

Projet HIPERCOM

Communication à hautes performances

Rocquencourt

THÈME 1B



*R*apport
*A*ctivité

2000

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	5
3	Fondements scientifiques	6
3.1	La théorie analytique de l'information	6
3.1.1	Calcul d'entropies, algorithmes de compression, dépoissonisation	7
3.1.2	Prédicteurs, rétro-information	7
3.1.3	Théorie des graphes, complexité	8
3.1.4	Analyse pire cas des algorithmes et algèbre (max,+)	8
3.2	Méthodologie de l'évaluation des algorithmes de télécommunications	9
3.2.1	Analyse déterministe des performances des algorithmes	9
3.2.2	Analyse probabiliste des performances des algorithmes	10
3.2.3	Simulation d'algorithmes de télécommunication	11
3.2.4	Algorithmes d'ordonnancement et d'attribution de priorités	11
3.3	Modélisation de trafics et d'architectures de réseaux	12
3.3.1	Les trafics On/Off	12
3.3.2	Étude des files d'attente dans les nœuds de commutation	13
3.3.3	Étude des files d'attente sous TCP	14
3.3.4	L'architecture fractale du réseau internet	14
3.4	Conception et implémentation d'algorithmes	15
4	Domaines d'applications	15
4.1	Modems câble	15
4.2	Contrôle statistique des qualités de services	16
4.2.1	Contrôle d'admission dans les réseaux câblés	16
4.2.2	Multimédia et compression adaptative	16
4.3	Garantie déterministe de la qualité de service	17
4.3.1	Systèmes distribués temps réel avec objets persistants	17
4.3.2	Systèmes multimédia de vidéo à la demande	17
4.4	HIPERLAN	17
4.5	Les réseaux sans fil ad-hoc	18
5	Logiciels	18
6	Résultats nouveaux	19
6.1	Etude du modèle CGM (Coarse Grained Multicomputer)	19
6.2	Ordonnancement distribué temps réel sérialisable de tâches: étude de faisabilité	20
6.3	Ordonnancement centralisé non-préemptif	21
6.4	Réutilisation spatiale dans les réseaux radio locaux	22
6.5	Réservation de bande passante dans les réseaux radio ad-hoc	22
6.6	Détection et codage de mouvement dans une séquence d'images	23

6.7	Analyse des sur-coût de trafic des protocoles de routage pour les réseaux radio ad-hoc	23
6.8	Mise en œuvre du protocole IPv6 au-dessus d'une infrastructure ATM	23
6.9	Analyse et évaluation de protocoles d'accès au canal et de protocoles de routage dans les réseaux locaux sans fil	24
6.10	Garantie déterministe de la qualité de service dans les systèmes multimédia	25
6.11	Contrôle d'admission basé sur les durées de séjour maximum	25
6.12	Ordonnancement temps réel dans un serveur de vidéo à la demande	26
6.13	Ordonnancement temps réel dans un serveur de vidéo à la demande utilisant des SSDs	26
6.14	Protocole d'accès en arbre appliqué à UMTS	26
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	27
7.1	BRAIN	27
7.1.1	Solutions Manet pour la micromobilité	27
7.1.2	Architecture de qualité de service dans les réseaux mobiles	27
7.1.3	Etude des caractéristiques statistiques des flux MPEG	27
7.2	CATSERVER	28
7.3	AEE	28
7.4	IPANEMA	29
7.5	I3	30
7.6	PRIMA	30
8	Actions régionales, nationales et internationales	31
8.1	Déploiement du réseau sans fil à l'INRIA	31
8.2	Action COMPAS	31
9	Diffusion de résultats	33
9.1	Enseignement universitaire	33
9.2	Autres enseignements	33
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations	33
10	Bibliographie	34

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Philippe Jacquet [Ingénieur en Chef des Mines]

Responsable permanent

Paul Mühlethaler [Ingénieur en Chef de l'Armement]

Assistante de projet

Lydie Vincensini [AI]

Personnel Inria

Marc Badel [Ingénieur Principal de l'Armement]

Pascale Minet [CR]

Laurent Viennot [CR]

Collaborateurs extérieurs

Khaldoun Al Agha [à partir du 1er octobre]

Chercheurs invités

Nikos Argiriou [Université de Thessalonique, Grèce, du 31 janvier au 11 février]

Leonidas Georgiadis [Professeur à l'Université de Thessalonique, Grèce, du 19 au 27 février et du 16 au 19 septembre]

Dan Marinescu [Professeur à l'Université de Purdue, Indiana, USA, du 16 mai au 15 juillet]

Wojciech Szpankowski [Professeur à l'Université Purdue, Indiana, USA, du 19 au 27 février et du 15 au 24 septembre]

Nikita Vvedenskaya [Professeur à l'Académie Russe des Sciences, Institute of Information Transmission Problems, Moscou, du 22 octobre au 22 novembre]

Chercheurs post-doctorants

Khaldoun Al Agha [jusqu'au 30 septembre]

Isabelle Guérin-Lassous [action coopérative COMPAS, jusqu'au 31 août]

Ingénieurs experts

Belkacem Bensadallah

Saadi Boudjit [à partir du 1er octobre]

François Dumontet

Georges Gyory [à mi-temps sur Hipercom et sur Carsense, à partir du 8 juin]

Olivier Lecomte [jusqu'au 30 septembre]

Abdellah Najid [à partir du 1er février]

Adokoé Plakoo

Doctorants

Cédric Adjih [Bourse Inria, Université de Paris-Sud (Orsay)]

Mounir Benzaid [Bourse Inria, Université de Paris-Sud (Orsay), à partir du 4 novembre]

Thomas Heide Clausen [Bourse de l'Université d'Aalborg (Danemark)]

Soumaya Kamoun [Bourse Inria, Université de Versailles-Saint Quentin]

Anis Laouiti [Bourse Inria, Université de Versailles-Saint Quentin]

Amir Qayyum [Bourse Inria, Université de Paris-Sud (Orsay)]

Mohsen Souissi [Bourse Inria, Université de Versailles-Saint Quentin, jusqu'au 31 juillet]

Stagiaires

Saadi Boudjit [Université de Versailles-Saint Quentin, du 1er avril au 20 septembre]

Laars Christensen [Université d'Aalborg (Danemark), du 13 au 30 novembre]

Idil Fodil [Université de Versailles-Saint Quentin, du 1er avril au 30 septembre]

Gitte Hansen [Université d'Aalborg (Danemark), du 13 au 30 novembre]

2 Présentation et objectifs généraux

Le projet HIPERCOM se donne pour objectif de concevoir, d'évaluer et d'optimiser les algorithmes de télécommunications. Les domaines d'intervention privilégiés sont les protocoles, les nouveaux standards de télécommunications et la gestion des qualités de services sur les réseaux. Le terrain d'intervention est essentiellement centré sur les nouveaux réseaux et services supportant l'Internet.

De nombreux types d'architectures de réseaux se développent actuellement de manière explosive pour répondre aux demandes croissantes d'interactivité, de débit et de qualité de services des communications. La concurrence lors de l'établissement des standards est très vive et se trouve au cœur d'enjeux économiques considérables. Dans ce contexte, la présentation d'idées originales doit impérativement s'appuyer sur des éléments de comparaison clairs et objectifs reposant sur des techniques d'évaluations quantitatives.

Le rôle d'une équipe de recherche est de proposer et de défendre des algorithmes performants.

Les travaux menés dans HIPERCOM s'articulent autour des quatre axes de recherche suivants:

– *la théorie analytique de l'information :*

C'est une sorte de boîte à outils pour l'analyse des algorithmes. À cheval entre l'analyse d'algorithmes et la théorie de l'information, elle utilise abondamment l'analyse complexe pour obtenir des résultats fins sur les performances des protocoles de communication et des architectures des réseaux. La flexibilité des modèles analytiques facilite l'identification des processus déterminants dans le comportement des algorithmes. En l'occurrence la détermination précise des comportements asymptotiques est une source précieuse de renseignements dans les problèmes de grande taille.

– *la méthodologie de l'évaluation des algorithmes de télécommunication :*

L'évaluation des performances de systèmes distribués peut être faite par analyse, ou dans les cas plus complexes, par simulation. L'analyse des performances relève soit d'une approche déterministe (ex. : évaluation des temps de réponse pire cas), soit d'une approche probabiliste (ex. : évaluation des temps de réponse moyens). Les analyses relevant d'une approche déterministe reposent généralement sur l'identification des scénarios pires cas (par ex. l'ordonnancement critique des tâches). Différentes techniques peuvent être utilisées (calcul des plus longs chemins dans un graphe, algèbre max-plus). Les analyses relevant d'une approche probabiliste mettent en jeu des techniques empruntées à l'étude des systèmes stochastiques (mesures et distributions, chaînes de Markov, transformées de Laplace) et aussi des techniques empruntées à l'analyse d'algorithmes (combinatoire, récurrences, série génératrice).

– *la modélisation de trafics et d'architectures de réseaux :*

L'émergence et la montée en charge des réseaux de données, comme le Web sur l'Internet, appellent de nouveaux modèles de trafic adaptés au profil de ces nouveaux services. De même, les nouvelles architectures, notamment dans les réseaux ATM, viennent enrichir

le panorama. Par ailleurs l'émergence de ces nouveaux modèles, plus difficiles que les modèles classiques, oblige un renforcement des techniques d'évaluation des performances et la mise en œuvre d'outils puissants empruntés à la théorie analytique de l'information.

– *la conception et l'implémentation d'algorithmes :*

Le projet HIPERCOM propose des algorithmes dans le domaine des télécommunications et des protocoles. Les algorithmes sont dans la mesure du possible implémentés et expérimentés. Le projet attache une grande importance aux phases expérimentales. Le projet HIPERCOM a conçu des algorithmes dans les catégories suivantes :

- protocoles d'accès au médium (protocole d'accès pour câble-modem, protocole d'accès HIPERLAN),
- protocoles de routage sans fil (protocole de routage HIPERLAN, protocole de routage OLSR proposé dans le groupe MANet de l'IETF),
- les algorithmes d'ordonnancement et d'attribution de priorités prenant en compte les qualités de service des applications (démonstrateur CATSERVER, AEE).
- algorithmes de compression vidéo (démonstrateur CATSERVER),

HIPERCOM participe à différents *projets européens* (BRAIN, CATSERVER), *projets nationaux* (AEE, IPANEMA, I3, PRIMA), ainsi qu'à l'*action* COMPAS.

Des *relations de coopération* ont été établies avec différentes universités :

- au niveau international : université de Purdue (Indiana, USA), université de Thessalonique (Grèce), Académie Russe des Sciences (Moscou, Russie) ;
- au niveau national : université de Paris Sud (Orsay), université de Paris 12.

Par ailleurs, le projet est très actif au niveau de la *normalisation*. Il a proposé le protocole de routage OLSR dans le groupe MANet (réseaux mobiles ad-hoc) de l'IETF.

3 Fondements scientifiques

3.1 La théorie analytique de l'information

Participants : Philippe Jacquet, Paul Mühlethaler, Wojtek Szpankowski, Laurent Viennot.

Résumé : *La théorie analytique de l'information constitue le fondement scientifique du projet HIPERCOM. La terminologie a été introduite de concert avec W. Szpankowski de l'Université de Purdue. C'est une sorte de boîte à outils pour l'analyse des algorithmes. À cheval entre l'analyse d'algorithmes et la théorie de l'information, elle utilise abondamment l'analyse complexe pour obtenir des résultats fins sur les performances des protocoles de communication. La flexibilité des modèles*

analytiques facilite l'identification des processus déterminants dans le comportement des algorithmes. En l'occurrence la détermination précise des comportements asymptotiques est une source précieuse de renseignements dans les problèmes de grande taille. De cette manière les algorithmes peuvent être efficacement optimisés là où des simulations auraient été limitées par le mur de la complexité.

3.1.1 Calcul d'entropies, algorithmes de compression, dépoissonisation

L'entropie est la mesure théorique de la quantité d'information susceptible d'être stockée sur un support ou d'être transmise sur un canal. Elle permet donc de quantifier la capacité du support ou du canal. Les échanges entre ordinateurs nécessitent des modélisations très raffinées dans lesquelles le calcul précis de l'entropie revêt une importance considérable. Nous avons calculé les développements asymptotiques des entropies de sources d'information binomiales [9]. La méthodologie suivie est celle de la dépoissonisation [8] des séries génératrices.

Nous avons aussi poursuivi nos travaux sur les distributions limites des algorithmes de compression Lempel et Ziv. Nous avons étendu nos résultats pour les sources obéissant au modèle de Markov. En l'occurrence nous prouvons que les tailles des phrases créées par l'algorithme Ziv-Lempel sont asymptotiquement distribuées selon une loi normale. Et nous donnons une estimation du facteur de redondance entre les performances en moyenne de l'algorithme et la borne théorique de l'entropie.

