

Notice de Titres et travaux

La liste de références incluse après ce texte est relative à celui-ci, mes références complètes sont jointes à mon curriculum.

Profil Général, Outils & Techniques

Ma recherche porte sur la modélisation de problèmes pratiques par des structures combinatoires (surtout par la théorie des graphes) ainsi que sur la résolution formelle ou algorithmique des problèmes théoriques ainsi définis. Le domaine d'application principal de ces recherches est aujourd'hui l'optimisation pour les télécommunications. Parmi les problématiques abordées citons : la conception d'architectures logiques ou virtuelles pour les réseaux (ATM, groupage, partage de ressources, MPLS), le routage dans les réseaux optiques (WDM), les réseaux radio, les réseaux pair à pair.

Mes recherches sont fondées sur trois disciplines étroitement interconnectées que sont les Mathématiques Discrètes, l'Algorithmique et l'Optimisation Combinatoire. Beaucoup d'aspects algorithmiques ne sont pas spécifiques à la théorie des graphes puisque certains algorithmes utilisent des principes généraux (partitionnement, structures de données, programmation convexe, programmation dynamique, ...). J'utilise des méthodes issues de l'analyse d'algorithmes (évaluation de quantités combinatoires, techniques de comptage) afin d'analyser la complexité des algorithmes (ou les propriétés de nos solutions), ou des techniques voisines de comptage (probabilités discrètes, algorithmique aléatoire, marches aléatoires). J'ai aussi recours à un certain nombre d'outils issus de la recherche opérationnelle comme la programmation convexe (programmation linéaire, programmation semi définie positive), les techniques d'arrondi aléatoire, et de résolution de problèmes en nombres entiers (arbres de recherche). Depuis peu l'aspect dynamique des réseaux me conduit à m'intéresser aux outils provenant du domaine de l'évaluation de performances (chaînes de Markov, critères de stabilité, ...). Enfin de nombreux outils des Mathématiques classiques sont souvent utiles afin de résoudre les questions que nous étudions (algèbre linéaire, théorie des groupes, ...).

Depuis 1999, je poursuis mon orientation vers l'optimisation combinatoire, tout en conservant une partie restreinte de mes activités plus anciennes (concernant la résolution complète et formelle de problèmes particuliers). Cette démarche accompagne l'orientation du projet SLOOP, devenu depuis MASCOTTE, puisque les problématiques étudiées sont de nature de plus en plus algorithmiques. Je cherche donc désormais à faire si possible progresser l'état des techniques de résolution des problèmes d'optimisation (en général issus du domaine des télécommunications), mais je tente aussi d'implémenter et de valider ces méthodes (projets avec des industriels, nombreux stages d'étudiants).

Actuellement je tente d'intégrer de plus en plus les aspects dynamiques et aléatoires qui caractérisent les réseaux modernes, je tente donc de fournir des solutions plus locales et distribuées ainsi que de les évaluer dans un contexte stochastique.

Afin de présenter mes recherches actuelles et passées, je les ai organisées en 6 thèmes qui, bien qu'arbitraires me semblent représenter ma recherche. J'ai plus particulièrement détaillé les travaux récents ou ayant connu de nouveaux développements :

1. Réseaux Radio, Capteurs, WiFi,
2. Routage dans les réseaux optiques,
3. Construction et propriétés des réseaux,
4. Topologies Virtuelles,
5. Réseaux Distribués et Pair à Pair,
6. Communications en mode store & forward et wormhole.

1 Réseaux Radio, Capteurs, Wifi

1.1 Réseaux radio, Graphes de disque, Percolation de site ...

Une particularité des réseaux dans le plan est l'importance de la géométrie et celle de la percolation (voir la bible : Grimmett Springer 1999), en particulier la correspondance quasi exacte entre le graphe modélisant un réseau radio et la percolation de type site sans le plan euclidien.

Le modèle de base de réseau radio est en ensemble de n points placés au hasard dans le plan (dans un carré d'aire n que l'on peut considérer comme n cellules de côté 1), on relie alors entre elles toutes les paires de points distants d'au plus ρ . On appelle de type de graphes *unit disk graphs*; la première question étudiée fut de déterminer la valeur de ρ assurant la connectivité. Le lien avec la percolation apparaît alors immédiatement : si on partitionne le carré en n boîtes d'aire 1, le processus de placement des points dans ces carrés élémentaires peut être assimilé à un processus de *Boules et Boîtes* (Balls and Bins) et l'on sait qu'environ $\frac{n}{e}$ boîtes seront vides, de même une aire de $A, A \ll n$ est vide avec probabilité e^{-A} . On peut donc déjà conclure qu'il va exister des points isolés dans un carré d'aire $\Theta(\log n)$ (ce qui correspond à un rayon de $\Theta(\sqrt{\log n})$). Il faut donc que $\rho = \Omega(\sqrt{\log n})$ sinon le graphe va contenir des sommets isolés. En modifiant très légèrement la place des points (déplacement < 1) on peut considérer que les points sont au centre des boîtes, le processus est alors analogue à un phénomène de percolation sur la grille où chaque sommet est actif avec probabilité $\frac{1}{e}$. Ce problème est bien connu en physique, et une application des résultats et techniques de percolation permet de montrer que si $\rho \geq \rho_0$, alors le graphe est (presque toujours) connexe sinon il est (presque sûrement) déconnecté. La détermination approximative de ρ_0 est fort simple (des boîtes de côté $c = \sqrt{\log n}$ sont vides et si l'on partitionne l'aire en $n/\log n$ boîtes de côté c chaque boîte contient un point, on a donc $\rho_0 = \Theta(\sqrt{\log n})$, la détermination de la valeur exacte est plus complexe (voir Penrose Random Geometric Graphs, Oxford University Press). Comme souvent l'article fréquemment cité (Gupta Kumar IEEE Conf on Decision and Control 1998) est postérieur et inférieur à l'article de Penrose.

Le jeux des Points et des Sommets [88]

Nous nous sommes donc intéressés au problème suivant : mettre en correspondance la structure aléatoire formée par n points dans un carré et la structure aléatoire formée par n sommets disposés en grille. Pour ce faire, nous mettons les deux structures en bijection via un couplage, la mesure de distance est alors soit la longueur totale du couplage soit la longueur maximum d'une de ces arêtes. Nous avons étudié ce problème dans un contexte plus général : celui où l'on place au hasard n points sur un graphe ayant n sommets. Par exemple, si le graphe cible est une ligne, le déplacement maximal minimal à effectuer est environ \sqrt{n} (principalement à cause de la déviation de la loi normale), pour une grille de dimension 2 on trouve $\sqrt{\log n}$. Ce résultat affirme donc que grille régulière et répartition aléatoire sont très proches.

Routage Géométrique Ad-Hoc [93]

Nous avons aussi exploré le routage ad-hoc directionnel dans un tel réseau sans obstacle. On suppose alors que les noeuds ne disposent d'aucune information, et qu'à chaque étape on cherche à se rapprocher de la destination. Le but est cependant de générer aussi peu d'interférences que possible. Une émission à distance r occupe une zone d'aire r^2 , il est donc souhaitable de procéder par petits pas. Kumar et Al ont indûment affirmé que le débit maximum uniforme dans un réseau radio est $(\frac{1}{\sqrt{n \log n}})$, en effet si on procède par sauts de ρ on va effectuer en moyenne \sqrt{n}/ρ sauts par connexion ce qui utilise une aire $\sqrt{n}\rho$, l'aire totale étant n on a donc au plus $K \leq \sqrt{n}\rho$ connections concurrentes (soit en moyenne $\frac{1}{\sqrt{n}\rho}$ par sommet) Kumar et Gupta (étrangement toujours cités) ont donc prétendu que la capacité des réseaux radio est au plus $\frac{1}{\sqrt{n \ln n}}$, c'est en effet évident quand on impose une puissance de transmission fixe – qui doit donc être $\rho_0 \sim \sqrt{\log n}$ –. Cependant si la puissance est ajustable, une route menant de x vers y sera principalement constituée de sauts de longueur ~ 1 . Le nombre moyen de sauts étant de l'ordre de \sqrt{n} , une transmission moyenne occupe alors une aire de \sqrt{n} et on donc peut espérer \sqrt{n} transmissions concurrentes en moyenne. Avec G. Meheut nous avons tenté de trouver un tel routage sans mémoire et chargeant les zones du plan par

\sqrt{n} routes. Par exemple on peut tenter de router de x vers y en restant près de la ligne droite xy tout en faisant des petits sauts. De tels routages conduisent cependant à une impasse car les routes croisant la zone d'aire $\log n$ vide située vers le centre de la zone vont induire une surcharge de celle-ci. Un routage centralisé existe cependant ; encore une fois il repose sur un argument de percolation. Les physiciens ont en effet prouvé qu'il existe $\Theta(\sqrt{n})$ routes reliant le haut et le bas de la zone qui sont sommets disjointes et qui utilisent des sauts de longueur bornée (en somme tout se passe comme dans une grille). En terme physique, dans la grille $G_{p,\rho}$ où les points sont supprimés avec probabilité p et les sommets à distance $\leq \rho$ connectés le phénomène suivant apparaît : si $\rho \leq \rho_0$ le flot allant du bas vers le haut est négligeable (i.e. $o(\sqrt{n})$), si $\rho \geq \rho_0$ le flot vaut $\Theta(\sqrt{n})$. Ceci permet de router sur une grille virtuelle $\Theta(\sqrt{n} \times \sqrt{n})$ qui est à peu près dense et d'y raccrocher les sommets qui n'y sont pas. Ceci fournit un routage global qui atteint le débit optimal. Durant notre étude nous avons découvert un article (Dousse IEEE/ACM Transactions on Networking 2006) jamais cité qui utilise cette approche. Notre but est maintenant de déterminer comment introduire la métrique duale de charge dans le routage local afin d'obtenir une politique de routage distribuée évitant les fameuses zones contenant des points isolés ; l'algorithme implémenté par G. Meheut semble le faire mais il reste à le prouver formellement.

