

Projet HIPERCOM

Communication à hautes performances

Rocquencourt

THÈME 1B

R *apport*
d'Activité

1999

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
3	Fondements scientifiques	4
3.1	La théorie analytique de l'information	4
3.1.1	Calcul d'entropies, algorithmes de compression, dépoissonisation	5
3.1.2	Prédicteurs, rétro-information	5
3.1.3	Théorie des graphes, complexité	6
3.1.4	Analyse pire cas des algorithmes et Algèbre $(\max,+)$	6
3.2	Méthodologie de l'évaluation des algorithmes de télécommunications	7
3.2.1	Analyse déterministe des performances des algorithmes	8
3.2.2	Analyse probabiliste des performances des algorithmes	8
3.2.3	Simulation d'algorithmes de télécommunication	9
3.3	Algorithmes d'ordonnancement et d'attribution de priorités	9
3.4	Modélisation de trafics et d'architectures de réseaux	10
3.4.1	Les trafics On/Off	11
3.4.2	Étude des files d'attente dans les nœuds de commutation	11
3.5	Conception et implémentation d'algorithmes	12
4	Domaines d'applications	13
4.1	Modems câble	13
4.2	Contrôle statistique des qualités de services	13
4.2.1	Contrôle d'admission dans les réseaux câblés	13
4.2.2	Multimédia et compression adaptative	14
4.3	Contrôle des qualités de service par algorithmes d'ordonnancement déterministes	14
4.3.1	Contrôle des qualités de services temps réel	14
4.3.2	Contrôle des qualités de services tolérants aux fautes	14
4.3.3	Contrôle des qualités de services dans les bases de données répliquées . .	15
4.4	HIPERLAN	15
4.5	Les réseaux sans fil ad-hoc	15
5	Logiciels	16
6	Résultats nouveaux	16
6.1	Reconnaissance en temps linéaire des graphes P4-indifférents	16
6.2	Conditions de faisabilité d'un ordonnancement temps réel sérialisable de tâches distribuées avec structure en graphe	17
6.3	Conditions de faisabilité d'un ordonnancement temps réel sérialisable de tâches répliquées	17
6.4	Maintien de la cohérence dans des bases de données répliquées gérées selon un mode asymétrique	18
6.5	Contrôle d'admission de trafics	18

6.6	Détection et codage de mouvement dans une séquence d'images	19
6.7	Qualité de service multimédia	19
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	20
7.1	CATSERVER	20
7.2	IPANEMA	21
7.3	ATR	21
7.4	AEE	22
7.5	SAMU	22
8	Actions régionales, nationales et internationales	23
8.1	Action COMMOBILE	23
8.2	Action COMPAS	23
8.3	Réseaux et groupes de travail internationaux	27
8.4	Relations bilatérales internationales	27
8.5	Accueil de chercheurs étrangers	27
9	Diffusion de résultats	27
9.1	Enseignement universitaire	27
9.2	Autres enseignements	27
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations	27
10	Bibliographie	28

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, (à partir du 1er novembre)]

Pascale Minet [CR, (à partir du 22 mars)]

Laurent Viennot [CR]

Chercheurs invités

Wojciech Szpankowski [Professeur à l'Université Purdue, Indiana, USA (du 19 juin au 26 juin)]

Nikita Vvedenskaya [Professeur à l'Académie Russe des Sciences, Institute of Information Transmission Problems (du 25 Octobre au 24 novembre)]

Chercheurs post-doctorants

Khaldoun Al Agha [à partir du 1er septembre]

Isabelle Guérin-Lassous [action coopérative à partir du 13 septembre]

Ingénieurs experts

Sofiane Abdou [jusqu'au 1er octobre]

Belkacem Bensadallah [à partir du 1er octobre]

François Dumontet

Georges Gyory

Olivier Lecomte [à partir du 17 juin]

Doctorants

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

Thomas Heide Clausen [Bourse de l'Université d'Aalborg (DK) (à partir du 22 mars)]

Soumaya Kamoun [Bourse Inria, Université de Versailles-Saint Quentin, (à partir du 22 mars)]

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, (à partir du 1er octobre, anciennement action de recherche IPv6)]

Stagiaires

Steven Martin [ESIEE, (du 3 mai au 15 septembre)]

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.

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 permettent 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 [21]. 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 [10]. 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, 33].