Pour mener à bien les études analytiques précédentes, on a eu recours de manière extensive aux séries génératrices exponentielles qui sont particulièrement bien adaptées à l'analyse des modèles d'information. Il a fallu forger un outil générique : la dépoissonisation des séries génératrices exponentielles [8]. Cet outil permet d'extraire le comportement asymptotique des coefficients des séries exponentielles à partir de l'asymptotique de la fonction génératrice dans un cône du plan complexe. Cette méthodologie se situe dans la perspective directe des travaux du projet Algorithmes sur les séries génératrices et prend sa source dans les travaux de D. Knuth. Le modèle analytique reprend les séries génératrices sur les arbres digitaux de recherche et donne lieu à l'analyse asymptotique de solutions d'équations différentielles aux différences.

3.1.2 Prédicteurs, rétro-information

En théorie de l'information un prédicteur est un algorithme qui prédit le $n+1$ -ème symbole d'une chaîne de caractères à partir de la connaissance des n premiers. Bien sûr la prédiction est aléatoire et l'objectif est de minimiser la probabilité d'erreurs. Par exemple une prédiction acceptable sur la suite de caractères « *aaaaaaaaaaaa* » serait la lettre « *a* » mais rien n'empêche que dans la réalité le symbole suivant soit « *b* ».

Un prédicteur est optimal lorsque la probabilité d'erreur est minimale. Un prédicteur est fidèle si la prédiction suit la même distribution que celle du symbole suivant.

Philippe Jacquet a montré que le prédicteur basé sur la détection du plus long suffixe répliqué est fidèle pour tout modèle de Bernoulli et asymptotiquement fidèle pour le modèle de Markov, si la recherche de motif commence à partir de la gauche de la séquence [11]. Ce résultat permet de construire un prédicteur universellement optimal sur une grande classe de modèle. Ce prédicteur est en cours de test sur des séquences génétiques. Philippe Jacquet et

Wojciech Szpankowski travaillent sur la preuve que ce prédicteur est universellement optimal sur les modèles mélangeants.

La rétro-information est une tentative de modélisation de l'information sous certaines hypothèses extrapolées de la physique moderne (notamment la physique quantique). En particulier la violation d'*unitarité* permet en principe des transferts d'information en sens inverse du temps (sur de courtes échelles). Sous ces hypothèses, les transferts d'information bénéficient de propriétés intéressantes et donnent lieu à des combinaisons inédites en théorie de l'information [3, 38].

3.1.3 Théorie des graphes, complexité

De nombreuses recherches sur les réseaux concernent directement la théorie des graphes. Par exemple les protocoles de routage exploitent des métriques de graphes. Parmi les métriques utiles, il y a le nombre de sauts, le taux de disponibilité et la capacité des liens sur les chemins d'interconnexion. Chacune de ces métriques donne lieu à un type de routage bien particulier. Dans les réseaux sans fil, chaque transmission affectant tous les liens voisins de l'émetteur, voire tous les liens du réseau, la métrique la plus intéressante est celle qui minimise le nombre de retransmissions du message à délivrer.

Le réseau téléphonique mobile offre une palette de problèmes de recherche intéressants. Par exemple, les protocoles de synchronisation des balises des téléphones portables mettent en jeu des algorithmes de calcul parallèle des composantes connexes. De nombreux résultats équivalents découlent des études sur les partitions dans les graphes. Par ailleurs, les résultats sur la complexité des algorithmes sont en général énoncés sur les algorithmes de graphes. La connaissance de ces problématiques est nécessaire pour éviter de tomber dans les pièges NP-durs de l'algorithmique. Par exemple, Laurent Viennot [16] a montré que l'algorithme de sélection optimale des relais multipoints d'un nœud sans fil est NP-dur grâce à l'analogie avec le problème classique de la couverture minimale. Par contre il a montré que l'heuristique proposée par Amir Qayyum est optimale à un facteur multiplicatif $\log n$ près.

3.1.4 Analyse pire cas des algorithmes et algèbre $(\max, +)$

Les outils analytiques comme les séries génératrices et la théorie de l'information sont particulièrement utiles pour l'analyse des algorithmes en moyenne et en distribution lorsqu'ils sont soumis à des événements aléatoires. Il est tout aussi intéressant d'évaluer les algorithmes sous des événement *déterministes* pour en évaluer la borne maximale du comportement, ou, en d'autres termes, le comportement *en pire cas*. Ces analyses s'avèrent indispensables pour garantir la fiabilité des processus critiques dans des architectures qui nécessitent une sécurité maximale (avion, trafic aérien, centrales nucléaires). Dans cette perspective, l'algèbre $(\max, +)$ s'avère un outil précieux. Il existe en effet un parallèle intéressant entre l'algèbre $(\max, +)$ en analyse de pire cas, et l'algèbre $(+, \times)$ en analyse en moyenne. Par exemple, le calcul de la distribution de Laplace-Stieljes en t d'une fonction $f(x)$ revient à faire l'intégrale (la somme) de la fonction $\exp(-xt)f(x)$, l'analogie de ce calcul en algèbre $(\max, +)$ est la transformation de Fenchel : $\max(f(x) - tx)$, où on voit que la somme a été remplacée par l'opérateur \max , et la multiplication par une addition (une soustraction). La transformée de Fenchel a des propriétés

intéressantes en analyse en pire cas (auto-inversion comme la transformée de Laplace). Par exemple, l'analyse de la longueur maximale d'une file d'attente utilise la transformée de Fenchel de la fonction de trafic dans le temps, alors que l'analyse en distribution utilise la transformée de Laplace de cette même fonction. L'algèbre $(\max, +)$ devient un outil presque indispensable pour analyser les pires cas des systèmes à processeurs multiples. Il ne faut cependant pas négliger le facteur de complexité supplémentaire introduit par la non-commutativité de l'algèbre $(\max, +)$.

3.2 Méthodologie de l'évaluation des algorithmes de télécommunications

Mots clés : mesure, distribution, chaîne de Markov, transformée de Laplace, combinatoire, récurrence, série génératrice, simulation, analyse pire cas, analyse déterministe, temps de réponse maximum, scénario pire cas.

Participants : Cédric Adjih, Philippe Jacquet, Soumaya Kamoun, Anis Laouiti, Pascale Minet, Paul Mühlethaler, Amir Qayyum, Laurent Viennot.

Résumé :

Il est évident que l'on ne peut pas concevoir de bons algorithmes sans de bons modèles d'évaluation de ces algorithmes. L'équipe d'HIPERCOM a historiquement une forte expérience dans l'évaluation de performances pour les systèmes à accès multiple. L'évaluation de ces algorithmes constitue une des branches les plus difficiles de l'évaluation des performances de systèmes distribués. Cette évaluation peut être faite par analyse, ou dans les cas plus complexes, par simulation. L'analyse des performances relève soit d'une approche déterministe (ex. : évaluation des temps de réponse pire cas), soit d'une approche probabiliste (ex. : évaluation des temps de réponse moyens). Les analyses relevant d'une approche déterministe reposent généralement sur l'identification des scénarios pires cas. Le calcul des temps de réponse est alors effectué sur ces scénarios. Différentes techniques peuvent être utilisées (calcul des plus longs chemins dans un graphe, algèbre $(\max, +)$, ...). Les analyses relevant d'une approche probabiliste mettent en jeu des techniques empruntées à l'étude des systèmes stochastiques (mesures et distributions, chaînes de Markov, transformées de Laplace) et aussi des techniques empruntées à l'analyse d'algorithmes (combinatoire, récurrence, série génératrice). Lorsque les algorithmes sont difficiles à analyser, on a recours à la simulation.

3.2.1 Analyse déterministe des performances des algorithmes

Le domaine de l'évaluation déterministe des pire cas des algorithmes distribués a acquis une certaine maturité grâce en particulier à l'usage de l'algèbre $(\max, +)$. Maintenant la recherche se dirige vers la mise en évidence des conditions de faisabilité et la formalisation des cahiers des charges en algorithmique temps réel. Dans cette perspective différents algorithmes ont été ainsi évalués au cours de l'année 2000. L'objectif étant de décider de la faisabilité du point de vue temps réel (en particulier le respect des échéances de livraison/terminaison des messages/tâches) d'un ensemble de trafics/tâches. Les conditions de faisabilité qui en résultent

peuvent être utilisées a priori (i.e. avant la mise en fonctionnement du système [45], [43]) ou en cours de fonctionnement du système pour réaliser un contrôle d'admission [32], [34].

Nous nous sommes intéressés à deux domaines particuliers :

- les systèmes distribués temps réel avec objets persistants pour lesquels toute exécution de tâches distribuées doit satisfaire des contraintes temps réel (échéance de terminaison) et des contraintes de cohérence. Des conditions de faisabilité, nécessaires et suffisantes lorsque la complexité le permet, ou seulement suffisantes dans le cas contraire, ont été établies pour un ordonnancement FIFO (i.e. selon l'ordre des demandes d'activation des tâches) [45] et pour un ordonnancement périodique selon une séquence prédéfinie [44], [43];
- les systèmes multimédia de vidéo à la demande où le contrôle d'admission décide si un nouveau trafic peut être accepté sans remettre en cause les garanties déterministes accordées aux trafics déjà acceptés [32], [33], [34].

3.2.2 Analyse probabiliste des performances des algorithmes

Les protocoles à résolution de collisions L'équipe a une très forte expérience dans le domaine de l'accès multiple et de la résolution de collisions (deux thèses sur la contribution de l'algorithmique aux protocoles de communications et sur l'évaluation des protocoles d'accès aux réseaux hauts débits, de nombreuses publications internationales). Le domaine est très actif depuis une quinzaine d'années, autour de l'avènement des réseaux locaux.

L'analyse combinatoire de certains algorithmes de résolution de collisions fait intervenir des équations fonctionnelles proches de celles que l'on rencontre dans l'analyse de certains algorithmes de compression, ou de certaines structures de données arborescentes. Ceci permet de bénéficier des outils et des résultats d'analyses connus depuis D. Knuth (1973) et abondamment exploités depuis, notamment dans le projet Algorithmes.

On distingue les protocoles à réservation dans lesquels le jeton de réservation est soumis pendant une période à des collisions, et les données qui sont transmises dans des périodes protégées. Plus les données sont importantes par rapport au slot de réservation, plus la bande passante est utilisée efficacement. Les protocoles CSMA-CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*) sont des protocoles à réservation particuliers où le début de paquet joue le rôle de jeton de réservation, le corps du paquet étant protégé des collisions subséquentes grâce à la présence de sa porteuse. Certains résultats sont décrits avec détails dans les thèses d'habilitation de Paul Mühlethaler et Philippe Jacquet, soutenues en 1998 [14, 10].

Le domaine vient de rebondir récemment du fait de l'émergence de l'accès à Internet par le câble. En effet le protocole d'accès à la voie montante est à résolution différée de collisions. La résolution est différée dans la mesure où le temps de propagation est plus grand que la durée du slot de réservation. Le comité IEEE 802.14 a adopté l'algorithme de résolution en arbre ternaire défendu, entre autres, par l'équipe Algo-Hipercom (vote finalisé en 1998).

L'accès sans fil Il n'existe, à notre connaissance, pas encore d'exemple de modélisation vraiment satisfaisant pour les algorithmes d'accès sans fil. En général, il s'agit d'une extrapolation très directe de ce qu'on sait déjà faire sur les réseaux câblés. Néanmoins il existe

des différences fondamentales avec le câble, notamment les phénomènes de captures, les nœuds cachés, les niveaux physiques versatiles. Les évaluations des algorithmes d'accès sans fil doivent tenir compte de ces points.

Par exemple, la réutilisation spatiale d'une fréquence est la conséquence de l'atténuation polynomiale des signaux dans l'espace : deux nœuds éloignés peuvent émettre simultanément sans gêne mutuelle. C'est un phénomène typique en radio (capture) qui met en jeu la *capacité unitaire* d'un réseau sans fil étendu. La capacité unitaire d'un réseau est le produit de la quantité d'information transmise par unité de volume et unité de temps et du volume moyen de réception de l'information. Lorsque le réseau fonctionne sur fréquence unique, la capacité unitaire ne peut en aucun cas excéder la bande passante nominale sur la fréquence. En général la capacité unitaire est une constante, ou tend vers une constante quand la charge augmente. Cette constante dépend de la fonction d'atténuation du signal. On donne des valeurs exactes de la capacité unitaire pour différentes fonctions d'atténuation. Pour la propagation dans le vide la capacité unitaire est nulle sauf si on introduit un *horizon* pour la propagation [10].