Routage Optimal dans une grille

Le problème du routage de toutes les paires de connexion dans un réseau avec pour objectif de minimiser la charge (sur les sommets ou sur les liens) est appelé *problème d'indice de transmission* (lien ou sommet). Ce problème est extrêmement important ; en effet si les requêtes entre sommets sont indépendantes et uniformes et apparaissent avec une probabilité p_0 et si l'on route selon le routage optimal déterministe la charge d'un élément sera au plus environ $p_0 I + \Theta(\sqrt{p_0 I})$ à condition que $p_0 I$ soit au moins $\log n$ (par un argument standard d'arrondi aléatoire). I est en général élevé, son calcul dans le cas sommet est simple dans le cas des graphes de Cayley et de nombre de graphes sommets transitifs (Thèse Ginette Gauyacq labri 1995), en effet il est dans ce cas tout simplement égal à la distance moyenne dans le graphe divisée par le degré. L'indice de transmission est connu explicitement pour nombre de graphes classiques, sa valeur dérive en général d'un argument métrique (graphes de Cayley) ou d'un argument de coupe (arbres) – Notons que l'argument de coupe n'est autre qu'un argument métrique particulier.

Cependant dans le cas de la grille de dimension 2, on ne connaît pas l'indice de transmission. La question semble ancienne puisque C. Papadimitriou la posa en 1990. Donner une réponse approchée est trivial, il suffit de comparer au tore ou encore de comparer la charge du routage par des plus courts chemins classiques (XY) avec la congestion des sommets de la ligne médiane. On peut aussi pour une taille de grille donnée donner une approximation excellente quand la taille tend vers l'infini par simple arrondi aléatoire du routage fractionnaire optimal. Nous savons aussi en résolvant le problème fractionnaire pour des grilles $k \times k$, donner une formule qui est une $1 + \frac{1}{k}$ approximation. L'étude de ces grilles finies (par exemple de côté 100) montre très clairement que le trafic est dérivé du centre (surchargé) afin de passer par la périphérie, le dual semble assez régulier mais nous ne disposons pas encore d'une formule véritablement close.

1.2 Réseaux de capteurs, économie d'énergie

Topologie virtuelle pour un réseau sans fil [49, 50]

Nous avons résolu un problème d'attribution de puissance pour les réseaux radio (de type hertzien au sol). Il s'agit en fait de déterminer la topologie (ici un hypergraphe) connexe de diamètre au plus D de coût minimum, sachant que les sommets du réseau sont des points du plan Euclidien et que le coût pour transmettre à distance k est connu (par exemple k^2).

Diffusion avec énergie minimale [64, 65, 67, 68, 90]

Il s'agit ici de diffuser un message dans tout le réseau en minimisant le coût énergétique total ; ceci par ailleurs minimise aussi la quantité d'interférences produites, soit la capacité utilisée. Afin de diffuser à distance d on doit émettre avec une puissance $f(d)$. On pose le plus souvent $f(d) = d^\alpha$, dans un milieu

physique plan parfait nous aurions $\alpha = 2$, et $\alpha = 3$ si nous étions dans le vide et dans l'espace. Dans la pratique les réflexions sur le sol ou les obstacles, et bien d'autres phénomènes jouant sur la propagation des ondes électro-magnétiques font que $\alpha \in [2, 5]$.

Le problème se modélise en termes d'hypergraphe (orienté) ; pour chaque sommet v , on note v_i son i ème plus proche voisin. On dispose alors de n hyperarcs imbriqués E_1, \dots, E_n dont il est la source. Les puits du i ème hyperarc sont les sommets v_1, \dots, v_i . Choisir d'émettre depuis v jusqu'à son i ème plus proche voisin se modélise par le choix de l'hyperarc E_i . le coût de E_i est simplement $f(d(v, x_i))$. On doit alors trouver dans cet hypergraphe l'équivalent d'une arborescence enracinée en la source de la diffusion qui soit de coût minimal. Ce problème est difficile pour un hypergraphe quelconque, en effet le problème de couverture en est un cas particulier : quand les hyperarcs ont tous pour sources la source de la diffusion et qu'à chaque ensemble on associe un hyperarc dont les sommets puits sont les éléments de l'ensemble les arborescences sont en bijection avec les couvertures. Le facteur d'inapproximabilité du problème est donc $\log n$ (a contrario quand les hyperarcs sont de taille 2 le problème est dans P car nous sommes dans le cas des graphes orientés).

Il s'agit donc de prendre en compte les particularités de la géométrie euclidienne. Une heuristique simple utilisant l'arbre de poids minimum est couramment utilisée. Nous avons quasiment déterminé son efficacité (entre 6 et 6.33). Par ailleurs nous avons fourni une formulation linéaire du problème (en tant que problème de couverture) ; cette formulation nous a permis de déterminer les solutions optimales et de les comparer aux heuristiques proposées (jusqu'alors seules des heuristiques étaient seulement comparées entre elles). Dans la pratique les contraintes d'intégrité du problème ne semblent pas le rendre difficile à résoudre. Nous conjecturons donc que ce problème admet une PTAS. Nos tentatives pour utiliser des arguments comme la localité (à la Arora) ou la VC dimension finie ont cependant échoué.

Positionnement dans un réseau de ad-hoc et Reconnaissance de graphe type Unit-disk [92]

Nous avons étudié comment localiser les sommets dans un réseau (de senseurs) quand très peu de sommets (intelligents) connaissent leur localisation précise. Ce problème est très lié à la question suivante : dessiner de façon approchée un graphe de disques unitaire (unit disk graph). Notre travail démontre que cette question est NP -difficile, mais aussi que déterminer une représentation approchée optimale est difficile pour un facteur d'approximation $\rho > 1$.

1.3 Routage Coordonné dans un réseau [25–27, 82, 83, 89, 94, 95]

Ces travaux forment une part essentielle des thèses de doctorat de Nelson Morales, Patricio Reyes, Cristiana Gomes. La thèse de Dorian Mazauric porte aussi sur certains des problèmes évoqués.

Problématique générale

Dans un réseau sans fils la concurrence des communication est limitée par les interférences, celles ci sont en général prévisibles et on les exprime souvent par de simples considération géographiques. Le média n'est pas comme dans un réseau filaire une série de ressources indépendante (les fils) mais une ressource globale (l'espace physique). De ce fait les problèmes classiques de flots et de multi-flots doivent être reformulés. Ceci nous a amené à définir un modèle de communication synchrone abstrait. Ce modèle est défini par la donnée d'une définition (exhaustive ou mathématique) de ce que sont les connections réalisables concurremment lors d'un round de communication. Nous appelons un tel ensemble (d'arcs ou d'arêtes) un *round*. Dans un réseau filaire classique un round est souvent l'ensemble de toutes les arêtes (dans le cas avec capacités on répète e $c(e)$ fois). Ce modèle de communication est dit full duplex Δ ports, mais d'autres modèles existent principalement ceux exprimant une contrainte sur les sommets : Full duplex 1 port (un round est un couplage), k -port (un round est un sous graphe de degré k).

Dans le cas des réseaux radio les rounds sont définis de façon plus complexe. Définir les rounds équivaut de fait à donner un modèle d'interférence. Dans la plupart des modèles déterminer si un ensemble de liens constitue un round est un problème polynômial (même pour des modèles exprimant sans simplification les

lois signal bruit de Shannon). Par exemple dans le modèle géométrique un round est ensemble de liens suffisamment espacés, les deux cas d'école étant celui où les rounds sont des couplages et celui où les rounds sont des couplages induits (i.e. arêtes à distance ≥ 2).