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 [15] 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 aussi tout aussi intéressant d'évaluer les algorithmes sous des événements *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, Steven Martin, 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 1999. 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) ou en cours de fonctionnement du système pour réaliser un contrôle d'admission. Pascale Minet, Soumaya Kamoun et Steven Martin ont ainsi étudié :

- les conditions de faisabilité nécessaires et suffisantes d'un ordonnancement sérialisable de tâches répliquées [26];
- les conditions de faisabilité nécessaires et suffisantes, ou seulement suffisantes, de tâches distribuées avec structure en graphe [28];
- le contrôle d'admission de trafics suivant un même arbre de diffusion [36].

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 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 [13, 9].

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'exemples de modélisation vraiment satisfaisants 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 [9].

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 [30]. 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.

3.3 Algorithmes d'ordonnement et d'attribution de priorités

Participants : Soumaya Kamoun, Steven Martin, Pascale Minet, Paul Mühlethaler.

Résumé : *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'ordonnement des messages. Dans un réseau, on rencontre deux types d'ordonnement des messages : un ordonnement local à chaque station et un ordonnement global entre les stations.*

Au niveau de l'ordonnement local un ordonnement 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'ordonnement de tâches périodiques. Un algorithme basé sur les échéances de classes a été étudié. Il permet de multiplexer sur une même station les services de classes différentes, les services d'une même classe étant ordonnancés FIFO. Les conditions nécessaires et suffisantes d'ordonnement de tâches sporadiques ont été établies.

L'ordonnement global est moins couvert et n'est vraiment exploré que depuis les débuts d'ATM et de l'Internet nouvelle génération. En général, l'ordonnement 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-Reflex pour la gestion des contraintes temps réel dans la norme HIPERLAN [14]. 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 [36]. 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 [12]. Le respect des échéances de terminaison de tâches sporadiques ayant une structure en graphe fait l'objet de travaux [28].

3.4 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.*

3.4.1 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 poissonnien uniforme, la décroissance est exponentielle.

On analyse [11] 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 commutation judicieusement choisis, le trafic résultant présente de 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 [22].

3.4.2 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 [35].

3.5 Conception et implémentation d'algorithmes

Participants : Sofiane Abdou, Cédric Adjih, François Dumontet, Georges Gyory, Philippe Jacquet, Soumaya Kamoun, Steven Martin, 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 Contrôle des qualités de service par algorithmes d'ordonnancement déterministes

4.3.1 Contrôle des qualités de services temps réel

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

- respect de la sérialisabilité des exécutions des tâches, (i.e. équivalence à une exécution en série des tâches),
- respect des échéances de terminaison des tâches.

4.3.2 Contrôle des qualités de services tolérants aux fautes

Afin de tolérer les défaillances par arrêt des processeurs, une tâche est exécutée en plusieurs copies, une copie n'étant exécutée que par un seul processeur. Pour ce faire, les données manipulées par une tâche sont répliquées sur chaque processeur qui exécute une copie de cette tâche. Dans un système distribué, où les délais de communication sont bornés et connus, nous avons examiné les trois aspects suivants de la qualité de service :

- respect de la sérialisabilité des exécutions des tâches, et équivalence à une exécution en série des tâches sur une seule copie des données (i.e. one-copy serializability) ;
- terminaison de l'exécution d'au moins une copie de chaque tâche ;
- respect des échéances de terminaison des tâches.

4.3.3 Contrôle des qualités de services dans les bases de données répliquées

Afin d'assurer une grande disponibilité ou de meilleures performances, on a recours à une réplification des données. Lorsque le schéma de réplification est de type asymétrique (i.e. une copie primaire et des copies secondaires), nous nous sommes intéressés aux deux aspects suivants de la qualité de service :

- critère général de correction de l'algorithme de rafraîchissement des copies secondaires et adaptation à différentes configurations,
- degré de fraîcheur des données répliquées.

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. Laouiti 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 [34].

5 Logiciels

Les logiciels développés par HIPERCOM en 1999 sont :

- 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 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 Reconnaissance en temps linéaire des graphes P4-indifférents

Participants : Michel Habib [LIRMM, Montpellier], Christophe Paul [LABRI, Bordeaux], Laurent Viennot.

De nombreux problèmes pratiques sont difficiles à résoudre sur des graphes quelconques. Celui de la coloration qui revient dans de nombreuses applications en est un (il est NP-complet). Cependant dans certaines classes de graphes, ces problèmes peuvent être résolus plus facilement en utilisant des structures particulières de la classe. Les graphes P4-indifférents forment une classe pour laquelle on sait résoudre le problème de la coloration avec un algorithme linéaire très simple dès qu'on a calculé un ordre particulier sur les sommets du graphe.