Le domaine est devenu très actif depuis cinq ans environ, lors de l'avènement de la communication mobile et du GSM.

3.2.3 Simulation d'algorithmes de télécommunication

Certains algorithmes de télécommunication sont difficiles à évaluer. C'est par exemple le cas pour les protocoles de routage. En fait ils opèrent sur des topologies de réseaux non triviales qui rendent difficile l'application de modèles analytiques. Dans ce cas on a recours à des simulations par ordinateurs. Le projet se constitue une bibliothèque de noyaux de simulation. Il est indispensable de maîtriser un outil de simulation standard pour pouvoir participer aux comparaisons des résultats dans les comités de normalisations. Ainsi la politique de diffusion sans fil par relais multipoints a été simulée par Anis Laouiti [56]. Ses résultats ont montré que cette politique pouvait économiser jusqu'à 80 % du trafic généré par une inondation normale. Les simulations ont porté sur des réseaux dont l'effectif atteignait le millier d'unités.

3.2.4 Algorithmes d'ordonnancement et d'attribution de priorités

Les qualités de service s'expriment souvent par des échéances et des priorités qui peuvent être attribuées dynamiquement et qui ont pour but d'induire un processus d'ordonnancement des messages. Dans un réseau, on rencontre deux types d'ordonnancement des messages : un ordonnancement local à chaque station et un ordonnancement global entre les stations.

Au niveau de l'ordonnancement local un ordonnancement non-préemptif est utilisé. Des résultats nouveaux ont été établis concernant la complexité, les conditions d'optimalité d'EDF, (*Earliest Deadline First*), ainsi qu'une condition nécessaire et suffisante d'ordonnancement de tâches périodiques.

L'ordonnancement global est moins couvert et n'est vraiment exploré que depuis les débuts d'ATM et de l'Internet nouvelle génération. En général, l'ordonnancement global est

réalisé au moyen de réservations et de priorités, donc à partir de connaissances partielles de l'état instantané du réseau.

Une stratégie avantageuse consiste à utiliser l'échéance de validité du paquet pour déterminer les priorités de transmission. Cette politique d'ordonnement a été introduite par l'équipe Hipercom-Reflecs pour la gestion des contraintes temps réel dans la norme HIPERLAN [15]. Cette politique est aussi utilisée pour la gestion des qualités de service dans le QoS-proxy construit par le projet CATSERVER. L'échéance du paquet est aussi un paramètre du standard IPv6 et peut donc avantageusement être utilisée pour gérer les qualités de service dans les routeurs. Le projet HIPERCOM participe avec le LORIA et le LIAFA à l'action incitative COMPAS pour explorer, entre autres, les relations qui pourraient être établies entre l'échéance IPv6 et les priorités d'HIPERLAN (responsable Laurent Viennot).

Lorsqu'on veut une garantie déterministe de l'échéance de bout-en-bout d'un paquet, il faut pouvoir garantir que le temps de réponse maximum du paquet ne dépassera jamais cette échéance. C'est là l'objet du contrôle d'admission [32], [33], [34]. C'est l'un des axes de recherche du projet HIPERCOM.

Le problème de l'ordonnement global se complique dès lors que l'on doit en plus satisfaire des contraintes de cohérence [13]. Le respect des échéances de terminaison de tâches sporadiques ayant une structure en graphe fait l'objet de travaux [17], [44], [45], [43].

3.3 Modélisation de trafics et d'architectures de réseaux

Participants : Cédric Adjih, François Dumontet, Philippe Jacquet, Dan Marinescu, Nikita Vvedenskaya.

Résumé : *L'émergence et la montée en charge des réseaux de données, comme le Web sur l'Internet, appelle de nouveaux modèles de trafic adaptés au profil de ces nouveaux services. Par exemple, le trafic sur les réseaux de données est très sporadique et donne lieu à des corrélations à long terme qui n'apparaissent pas dans les modèles classiques. De même, les nouvelles architectures, notamment dans les réseaux ATM, viennent enrichir le panorama. Par ailleurs l'émergence de ces nouveaux modèles, plus difficiles que les modèles classiques, oblige un renforcement des techniques d'évaluation des performances et la mise en œuvre d'outils puissants empruntés à la théorie analytique de l'information.*

3.3.1 Les trafics On/Off

Jusqu'à présent le modèle de prédilection dans les évaluations d'algorithmes de télécommunications était le trafic uniforme de Poisson. De récentes statistiques de trafics, établies notamment à Bellcore (New Jersey) ont montré que certains trafics de données s'écartaient très sensiblement du modèle poissonnien et prenaient des caractéristiques fractales et à longues dépendances. Des études récentes montrent que de tels trafics peuvent être modélisés par des superpositions de processus On/Off.

Les conséquences pratiques concernent essentiellement les dimensionnements des tampons au niveau des routeurs IP ou dans les commutateurs ATM. En effet, des analyses de files

d'attente simples montrent que les niveaux d'occupation des files d'attente suivent alors une loi à décroissance polynomiale alors que, sous le modèle poissonien uniforme, la décroissance est exponentielle.

On analyse [12] un modèle simple où les sources commutent entre l'état «on» et l'état «off» indépendamment et selon des processus exponentiels aux taux prédéterminés. Si on dispose en série des sources aux paramètres de commutation judicieusement choisis, le trafic résultant présente des longues dépendances. Ce résultat est un peu paradoxal dans la mesure où on ne s'attend pas forcément à ce qu'un ensemble de sources indépendantes et sans mémoire puisse créer des longues dépendances.

L'analyse utilise les propriétés de la transformée de Mellin qui se révèle un outil efficace pour traquer les comportements polynomiaux. Philippe Jacquet est auteur d'un chapitre sur les sources On/Off dans un livre consacré aux nouvelles modélisations de trafic, co-édité par Kihong Park et Walter Willinger [25].

3.3.2 Étude des files d'attente dans les nœuds de commutation

La modélisation des files d'attentes constitue le noyau de l'étude des architectures des nœuds de commutation. On entend par nœud de commutation un dispositif d'interconnexion placé entre plusieurs réseaux fonctionnant par paquet. Par exemple, un routeur IP, un bridge ou un *hub* Ethernet, un commutateur ATM, *etc.*

L'existence de nombreuses classes de services multiplie le nombre de files d'attente résidant dans un commutateur. Dans ce contexte l'analyse asymptotique du système s'avère nécessaire afin de traiter le cas où ce nombre croît de façon importante. On avait développé une méthodologie basée sur la convergence asymptotique des vecteurs d'états vers les séries génératrices probabilistes.

Dans le cadre d'une ancienne collaboration avec les Bell Laboratories (Albert Greenberg) nous avons appliqué cette méthode sur des architectures simples. Cette année nous avons appliqué une méthode dérivée et améliorée par Nikita Vvedenskaya à un réseau de files d'attente disposant d'un routage. Le routage consiste à ce que chaque nouveau paquet créé dans une file d'attente sélectionne une file au hasard et la rejoint si cette file est moins longue que la file d'origine. Dans le cas d'un processus de création et de service des paquets suivant des lois de Poisson, on montre que la distribution des longueurs des files d'attente tend à être super-exponentielle. D'une manière plus précise si λ est le taux d'occupation du commutateur, la probabilité d'avoir une file d'attente de taille supérieure à n est λ à la puissance deux à la puissance n . Ce résultat est remarquable parce que sans routage cette probabilité devient λ à la puissance n , c'est-à-dire un ordre logarithmique au dessus. Les hypothèses de la loi de création et de service ne sont pas fondamentales. Mieux encore Nikita Vvedenskaya et Philippe Jacquet ont montré cette année que le caractère super-exponentiel de la distribution de la file d'attente était maintenu même dans le cas de la création des paquets par des sources «on/off» selon le modèle décrit dans la section précédente. On arrive donc au résultat paradoxal où les files d'attentes sans routage ont une distribution polynomiale, et avec routage, une distribution super-exponentielle [54].

3.3.3 Étude des files d'attente sous TCP

Riche de l'expérience acquise dans l'étude des files d'attente dans les nœuds de commutation, l'équipe s'est lancée dans le problème difficile de l'analyse des performances du protocole TCP/IP en réseau routé. Le protocole TCP contrôle le flux des connexions de données en faisant varier les tailles de fenêtre de transmission. Le modèle retenu est celui d'une file d'attente entre un réseau rapide et un réseau lent. Les serveurs sont sur le réseau rapide et les clients sont sur le réseau lent. Ceci est une situation réaliste dans la mesure où les serveurs des distributeurs internet sont souvent localisés sur l'épine dorsale d'internet alors que les clients doivent d'abord traverser leur boucle d'accès local (modem, câble, ADSL) avant d'accéder au réseau internet à proprement dit. Pour faire plus réaliste, les temps de retour des acquittements sont accompagnés d'une composante aléatoire. Moins réaliste est l'hypothèse que chaque serveur transfère des fichiers de taille infinie, mais ceci permet d'approcher le cas réaliste où les transferts sur réseau sont longs. Le protocole TCP est simplifié afin de pouvoir entrer dans un modèle analytique ; en particulier les fenêtres sont envoyées d'une seule pièce alors que dans la réalité cet envoi est temporisé par le retour graduel des acquittements. Le retour au mode *slow start* en cas de forte congestion est désactivé. Cédric Adjih, Nikita Vvendskaya et Philippe Jacquet travaillent actuellement sur le modèle asymptotique où le nombre de connexions croît linéairement avec la taille du buffer sur le goulot d'étranglement. Sous certaines conditions, il apparaît que la taille de la place résiduelle dans le buffer tend vers une loi exponentielle. Il apparaît aussi que la distribution des tailles des fenêtres est très étalée, notamment en direction des petites fenêtres. Cet étalement est particulièrement pénalisant pour l'équité entre les clients, puisque les débits instantanés sont proportionnellement très étalés. On constate en conséquence que la distribution du temps d'envoi d'un fragment de fichier est à queue lourde. L'analyse est contrôlée par des simulations sous NS du protocole TCP.

3.3.4 L'architecture fractale du réseau internet

Quand un service d'information doit envoyer le même contenu à un groupe d'abonnés, il recourt naturellement à un mode de distribution *multicast* si le réseau le permet (par exemple, la télévision). Le protocole internet a été initialement conçu pour des communications sous le mode *unicast*. Des études importantes sont menées afin de standardiser des protocoles de transfert multicast les plus efficaces possible. Les enjeux sont extrêmement importants car le gain de capacité sur les liens physiques est très important si on remplace 1 millions de connexions unicast par une seule connexion multicast. Le gain réalisé a été analysé de manière empirique par Chuang et Sirbu en 1998. La loi empirique de Chuang-Sirbu stipule que le gain réalisé est d'un facteur $n^{0.2}$. Ce résultat (obtenu par simulation) est surprenant dans la mesure où dans les arbres aléatoires le gain est plutôt en $\log n$. Cédric Adjih, Leonidas Georgiadis, Philippe Jacquet et Wojciech Szpankowski ont repris un modèle analytique pour tenter de retrouver la loi de Chuang-Sirbu. Ils ont introduit une nouvelle espèce d'arbres, les arbres auto-similaires qui permettent de simuler le gain en facteur n^α . Les arbres auto-similaires prévoient une certaine abondance de routeurs dit *unitaires* qui admettent un flux prépondérant unique. Ces résultats sont étayés par l'analyse d'une campagne de mesure de route effectuée par les Bell Laboratories et qui mettent en évidence l'existence de ces routeurs unitaires à l'origine du facteur n^α (bien que dans le cas des dites mesures on ait plutôt $\alpha \approx 0.11$).

3.4 Conception et implémentation d'algorithmes

Participants : Cédric Adjih, François Dumontet, Georges Gyory, Philippe Jacquet, Soumaya Kamoun, Pascale Minet, Paul Mühlethaler, Amir Qayyum, Laurent Viennot.

Résumé : *Dans cette section, nous présentons des algorithmes qui sont directement issus d'optimisations basées sur des évaluations de performances et à la définition desquels nous avons pris part.*

Protocoles d'accès pour câble-modem Ils sont adaptés du protocole en arbre et sont stables en population infinie et indépendamment du délai de propagation. Le comité IEEE 802.14 a standardisé une version en arbre ternaire comme protocole d'accès à la voie montante du réseau câblé.

Un ordonnancement global basé sur des priorités d'accès hiérarchiques et un contrôle de type « thermodynamique » du trafic entrant. Par « gestion thermodynamique » on entend une gestion agissant au niveau des paramètres d'équilibre global du trafic et qu'on oppose à la gestion « dynamique » qui est définie sur des critères explicites pour chaque sous trafic. Élément de la norme HIPERLAN type 1, norme ETSI 300.652, aussi utilisé pour le contrôle de la qualité de service dans le projet CATSERVER.