Formulation Convexe, Dualité, Séparation et Round de poids maximal

Nous avons formulé le problème du routage par un programme linéaire et étudié son dual. Celui-ci est défini comme suit : étant donné un poids p sur les liens déterminer le round de poids maximal. Les arguments généraux de type *Optimisation = Séparation* (Schriver et Al, Jansen et Al) permettent alors d'affirmer que si l'on dispose d'un algorithme (polynomial) résolvant le problème du round de poids max avec un facteur d'approximation ρ , alors approximer le routage de coût minimum avec un facteur ρ est dans P . De ce résultat général dérivent un bon nombre de conséquences pour le routage dans les réseaux radio avec les modèles d'interférence classiques ; en particulier le problème est dans P quand les rounds sont des couplages ; il n'est pas approximable à un facteur $n^{1-\varepsilon}$ quand les rounds sont des couplages induits ; il existe une PTAS quand la topologie est une grille ou issue de la métrique euclidienne.

Si ces résultats ferment en quelque sorte le problème d'un point vue théorique il reste des considérations pratiques : Peut on distribuer les algorithmes ? Des instances particulières (diffusion) sont elles plus faciles à résoudre ?

Le cas de la diffusion

A cet égard nous avons particulièrement étudié le cas de la diffusion (ou encore de la concentration) depuis une ou plusieurs sources (i.e. passerelles équivalentes). Ce cas semble être le cas pratique par excellence, de plus il diffère complètement du cas général. Nous avons ainsi proposé un algorithme distribué qui calcule une 4 approximation de l'optimal ; à titre de comparaison les instances générales ne peuvent pas être résolues avec un facteur d'approximation inférieur à $n^{1-\varepsilon}$. On retrouve donc ici (en fractionnaire) la séparation classique des problèmes de flot entre simple flot (facile) et à plusieurs commodités (difficile). Ce travail c'est poursuivi dans le cas de topologies particulières, où nous avons montré que le coût du routage (simple flot) est souvent induit par la congestion apparaissant au niveau des sources ; ceci induit des formules quasi closes dans le cas des grilles, des chemins, des arbres. Nous avons alors tenté de progresser dans le cas d'une topologie générale en formulant le problème du routage comme un problème de couvertures des coupes. Cette formulation tente d'intégrer au problème la différence essentielle entre commodité unique et commodités multiples en intégrant le théorème Max-Flot Min-Cut au modèle. Elle ne nous a cependant pas permis de résoudre la question centrale : déterminer si le routage d'une diffusion admet une PTAS où non. A l'heure actuelle, la complexité de la diffusion reste ouverte ; nous savons en effet simplement que le problème est NP complet (sans aucun résultat d'innapproximabilité) et qu'il existe une 4 approximation.

Citons enfin quelques variantes dont l'étude est en cours : détermination de solution entières dans des cas particuliers (grilles, arbres,...), cas sans tampons (i.e. les paquets doivent être routés sans séjourner dans les nœuds).

Algorithmes en ligne de type *Best effort*

Ce travail en cours est inspiré de résultats provenant de la communauté évaluation de performances, nous étudions des question liées aux travaux de Srikant, Tassiulas, Massouillé. (Voir le programme de recherche). Nous souhaitons en particulier mieux comprendre comment les propriétés de la séquence d'entrée d'un algorithme en ligne se traduisent en sortie (par la taille des files par exemple), ce quand l'algorithme cherche à suivre le gradient maximal d'un algorithme de minimisation convexe centralisé.

2 Routage dans les réseaux optiques & Coloration de chemins [8, 10, 11, 29, 30, 44, 45, 62, 63, 75, 76, 86, 91]

Nous avons étudié les problèmes liés au progrès des technologies de communications optiques, et à l'apparition de commutateurs optiques capables de distinguer plusieurs longueurs d'onde (WDM). une synthèse de cette étude est présentée dans la thèse de Bruno Beauquier, son extension est un des documents produit par le projet Européen Cresco.

Le modèle essentiel est le suivant : étant donné un graphe et un ensemble de requêtes on doit associer à chaque requête un chemin la réalisant, ainsi qu'une coloration de ces chemins telle que deux chemins partageant un lien utilisent des couleurs différentes. Nous noterons ici w le nombre de couleurs et π la charge minimale du routage. Les relations entre π et w sont complexes, on peut effet construire des instances admettant un routage de charge 2 mais nécessitant n couleurs. Cependant dans le cas de la diffusion ou de la diffusion partielle (i.e. commodité unique) nous avons montré que $w = \pi$ et que déterminer le nombre minimal de couleurs afin de diffuser est un un problème dans P (plus exactement nous ramenons le problème au une question de flot simple). A cette occasion nous avons introduit une modélisation en terme de routage dans un réseau en couches qui affirme que le routage optique n'est autre qu'une variante du routage entier avec capacité unitaire. Nous avons aussi démontré que pour de nombreux graphes $w = \pi$ lorsque les demandes sont celle de l'échange total. Les questions que nous avons alors soulevées et laissées irrésolues : a-t-on $w = \pi$ pour tout graphe (dans le cas de l'échange total) ? étant donné un graphe déterminer w (pour l'échange total) est il un problème NP complet ? sont à notre connaissance toujours ouvertes.

Nous avons ensuite cherché des algorithmes d'approximation du problème de coloration de chemins dans un graphe orienté. Dans le cas des arbres, nous avons montré que la coloration fractionnaire est polynomiale, cette relaxation de la coloration semble très voisine du problème initial, et permet donc un Branch and Bound efficace. De plus nous avons proposé un algorithme basé sur un arrondi aléatoire de la coloration fractionnaire, son facteur d'approximation reste à ce jour le meilleur prouvé. Cette approche du problème, ses conséquences et diverses variantes ont fait l'objet du stage de DEA de H. Rivano, puis d'une partie importante de sa thèse. Nous avons aussi utiliser une technique du même ordre afin de résoudre efficacement le problème de couplage contraint dans un graphe biparti.

Nous conjecturons que colorier les chemins d'un arbre orienté n'est pas un problème APX complet, principalement parce les ensembles indépendants maximaux sont rapides à calculer (à titre de comparaison il existe une PTAS pour colorier les arêtes d'un multigraphe "parce que" calcule un couplage de poids maximum est facile). Il est même possible que l'on puisse approcher le nombre chromatique à une constante près. Nous pensons aussi que le même phénomène existe pour les *graphe des arc circulaires* (autrement le graphe d'intersection de chemins sur un circuit) ainsi que pour les graphes planaires pondérés. Dans le cas de la coloration pondérée un sommet x de poids $w(x)$ doit recevoir $w(x)$ couleurs distinctes, si le poids max d'un sommet est W le nombre chromatique est compris entre $[W, 4W]$ (en utilisant le théorème des 4 couleurs) le problème est donc approximable. Nous avons montré que le problème admet de fait une PTAS. Il nous reste donc à savoir si il existe un algorithme polynomial coloriant un graphe planaire pondéré avec $OPT + o(OPT)$ couleurs voire même avec $OPT + Constante$.

Nous avons aussi étudié le cas des réseaux k -fibres, via deux directions : soit en utilisant une technique d'arrondi aléatoire d'un routage fractionnaire calculé dans un réseau auxiliaire que nous avons auparavant introduit (lors de son stage N. Bastiokis a montré l'efficacité de cette approche), soit en modélisant le problème à l'aide d'hypergraphes, et en utilisant les algorithmes de coloration d'hypergraphe.

D'un point de vue pratique nous avons formulé dans le cadre du projet Porto des contraintes et des coûts pour un problème de routage optique utilisant des commutateurs développés par Alcatel-Lucent. Le problème est extrêmement complexe, car les longueurs d'ondes sont groupées en bandes et que le coût des commutateurs dépend de leur capacité fonctionnelle : granularité de la commutation, conversion optique-électronique. Nous avons développé le premier programme qui repris et amendé par des programmeurs plus qualifiés a abouti au logiciel final livré à la fin du projet. Ce Travail a aussi en partie initié les recherches de Mascotte autour de la thématique du groupage du trafic dans les réseaux.

3 Construction et propriétés des réseaux

Propriétés Structurelles [14, 19, 20, 33, 39–42, 52, 53, 85]

Nous avons établi une borne de type “Moore” pour les graphes orientés répondant à une conjecture de J-C. Bermond (citée par exemple dans le livre RUMEUR) motivée initialement par des “réseaux radio”. Nous avons ensuite construit, avec J. Gomez et C. Padro de l’ETSIT de Barcelone, de nouveaux graphes orientés approchant cette borne de Moore.