Plus précisément, ces graphes sont ceux pour lesquels il existe un ordre sur les sommets $<$ tel que tout chemin de longueur 4 a, b, c, d (ou encore appelé P4) vérifie $a < b < c < d$ ou $d < c < b < a$. C'est cet ordre qui est utilisé ensuite pour colorier efficacement le graphe. Nous avons proposé un algorithme linéaire [32] permettant de tester si un graphe donné est P4-indifférent et si c'est le cas, de fournir un ordre adéquat sur les sommets, rendant ainsi possible la coloration efficace de tels graphes.

6.2 Conditions de faisabilité d'un ordonnancement temps réel sérialisable de tâches distribuées avec structure en graphe

Participants : Soumaya Kamoun, Pascale Minet.

Les tâches distribuées, supposées placées sur les processeurs, accèdent à des objets persistants. Les demandes d'activation de ces tâches suivent des lois sporadiques. Ces tâches ont une structure en graphe orienté fini d'actions. Chaque action est exécutée par un processeur avec une durée d'exécution maximum connue. Chaque tâche doit respecter son échéance de terminaison. Nous supposons l'absence de défaillance, l'existence d'une diffusion fiable uniforme avec un délai maximum borné connu et l'existence d'horloges à dérive bornée ε -synchronisées.

Les conditions de faisabilité ont été établies pour deux algorithmes d'ordonnancement :

- un ordonnancement périodique, de période p , selon une séquence prédéfinie σ [28],
- un ordonnancement "FIFO" selon l'ordre des demandes d'activation des tâches.

Ces conditions de faisabilité sont basées sur la caractérisation des scénarios pires cas. L'exécution de ces scénarios est modélisée par un graphe. Le calcul des temps de réponse pire cas des tâches se ramène alors au calcul des plus longs chemins dans ce graphe. Un outil, utilisant la librairie LEDA, a été développé en C++. Il permet de se prononcer sur la faisabilité d'un jeu de tâches (i.e. dans tout scénario conforme aux hypothèses, chaque tâche respecte son échéance de terminaison).

6.3 Conditions de faisabilité d'un ordonnancement temps réel sérialisable de tâches répliquées

Participants : Laurent George [Université de Paris 12], Pascale Minet.

Dans un système distribué où les tâches sont exécutées en redondance active (chaque copie de la tâche est exécutée sur un seul processeur), nous proposons une solution algorithmique qui, malgré k arrêts de processeurs, garantit :

- la terminaison d'au moins une copie de chaque tâche, dont l'activation a été demandée ;
- la sérialisabilité des exécutions des tâches. Plus précisément, toute exécution obtenue avec cette solution est équivalente à une exécution en série des tâches avec une seule copie des données (i.e. one-copy serializability) ;
- le respect des échéances de terminaison des tâches.

Une analyse statique des conflits éventuels entre tâches permet de définir des classes de tâches. Un processeur ordonnance les tâches d'une même classe selon l'ordre de leurs demandes d'activation. Sur un même processeur, deux tâches appartenant à deux classes distinctes sont ordonnancées selon leurs échéances de classe. Nous établissons les conditions de faisabilité nécessaires et suffisantes associées à cette solution [26].

6.4 Maintien de la cohérence dans des bases de données répliquées gérées selon un mode asymétrique

Participants : Esther Pacitti [projet RODIN], Pascale Minet, Eric Simon [projet RODIN].

Dans une base de données où les données répliquées sont gérées selon le modèle asymétrique, une transaction peut valider ses mises-à-jour, après avoir mis à jour une seule réplique (la copie primaire) sur le nœud maître. Les mises à jour sont ensuite propagées aux autres répliques (les copies secondaires), qui sont mises à jour dans des transactions de rafraîchissement séparées. La conception d'algorithmes chargés de maintenir la cohérence des répliques, tout en minimisant la dégradation des performances due à la synchronisation des transactions de rafraîchissement, est un problème crucial. Nous proposons un algorithme de rafraîchissement simple et général qui résout ce problème [29], et nous prouvons sa correction [37]. Le principe de l'algorithme est de faire attendre les transactions de rafraîchissement, avant de les exécuter sur un nœud ayant des copies secondaires. Nous présentons ensuite deux optimisations majeures de cet algorithme. La première optimisation est basée sur des propriétés topologiques de la configuration des répliques. En particulier, nous caractérisons les nœuds pour lesquels, il est inutile d'attendre. La deuxième optimisation améliore la fraîcheur des données en utilisant une stratégie de propagation immédiate des mises à jour. Notre évaluation de performances montre l'efficacité de cette optimisation.