Protocole d'accès sans fil à détection de collisions par signalement actif. Base de la norme HIPERLAN.

Protocoles de routage sans fil basés sur la reconnaissance des voisinages et sur des transmissions à diffusion optimisées. Éléments de la norme HIPERLAN. Fondement des protocoles IMEP et OLSR proposés dans le groupe MANet de l'IETF (voir domaine d'application).

Algorithme de compression vidéo basé sur la détection de mouvement par pattern matching et une compression des différences par ondelettes. Pour le projet CATSERVER [2].

4 Domaines d'applications

4.1 Modems câble

La demande pour des connexions Internet vraiment plus rapides va croissant. Le câble est l'une des alternatives les plus prometteuses, en particulier pour les zones urbaines. Les principales caractéristiques du réseau câblé sont :

- a) l'existence d'un canal montant permettant l'interactivité ;
- b) un débit de 1-10 Mbits/s en montée et de 10-30 Mbits/s en descente, assurant la transmission symétrique à haut débit.

Le projet a participé aux travaux du comité international de normalisation IEEE 802.14 qui a standardisé le protocole d'accès à la voie montante du câble. Plus précisément le comité cherchait un mécanisme d'accès qui entrelace d'une manière naturelle les slots de requêtes avec les slots de données afin d'obtenir une latence réduite à faible charge et une capacité optimale. Nous y avons défendu un protocole en arbre légèrement modifié pour tenir compte du *feedback* différé et de l'entrelacement des réservations. Ces études prennent en compte diverses modélisations et expérimentations.

4.2 Contrôle statistique des qualités de services

4.2.1 Contrôle d'admission dans les réseaux câblés

Le projet européen ESPRIT IT CATSERVER (*cable TV server*) a pour but de réaliser un serveur multimédia raccordé à l'Internet par le câble. La tâche de l'INRIA dans ce projet concerne les deux actions suivantes :

1. la conception d'un contrôle de la qualité de service à la fois distribué (application *QoS-Controller* dans les serveurs du réseau) et centralisé (présence d'un *QoS-Proxy* en tête de réseau) ;
2. la conception d'un serveur multimédia installé chez l'abonné au câble et disposant d'un débit vidéo variable afin de démontrer l'efficacité du contrôle de qualité de service.

En ce qui concerne la première action, il est prévu trois algorithmes fondamentaux : un algorithme de contrôle d'admission, un algorithme d'allocation de la bande passante et un algorithme de sélection de priorités de service sur le routeur. Le protocole RSVP, initialement envisagé, ne sera pas utilisé à cause de problèmes d'implémentation.

En ce qui concerne la seconde action, la compression adaptative est une piste intéressante pour contrôler des qualités de services multimédia. Dans un réseau à accès multiple, comme le réseau câble TV, le maintien du service multimédia devra passer par un contrôle dynamique des taux de compression. En cas de surcharge locale, les services pourront continuer à être fournis au prix d'une dégradation de qualité contrôlée, sans pour autant devenir prédateurs les uns des autres.

4.2.2 Multimédia et compression adaptative

Les nouvelles applications multimédia sur l'Internet demandent de nouvelles techniques de compression qui soient adaptées à ce nouveau type de communication (groupes de standardisation MHEG pour le Web). En outre, les nouveaux médias sur lesquels seront basés l'Internet rapide, comme le câble, permettront des applications multimédia de qualité accrue, notamment en ce qui concerne la vidéo. On recherche des techniques asymétriques telles que la décompression soit particulièrement rapide et aisée, de façon à ce qu'un abonné normal puisse accéder au service sans nécessiter de matériel supplémentaire (carte MPEG et/ou carte ATM). La partie compression peut avoir été faite off-line sur le serveur [2].

Dans cette perspective, W. Szpankowski de l'université de Purdue propose une technique basée sur une adaptation avec perte de l'algorithme de Lempel et Ziv. La reconstruction des

données se fait par simple lecture en ligne d'un fichier sans le recours à trop d'opérations complexes entre réels flottants.

4.3 Garantie déterministe de la qualité de service

4.3.1 Systèmes distribués temps réel avec objets persistants

Dans un système distribué, où les délais de communication sont bornés et connus, nous avons examiné deux aspects de la qualité de service pour des tâches distribuées temps réel ayant une structure en graphe et accédant à des objets persistants :

- respect de la sérialisabilité des exécutions des tâches, (i.e. équivalence à une exécution en série des tâches) ; la sérialisabilité permet en l'absence de défaillance de garantir la cohérence du système ;
- respect des échéances de terminaison des tâches.

4.3.2 Systèmes multimédia de vidéo à la demande

Dans les systèmes multimédia de vidéo à la demande, le contrôle d'admission décide si un nouveau trafic peut être accepté sans remettre en cause les garanties déterministes accordées aux trafics déjà acceptés. Nous avons considéré les deux aspects suivants de la qualité de service :

- respect de la gigue maximum en réception chez le client,
- respect de l'échéance de remise au plus tard chez le client.

4.4 HIPERLAN

Suite aux résultats du projet LAURA, et à l'aboutissement et à l'adoption de la norme HIPERLAN en 1996, le projet Euclid IPANEMA est en cours. L'idée est de porter la norme HIPERLAN sur des réseaux radio à 2,4 GHz et de les faire travailler sous IPv6 dans le cadre d'un réseau tactique militaire. Ces réseaux auront des performances moindres de celle d'HIPERLAN (de 1 à 2 Mbits/s de débit au lieu de 24 Mbits/s) mais reposent sur une technologie mûre et meilleur marché. La nouvelle norme ETS 300-328 sur la libéralisation de la bande 2,4 GHz fournit le cadre normatif à cette action.

Les cartes réseaux radio à 2,4 GHz existent dans le commerce. Nous avons sélectionné la carte Wavelan de Lucent Technology. Dans le cadre de la collaboration avec l'action PRAXITELE, ces cartes servent aussi à la liaison sans fil entre les voitures électriques et une base fixe.

Il s'agit de réaliser des pilotes HIPERLAN au dessus des cartes 2,4 GHz qui intègrent les fonctions de routage dynamique air-air et air-câble. Des implémentations sous Linux et MSDOS existent déjà, elles ont été faites en collaboration avec PRAXITELE. Il s'agit maintenant de porter ces pilotes sous FreeBSD afin de rejoindre les souches IPv6 de Francis Dupont. Un portage sous Windows est aussi en cours.

4.5 Les réseaux sans fil ad-hoc

Un réseau mobile ad-hoc est un réseau créé par l'interaction de mobiles qui communiquent entre eux par radio et qui n'utilisent pas d'infra-structure pré-existante. Par exemple un groupe d'ordinateurs portables reliés par des cartes HIPERLAN est un réseau ad-hoc. Le réseau GSM n'est pas un réseau ad-hoc dans la mesure où les communications passent obligatoirement par les stations de base (BTS) et le réseau filaire.

Lorsque le réseau ad-hoc est géographiquement étendu, certaines stations peuvent être hors de portée les unes des autres. Ce cas nécessite l'emploi d'un routage interne des messages par des stations intermédiaires. La gestion de ce routage consiste à établir une sorte d'architecture molle où l'on doit tenir compte de la mobilité des stations et de la versatilité du médium physique. La modélisation en est assez difficile. Un groupe de travail a été créé dans ce sens à l'IETF (MANet). L'équipe HIPERCOM y participe très activement sous le couvert de l'action incitative COMMOBILE (responsable Afonso Ferreira). Amir Qayyum a rédigé le draft du protocole fédérateur IMEP de MANet [1]. Philippe Jacquet, Paul Mühlethaler et Amir Qayyum sont co-auteurs du draft du protocole OLSR (*Optimized Link State Routing* [7]). Ce draft a été renouvelé en novembre. Il existe deux classes de protocoles de routage : les protocoles réactifs qui recherchent les routes à la demande, et les protocoles pro-actifs qui établissent les routes à l'avance grâce à une gestion périodique des tables de routage. Le protocole OLSR est un protocole pro-actif. Les deux techniques, routage proactif et routage réactif, ont leurs avantages et inconvénients, selon le type d'application et l'environnement d'implémentation. A. Qayyum et A. Laouti ont fait des simulations pour comparer OLSR, qui est un protocole proactif, avec un protocole réactif : DSR (*Dynamic Source Routing*). DSR est aussi un protocole candidat à MANet. Les résultats ont montré que les protocoles proactifs sont performants et présentent des domaines d'application importants dans les réseaux sans fil mobiles.

La comparaison entre OLSR et DSR a également montré que lorsque le nombre de nœuds du réseau devient important, les performances de OLSR dépassent celles de DSR. En outre, lorsque des liens de communication asymétriques apparaissent dans le réseau à cause de phénomènes de *fading*, d'interférences ou d'autres perturbations dans la propagation des ondes, le protocole OLSR se stabilise mieux que le protocole DSR [53].

5 Logiciels

Les logiciels développés par HIPERCOM en 2000 sont :

- Un outil permettant de décider de la faisabilité d'un jeu de tâches distribuées temps réel avec une structure en graphe. Ces tâches sporadiques doivent respecter leurs échéances de terminaison et préserver la cohérence d'objets persistants modifiables (voir paragraphe 6.2). Cet outil a été développé en C++ et utilise la bibliothèque LEDA pour calculer les plus longs chemins dans un graphe.
- Un simulateur de réservation de bande passante sous Linux (voir paragraphe 6.5).
- Une implémentation en Linux et en FreeBSD du protocole de routage OLSR pour réseau sans fil. Le routage est fait au niveau IP sous la forme d'un démon. Au contraire des

autres protocoles de routage ad hoc, le protocole OLSR est implémentable en *user space* et nécessite aucune modification de la pile IP existante. Cette particularité fait de la solution OLSR un algorithme très facile à porter.

- Un simulateur de routage sur les réseaux mobiles ad-hoc sous OPNET. En ce qui concerne le protocole OLSR, le simulateur utilise le code d'implémentation décrit au-dessus. Ceci permet de valider en même temps l'algorithme et le code.
- Un émulateur de topologie de routage sans fil sous IP basé sur du filtrage de paquet.
- Deux drivers de communication pour réseaux sans fil avec routage interne ont été développés pour les cartes Wavelan 2.4GHz seconde génération de Lucent Technology. L'un fonctionne sous Linux ou sous FreeBSD, l'autre fonctionne sous Windows.
- Un analyseur de trafic sur réseaux sans fil IEEE 802.11, permettant la capture au vol des paquets échangés en vue de debugage.
- Un émulateur de topologie de routage HIPERLAN basé sur du filtrage de paquet.
- Un simulateur graphique d'inondation dans un réseau sans fil : ce logiciel est réalisé en C++ (2000 lignes) sous Linux.
- Un système de compression/décompression vidéo par ondelettes, s'appuyant sur l'architecture Real Media.
- Une interface de contrôle de la qualité de service entre application (QoS controller) et gestionnaire distant (QoS proxy) sous Windows NT.

6 Résultats nouveaux

6.1 Etude du modèle CGM (Coarse Grained Multicomputer)

Participants : Afonso Ferreira [Projet Mascotte], Mohammed Essaïdi [Projet Résédas], Assefaw Hadish Gebremedhin [Bergen University], Isabelle Guérin-Lassous, Jens Gustedt [projet Résédas], Michel Morvan [LIAFA, Paris], Jan Arne Telle [Bergen University], Eric Thierry [LIRMM, Montpellier].

Le modèle CGM (Coarse Grained Multicomputer) est un modèle parallèle à gros grain récent qui prend en compte certaines caractéristiques réelles des machines parallèles actuelles tout en englobant le plus de plate-formes possibles. Nos travaux ont porté sur une étude expérimentale concernant les algorithmes parallèles de traitement de graphes et le modèle CGM. Nous nous sommes donc intéressés à la conception d'algorithmes parallèles de traitement de graphes ainsi qu'à leur implantation sur des architectures diverses.

Cette année, nous avons proposé plusieurs algorithmes pour le problème du list ranking présentant de bonnes complexités théoriques [36]. C'est un problème de base en algorithmique parallèle des graphes puisqu'il est utilisé comme sous-routine dans la plupart des algorithmes parallèles sur les graphes. Nous avons proposé un algorithme de coloriage de graphe dans ce

modèle (qui peut servir de point de départ pour les problèmes d'assignation de fréquences dans les réseaux sans fil) [31]. Nous avons aussi proposé des algorithmes de permutation aléatoire d'entiers qui respectent les contraintes du modèle CGM [37]. Ces algorithmes permettent de réaliser une redistribution aléatoire des données comme il est souvent demandé dans les algorithmes probabilistes.