Nous nous sommes aussi intéressés aux propriétés des réseaux ayant de *bonnes caractéristiques*; ainsi nous avons montré que le réseau de Butterfly se *décompose en cycles Hamiltoniens* (ceci répondait à une conjecture de D. Barth et A. Raspaud). Puis, nous avons proposé une conjecture analogue au sujet de la décomposition en circuits orientés, et ramenée celle-ci au cas simple du diamètre 2, et degré d premier, tout en prouvant qu’elle est vérifiée pour $d < 12000$. Suite à ce travail, le cas du diamètre 2 et degré premier a été résolu par H. Verall, ce qui clôt la question.

L’existence de nombreuses symétries dans un réseau facilite une utilisation efficace de celui-ci. Dans le cas de graphes de Cayley nous avons introduit les *rotations complètes* à des fins algorithmiques, puis étudié celle ci ainsi que les propriétés des graphes possédant une rotation complète. Le stage de DEA de N. Lichardopol [Lic00] a porté sur ces questions.

Avec P. Berthomé et A. Ferreira du LIP à Lyon, B. Maggs et G. Plaxton, nous avons aussi fourni des algorithmes de sélection très efficaces sur les réseaux hypercubiques.

Par ailleurs, nous avons étudié avec D. Coudert comment implanter de bon réseaux, en utilisant des technologies d’interconnexions optiques existantes, telle que l’architecture OTIS (Optical Transpose Interconnecting System). Ce travail caractérise comment réaliser un réseau de de Bruijn à l’aide de commutateurs OTIS et permet de choisir l’implémentation la moins coûteuse.

Tolérance aux Pannes, Robustesse et Expansion [1, 2, 21, 31, 58]

À la demande d’Alcatel Space Industries nous avons étudié le problème de conception suivant : des signaux arrivant sur un satellite de télécommunications (uplinks, inputs) doivent être routés par un réseau vers des amplificateurs (output, downlinks). La technologie est particulière : le réseau est un ensemble de guide d’ondes. Comme les amplificateurs sont sujets à des pannes définitives et ne peuvent être remplacés, un certain nombre d’amplificateurs de secours sont intégrés. Le réseau doit permettre de router (sans conflit de lien) toutes les entrées vers des amplificateurs fonctionnant quelques soient les amplificateurs en panne. Un tel réseau est dit valide. Les commutateurs sont de degré 4 et très onéreux. L’objectif est de construire le réseau valide utilisant le moins de commutateurs. Ainsi nous cherchons à minimiser le nombre de commutateurs sous les contraintes suivantes :

- chaque entrée (sortie) est connectée à un commutateur
- les commutateurs sont de degré 4, il y a $p + \lambda$ entrées et $p + k$ sorties,
- quelques soient les p entrées (parmi $p + \lambda$) et les p sorties (parmi $p + k$) il est possible de router les entrées vers les sorties.

Nos solutions reposent sur une application fine des théorèmes de flot classiques; la méthode permet de prouver que la validité d’un réseau équivaut au respect de certaines condition de type isopérimétrique. Une première conséquence remarquable est que, si il est facile de démontrer qu’un réseau n’est pas valide, le problème est donc *Co-NP* complet. La seconde est que le problème se ramène à la construction de réseaux possédant la propriété d’expansion. A la suite de ce travail un brevet a été déposé par Alcatel. L’article présentant la méthode générale devrait être enfin publié (il est cité dans les travaux ultérieurs qui eux sont publiés).

Notre travail s'est poursuivi autour de la propriété d'expansion que nous appelons *robustesse* des réseaux : Un graphe de degré 4 a pour *robustesse* k si $||[X, \overline{X}]|| \geq \min(k, |X|), \forall X$ (ici $[X, \overline{X}]$ désigne l'ensemble des arêtes sortantes de X), il s'agit donc d'une propriété d'expansion 1 ($||[X, \overline{X}]|| \geq |X|$ limitée aux petits ensembles (i.e. de taille $\leq k$). Nos divers travaux ont montré que ce type de propriété est relativement facile à obtenir lorsque k est borné ; il est alors possible de construire des graphes de bonne robustesse avec des réseaux classiques. Tant que $k = O(\log n)$ des réseaux de grande maille permettent aussi de fournir des solutions. Nous avons aussi montré que des graphes de robustesse $n/13$ et de degré 4 existent. Si la notion de robustesse permet de résoudre les problèmes de conception posés par Alcatel, elle est aussi liée à des questions fondamentales impliquant nous seulement l'expansion ou la bissection des graphes de petit degré mais aussi les problèmes de *densité*. Par exemple on ne connaît toujours ni l'expansion des graphes de degré 4 ni la bissection maximale d'un tel graphe.

Notons que nous avons aussi étudié des variantes plus complexes du problème (entrées prioritaires, commutateurs de degré 6 ou plus) Ces généralisations ont fait l'objet de deux stages (F. Giroire, O. Bernardi). Enfin des algorithmes de vérification basés sur la démarche théorique ont été implémentés (Eric Darrot, T. Dylis).

Structure de diffusion Optimale [69–72]

Concernant l'étude de la dissémination de l'information dans un réseau, nous avons prouvé que dans une certaine famille de graphes aléatoires le temps de diffusion d'un graphe est avec probabilité $1 - o(1)$ celui prévu par la borne combinatoire. Notons que jusqu'alors les recherches pourtant fort nombreuses de construction effectives de telles familles n'avaient pas abouti. Ce résultat est à rapprocher de celui, ancien, affirmant que le diamètre des graphes aléatoires de degré Δ est $\sim \log_{\Delta-1}(n)$.

Dans le cas de protocoles de communication *infinis* ou *systoliques*, l'efficacité se mesure par la latence. Avec M. Flammini (Université d'Aquila), nous avons établi une borne inférieure générale de la latence de l'*échange total systolique*, cette borne est la seule à notre connaissance qui montre que l'échange total est intrinsèquement plus coûteux que la diffusion en mode half-duplex.

Pathwidth, jeu de galets, largeur d'un graphe sur un autre [3, 4, 54]

Lors du stage de Qwang Pham (encadré avec D. Coudert) nous nous sommes posés un problème de reconfiguration. Le problème était le suivant : comment reconfigurer un routage en minimisant le nombre d'interruptions de trafic. Une fois formalisé ce problème fait apparaître un jeu de type *gendarmes et voleurs* sur un graphe, et il apparaît que notre paramètre n'est autre que la pathwidth ou la pathwidth plus un du graphe auxiliaire. Ce travail a engendré une certaine activité dans l'équipe (travaux de D. Coudert, J.S Sérenni, F. Huc). Diverses discussions autour des notions de *largeur* nous ont ensuite amenés à étudier une conjecture de Fomin ; nous l'avons presque démontrée en utilisant une notion de *H-width* : pour cela on définit un plongement de G sur H en associant à chaque sommet de G une partie connexe de H . Les parties associées à deux sommets voisins de G doivent alors s'intersecter. La charge ou largeur du plongement est le nombre maximum de pré-images d'un sommet de H . Quand H est un arbre ou un chemin on retrouve la définition classique des largeurs arborescentes (et de chemin). L'intérêt de notre plongement est qu'il conserve la pathwidth à un facteur égal à la charge. En utilisant ce type de plongement nous avons alors pu montrer que, dans de nombreux cas, la pathwidth d'un graphe planaire vaut au plus deux fois celle de son dual.

4 Topologies Virtuelles

L'exploitation des réseaux repose souvent sur l'utilisation de topologies virtuelles. L'objectif est multiple : factorisation des décisions (routage) afin d'éviter une explosion combinatoire, économie d'échelle, partage de ressources. Les problèmes de ce type sont donc récurrents mais évoluent selon la technologie en vogue : ATM, groupage par bande en optique, économie d'échelle en SDH, simplicité du routage sur un réseau de type Chord-petit-monde, étiquettes MPLS.

Architectures ATM [16, 17, 34–37, 47]

Avec D. Peleg de l’institut Weizmann nous avons obtenu des résultats généraux concernant le diamètre d’un réseau virtuel (VPL : Virtual path layout), et déterminé des constructions quasi-optimales pour les topologies classiques. La thèse de N. Marlin a principalement porté sur ce sujet ; dans celle-ci le paramètre $\pi_k(G)$, égal à la congestion minimale d’un plongement d’un graphe de diamètre k dans G , est introduit ; ce paramètre généralisant l’arête-indice de transmission π ouvre des perspectives de recherche intéressantes, exposées dans la thèse (la traduction en anglais est en cours).

Nous avons poursuivi l’étude de ces problèmes avec Sébastien Choplin ; nous avons donné les premières bornes quasi-exactes sur le nombre maximum de sommets dans un réseau virtuel de charge c et de diamètre D construit sur un cycle. Un problème voisin, est celui de la conception de réseaux hiérarchiques de cycles : ces topologies introduites par Rosenberg et Al sont voisines des graphes cordaux de charge bornée et des VPL reposant sur le cycle. Nous avons déterminé comment construire un réseau hiérarchique de cycles de profondeur k et diamètre D contenant un nombre maximal de sommets.