6.5 Contrôle d'admission de trafics

Participants : Steven Martin, Pascale Minet.

Dans un réseau sûr, c'est-à-dire sans défaillances des processeurs ou du réseau et sans pertes de messages, coexistent n trafics différents. A l'intérieur du réseau, chaque trafic suit un arbre de diffusion dont la racine est la source du trafic et les feuilles des destinataires du trafic. Nous supposons que les liens de communication sont FIFO et que tout nœud intermédiaire ou final utilise un ordonnancement FIFO. Dans cette première étape, nous supposons que tous les trafics suivent le même arbre de diffusion.

Le rôle d'un contrôle d'admission est de déterminer si un trafic supplémentaire $n + 1$ peut être admis conformément à la qualité de service requise et ceci sans remettre en cause les garanties accordées aux trafics déjà acceptés. Cette qualité de service est exprimée par une échéance de bout-en-bout (i.e. la durée de séjour maximum d'un message du trafic). Nous nous intéressons à une garantie déterministe de la qualité de service. Le contrôle d'admission consiste alors à vérifier que le trafic supplémentaire respecte son échéance de bout-en-bout et qu'il ne remet pas en cause les garanties d'échéances accordées aux trafics déjà acceptés.

Ce contrôle d'admission a été réalisé en C++ [36], lorsque la source utilise un ordonnancement FIFO, et lorsqu'elle utilise un ordonnancement EDF (*Earliest Deadline First*) non-préemptif et non-oisif. Dans ce dernier cas, nous avons étudié l'incidence du choix de l'échéance sur le nœud source sur les délais de bout-en-bout de tous les trafics.

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

Participant : Georges Gyory.

La détection de mouvement par inondation (cf. [2]) et par ondelettes, à la différence de celle de MPEG, ne cherche pas à détecter des valeurs de mouvements optimales pour des blocs prédéterminés, mais des valeurs de mouvement qui peuvent s'étendre à de grandes régions, donner des champs de vecteurs de mouvements continus (ex. : zoom dans l'image) et donc faciles à coder. Comme la quantization décrite ci-dessus ne permet pas d'utiliser un codage prédictif, ma recherche actuelle se focalise sur les possibilités de rapprocher l'image à coder de l'image précédente reconstituée uniquement par des valeurs de mouvement et si possible avec des conditions de convergence (afin d'éviter l'utilisation d'images non-différentielles dans la séquence).

6.7 Qualité de service multimédia

Participants : Cédric Adjih, Philippe Jacquet, François Dumontet, Philippe Robert [Projet Algo].

Une architecture de qualité de service a été définie en collaboration avec les partenaires du projet CATSERVER, notamment l'Université de Thessalonique, et a été publiée dans [16].

Cette architecture sépare ordonnancement des paquets et contrôle d'admission. Elle se distingue des protocoles déjà standardisés (comme RSVP) en ce qu'une réservation propose plusieurs possibilités de qualité de service (débits) au contrôle d'admission qui, lui, décide.

Un algorithme de contrôle d'admission a été imaginé, se basant sur un contrôle stochastique. Il a été décliné principalement en deux versions :

- une version considérant des requêtes fixes (ne profitant pas de la possibilité d'avoir plusieurs qualités de service),
- une version considérant des requêtes adaptables.

L'étude de la première version par des moyens analytiques, puis la vérification par des simulations a été faite. Un article synthétisant les résultats obtenus, a été accepté à Infocom 2000 [23].

Le protocole supportant cet algorithme a été défini et implémenté dans le cadre du projet CATSERVER.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 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.

François Dumontet a spécifié les protocoles de communication *du QoS Controller* avec (i) les applications, (ii) *le QoS Proxy*, et (iii) *l'Agency*. Il a également spécifié les fonctionnalités du *Controller* et de la partie négociation du Real Server.

Finalement, il a développé *le QoS Controller* et la partie négociation du Real Server.

