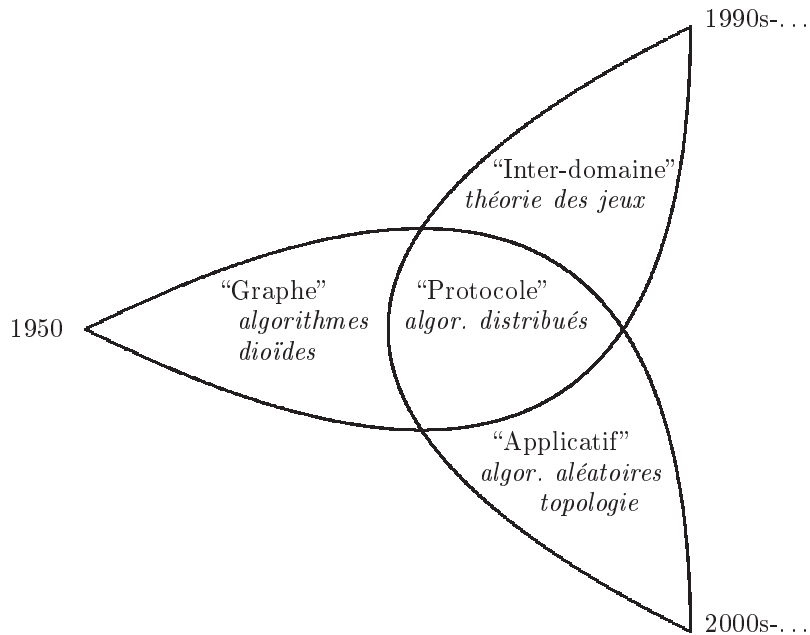


FIG. 1 – Principaux domaines de recherche introduits dans ce cours

Ce qu’on y trouvera : Un récapitulatif de résultats sur les chemins de longueur minimum dans les graphes ; une introduction à l’algèbre tropicale (dans les semi-anneaux et dioïdes) ; un tour d’horizon des algorithmes de routages distribués, et de leurs preuves ; une rapide description des protocoles les plus courants ; une présentation de deux résultats récents ainsi que de leurs domaines d’application ; quelques exercices pour s’entraîner ; quelques références pour aller plus loin.

Ce qu'on y trouvera pas : Des résultats de complexité non élémentaires (classification ou complétude des problèmes posés); une description détaillée des protocoles de communication; les principes d'un réseau à commutation de circuits; ce qui est en rapport avec les flots, les circuits hamiltoniens, les couplages de graphe, la programmation linéaire, la planification de topologie.

Plan : La section 2 traite du problème du plus court chemin d'un point de vue théorique, en supposant que le graphe de communication est entièrement connu et qu'il n'évolue pas. Les solutions utilisées se trouvent être des méthodes de résolution d'un problème algébrique sous des axiomes généraux assez faibles, ce qui fait l'objet de la section 3. Dans la section 4, nous présentons les méthodes pratiques déployées pour organiser ce calcul de manière distribuée dans un réseau IP. La section 5 est dédiée au problème de l'inter-connection entre domaines autonomes. Ce document se conclue sur deux sections traitant de cas où les hypothèses classiques des réseaux de communication ne s'appliquent pas : un ensemble de noeuds communiquant par radio sans une infrastructure préalable (section 6); un ensemble de terminaux aux extrémités d'un réseau, qui communiquent entre eux sans point d'adressage central, et sans accès à la signalisation des routes sous-jacentes (section 7).

1.1 Bibliographie synthétique

Les deux premières sections de ce document sont inspirées de deux chapitres de [GM95] avec quelques simplifications. Ce livre est donc idéal pour aller plus loin que les résultats présentés dans ces notes, c'est aussi l'une des rares références générales qui traite des méthodes de résolution algébrique. Plus généralement, les problèmes de calcul de plus court chemin sont traités dans les livres de références sur les algorithmes et la complexité. Certains auteurs ne les présentent pas à part, mais comme un exemple parmi d'autres techniques d'algorithmes [KT05]. Ainsi, si les résultats de ce cours sont maîtrisés, ceci permet par la suite d'avoir un aperçu rapide de plusieurs domaines.

L'étude des réseaux de transports de données est devenu une discipline à part entière au cours des années 1980, et ce domaine s'est fortement élargi avec le déploiement rapide d'Internet au cours des années 1990. Parmi les livres de références, nous recommandons par ordre chronologique [BG92], [Kes97], et [KR00]. Le premier à l'avantage de contenir une collection assez complète de résultats théoriques sur les principes fondamentaux; les deux autres livres offrent une vision plus détaillée de l'état de l'art actuel. Enfin, nous recommandons [Hui95] qui offrent dans les premiers chapitres une synthèse éclairante des aspects technologiques, historiques et économiques qui interviennent dans le déploiement des réseaux et la conception des protocoles.

Pour les domaines de recherche les plus récents, les articles que nous citerons sont la plupart issus des journaux et conférences suivants : ACM SIGCOMM, IEEE Infocom, ACM/IEEE ToN, IEEE JSAC, pour le domaine des réseaux, Journal of the ACM, ACM PODC, ACM STOC et ACM SPAA, pour les algorithmes distribués.

Références

- [Ber70] C. Berge. *Graphes et Hypergraphes*. Dunod, Paris, 1970.
- [BG92] Dimitri Bertsekas and Robert Gallager. *Data networks (2nd ed.)*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1992.
- [Die06] Reinhard Diestel. *Graph Theory*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 3rd edition, 2006.
- [GM95] Michel Gondran and Michel Minoux. *Graphes et algorithmes*. Eyrolles, Paris, 3rd edition, 1995.
- [GM02] Michel Gondran and Michel Minoux. *Graphes, dioïdes et semi-anneaux : nouveaux modèles et algorithmes*. Tec et Doc, Paris, 1st edition, 2002.
- [Hui95] Christian Huitema. *Le routage dans l'Internet*. Eyrolles, Paris, 1995.
- [Kes97] S. Keshav. *An engineering approach to computer networking : ATM networks, the Internet, and the telephone network*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1997.
- [KR00] James F. Kurose and Keith W. Ross. *Computer Networking : A Top-Down Approach Featuring the Internet*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 2000.
- [KT05] Jon Kleinberg and Éva Tardos. *Algorithm Design*. Addison Wesley, 1st edition, 2005.
- [Lyn96] Nancy A. Lynch. *Distributed Algorithms*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1996.
- [PS82] Christos H. Papadimitriou and Kenneth Steiglitz. *Combinatorial optimization : algorithms and complexity*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1982.