Problème des k chemins dans un réseau symétrique [87]

Le problème de l’existence de k chemins $\{(a_i, b_i) \mid (a_i, b_i) \in P \subset V \times V\}$ (arête, arc) disjoints dans un graphe (orienté) peut être considéré comme le plus simple des problèmes de réseau virtuel et de plongement. Ce problème est polynomial lorsque P est de la forme $A \times B$ (problème de flot). Lorsque $P = (v_1, v'_1), (v_2, v'_2), \dots, (v_k, v'_k)$ (les couples d’extrémités sont fixés) le problème est NP complet dans le cas orienté dès que $k \geq 2$; dans le cas non-orienté le problème est polynomial car on peut le réduire à la détermination d’un mineur particulier du graphe. Dans le cas orienté symétrique, le problème était ouvert, et P. Chanas avait montré que, à l’inverse du cas orienté général, le problème est polynomial pour $k = 2$. Pendant son stage A. Jarry a montré que le problème est polynomial pour k fixé.

Problématiques de Groupage, sous graphes denses [5–7, 22, 57, 81, 86, 91]

Le projet Porto m’a amené à m’investir dans des tâches de modélisation fines et de programmation. Un premier travail a permis la mise en évidence l’impact de la granularité du routage sur la performance de celui-ci. La modélisation que nous avons effectuée a aussi fait apparaître l’importance de regrouper les signaux au mieux (factorisation du trafic). Le stage de G. Huiban qui portait sur le calcul d’un groupage optimal a fourni un premier modèle pour aborder les problèmes de groupage ; la méthode de résolution choisie (programmation linéaire + heuristiques) a permis le calcul rapide d’un groupage optimal (lorsque le routage est fixé). Nous avons ensuite proposé ce modèle dit de groupage dit par *tube* et proposé des heuristiques. Le stage d’Olivier de Rivoyre a porté sur ce type de questions, nous avons démontré que déterminer des solutions approchées est NP complet (problème APX -difficile). Enfin nous avons étudié la complexité des problèmes de groupage quand les ressources chères sont les sommets. Le problème est alors de décomposer les arêtes d’un graphe en un petit nombre de sous graphes de petite taille. A la différence des approches précédentes (théorie des design) cherchant une résolution exacte dans des cas particuliers, la notre a été algorithmique. Nous avons donc cherché à couvrir les arêtes d’un graphe par des sous graphes aussi denses que possibles. Nous avons prouvé avec Ignasi Sau Valls que ce type de groupage est difficile ; nous avons aussi abordé le problème du sous graphe de taille k le plus dense. Il est probable que ce problème soit très difficile à approximer ; la démonstration de ce fait viendra probablement de progrès sur la conjecture des jeux uniques ou de résultats portant sur le théorème PCP. Suite à ces recherches nous avons étudié la complexité des divers problèmes associés à la détermination de sous-graphes avec des contraintes sur le degré.

Minimisation des étiquette MPLS [18]

Avec Joanna Moulierac et Fernando Solano nous avons récemment formalisé un problème de minimisation de nombre d'étiquette MPLS. Le modèle fait apparaître un problème de conception d'hypergraphe assez semblable à ceux posés dans le cas ATM (il s'agissait alors de graphes). Le coût d'un réseau est induit par deux valeurs : d'une part sa longueur physique d'autre part la distance totale logique parcourue par le trafic. On retrouve là un problème bi-critère classique.

Nous avons montré que le problème est difficile à approximer à un facteur $\ln n$ et proposé une approximation de cet ordre. Nous avons aussi déterminé un algorithme polynomial dans le cas du chemin. Les généralisations sont en cours.

Optimisation de boucles SDH [46]

Dans le cadre d'une collaboration avec FRANCE TÉLÉCOM R & D avec Jérôme Galtier et Sébastien Choplin, nous avons étudié le problème de la conception d'un réseau permettant d'écouler un trafic sous l'hypothèse d'un coût de capacité concave (de la forme c^α , $\alpha < 1$); dans le cas d'un trafic uniforme (i.e. de type all to all avec pondération uniforme), nous avons quasiment déterminé les réseaux optimaux; dans le cas d'un trafic quelconque nous cherchons à améliorer nos méthodes de résolution.

Algorithmique pour les Groupes de risques [51, 55]

L'usage de liens virtuels et de topologies virtuelle induit de la corrélation entre les pannes; en effet 2 éléments logiques d'un réseau peuvent partager la même ressource physique et de fait être dans le même groupe de risques. Ceci nous a défini et à étudier la complexité des problèmes classiques (MST, plus court chemin) dans cadre des SRLG (Shared Risk Link Groups). Nous modélisons les groupes de risques en associant à chaque lien d'un graphe une liste de couleurs, chaque couleur représentant un risque encouru.

Nous avons déterminé la complexité de presque tous les problèmes abordés et leur degré d'approximabilité. Les résultats sont surprenants, puisque le calcul de l'équivalent d'un plus court chemin devient difficile. Nous avons aussi donné des formulations de type linéaire (Mixed Integer Linear Programming). Enfin nous avons montré que le nombre de composantes connexes du graphe engendré par une couleur est le facteur crucial dans ce type de problème; quand il y a peu de composantes, le problème redevient polynomial. Ces travaux ont constitué une bonne partie de la thèse de Marie Émilie Vogé.

5 Réseaux Distribués & Réseaux de pairs

Réseaux Distribués [12, 13, 23, 32, 73, 74, 77–80]

Bien que nous ayons principalement examiné des problèmes réguliers, certaines questions liées à l'apparition de grands réseaux distribués irréguliers nous sont apparues intéressantes lors des réunions françaises TAROT puis RESCOM ou Européennes (Cresco, Aeolus). Les questions abordées furent les suivantes :

- En collaboration avec C. Gavoille une borne optimale sur la taille mémoire minimale nécessaire afin de réaliser un routage par les plus courts chemins sur un réseau distribué a été obtenue. Ce résultat a obtenu le "best student paper award" de la conférence PODC'96). De cette borne dérive une borne inférieure prouvant aussi la difficulté d'implémentation d'un routeur par intervalles sur un réseau distribué irrégulier.
- Nous avons étudié un problème de routage sans inter-blocage (*deadlock free*) en utilisant des orientations acycliques en collaboration avec M. Di Ianni et M. Flammini des Universités de Rome et L'Aquila (Italie).
- En collaboration avec D. Peleg du Weizmann Institute, nous avons résolu une question portant sur l'influence de monopoles au sein d'un réseau, cette question est liée à la tolérance aux pannes des réseaux

distribués ; il s'agit de déterminer dans quelle mesure un faible nombre de noeuds peut influencer le réseau tout entier.

- En collaboration avec A. Pelc, professeur invité, et d'autres chercheurs, nous avons étudié des problèmes de nommage et de communication dans les réseaux anonymes. Il s'agit alors d'attribuer des noms aux sommets d'un réseau inconnu, ou d'y transmettre de l'information.
- En collaboration avec D. Peleg et C. Gavoille nous avons étudié comment étiqueter les sommets d'un réseau de façon à ce que la distance entre deux sommets quelconque puisse être calculée ou approchée à l'aide des étiquettes.

Réseaux de Pairs [48, 56, 66]

- Avec M. Flammini nous avons étudié comment optimiser les réseaux petit monde. Nous avons étudié quelles constructions assurent un diamètre naïf minimal pour un graphe de type petit-monde (modèle de Kleinberg). Nous parlons de diamètre naïf car le chemin reliant deux sommets doit être calculé en ligne en utilisant peu de mémoire ; il peut donc différer complètement du plus court chemin qui lui est un objet global. Nous avons prouvé que, pour une classe très large de distribution des distances, le diamètre naïf est $\mathcal{O}(\ln^2 n)$. Par ailleurs nous avons montré que minimiser le diamètre naïf est difficile (déterminer le meilleur choix de cordes). Enfin nous avons donné les constructions optimales pour les réseaux sous-jacents classiques (grilles, arbres etc ..).
- Avec Zvi. Lotker et Alfredo Navarra nous avons cherché à comprendre comment un fichier se reproduit dans un réseau pair à pair et sous quelle condition il peut venir à disparaître. Nous avons principalement montré qu'une fois que le fichier est passé de son initiateur (seeder) dans le réseau, sa probabilité de survie devient très grande.
- Avec Frédéric Giroire et Julian Monteiro nous cherchons à analyser comment se comporte un réseau de stockage pair à pair. Nous avons proposé un modèle qui est selon nous le premier à introduire de la corrélation ; afin de l'analyser nous en avons proposé une relaxation fluide. La précision des prédictions obtenues ce faisant est très grande ; de plus notre modèle analytique passe à l'échelle ce qui n'est évidemment pas le cas des simulations.