Concernant la partie expérimentation, un certain nombre d'algorithmes ont été implantés sur une machine parallèle T3E et deux grappes de PCs (une reliée par un réseau Fast Ethernet et l'autre par un réseau Myrinet). Les algorithmes implantés concernent les algorithmes proposés cette année, ainsi que d'autres algorithmes soit conçus les années précédentes (somme préfixe, graphes de permutation, graphes d'intervalles), soit déjà existants dans la littérature. Toutes ces implantations ont fait l'objet d'une bibliothèque appelée SSCRAP qui se situe sur deux niveaux : le premier implante les fonctionnalités du modèle CGM et le deuxième concerne les algorithmes CGM de traitement de graphes (le deuxième niveau faisant appel au premier). SSCRAP est basée sur la bibliothèque MPI (URL : <http://www.loria.fr/~gustedt/cgm>). Ce travail a montré que ce modèle permet de faire du calcul efficace sur les réseaux locaux homogènes à haut débit et les machines parallèles car peu de communications sont réalisées et au total peu de données sont échangées sur le réseau [35, 50]. Les résultats ont montré que le médium était peu sollicité avec ce modèle, par conséquent ce point semble très prometteur et bénéfique pour certaines applications qui demandent d'économiser de la bande passante, comme les réseaux radio.

6.2 Ordonnement distribué temps réel sérialisable de tâches : étude de faisabilité

Mots clés : ordonnancement distribué temps réel, sérialisabilité, tâches sporadiques en graphe, conditions de faisabilité.

Participants : Soumaya Kamoun, Pascale Minet.

Dans sa thèse [17], Soumaya Kamoun traite du problème ODITS: Ordonnement Distribué Temps réel Sérialisable. Elle étudie la faisabilité d'un jeu de tâches sporadiques distribuées soumises à des contraintes temps réel et partageant des objets modifiables persistants. Un jeu de tâches ODITS est dit faisable ssi il existe un ordonnancement satisfaisant les contraintes de cohérence (invariants sur les objets) et les contraintes temps réel (échéances de terminaison des tâches). Le problème est d'autant plus difficile que les tâches distribuées ont une structure en graphe.

Dans un premier temps, une approche générale de résolution du problème ODITS est proposée. Elle comprend trois composantes chargées respectivement de :

- garantir la sérialisabilité de l'exécution des tâches. Cette première composante est basée sur (i) le partitionnement des tâches en classes et (ii) l'évitement de conflit au sein d'une même classe grâce à un ordre total global par classe ;
- déterminer un algorithme d'ordonnement temps réel générique en ligne non-préemptif garantissant cet ordre total global par classe ;

- établir les conditions de faisabilité pour une solution mettant en œuvre les deux composantes précédentes, et ce avant mise en fonctionnement du système. Ces conditions sont obtenues par une analyse pire cas. Les règles permettant d’identifier les scénarios pires cas d’un jeu de tâches ODiTS sont établies. Les scénarios pires cas sont modélisés sous forme d’un graphe orienté cyclique. Cette modélisation permet d’énoncer des conditions de faisabilité nécessaires et suffisantes pour un jeu de tâches et une solution algorithmique au problème ODiTS.

Dans un deuxième temps, deux solutions particulières sont dérivées de cette approche générale : l’une basée sur un ordonnancement périodique selon une séquence prédéfinie [43] et l’autre basée sur un ordonnancement FIFO [45]. Chacune de ces solutions fait l’objet d’une étude détaillée. La complexité des conditions de faisabilité nécessaires et suffisantes obtenues étant élevée, nous proposons des conditions de faisabilité de moindre complexité. Ces conditions, qui généralement ne sont que suffisantes, sont obtenues en observant les scénarios avec une certaine granularité temporelle. Soumaya Kamoun a développé en C++ l’outil ODiTS qui établit les conditions de faisabilité d’un jeu de tâches pour l’ordonnancement FIFO et pour l’ordonnancement périodique, et en déduit si le jeu de tâches considéré est faisable.

Dans un troisième temps, nous comparons, pour un jeu de tâches ODiTS donné, les deux algorithmes d’ordonnancement étudiés. Nous prouvons que les temps de réponse pires cas des tâches avec une structure en étoile sont plus petits avec FIFO qu’avec tout ordonnancement périodique. Inversement, nous montrons que l’ordonnancement périodique peut donner de meilleurs résultats pour des tâches en cascade. Plus généralement, nous donnons la relation liant, pour toute tâche sporadique ayant une structure en graphe, ses temps de réponse pires cas obtenus avec FIFO et avec un ordonnancement périodique selon une séquence prédéfinie.

6.3 Ordonnancement centralisé non-préemptif

Mots clés : ordonnancement distribué temps réel, sérialisabilité, tâches sporadiques en graphe, conditions de faisabilité.

Participants : Laurent George, Paul Mühlethaler, Nicolas Rivierre.

Dans un récent travail, Laurent George, Paul Mühlethaler et Nicolas Rivierre ont obtenu plusieurs résultats techniques nouveaux sur l’ordonnancement non préemptif [49].

Pour l’ordonnancement de tâches aperiodiques, ils ont montré que le problème était NP (résultat déjà connu) mais restait NP avec une charge processeur inférieure à toute valeur positive prédéfinie. Ces derniers fournissent également une estimation de la complexité du problème en terme de nombre de tâches dans les périodes actives et montrent que l’algorithme d’ordonnancement EDF est optimal dans le cas non préemptif pour des tâches de même durée d’exécution.

Dans le cas de tâches concrètes périodiques le caractère NP du problème est démontré avec une charge processeur inférieure à toute valeur positive prédéfinie. Un résultat nouveau est aussi obtenu sur la période de recherche pour s’assurer de la faisabilité du jeu de tâches. Contrairement au cas préemptif où la faisabilité peut s’établir sur un intervalle r+PPCM (des

périodes) il est nécessaire et suffisant de tester sur $r+2*$ PPCM (des périodes); r désigne le plus grand des instants de première apparition d'une tâche.

Laurent George, Paul Mühlethaler et Nicolas Rivierre ont également montré un résultat intéressant qui montre bien la ligne de démarcation entre l'ordonnancement préemptif et l'ordonnancement non préemptif. Contrairement à l'ordonnancement préemptif, un jeu de tâches peut satisfaire la propriété suivante: sur tout intervalle de temps, la charge processeur, augmentée du facteur de blocage, peut être inférieure à la durée de l'intervalle sans pour autant être ordonnançable.

6.4 Réutilisation spatiale dans les réseaux radio locaux

Participants : Khaldoun Al Agha, Laurent Viennot.

L'interbrouillage des communications dans un réseau radio est sans doute la principale difficulté dans l'élaboration de protocoles pour ce type de réseaux. Il en fait la spécificité. La plupart des solutions trouvées pour les réseaux filaires doivent être revues avec cette particularité en vue.

Modéliser la possibilité d'utiliser en plusieurs endroits la même ressource radio (réutilisation spatiale) constitue donc une étude fondamentale pour pouvoir utiliser au mieux les possibilités de la radio. Une étude inspirée des travaux existants en GSM a été menée par Khaldoun Al Agha et Laurent Viennot [47]. Un modèle de propagation a été validé grâce à de nombreuses mesures expérimentales dans différents environnements. Ce modèle permet par exemple de trouver une densité maximale d'émetteurs qui soit acceptable (c'est à dire produisant peu d'interbrouillages).

6.5 Réserve de bande passante dans les réseaux radio ad-hoc

Participants : Khaldoun Al Agha, Saadi Boudjit, Isabelle Guérin, Karel Bertet [L3i, Université de La Rochelle], Laurent Viennot.

Les résultats décrits précédemment permettent de définir un schéma de réserve de bande passante dans les réseaux radio: un nœud peut réserver une certaine bande passante si la somme des réservations sur une zone de rayon D autour de lui ne dépasse pas la bande passante maximale. Le stage de DEA de Saadi Boudjit sous la direction de Laurent Viennot a consisté à valider ce schéma quand les nœuds accèdent au médium par un protocole de type CSMA. Les simulations faites permettent de déterminer le plus petit rayon D acceptable et le seuil de CSMA qui convient.

Un simulateur de réseau radio local pour tester ce schéma de réserve de bande passante a été développé par Saadi Boudjit (stagiaire de DEA) et Khaldoun Al Agha (post-doctorant) sous la coordination de Laurent Viennot. Le simulateur inclut une modélisation de la propagation radio, un gestionnaire de réserve de bande passante, et simule l'émission des paquets des trafics réservés, de façon à vérifier la cohérence du schéma de réserve de bande passante utilisé. Le tout représente environ 3000 lignes de C sous Linux.

Isabelle Guérin-Lassous, Karel Bertet et Laurent Viennot ont d'autre part étudié le problème de l'optimisation de l'acceptation d'un maximum de requêtes de réserve de bande passante tout en

respectant cette contrainte [29]. Diverses variantes du problème se révèlent *NP*-complètes. Des heuristiques sont proposées pour certaines variantes.

6.6 Détection et codage de mouvement dans une séquence d'images

Participant : Georges Gyory.

En 2000, Georges Gyory a continué à améliorer la méthode de compression par ondelettes. Pour le codage des mouvements, il a modifié la méthode SPIHT (A New Fast and Efficient Image Codec Based on Set Partitioning in Hierarchical Trees, Amir Said and W.E. Pearlman, IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology, vol. 6, June 1996) afin de coder une image de mouvement incomplète décrivant le mouvement des parties contrastées de l'image seulement. L'écriture du rapport de recherche est en cours.

6.7 Analyse des sur-coût de trafic des protocoles de routage pour les réseaux radio ad-hoc

Participants : Philippe Jacquet, Laurent Viennot.

Le routage dans les réseaux ad-hoc n'est pas encore abouti. Les protocoles proposés au groupe de travail MANet de l'IETF se distinguent en deux classes par le principe de base utilisé pour construire des routes. D'une part les protocoles réactifs construisent des routes au moyen d'inondation depuis la source. D'autre part, les protocoles pro-actifs maintiennent une représentation de la topologie du réseau via l'émission régulière de paquets de contrôle.

Philippe Jacquet et Laurent Viennot ont proposé la première étude comparant les sur-coûts de trafic obtenus avec ces deux méthodes de construction des routes [55]. Deux types de sur-coûts ont été identifiés. Tout d'abord, les routes obtenues par inondation ne sont pas toujours optimales. Contrairement aux protocoles pro-actifs qui produisent des routes de plus courts chemins, les protocoles réactifs présentent donc un sur-coût proportionnel au trafic de données. Une étude analytique dans le cas unidimensionnel dense et des simulations dans diverses situations sont proposées.

D'autre part, un modèle probabiliste simple est proposé pour étudier le sur-coût dû aux paquets de contrôle. Ce modèle permet de confirmer de manière rationnelle l'idée selon laquelle les protocoles pro-actifs produisent moins de trafic de contrôle quand le nombre de routes actives augmente et plus de trafic quand la mobilité des nœuds augmente. Ce modèle s'avère cohérent avec des résultats de simulations trouvés dans la littérature.

6.8 Mise en œuvre du protocole IPv6 au-dessus d'une infrastructure ATM

Mots clés : mise en oeuvre, IPv6, ATM, LAN, SVC, Unix, BSD, découverte des voisins, NBMA, signalisation ATM, MARS, unicast, multicast.

Participant : Mohsen Souissi.

Dans sa thèse [19], Mohsen Souissi traite de la mise en œuvre du protocole IPv6 au-dessus d'une infrastructure ATM. IPv6 est la nouvelle version du protocole Internet, conçue pour

améliorer et succéder à IPv4. L'infrastructure Ethernet est généralement privilégiée dans les réseaux locaux (LAN) pour le déploiement d'IPv6 en raison de sa maturité et surtout de son support de la diffusion naturelle. Cette dernière propriété, très utile pour IPv6 et ses protocoles associés tels que la découverte des voisins, n'est pas supportée par les infrastructures NBMA (Non Broadcast Multiple Access) dont l'ATM est un cas particulier. Ainsi, le transport d'IPv6 au-dessus d'ATM nécessite un système tel que MARS (Multicast Address Resolution Server, standard IETF), capable d'émuler le service multicast.

Cette thèse consiste à étudier en premier lieu la solution IPv6 au-dessus d'ATM proposée par l'IETF. Elle se propose ensuite de mettre en œuvre cette solution et de l'expérimenter dans un environnement LAN SVC, sur une plate-forme Unix FreeBSD/NetBSD exécutant la souche IPv6 de l'INRIA.

Dans un premier temps, le logiciel de signalisation linux-atm de l'EPFL a été modifié et porté, puis les fonctionnalités point-à-multipoint y ont été ajoutées. Une API et un client de signalisation générique ont été développés et ont servi comme base pour l'implémentation d'un système MARS complet (serveur, client et MCS, instances du client de signalisation). Le système MARS a été testé puis étendu pour prendre en compte les messages de découverte des voisins.