Étude d'algorithmes de compression En 1999, Georges Gyory a amélioré la méthode de compression par ondelettes utilisée dans CATSERVER. Plus précisément, il a réalisé des démonstrations pour illustrer les résultats de compression par différents types d'ondelettes et différents (forts) taux de compression comparés à une compression JPEG image par image. Il a de plus adapté un procédé décrit par Lewis and Knowles pour une implémentation VLSI (Electronics Letters 17/1/1991 vol. 27 No. 2) en arithmétique entière, basé sur l'approximation

facile d'un jeu de coefficients de Daubechies avec de bonnes propriétés de localisation spatiale et spectrale. Finalement avec Cedric Adjih, ils ont adapté une méthode de quantification dans une structure quadtree qui permet de tronquer la fin du code de chaque image compressée pour régler le débit et ceci au prix d'une perte minimale en erreur quadratique.

7.2 IPANEMA

Participants : Sofiane Abdou, Philippe Jacquet, Olivier Lecomte, Paul Mühlethaler.

Le maître d'œuvre du projet Euclid IPANEMA est Matra SCI, les autres partenaires sont Datamat (Italie) et Telebit (Danemark). Le projet IPANEMA (*IPv6 protocols Applied to Networks in Military Applications*) a pour but de tester les technologies IPv6 et Hiperlan pour des applications militaires. L'INRIA intervient dans ce projet au niveau des couches 2 et 3, les autres partenaires fournissant les médias de communication et les logiciels applicatifs. Le projet IPANEMA est commencé depuis un peu plus d'un an et suit sensiblement le déroulement prévu. Cette première année a été dédiée à de nombreuses études techniques spécifiques concernant la technologie IPv6 et les réseaux radio sans fil ainsi qu'à des développements logiciels.

Parmi les sujets sur lesquels l'INRIA a plus particulièrement travaillé nous trouvons :

- l'utilisation de l'adressage IPv6 pour le domaine tactique,
- les protocoles de routage dans le domaine tactique (intra-domaine, inter-domaine),
- l'utilisation optimale des réseaux locaux sans fil dans le domaine tactique.

Un des résultats de cette étude montre que l'architecture d'HiPERLAN type 1 est particulièrement bien adaptée aux besoins tactiques en termes de réseaux sans fil.

L'INRIA a été également responsable de la spécification de la plateforme expérimentale.

Pour le projet IPANEMA, l'INRIA est en train de développer un réseau radio dont l'architecture réseau est celle d'HiPERLAN type 1. Ce réseau expérimental de stations fixes et mobiles fonctionnera sous le système d'exploitation FreeBSD. Il utilisera des cartes radio WaveLAN IEEE. Ce développement est terminé et des tests de fonctionnement approfondis sont en cours.

L'INRIA a également procédé aux développements de nombreux compléments autour de sa souche IPv6. Ces développements concernent en particulier la mobilité et la sécurité.

7.3 ATR

Mots clés : diffusion atomique uniforme temps réel, algorithme synchrone, algorithme asynchrone, condition de faisabilité, avionique modulaire, contrôle de trafic aérien.

Le projet ATR, Accord Temps Réel, est l'un des projets de l'action conjointe de la DGA/DSP, du MENRT et du CNRS sur le thème "Maîtrise des systèmes complexes réactifs et sûrs". Axlog Ingénierie et l'INRIA (projet REFLECS) sont co-responsables de ce projet, qui réunit quatre industriels (Axlog Ingénierie, Dassault Aviation, Thomson Airsys, Thomson TM) et quatre

équipes de recherche (LIX, LIAFA, Université Joseph Fourier et INRIA (projets REFLECS et HIPERCOM)).

Les problèmes applicatifs examinés sont l'Avionique Modulaire et le Contrôle de Trafic Aérien. L'algorithme de diffusion atomique uniforme à base de phases synchronisées et de détecteurs de défaillances, spécifié par le LIAFA, ainsi que sa composante temps réel spécifiée par l'INRIA, ont été implémentés sur plate-forme par AXLOG. La diffusion atomique uniforme temps réel a été testée selon les scénarios établis par Dassault Aviation et Thomson Airsys. Le taux de couverture des conditions de faisabilité a été évalué par analyse probabiliste.