Nous comptons poursuivre ces recherches dans le cadre d'un contrat avec Alcatel Lucent Belgique ; l'objectif est d'étudier le routage dynamique dans les réseaux d'aujourd'hui. Nous allons aussi poursuivre la recherche d'analyse formelle de systèmes pairs à pair, le but étant de déterminer des politiques de contrôle optimales. La thèse de Julian Monteiro porte sur ce dernier problème.

6 Communications en mode *Store-and-Forward* et en mode *Wormhole*

Store & Forward [9, 24, 28, 38, 84]

Nous avons particulièrement étudié la *diffusion* et l'*échange total* qui constituent deux des principaux paradigmes utilisés lorsque l'on étudie les communications globales. Nous avons à la fois déterminé de nouveaux algorithmes et démontré des bornes inférieures.

- En particulier nous avons amélioré les bornes supérieures (en utilisant de nouveaux protocoles) et inférieures des temps de *diffusion* dans les réseaux de de Bruijn, Butterfly et analogues. Ces résultats mettent quasiment un terme à la détermination de ce paramètre pour ces réseaux.
- En affinant nos arguments nous avons obtenu des résultats plus généraux.
- Nous avons démontré certaines relations entre le graphe représentatif des arcs d'un graphe orienté G et un composé de G par le graphe biparti complet. Ces résultats induisent de meilleurs algorithmes pour l'échange total dans le réseau shuffle-exchange et des *composés* du réseau de de Bruijn, ce qui fournit une réponse à une conjecture de B. Monien.
- Avec P. Berthomé et A. Ferreira (alors tous deux au LIP à Lyon), nous avons donné des méthodes de *diffusion* dans des réseaux construits de manière récursive à l'aide de la théorie des groupes (réseaux Star et Pancake).

- Par ailleurs nous avons prouvé avec S. Fujita (Univ. Hiroshima, Jap.) et J. Peters (SFU Vancouver, Can.) un résultat concernant l'émulation d'un réseau complet par un hypercube.
- Suite à l'apparition de nouveaux modèles du temps d'échange de l'information, considérés comme plus réalistes, une étude de *l'échange total* sous l'hypothèse de communications avec une *taille de paquets fixée* a été menée; nous avons en particulier utilisé les fortes symétries de certains graphes de Cayley afin de déterminer des protocoles optimaux. Nous avons aussi étudié, avec L. Gargano (Université de Salerne, It.), le nombre minimal d'appels nécessaires afin de réaliser un tel algorithme.
- Concernant la diffusion de long messages, nous avons prouvé qu'il existe un compromis entre la minimisation du nombre d'étapes d'un protocole et l'utilisation optimale de la bande passante. Ce résultat est le premier de ce genre et explique pourquoi la plupart des algorithmes de diffusion sont fondés sur le calcul d'une taille de message optimale.

Dans le cas d'architecture à bus les communications globales sont bien plus difficiles à analyser. Avec C. Laforest (LRI Orsay) et S. Fujita (Université d'Hiroshima) nous avons proposé un algorithme d'échange total pour un réseau construit à partir de bus de taille limitée; cet algorithme est conjecturé optimal.

Communications globales en modèle *Commutation de Circuits* [15, 43, 59–61]

De par l'apparition de nouvelles techniques de routage dont l'intérêt est de masquer la distance entre deux noeuds communiquant, les techniques de communication ont due être en partie renouvelées. Nous avons donc entrepris une étude du routage "*Wormhole*" (*Commutation de circuits*) sous diverses hypothèses de temps de communication et sur divers réseaux. Cette étude comporte un certain nombre de résultats généraux se trouve dans ma thèse ainsi que dans celle d'Olivier Delmas. Quelques résultats plus précis peuvent être cités :

- En collaboration avec C. Calvin et D. Trystram de l'IMAG à Grenoble, un algorithme d'*échange total* optimal dans les grilles toriques de dimension deux à été proposé.
- Nous avons aussi étudié le cas du routage dans les grilles toriques tri-dimensionnelles, un protocole optimal en nombre d'étapes pour l'*échange total* y est proposé. Nous avons poursuivi en généralisant au cas des grilles toriques d -dimensionnelles.
- Nous avons aussi résolu le cas du routage de l'échange total dans les hypercubes. Le protocole que nous avons proposé. repose sur une construction algébrique et des propriétés de connectivité, en particulier celle affirmant que dans un réseau symétrique il existe un flot maximal symétrique.

Références

- [1] O. Amini, J-C. Bermond, F. Giroire, F. Huc, and S. Pérennes. Design of minimal fault tolerant networks : Asymptotic bounds. In *8^{ème} Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel'06)*, pages 37–40, Trégastel, France, May 2006.
- [2] O. Amini, F. Giroire, F. Huc, and S. Pérennes. Minimal selectors and fault tolerant networks. *Networks*. To appear.
- [3] O. Amini, F. Huc, and S. Pérennes. On the pathwidth of planar graphs. *SIAM Journal of Discrete Mathematics*. To appear.
- [4] O. Amini, F. Huc, and S. Pérennes. On the pathwidth of planar graphs. Technical Report HAL-00082035, INRIA, July 2006.
- [5] O. Amini, D. Peleg, S. Pérennes, I. Sau Valls, and S. Saurabh. Degree-constrained subgraph problems : Hardness and approximation results. In *6th International Workshop on Approximation and Online Algorithms (ALGO-WAOA 2008)*, Karlsruhe, Germany, September 2008.
- [6] O. Amini, S. Pérennes, and I. Sau Valls. Hardness and approximation of traffic grooming. In *The 18th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2007)*, volume 4835 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 561–573, Sendai, Japan, December 2007. Springer-Verlag.
- [7] O. Amini, S. Pérennes, and I. Sau Valls. Hardness of approximating the traffic grooming. In *9^{ème} Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel'07)*, Ile d'Oléron, France, May 2007.
- [8] B. Beauquier, J-C. Bermond, L. Gargano, P. Hell, S. Pérennes, and U. Vaccaro. Graph problems arising from wavelength-routing in all-optical networks. In *Proc. Conference WOC97, Geneva, April 1997*, 1997.
- [9] B. Beauquier, O. Delmas, and S. Pérennes. Tight bounds for broadcasting in the linear cost model. *Journal of Interconnection Network*, 2(2) :175–188, 2001.
- [10] B. Beauquier, P. Hell, and S. Pérennes. Optimal wavelength-routed multicasting. *DAMATH : Discrete Applied Mathematics and Combinatorial Operations Research and Computer Science*, 84(1-3), May 1998.
- [11] B. Beauquier, S. Pérennes, and D. Tóth. All-to-all routing and coloring in weighted trees of rings. In *Proc. of 11th ACM Symp. on Parallel Algorithms and Architectures (SPAA)*, pages 185–190, Saint-Malo, France, June 1999. ACM Press.
- [12] J-C. Bermond, J. Bond, D. Peleg, and S. Pérennes. Tight bounds on the size of 2-monopolies. In *Proc. Conference SIROCCO96, Siena, June 96, International Informatics Series 6*, pages 170–179. Carleton U. Press, 1997.
- [13] J-C. Bermond, J. Bond, D. Peleg, and S. Pérennes. The power of small coalitions in graphs. *Discrete Applied Mathematics, Editor's Choice*, 127(3) :399–414, 2003.
- [14] J-C. Bermond, A. Bonnet, T. Kodate, S. Pérennes, and P. Solé. Symetric flows and broadcasting in hypercubes. *Annales de l'Institut Fourier*, 49 :787–807, 1999.
- [15] J-C. Bermond, A. Bonnet, T. Kodate, S. Pérennes, and P. Solé. Broadcasting in hypercubes in the circuit switched model. In *Proc. Conference IPDPS 2000, Cancun, Mexico, May 2000*, pages 21,26, 2000.
- [16] J-C. Bermond, S. Choplin, and S. Pérennes. Hierarchical ring network design. In *9th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO'02)*, pages 1–16. Carleton Scientific, 2002.
- [17] J-C. Bermond, S. Choplin, and S. Pérennes. Hierarchical ring networks design. *Theory of Computing Systems*, 36(6) :663–682, 2003.
- [18] J-C. Bermond, D. Coudert, J. Moulhierac, S. Pérennes, H. Rivano, I. Sau, and F. Solano Donado. MPLS label stacking on the line network. soumis, 2009.