L'ensemble de ces composants forme une distribution logicielle, `bsd-ipv6-atm`, disponible sous FTP anonyme de l'INRIA. Le transport d'IPv6 a été expérimenté en unicast et en multicast et des mesures de performances ont été effectuées sur la plate-forme. Les résultats montrent que le système offre globalement et avec une certaine stabilité, des débits relativement élevés et des temps de réponse plutôt courts.

6.9 Analyse et évaluation de protocoles d'accès au canal et de protocoles de routage dans les réseaux locaux sans fil

Mots clés : réseaux mobiles sans fil, simulation de réseaux mobiles sans fil, accès multiple, signalement actif, routage dynamique, routage proactif, relais multipoint.

Participant : Amir Qayyum.

Dans sa thèse [18], Amir Qayyum s'intéresse à deux problèmes majeurs dans le domaine des réseaux mobiles sans fil :

- l'accès multiple au canal,
- le routage dynamique.

Le choix d'un protocole d'accès multiple, qui permet à des utilisateurs géographiquement répartis et mobiles de partager un canal commun, est très important pour une utilisation efficace et équitable de la bande passante disponible. La thèse présente différents mécanismes d'accès multiple et analyse ensuite plus finement CSMA (Carrier Sense Multiple Access). Elle décrit la technique de signalement actif qui est une amélioration de CSMA. Elle compare les performances de CSMA avec et sans signalement actif, en ayant recours à des simulations.

La deuxième partie de la thèse traite des protocoles de routage pour des réseaux mobiles sans fil. Elle présente le mécanisme d'inondation de message dans un réseau, afin d'établir une

base de comparaison pour les protocoles de routage étudiés. Elle montre comment les relais Multipoint offrent une alternative plus efficace à l'inondation de message. C'est pourquoi les relais multipoint sont utilisés dans le protocole de routage proactif, appelé OLSR (Optimized Link State Routing). Les principes de ce protocole sont détaillés. Des résultats de simulations montrent les performances d'OLSR dans des conditions de charge variées et avec différents scénarios de mobilité de réseau.

6.10 Garantie déterministe de la qualité de service dans les systèmes multimédia

Mots clés : système multimédia, vidéo à la demande, qualité de service, garantie déterministe, ordonnancement temps réel, contrôle d'admission.

Participants : Laurent George [université de Paris 12], Dana Marinca [ESI], Pascale Minet.

Nous étudions les conditions sous lesquelles des systèmes multimédia fournissant des services de vidéo à la demande (VoD), peuvent offrir à leurs clients une garantie déterministe de la qualité de service. Nous avons considéré les deux aspects suivants de la qualité de service :

- respect de la gigue maximum en réception chez le client.
- respect de l'échéance de remise au plus tard chez le client.

Le rôle du contrôle d'admission est de décider si un nouveau trafic peut être accepté sans remettre en cause les garanties déterministes accordées aux trafics déjà acceptés.

6.11 Contrôle d'admission basé sur les durées de séjour maximum

Dans [20], nous proposons un contrôle d'admission qui permet d'optimiser la durée de séjour maximum garantie dans chaque nœud visité afin d'accepter davantage de trafics sans compromettre les échéances de bout-en-bout des trafics déjà acceptés. Un trafic est composé de flux sporadiques point-à-point ou multipoint. Le choix de la durée de séjour maximum garantie à un flux par un nœud est un compromis :

- plus cette durée est petite, plus il est facile de respecter l'échéance de bout-en-bout du flux ;
- plus cette durée est grande, plus ce nœud peut accepter de nouveaux flux.

Nous montrons comment mettre en œuvre ce contrôle d'admission lorsque chaque nœud :

- annule la gigue en réception de tout message reçu : un message reçu n'est pas considéré par l'ordonnanceur avant sa date de réception au plus tard ;
- ordonnance les messages reçus selon l'ordonnancement NP-EDF (Non-Preemptive Earliest Deadline First).

Nous évaluons ensuite la complexité du contrôle d'admission d'un nouveau flux.

6.12 Ordonnancement temps réel dans un serveur de vidéo à la demande

Dans [33], nous nous intéressons plus particulièrement à l'architecture d'un serveur de vidéo à la demande ainsi qu'à l'ordonnancement temps réel des requêtes dans les modules de stockage et de transmission de ce serveur. Dans l'architecture proposée, les disques magnétiques sont organisés en groupes statiques. Un contenu vidéo est découpé en blocs et ces blocs sont stockés sur un groupe. Lors de la transmission du contenu vidéo à un client, tous les disques du groupe sont sollicités. Ceci permet d'améliorer les temps de réponse des commandes émises par le client (ex. : play, start), de réduire la taille des buffers chez le client, et d'accroître la flexibilité du système (ex. : coexistence de contenus vidéo codés à des débits différents). L'ordonnancement des requêtes dans un groupe est effectué par round. Le contrôle d'admission choisit le round dans lequel sera traitée la première requête associée à une nouvelle transmission d'un contenu vidéo ; ceci afin d'équilibrer la charge entre tous les disques du groupe. Nous montrons par une évaluation quantitative que cette solution permet d'accepter un plus grand nombre de clients.

6.13 Ordonnancement temps réel dans un serveur de vidéo à la demande utilisant des SSDs

Dans [34], nous étudions l'apport des SSDs (Solid State Disks) dans les systèmes multimédia. Les SSDs présentent deux avantages essentiels par rapport aux disques magnétiques : des temps d'accès beaucoup plus courts et constants.

Nous proposons une architecture de stockage dans laquelle les SSDs stockent le catalogue des contenus vidéo disponibles, ainsi qu'une petite partie des contenus vidéo en cours de visualisation par les clients. Nous définissons l'ordonnancement des requêtes d'accès à un module de stockage et établissons les conditions de faisabilité associées. Puis, nous montrons comment les SSDs permettent d'améliorer la qualité de service perçue par le client (ex. : temps de réponse plus courts), de réduire la taille des buffers chez le client et d'accepter un plus grand nombre de clients.

6.14 Protocole d'accès en arbre appliqué à UMTS

Participants : Khaldoun Al Agha, Philippe Jacquet, Nikita Vvedenskaya.

Dans l'article [28], nous étudions la possibilité d'appliquer le protocole en arbre pour améliorer la résolution de conflits sur l'accès aléatoire du système UMTS, lequel utilise le mécanisme « slotted aloha ». Ce dernier exclut toute forme de priorité entre les utilisateurs. Nous montrerons également la manière dont on peut introduire la priorité au premier niveau de l'accès aléatoire à travers le protocole en arbre.

Le rapport de recherche [46] reprend le travail de l'article précédent. Il expose ainsi une étude analytique plus poussée pour la validation du protocole proposé.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 BRAIN

Participants : Cédric Adjih, Khaldoun Al Agha, François Dumontet, Georges Gyory, Philippe Jacquet, Laurent Viennot.

Les contractants du projet européen BRAIN sont Agora Systems, British Telecom, Ericsson, France Télécom R&D, Inria, Kings College, Nokia, NTT DoCoMo, Sony et T-Nova.

Ce projet s'intéresse à la conception d'une architecture permettant d'offrir un accès internet à haut débit sur des zones métropolitaines. Si on peut voir le projet comme une sorte de GSM ambitieux, il s'agit d'un point de vue réseau d'intégrer à la fois deux fleurons récents de la technologie internet que sont la qualité de service et la mobilité. La tâche est d'autant plus délicate que les deux ne se marient pas aisément.

7.1.1 Solutions Manet pour la micromobilité

Le réseau BRAIN s'articule autour d'une infrastructure à deux niveaux comme en GSM. Des stations de bases offrent un accès radio aux utilisateurs se trouvant dans leurs cellules. Les stations de bases sont regroupées en domaines qui sont reliés par un backbone.

La mobilité d'un domaine à un autre sera gérée par Mobile IP (standard de l'IETF). Par contre, la mobilité à l'intérieur d'un domaine (ou micromobilité) doit être gérée de manière plus réactive.

Philippe Jacquet et Laurent Viennot apportent l'expertise de l'INRIA en matière de réseaux ad-hoc pour étudier des solutions de gestion de la micromobilité inspirées des protocoles de routage proposés au groupe MANet de l'IETF. Dans BRAIN, la différence vient du fait que les stations de base sont fixes et reliées entre elles par un réseau filaire haut débit. Cependant, rien n'interdit d'utiliser les protocoles de MANet conçus pour un réseau où tous les nœuds sont mobiles. Il faut cependant adapter les protocoles pour tenir compte de l'hétérogénéité entre les liaisons filaires et les liaisons radio.

7.1.2 Architecture de qualité de service dans les réseaux mobiles

François Dumontet a participé à la définition de l'architecture BRENTA supportant la mobilité et la qualité de service. Il est éditeur du chapitre décrivant les composants logiciels en charge de la qualité de service dans un environnement mobile. Plus précisément, il s'agit de spécifier ces composants et de définir leurs interfaces. Il a aussi contribué au chapitre traitant de la taxinomie des violations de qualité de service et des méthodes pour y remédier.

7.1.3 Etude des caractéristiques statistiques des flux MPEG

Dans le cadre du projet BRAIN, Georges Gyory et Philippe Jacquet ont écrit une étude [51] sur les caractéristiques statistiques des flux MPEG (transmettant des séquences vidéo). Plus particulièrement, ils décrivent les streams élémentaires audio et vidéo et leur interaction sur un réseau TCP/IP, ainsi que les outils théoriques pour étudier leurs statistiques de bande passante en moyenne et en distribution. Des résultats numériques sont fournis.

7.2 CATSERVER

HIPERCOM pilote au niveau INRIA le projet R&D IT CATSERVER dont le maître d'œuvre industriel est Dassault Automatismes. Les autres participants de ce projet sont la Lyonnaise Communication, Brutélé (Belgique), Barco (Belgique), Topnet (Luxembourg), Intrasoft (Luxembourg) et l'Université de Thessalonique (Grèce). Le but du projet est de réaliser un serveur multimédia raccordé à l'Internet par le câble. Les zones d'interventions particulières de l'INRIA sont :

1. le maintien et la gestion de la qualité de service ;
2. l'étude d'algorithmes de compression asymétriques permettant une décompression facile sans carte de compression spécifique.

Le maintien et la gestion de la qualité de service En ce qui concerne le maintien et la gestion de la qualité de service, c'est l'approche DiffServ qui a été choisie. La réalisation passe par un système d'allocation de bande passante centralisé, *le QoS Proxy*, et un contrôle local de l'accès des paquets au réseau, *le QoS Controller*. *Le QoS Proxy* est développé par l'Université de Thessalonique, l'INRIA a la charge du *QoS Controller*.

Ce logiciel est installé sur les PC qui ont une activité de serveur. Il assure (i) la négociation (réservation de bande passante) avec le *Proxy*, (ii) le maintien au niveau local de flots compatibles avec les réservations effectuées, et (iii) la coloration des paquets, en fonction des instructions du *QoS Proxy*.

La négociation s'effectue au travers d'un protocole spécifique développé en collaboration avec l'Université de Thessalonique, il permet au *Controller* de demander des réservations avec différents niveaux de bande passante. Des modifications du choix du niveau peuvent être effectuées à tout moment à la demande du *Controller* ou à l'initiative du *Proxy*. Le contrôle des débits est réalisé au moyen de la Stack fournie par Dassault, cette dernière est contrôlée par *l'Agency* (développé par Dassault) et supervisée par le *Controller*. La Stack colore aussi chacun des flots en fonction des indications fournies par le *Controller* (en fonction des ordres du *proxy*), afin de permettre un traitement différencié des paquets au niveau des routeurs du réseau.

En 2000, Cédric Adjih et François Dumontet ont assuré l'intégration, les tests et corrections d'erreur.

Etude d'algorithmes de compression En 2000, Cédric Adjih a intégré la gestion de la qualité de service à l'algorithme de compression. Georges Gyory a continué à améliorer la méthode de compression par ondelettes (cf. paragraphe 6.6).

Le projet CATSERVER s'est terminé en mars 2000. Il a été présenté à la commission européenne et a reçu les félicitations de ses rapporteurs.

7.3 AEE

Mots clés : analyse déterministe pire cas, ordonnancement temps réel, tolérance aux fautes, système embarqué, architecture opérationnelle, électronique embarquée, transport de

personnes.

Participants : Soumaya Kamoun, Pascale Minet.