- [19] J-C. Bermond, E. Darrot, O. Delmas, and S. Pérennes. Hamilton circuits in the directed wrapped butterfly network. *Discrete Applied Mathematics*, 84(1-3) :21–42, 1998.
- [20] J-C. Bermond, E. Darrot, O. Delmas, and S. Pérennes. Hamilton cycle decomposition of the butterfly networks. *Parallel Processing Letters*, 8(3) :371–385, 1998.
- [21] J-C. Bermond, O. Delmas, F. Havet, M. Montassier, and S. Pérennes. Réseaux de télécommunications minimaux embarqués tolérants. In *5^{ème} Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel'03)*, pages 27–32, Banyuls, France, May 2003.
- [22] J-C. Bermond, O. DeRivoyre, S. Pérennes, and M. Syska. Groupage par tubes. In *5^{ème} Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel'03)*, pages 169–174, Banyuls, France, May 2003.
- [23] J-C. Bermond, M. Di Ianni, M. Flammini, and S. Pérennes. Acyclic orientations for deadlock prevention in usual networks. *Discrete Applied Mathematics*, 129(1) :31–47, 2003.
- [24] J-C. Bermond, A. Ferreira, S. Pérennes, and J. Peters. Neighbourhood broadcasting in hypercubes. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, 21(4) :823–843, 2007.
- [25] J-C. Bermond, J. Galtier, R. Klasing, N. Morales, and S. Pérennes. Gathering in specific radio networks. In *8^{ème} Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel'06)*, pages 85–88, Trégastel, France, May 2006.
- [26] J-C. Bermond, J. Galtier, R. Klasing, N. Morales, and S. Pérennes. Hardness and approximation of gathering in static radio networks. *Parallel Processing Letters*, 16(2) :165–183, 2006.
- [27] J-C. Bermond, J. Galtier, R. Klasing, N. Morales, and S. Pérennes. Hardness and approximation of gathering in static radio networks. In *FAWN06*, pages 75–79, Pisa, Italy, March 2006.
- [28] J-C. Bermond, L. Gargano, and S. Pérennes. Optimal sequential gossiping by short messages. *Discrete Applied Mathematics*, 86(2-3) :145–155, 1998.
- [29] J-C. Bermond, L. Gargano, S. Pérennes, A.A. Rescigno, and U. Vaccaro. Efficient collective communications in optical networks. In *Proc.23rd ICALP96, Paderborn, Germany Lecture Notes in Computer Science, 1099*, pages 574–585. Springer verlag, 1996.
- [30] J-C. Bermond, L. Gargano, S. Pérennes, A.A. Rescigno, and U. Vaccaro. Efficient collective communications in optical networks. *Theoretical Computer Science*, 233(1-2) :165–189, 2000.
- [31] J-C. Bermond, F. Giroire, and S. Pérennes. Design of minimal fault tolerant on-board networks : Practical constructions. In *14th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO 07)*, volume 4474 of *Lecture Notes in Computer Sciences*, pages 261–273, Castiglioncello, Italy, June 2007.
- [32] J-C. Bermond, M. Di Ianni, M. Flammini, and S. Pérennes. Systolic orientations for deadlock prevention in usual networks. In *Proceedings 23th Int Workshop on Graph Theoretic Concepts in Computer Science WG97, Lecture Notes in Computer Science*, volume 1335, pages 52–64. Springer verlag, 1997.
- [33] J-C. Bermond, T. Kodate, and S. Pérennes. Gossiping in cayley graphs by packets. In *Proceedings of the Franco-Japanese conference Brest July 95*, volume *Lecture Notes in Computer Science*, 1120, pages 301–315. Springer verlag, 1996.
- [34] J-C. Bermond, N. Marlin, D. Peleg, and S. Pérennes. Directed virtual path layouts in ATM networks. In *Proc. Conference DISC98, Andros, Greece, Sep. 1998 Lecture Notes in Computer Science, 1499*, pages 75–i88. (Full version appeared in TCS). Springer Verlag, 1998.
- [35] J-C. Bermond, N. Marlin, D. Peleg, and S. Pérennes. Virtual path layouts in simple atm networks. In *Proc. Conference IFIP ATM '98, Ilkley, U.K., Jul. 1998*, 1998.
- [36] J-C. Bermond, N. Marlin, D. Peleg, and S. Pérennes. Virtual path layouts with low congestion or low diameter in atm networks. In *1ères Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel'99)*, pages 77–82, Roscoff, France, May 1999.

- [37] J-C. Bermond, N. Marlin, D. Peleg, and S. Pérennes. Directed virtual path layout in ATM networks. *Theoretical Computer Science*, 291(1) :3–28, 2003.
- [38] J-C. Bermond and S. Pérennes. Efficient broadcasting protocols on de bruijn and similar networks. In *Proc. Conference SIROCCO95, Olympie, International Informatics Series 2*, pages 199–209. Carleton U. Press, 1995.
- [39] P. Berthomé, A. Ferreira, B. Maggs, S. Pérennes, and G. Plaxton. Sorting-based selection algorithms on hypercubic networks. In *Proceedings of the 7th IEEE International Parallel Processing Symposium – IPPS’93*, pages 89–95. IEEE Press, 1993.
- [40] P. Berthomé, A. Ferreira, and S. Pérennes. Improved algorithm design and optimal information dissemination in Star and Pancake networks. In *Proceedings of the 5th IEEE Symposium on Parallel and Distributed Processing – SPDP’93*, pages 720–723. IEEE Press, December 1993.
- [41] P. Berthomé, A. Ferreira, and S. Pérennes. Decomposing hierarchical Cayley graphs, with applications to information dissemination and algorithm design. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 7(12) :1292–1300, December 1996.
- [42] P. Berthomé, A. Ferreira, S. Pérennes, G. Plaxton, and B. Maggs. Sorting-based selection algorithms on hypercubic networks. *Algorithmica*, 26(2) :237–254, 2000.
- [43] C. Calvin, S. Pérennes, and D. Trystram. Gossiping in torus with wormhole-like routing. In *Proceedings of the 7-th IEEE Symposium on Parallel and Distributed Processing, San-Antonio*, 1995.
- [44] I. Caragiannis, A. Ferreira, C. Kaklamanis, S. Pérennes, P. Persiano, and H. Rivano. Approximate constrained bipartite edge coloring. In V.B. Le A. Branstdt, editor, *27th International Workshop on Graph-Theoretic Concepts in Computer Science (WG’01)*, volume 2204 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 21–31, Boltenhagen, Germany, June 2001. Springer-Verlag.
- [45] I. Caragiannis, A. Ferreira, C. Kaklamanis, S. Pérennes, P. Persiano, and H. Rivano. Approximate constrained bipartite edge coloring. *Discrete Applied Mathematics*, 143(1-3) :54–61, September 2004.
- [46] S. Choplin, J. Galtier, and S. Pérennes. Optimal concave costs in the SDH context. Technical Report RR-5201, INRIA, 2004 route des lucioles - BP 93 - FR-06902 Sophia Antipolis, May 2004.
- [47] S. Choplin, A. Jarry, and S. Pérennes. Virtual network embedding in the cycle. *Discrete Applied Mathematics*, 145(3) :368–375, 2005.
- [48] R. Cilibrasi, Z. Lotker, A. Navarra, S. Pérennes, and P. Vitanyi. About the Lifespan of Peer to Peer Networks. In *Proceedings of the 10th International Conference On Principles Of Distributed Systems (OPODIS)*, volume LNCS 4305, pages 290–304, Bordeaux, December 2006. Springer-Verlag.
- [49] A. Clementi, A. Ferreira, P. Penna, S. Pérennes, and R. Silvestri. The minimum range assignment problem on linear radio networks. In *Proc. of ESA-00, 8th Annual European Symposium on Algorithms*, volume LNCS, pages 143–154, 2000.
- [50] A. Clementi, A. Ferreira, P. Penna, S. Pérennes, and R. Silvestri. The Minimum Range Assignment Problem on Linear Radio Networks. *Algorithmica*, 35(2) :95–110, 2003.
- [51] D. Coudert, P. Datta, S. Pérennes, H. Rivano, and M-E. Voge. Shared risk resource group : Complexity and approximability issues. *Parallel Processing Letters*, 17(2) :169–184, jun 2007.
- [52] D. Coudert, A. Ferreira, and S. Pérennes. Theoretical Aspects of the Optical Transpose Interconnecting System Architecture. In *1ères Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel’99)*, pages 101–106, Roscoff, France, 5-7 Mai 1999.
- [53] D. Coudert, A. Ferreira, and S. Pérennes. De Bruijn Isomorphisms and Free Space Optical Networks. In *IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*, pages 769–774. IEEE Press, 2000.
- [54] D. Coudert, S. Pérennes, Q-C. Pham, and J-S. Sereni. Rerouting requests in WDM networks. In *7ème Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel’05)*, pages 17–20, Presqu’île de Giens, France, May 2005.

- [55] D. Coudert, S. Pérennes, H. Rivano, and M-E. Voge. Shared risk resource groups and survivability in multilayer networks. In *IEEE-LEOS ICTON / COST 293 GRAAL*, volume 3, pages 235–238, June 2006. Invited Paper.
- [56] O. Dalle, F. Giroire, J. Monteiro, and S. Pérennes. Analysis of failure correlation in peer-to-peer storage systems. soumis, 2009.
- [57] O. de Rivoyre. Optimisation du groupage dans les réseaux de télécommunication. Master’s thesis, Université de Nice Sophia-Antipolis, 2003.
- [58] O. Delmas, F. Havet, M. Montassier, and S. Pérennes. Design of fault tolerant on-board networks. Technical report, INRIA Research Report 5866, March 2006.
- [59] O. Delmas and S. Pérennes. Diffusion en mode commutation de circuits dans les tores de dimension k . In *Actes de la 8^{ème} conférence RenPar, Bordeaux*, pages 53–56, 1996.
- [60] O. Delmas and S. Pérennes. Diffusion par commutation de circuits dans les tores de dimension k / Circuit-switched broadcasting in the k -dimensional torus networks. *Technique et science informatiques*, 16(5) :563–581, 1997.
- [61] O. Delmas and S. Pérennes. Circuit-Switched Gossiping in 3-Dimensional Torus Networks. In *Proceedings of the Euro-Par’96 Parallel Processing / Second International EURO-PAR Conference*, volume 1123 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 370–373, Lyon, France, 1996. Springer Verlag.
- [62] A. Ferreira, S. Pérennes, A. W. Richa, H. Rivano, and N. Stier. Models, complexity and algorithms for the design of multi-fiber wdm networks. *Telecommunication Systems*, 24(2) :123–138, October 2003.
- [63] A. Ferreira, S. Pérennes, A.W. Richa, H. Rivano, and N. Stier Moses. Models, complexity and algorithms for the design of multifiber wdm networks. In *Telecommunications, 2003. ICT 2003. 10th International Conference on*, volume 1, pages 12–18, February 2003.
- [64] M. Flammini, R. Klasing, A. Navarra, and S. Pérennes. Improved approximation results for the minimum energy broadcasting problem. *Algorithmica*, 49(4) :318–336, 2007.
- [65] M. Flammini, R. Klasing, A. Navarra, and S. Pérennes. Tightening the upper bound for the minimum energy broadcasting problem. *Wireless Networks*, 14(5) :659–669, 2008. Published online. To appear in the Special Issue associated to the 3rd International Symposium on Modelling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt 2005).
- [66] M. Flammini, L. Moscardelli, A. Navarra, and S. Pérennes. Asymptotically optimal solutions for small world graphs. In *Proceedings of the 19th International Symposium on Distributed Computing, (DISC 2005)*, volume 3724 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 414–428. Springer Verlag, September 2005.
- [67] M. Flammini, A. Navarra, and S. Pérennes. The ”real” approximation factor of the mst heuristic for the minimum energy broadcasting. In *Proceedings of the 4th International Workshop on Experimental and Efficient Algorithms, (WEA 2005)*, volume 3503 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 22–31. Springer Verlag, May 2005.
- [68] M. Flammini, A. Navarra, and S. Pérennes. The real approximation factor of the mst heuristic for the minimum energy broadcasting. *ACM Journal of Experimental Algorithmics*, 11 :1–13, 2006. (Special Issue associated to the 4th International Workshop on Efficient and Experimental Algorithms (WEA 2005)).
- [69] M. Flammini and S. Pérennes. On the optimality of general lower bounds for broadcasting and gossiping. *SIAM J. Discrete Math.*, 14(2) :267–282, 2001.
- [70] M. Flammini and S. Pérennes. Lower bounds on the broadcasting and gossiping time of restricted protocols. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, 17(4) :521–540, 2004.
- [71] M. Flammini and S. Pérennes. Lower bounds on systolic gossip. *Information and Computation*, 196(2) :71–94, 2005.
- [72] M. Flammini and S. Pérennes. Lower Bounds on systolic gossiping. *Information and Computation*, 196(2) :71–94, 2005.

- [73] P. Fraigniaud, A. Pelc, D. Peleg, and S. Pérennes. Assigning labels in unknown anonymous networks. In *Proceedings of PODC 2000, (Nineteenth Annual ACM SIGACT-SIGOPS Symposium on PRINCIPLES OF DISTRIBUTED COMPUTING)*, pages 101–112, 2000.
- [74] P. Fraigniaud, A. Pelc, D. Peleg, and S. Pérennes. Assigning labels in unknown network with a leader. *Distributed Computing*, 14(3) :163–183, 2001.
- [75] L. Gargano, P. Hell, and S. Pérennes. Colouring paths in directed symmetric trees with applications to WDM routing. In *ICALP'97*, volume 1256 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 505–515, Bologna, Italy, July 1997. Springer-Verlag.
- [76] L. Gargano, P. Hell, and S. Pérennes. Coloring all directed paths in a symmetric tree, with an application to optical networks. *Journal of Graph Theory*, 38(4) :183–196, 2001.
- [77] L. Gargano, A. Pelc, S. Pérennes, and U. Vaccaro. Efficient communication in unknown networks. In *Proc. of WG'2000 - 26th International Workshop on Graph-Theoretic Concepts in Computer Science*, volume 1928 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 172–183, Konstanz, Germany, 2000.
- [78] L. Gargano, A. Pelc, S. Pérennes, and U. Vaccaro. Efficient communication in unknown networks. *Networks*, 38(1) :39–49, 2001.
- [79] C. Gavoille, D. Peleg, S. Pérennes, and R. Raz. Distance labeling in graphs. In *SODA '01*, pages 210–219, 2001.
- [80] C. Gavoille, D. Peleg, S. Pérennes, and R. Raz. Distance labeling in graphs. *Journal of Algorithms*, 53(1) :85–112, 2004.
- [81] G. Huiban. Les problèmes de groupage dans les réseaux de télécommunication. Master's thesis, ISIMA, Clermont-Ferrand, 2000.
- [82] C. Gomes, S. Pérennes, P. Reyes, and H. Rivano. Bandwidth allocation in radio grid networks. In *10^{ème} Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel'08)*, Saint-Malo, France, May 2008.
- [83] C. Gomes, S. Pérennes, and H. Rivano. Bottleneck analysis for routing and call scheduling in multi-hop wireless networks. In *4th IEEE Workshop on Broadband Wireless Access (BWA)*, New-Orleans, US, December 2008.
- [84] M.-C. Heydemann, N. Marlin, and S. Pérennes. Rotational cayley graphs on transposition generated groups (extended abstract). In *6^{ème} Colloque International de Théorie des Graphes*, *Electronical Notes in Discrete Mathematics*, pages 187–190. Elsevier Science, 2000.
- [85] M.-C. Heydemann, N. Marlin, and S. Pérennes. Complete rotations in cayley graphs. *European Journal of Combinatorics*, 22(2) :179–196, 2001.
- [86] G. Huiban, S. Pérennes, and M. Syska. Traffic grooming in WDM networks with multi-layer switches. In *IEEE ICC*, New-York, April 2002. CD-Rom.
- [87] A. Jarry and S. Pérennes. Disjoint path in symmetric graphs. *Discrete Applied Mathematics*, 157(1) :90–97, 2009.
- [88] R. Klasing, Z. Lotker, A. Navarra, and S. Pérennes. From balls and bins to points and vertices. In *Proceedings of the 16th Annual International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2005)*, volume 3827 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 757–766. Springer Verlag, December 2005.
- [89] R. Klasing, N. Morales, and S. Pérennes. On the complexity of bandwidth allocation in radio networks. *Theoretical Computer Science*, 406(3) :225–239, oct 2008.
- [90] R. Klasing, A. Navarra, A. Papadopoulos, and S. Pérennes. Adaptive broadcast consumption (ABC), a new heuristic and new bounds for the minimum energy broadcast routing problem. In *Proc. 3rd FIP-TC6 Networking Conference (Networking 2004)*, volume 3042 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 866–877. Springer-Verlag, 2004.

- [91] J.-F. Lalande, S. Pérennes, and M. Syska. Groupage dans les réseaux dorsaux WDM. In *4^{ème} congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF'03)*, number 5 in Proceedings in Informatics, pages 254–255, Avignon, France, June 2003. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.
- [92] Z. Lotker, M. Martinez de Albeniz, and S. Pérennes. Range-free ranking in sensors networks and its applications to localization. In *ADHOC-NOW 2004*, pages 158–171, 2004.
- [93] G. Méheut, S. Pérennes, and H. Rivano. Evaluation stochastique et simulation des réseaux radio. Technical Report 5989, INRIA, September 2006.
- [94] C. Molle, F. Peix, S. Pérennes, and H. Rivano. Formulation en coupe/rounds pour le routage dans les réseaux radio maillés. In *10^{ème} Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel'08)*, Saint-Malo, France, May 2008.
- [95] C. Molle, F. Peix, S. Pérennes, and H. Rivano. Optimal routing and call scheduling in wireless mesh networks with localized information. In *the fourth Symposium on Trustworthy Global Computing (TGC 2008)*, Lecture Notes in Computer Science, November 2008. To Appear.