Le projet AEE, Architecture Electronique Embarquée [1998-2001], financé par le Ministère de l'Industrie, regroupe des constructeurs (PSA, RENAULT, AEROSPATIALE MATRA Lanceurs), des équipementiers (SAGEM, SIEMENS, VALEO) et des équipes de recherche (IRCyN, Ecole Centrale de Nantes, LORIA, INRIA).

Notre contribution concerne essentiellement la validation des propriétés d'une architecture opérationnelle selon une approche déterministe. Plus particulièrement, il s'agit de déterminer si les contraintes temporelles des tâches (i.e. échéances de terminaison) sont respectées dans tous les scénarios conformes aux hypothèses adoptées (ex. délai minimum inter-arrivée des tâches, nombre maximum d'arrêts de processeur,...). Pour plus de détails sur le projet AEE, se référer à <http://aee.inria.fr>.

7.4 IPANEMA

Participants : Marc Badel, Belkacem Bensadallah, Philippe Jacquet, Olivier Lecomte, Paul Mühlethaler, Adokoé Plakoo, Laurent Viennot.

Le but de projet Euclid IPANEMA (IPv6 protocols Applied to Networks in Military Applications) est de démontrer l'utilisation de la technologie IPv6 et HiPERLAN type 1 pour les applications militaires. Ce projet a été mené en collaboration avec Matra SI, DATAMAT un industriel italien de l'armement et Telebit (Danemark). L'INRIA est intervenu dans ce projet au niveau des couches 2 et 3 pour l'architecture HiPERLAN et pour la pile IPv6 des terminaux. Les autres partenaires ont pris en charge les routeurs IPv6, les médias de communication et les logiciels applicatifs.

Le projet s'est achevé avec succès en Avril 2000 par une démonstration de la plateforme expérimentale devant les spécialistes techniques des ministères de la défense des pays à l'initiative du projet.

Parmi les points particuliers mis en évidence par cette démonstration nous avons :

- l'utilisation de différents médias de communication : liaison dédiée, satellite, Ethernet, UHF. Le tout a permis de bâtir une architecture routée complexe;
- l'utilisation de diverses technologies et politiques de routage IPv6 (OSPFng, RIPng, routage inter domaine, routage intra-domaine...);
- la mise en œuvre de différentes politiques de qualité de service IPv6;
- l'utilisation de techniques de compression d'entête;
- l'utilisation d'un réseau sans fil de type HiPERLAN type 1 comme réseau local dans un contexte militaire...;

Durant cette dernière année du projet, les tâches menées par l'INRIA ont été :

- développement, mise au point et test de l'architecture HiPERLAN type 1;

- mise à jour de la pile IPv6 (mise à jour du support de la mobilité IPv6), mise à jour du système d'ordonancement avancé (ALTQ), support de la mobilité IPv6 dans l'outil IKE (Internet Key Exchange), support complet de la mobilité IPv6 avec IPsec);
- participation au déploiement et aux tests de la plateforme.

Le travail mené pour ce projet a été jugé par les autorités militaires de très bonne qualité.

7.5 I3

Participants : Khaldoun Al Agha, Mounir Benzaid, Philippe Jacquet, Pascale Minet.

I3 est une action coopérative INRIA. I3 a pour partenaires: LIP6, ENST, Hipercom et Planet. Le travail dans I3 consiste à offrir une qualité de service pour un client de réseau Internet. Pour gérer cette qualité, nous proposons d'utiliser le concept de VPN (Virtual Private Network). En effet, un serveur de politique de qualité de service doit assurer la réservation de ressources entre une source et une destination pour le flux de données. Cependant, le serveur de politique rencontre des difficultés liées à la mobilité des utilisateurs et en particulier la micro-mobilité (d'une antenne relais vers une autre). C'est pourquoi, un protocole de gestion de la qualité de service transparent par rapport au serveur de politique est nécessaire. Hipercom travaille sur cette gestion locale. Pour ce faire, nous proposons des solutions fondées sur les techniques de routage ad-hoc pour offrir une meilleure mobilité pour l'utilisateur.

7.6 PRIMA

Participants : Marc Badel, Belkacem Bensadallah, Philippe Jacquet, Anis Laouti, Olivier Lecomte, Paul Mühlethaler, Abdellah Najid, Adokoé Plakoo, Laurent Viennot.

Le projet PRIMA est un projet RNRT dédié à l'étude des réseaux radio mobiles ad-hoc. Ce projet qui a débuté en avril 2000 est en collaboration avec :

- COMATIS une PME spécialisé dans le domaine de la radio industrielle,
- le HCR (Haut Comité pour les Réfugiés),
- Eurocontrol, un organisme Européen qui s'occupe de l'organisation du transport aérien,
- MATRA SI.

De façon schématique, les tâches dans ce projet se répartissent comme suit :

- COMATIS doit fournir les modems radio ainsi que la couche d'accès MAC,
- le HCR et Eurocontrol fournissent des scenarii d'applications concrètes,
- l'INRIA sera responsable de la partie routage,
- Matra, qui est le leader du projet, sera responsable de la partie transport et des adaptations aux protocoles IP nouvelle génération.

Le projet aura une durée de 27 mois. Durant les premiers mois, les tâches menées à l'INRIA concernant ce projet ont été :

- participation à la spécification de la couche d'accès MAC,
- début de l'étude des algorithmes de routage MAC,
- mise en place d'un modèle pour la simulation de système de routage,
- début d'implémentation du protocole de routage,
- travail d'amélioration et de promotion du protocole de routage OLSR au sein du groupe MANet de l'IETF.

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Déploiement du réseau sans fil à l'INRIA

Participants : Marc Badel, Belkacem Bensadallah, Olivier Lecomte, Paul Mühlethaler.

Grâce à l'aide du conseil régional, l'INRIA a entrepris de déployer un réseau radio sans fil sur le campus de l'INRIA Rocquencourt.

Ce réseau s'appuie sur des modems de type IEEE 802.11 mais offre une architecture de type HiPERLAN type 1 qui a été développée par le projet HiPERCOM. Chaque bâtiment va disposer de deux nœuds d'accès au réseau sans fil. Par ailleurs du point de vue IP, le réseau sans fil portera un numéro de réseau distinct du réseau local de l'INRIA. Cette caractéristique du déploiement permettra ainsi de cloisonner les différents réseaux et d'éviter la pollution du réseau sans fil par du trafic en diffusion sur le réseau local.

Ce réseau radio aura d'abord un usage opérationnel pour les personnels ou visiteurs du site de l'INRIA Rocquencourt. Ce réseau devra permettre l'accès à partir d'un portable à l'Internet ou à des machines de l'INRIA. Les cas d'utilisation visés sont par exemple :

- travail avec un portable pour le personnel INRIA,
- accès à l'Internet pour des visiteurs à la bibliothèque ou dans une salle de conférence,
- accès à des informations pour du personnel de maintenance INRIA.

Ce réseau radio aura ensuite un usage de recherche notamment pour le projet HiPERCOM. De nombreuses évaluations sont prévues sur ce réseau; une attention particulière sera portée sur les performances d'architecture multi-saut.

8.2 Action COMPAS

Compas est une action de recherche en coopération en collaboration avec le Liafa (Université Paris 7) et le Loria (Projet Résédas). Les informations suivantes sont extraites des pages web de l'action (adresse : <http://hipercom.inria.fr/compas>). Hipercom a un rôle moteur dans

cette action et a fourni l'expertise de base sur les réseaux radio locaux qui a permis d'intéresser de nombreuses personnes aux problèmes rencontrés dans ce type de réseaux.

Les personnes participant à l'action sont :

- Philippe Jacquet (Hipercom),
- Anis Laouiti (Hipercom),
- Paul Mühlethaler (Hipercom),
- Laurent Viennot (Hipercom),
- Saadi Boudjit (Hipercom, ancien stagiaire de DEA),
- Isabelle Guérin (ReMap, ancienne post-doctorant à Hipercom),
- Khaldoun Al Agha (Lri, ancien post-doctorant à Hipercom),
- Marc Espie (Liafa),
- Michel Morvan (Liafa),
- Johanne Cohen (Résédas),
- Eric Fleury (Résédas),
- Jens Gustedt (Résédas),
- Karell Bertet (L3i, Université de La Rochelle),
- Michael Krajecki (Leri, Université de Reims).

Le but premier de l'action était d'étudier le multicast et la qualité de service dans les réseaux radio locaux. Ce programme ambitieux a été partiellement défriché. La qualité de service a été étudiée sous l'angle plus restreint de la réservation de bande passante et a tout d'abord nécessité une étude préliminaire sur la réutilisation spatiale.

L'étude d'un protocole de multicast optimisé a conduit à concevoir un nouveau protocole de routage unicast.

Modélisation de la réutilisation spatiale dans les réseaux radio

Ce travail a déjà été évoqué dans le paragraphe 6.4.

Réservation de bande passante

Ce travail a déjà été évoqué dans le paragraphe 6.5.

JUMBO Jointed Unicast, Multicast, Broadcast Organization

JUMBO [30] est une proposition de protocole de routage en réseau sans fil ad hoc motivée par la prise en compte du partage du médium. Pour cela, la topologie du réseau est représentée comme une union de cliques. Le protocole ne couvre pour l'instant que le routage unicast, le multicast est en cours d'étude. Ce travail a principalement été mené par l'équipe Résédas au LORIA.

9 Diffusion de résultats

9.1 Enseignement universitaire

Soumaya Kamoun est intervenue au CNAM dans le module « Architecture des machines et systèmes informatiques ».

Pascale Minet a donné des cours à l'INSTN (Saclay), sur les réseaux et la qualité de service dans le cadre du DEA Systèmes Électroniques et Traitement de l'Information.

Amir Qayyum est intervenu à l'INT Evry sur le routage : « Routing in data networks ».

Laurent Viennot enseigne à l'École Polytechnique en tant que Chef de Travaux Pratiques à temps partiel.

9.2 Autres enseignements

Isabelle Guérin Lassous a été invitée à effectuer un cours intitulé « GPRS (General Packet Radio Services) » en cinquième année de la Formation d'Ingénieur en Informatique de la Faculté d'Orsay (FIIFO).

Khaldoun Al Agha, Philippe Jacquet et Paul Mühlethaler ont animé un séminaire Orsys sur le thème des réseaux mobiles.

Philippe Jacquet a présenté un tutoriel sur les réseaux mobiles *ad hoc* à la conférence Networking' 2000.

9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

Isabelle Guérin Lassous a donné des séminaires sur « les Modèles Parallèles à Gros Grain et leurs Applications sur les Graphes » à l'INRIA Rocquencourt, au LIP à Lyon, au LARIA à Amiens et au laboratoire ID à Grenoble. Elle a été invitée à présenter « les Réseaux Ad Hoc » lors d'une journée de recherche en télécommunications au laboratoire CITI de l'INSA de Lyon.

Soumaya Kamoun a présenté ses travaux « Conditions de faisabilité pour systèmes distribués temps réel avec contraintes de cohérence » lors de la journée d'ordonnancement organisée au LIRMM (Montpellier) par J. C. König le 7 mars.

Cédric Adjih a présenté une conférence sur le contrôle d'admission pendant la session consacrée au projet BRAIN de la conférence PIMRC' 2000 qui s'est déroulée à Londres au mois de septembre.

Pascale Minet a été membre du comité de programme de :

- CFIP'2000 (Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles), qui s'est déroulé du 17 au 20 octobre à Toulouse ;

- NOTERE'2000 (NOuvelles TEchniques pour la REpartition), qui s'est déroulé du 21 au 24 novembre à Paris.

Amir Qayyum a présenté le protocole de routage OLSR dans le groupe MANet de l'IETF. En mars 2000 à Adélaïde (Australie), il a détaillé les principes de fonctionnement de OLSR et les améliorations apportées au draft initial. En août, à Pittsburgh (USA), Amir Qayyum et Thomas Heide Clausen ont fait le point sur l'état d'avancement des travaux en cours sur la simulation et l'implémentation de OLSR.

Mohsen Souissi a donné un séminaire intitulé « IPv6 au-dessus d'ATM », à l'INT (Evry) le 19 octobre 2000.

Philippe Jacquet a présenté une conférence invitée sur les réseaux mobiles au séminaire Algotel 2000 en mai, à la Rochelle. Philippe Jacquet a participé au séminaire ISIT 2000 sur la théorie de l'information à Sorrento (Italie) en juin, et au séminaire d'analyse d'algorithmes à Krinica Morska (Pologne), en juillet. Il a participé au colloque sur les Mathématiques et l'Informatique en septembre. Il a participé au colloque Franco-Chinois organisé conjointement par les académies des sciences de France et de Chine, à Beijing, en octobre. Il a aussi donné une conférence à DNAC'2000, en novembre.

10 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] S. CORSON, S. PAPADEMETRIOU, V. PARK, A. QAYYUM, « Internet MANET Encapsulation Protocol, Internet draft », *rapport de recherche*, IETF, August 1998, draft-ietf-manet-imep-spec-01.txt.
- [2] G. GYORY, « Animated image compression in CATSERVER: preliminary description », *rapport de recherche n° RR-3457*, INRIA, 1998, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3457.html>.
- [3] P. JACQUET, V. JOLY, « Retro-information in Wheeler-Feynman universe model: application over an hypothetical concept in quantum mechanics », *rapport de recherche n° RR-3530*, INRIA, 1998, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3530.html>.
- [4] P. JACQUET, P. MINET, P. MÜHLETHALER, N. RIVIERRE, « Data transfer for HIPERLAN », *Wireless Personal Communications 1*, 4, January 1997, special issue on the High Performance Radio Local Area Network (HIPERLAN).
- [5] P. JACQUET, P. MINET, P. MÜHLETHALER, N. RIVIERRE, « Increasing reliability in cable-free radio LANs - low level forwarding in HIPERLAN », *Wireless Personal Communications 1*, 4, January 1997, special issue on the High Performance Radio Local Area Network (HIPERLAN).
- [6] P. JACQUET, P. MINET, P. MÜHLETHALER, N. RIVIERRE, « Priority and collision detection with active signaling - the channel access mechanism of HIPERLAN », *Wireless Personal Communications 1*, 4, January 1997, special issue on the High Performance Radio Local Area Network (HIPERLAN).
- [7] P. JACQUET, P. MÜHLETHALER, A. QAYYUM, « Optimized Link State Routing Protocol », *rapport de recherche*, IETF, août 1998, draft-ietf-manet-olsr-00.txt.

- [8] P. JACQUET, W. SZPANKOWSKI, «Analytical depoissonization and its applications», *Fundamental Study 201*, 1–2, 1998.
- [9] P. JACQUET, W. SZPANKOWSKI, «Entropy calculation via analytic depoissonization», *IEEE Transaction on Information Theory* 45, 4, May 1999.
- [10] P. JACQUET, *Elements de théorie analytique de l'information, modélisation et évaluation de performances*, thèse de doctorat, Université de Versailles Saint-Quentin, juillet 1998, mémoire d'habilitation.
- [11] P. JACQUET, «Left pattern matching predictor is optimal over Bernoulli source models», *rapport de recherche n° RR-3571*, INRIA, 1998, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3571.html>.
- [12] P. JACQUET, «Long term dependences and heavy tails in traffics and queues generated by memoriless on/off sources in series», *rapport de recherche n° RR-3516*, INRIA, 1998, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3516.html>.
- [13] P. MINET, *Temps réel, tolérance aux fautes et cohérence dans les systèmes distribués*, thèse de doctorat, Université de Versailles Saint-Quentin, septembre 1998, mémoire d'habilitation.
- [14] P. MUHLETHALER, *Contribution à la conception et à l'analyse d'algorithmes pour l'accès multiple et l'ordonnancement sous contraintes temporelles*, thèse de doctorat, Université de Versailles Saint-Quentin, juillet 1998, mémoire d'habilitation.
- [15] RES-10, «Radio Equipment and Systems (RES); HIgh PERFORMANCE Radio Local Area Network (HIPERLAN); Functional specification», *rapport de recherche*, ETSI, June 1996.
- [16] L. VIENNOT, «Complexity Results on Election of Multipoint Relays in Wireless Networks», *rapport de recherche n° RR-3584*, INRIA Rocquencourt, 1998, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3584.html>.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [17] S. KAMOUN, *Ordonnancement distribué temps réel sérialisable de tâches : étude de faisabilité*, thèse de doctorat, Université de Versailles-Saint Quentin, Décembre 2000.
- [18] A. QAYYUM, *Analysis and evaluation of channel access schemes and routing protocols in wireless LANs*, thèse de doctorat, Université de Paris Sud, November 2000.
- [19] M. SOUISSI, *Mise en oeuvre du protocole IPv6 au-dessus d'une infrastructure ATM*, thèse de doctorat, Université de Versailles-Saint Quentin, Juin 2000.

Articles et chapitres de livre

- [20] G. GEORGE, D. MARINCA, P. MINET, «A solution for a deterministic QoS in multimedia systems», *International journal of computer and information science* 1, 3, Summer 2000, p. 106–118, ISSN 1525-9293.
- [21] M. HABIB, C. PAUL, L. VIENNOT, «Partition refinement techniques: an interesting algorithmic tool kit», *International Journal of Foundations of Computer Science* 175, 2000, To appear.
- [22] P. JACQUET, P. MÜHLETHALER, «Simulations of High Performance Radio LAN type 1 with ATM traffics», *Wireless Personal Communications* 12, 2, 2000, p. 137–148.

- [23] P. JACQUET, W. SZPANKOWSKI, I. APOSTOL, *A universal predictor based on pattern matching, preliminary results*, Birkhauser, 2000, ch. 7, p. 75–85.
- [24] P. JACQUET, W. SZPANKOWSKI, J. TANG, «Average profile of the Lempel-Ziv parsing scheme for a Markovian Source», *Algorithmica*, 2001, "to appear".
- [25] P. JACQUET, *Traffic and queueing from an unbounded set of independent memoryless on/off sources*, Wiley, 2000, ch. 11, p. 269–283.
- [26] H. MAHMOUD, P. FLAJOLET, P. JACQUET, M. RÉGNIER, «Analytic variations on bucket selection and sorting», *Acta Informatica*, 36, 2000, p. 735–760.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [27] C. ADJIH, K. A. AGHA, P. JACQUET, A. LÓPEZ, L. VIENNOT, «Quality of service aspect for BRAIN architecture», *in: 11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'2000)*, August 2000. Session 4.1.
- [28] K. A. AGHA, P. JACQUET, N. VVEDENSKAYA, «W-CDMA random access with priority resolution», *in: IEEE WCNC 2000: Wireless Communications and Networking Conference*, IEEE PRESS, Chicago, USA, 2000.
- [29] K. BERTET, I. GUÉRIN LASSOUS, L. VIENNOT, «Un premier pas vers la réservation de bande passante dans les réseaux radio», *in: AlgoTel 2000: 2èmes rencontres francophones sur les aspects algorithmiques des télécommunications*, E. Fleury (éditeur), INRIA, May 2000. ISBN 2-7261-1157-2.
- [30] J. COHEN, E. FLEURY, J. GUSTEDT, «JUMBO: protocoles de routage unicast dans les réseaux ad-hoc sans fils», *in: AlgoTel 2000: 2èmes rencontres francophones sur les aspects algorithmiques des télécommunications*, E. Fleury (éditeur), INRIA, May 2000. ISBN 2-7261-1157-2.
- [31] A. GEBREMEDHIN, I. J. G. GUÉRIN LASSOUS, J. TELLE, «Graph Coloring for a Coarse Grained Multiprocessor», *in: Proceedings of Workshop on Graph-Theoretical Concepts (WG 2000)*, U. Brandes, D. Wagner (éditeurs), LNCS, 1928, Springer Verlag, p. 184–195, 2000.
- [32] L. GEORGE, D. MARINCA, P. MINET, «An admission control for a deterministic QoS in multimedia systems», *in: int. conf. on Software Engineering Applied to Networking and Parallel/Distributed Computing, SNPD'00*, Reims, France, May 2000. organized with ACM SIGOPS.
- [33] L. GEORGE, D. MARINCA, P. MINET, «A scalable VoD server», *in: 8th int. conf. on Software, Telecommunications and Computer Networks SoftCOM'2000*, Split, Croatia, October 2000. sponsored by IEEE Communications Society.
- [34] L. GEORGE, D. MARINCA, P. MINET, «A scalable VoD server», *in: Protocols for Multimedia Systems, PROMS'2000*, Cracow, Poland, October 2000. sponsored by IEEE.
- [35] I. GUÉRIN LASSOUS, J. GUSTEDT, M. MORVAN, «Graphs According a Coarse Grained Approach: Experiments with PVM and MPI», *in: Proceedings of European PVM/MPI Users' Group Meeting (EuroPVM/MPI 2000)*, J. D. P. K. N. Podhorszki (éditeur), LNCS, 1908, Springer Verlag, p. 72–79, 2000.
- [36] I. GUÉRIN LASSOUS, J. GUSTEDT, «Portable List Ranking: an Experimental Study», *in: Proceedings of Workshop on Algorithm Engineering (WAE 2000)*, LNCS, Springer Verlag, 2000. To appear.

- [37] I. GUÉRIN LASSOUS, E. THIERRY, «Generating Random Permutations in the Parallel Coarse Grained Models Framework», *in: Proceedings of the International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS 2000)*, 2000. To appear.
- [38] P. JACQUET, V. JOLY, «Capacity of retro-information channels», *in: 2000 IEEE International Symposium on Information Theory*, p. 182, Sorrento, Italie, June 2000.
- [39] P. JACQUET, «Information theory and mobile telecommunication», *in: Colloque Franco-Chinois "sciences des réseaux"*, Beijing, octobre 2000.
- [40] P. JACQUET, «Is the internet fractal?», *in: Seminar on the Analysis of Algorithms*, Krynica Morska (Pologne), juillet 2000.
- [41] P. JACQUET, «les réseaux mobiles *ad hoc*», *in: Algotel 2000: 2èmes rencontres francophones sur les aspect algorithmiques des télécommunications*, E. Fleury (éditeur), INRIA, mai 2000.
- [42] P. JACQUET, «MANET et la nouvelle génération de réseaux mobiles IP», *in: DNAC 2000*, novembre 2000.
- [43] S. KAMOUN, P. MINET, «Feasibility conditions of distributed tasks with consistency and hard real-time constraints», *in: int. conf. on Software Engineering Applied to Networking and Parallel/Distributed Computing, SNPD'00*, Reims, France, May 2000. organized with ACM SIGOPS.
- [44] S. KAMOUN, P. MINET, «Real-time scheduling of distributed tasks with graph structure and persistent objects», *in: 5th AAA workshop on Algorithm Architecture Adequation*, Rocquencourt, France, January 2000.
- [45] S. KAMOUN, P. MINET, «Serializable FCFS scheduling of distributed tasks with graph structure», *in: int. conf. on Artificial and Computational Intelligence for Decision, Control and Automation in Engineering and Industrial Applications, ACIDCA '2000*, Monastir, Tunisia, March 2000. sponsored by IEEE SMC.

Rapports de recherche et publications internes

- [46] K. A. AGHA, P. JACQUET, N. VVEDENSKAYA, «Analysis of a Priority stack Random Access Protocol in W-CDMA Systems», *rapport de recherche n° 3922*, INRIA, 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3922.html>.
- [47] K. A. AGHA, L. VIENNOT, «Spatial reuse in wireless LAN networks», *rapport de recherche n° 3929*, INRIA, 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3929.html>.
- [48] K. BERTET, I. GUÉRIN LASSOUS, L. VIENNOT, «Un premier pas vers la réservation de bande passante dans les réseaux radio», *rapport de recherche n° 3895*, INRIA, Mars 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3895.html>.
- [49] L. GEORGE, P. MÜHLETHALER, N. RIVIERRE, «A few results on non preemptive real time scheduling», *rapport de recherche n° 3926*, INRIA, May 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3926.html>.
- [50] I. GUÉRIN LASSOUS, J. GUSTEDT, M. MORVAN, «Feasibility, Portability, Predictability and Efficiency: Four Ambitious Goals for the Design and Implementations of Parallel Coarse Grained Graph Algorithms», *rapport de recherche n° 3885*, INRIA, Février 2000.

- [51] G. GYORY, P. JACQUET, « MPEG stream statistics », *rapport de recherche n° IST1999-10050/INRIA/WP1/D1.2/01/a*, BRAIN European Project, September 2000.
- [52] P. JACQUET, V. JOLY, « Capacity of retro-information channels », *rapport de recherche n° 3836*, INRIA, 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3836.html>.
- [53] P. JACQUET, A. LAOUITI, « Analysis of mobile ad-hoc network routing protocols in random graph models », *rapport de recherche n° 3835*, INRIA, décembre 1999, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3835.html>.
- [54] P. JACQUET, Y. SUHOV, N. VVEDENSKAYA, « Dynamic Routing in the Mean-Field Approximation », *rapport de recherche*, INRIA Rocquencourt, October 1999, à paraître.
- [55] P. JACQUET, L. VIENNOT, « Overhead in Mobile Ad-hoc Network Protocols », *rapport de recherche n° 3965*, INRIA, 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3965.html>.
- [56] A. QAYYUM, L. VIENNOT, A. LAOUITI, « Multipoint relaying: an efficient technique for flooding in mobile wireless networks », *rapport de recherche n° 3898*, INRIA, March 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3898.html>.