7.4 AEE

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

Le projet AEE, Architecture Electronique Embarquée [1998-2001], financé par le Ministère de l'Industrie, regroupe des constructeurs (PSA, Renault, Aérospatiale), 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'arrêt de processeur,...). Pour plus de détails sur le projet AEE, se référer à <http://aee.inria.fr>

7.5 SAMU

Le projet RNRT SAMU (Services Améliorés par la Maîtrise de l'UMTS) a une durée de 30 mois. Sa date de lancement est prévue pour la fin de l'année 1999. Les partenaires sont : Centre de Recherche de Motorola Paris, Renault, SFR, Institut Eurecom, Laboratoire PRiSM de l'université de Versailles-Saint-Quentin. L'INRIA, (projet Hipercom), est sous-traitant de PRiSM.

SAMU est un projet RNRT qui a la charge d'étudier et de résoudre différents problèmes dans les réseaux sans fil de futures générations : l'UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Parmi ces divers problèmes, nous citons la gestion de ressources radio, lesquels rencontreront certainement des difficultés liées à la saturation et l'intégration de IP dans l'UMTS. Face à ce défi, deux sous-projets ont donc pour but de mettre au point des algorithmes pour optimiser l'allocation de canaux de l'UMTS ainsi que pour y assurer le transport du trafic IP. Un troisième sous-projet transversal viendra compléter ces deux derniers. Il s'agit de l'utilisation des agents mobiles en vue de rassembler davantage de paramètres du réseau pour une gestion plus globale au niveau de l'assignation des ressources ou de la qualité de service IP. Un dernier sous-projet expérimentera, en grandeur nature, et à travers une plate-forme réelle, tous les mécanismes déjà énoncés ci-dessus.

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Action COMMOBILE

Le projet HIPERCOM a participé activement à l'action COMMOBILE, qui est une Action Incitative lancée en 1997 sur le routage dans les réseaux par satellite et dans les réseaux ad-hoc, avec les projets ALGO, MISTRAL et SLOOP (coordinateur), le LIAFA (Paris VII), le LRI (Paris XI), le LIMOS (Clermont II). Le projet HIPERCOM a présenté les travaux du groupe MANet de l'IETF, et plus particulièrement la contribution HIPERCOM dans ce domaine.

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). Elle a pour objet l'étude des réseaux sans fil avec qualités de services. Les informations suivantes sont extraites des pages web de l'action (adresse: <http://hipercom.inria.fr/compas>).

Cette action a permis au projet Hipercom de recruter deux post-doctorants : Isabelle Guérin (prise totalement en charge par l'action) et Khaldoun Al Agha (pris en charge à moitié par l'action et à moitié par le projet).

Les autres personnes participant à l'action sont :

- Philippe Jacquet (Hipercom),
- Anis Laouiti (Hipercom),
- Paul Muhlethaler (Hipercom),
- Laurent Viennot (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).

La plupart des membres de l'action ont abordé des thèmes nouveaux pour eux dans ce projet commun. La mise en route des travaux a donc été assez longue, le temps pour chacun d'apprendre suffisamment sur les réseaux sans fil, le multicast et la qualité de service. Les travaux des membres de l'action sont maintenant concentrés sur différents axes de recherche assez ciblés. L'étude de chacun de ces axes peut être envisagée sous trois aspects :

- théorique,

- simulation,
- expérimentation.

Étude de la réutilisation spatiale dans les réseaux radio

Responsable : Khaldoun Al Agha.

Participants : Philippe Jacquet, Michel Morvan, Karell Bertet, Laurent Viennot, Michael Krajecki.

Dans les réseaux radio, le médium est plus ou moins partagé : deux émissions proches se brouillent l'une l'autre tandis que deux émissions éloignées peuvent se faire simultanément, on parle alors de réutilisation spatiale. Cette caractéristique différencie de manière radicale les réseaux radio des réseaux filaires (et même plus radicalement que les aspects de mobilité). Elle recouvre des aspects de brouillage (plusieurs émissions simultanées peuvent en brouiller une autre, même éloignée) et de contrôle de puissance (vaut-il mieux émettre plus fort pour atteindre directement plus de nœuds au risque de brouiller plus d'émissions? ou vaut-il mieux émettre moins fort au risque de nécessiter plus de réémissions pour atteindre un destinataire?). Ces thèmes ont été largement étudiés dans le cas des réseaux cellulaires, mais très peu dans le cas des réseaux ad hoc. Or ces deux approches sont très différentes : dans le premier cas, l'étude est centralisée autour de la station de base de chaque cellule, dans le second, le problème est totalement distribué d'un point de vue physique comme d'un point de vue algorithmique. C'est ce second cas qui nous intéresse ici.

MOLSR Multicast dans le protocole OLSR

Responsable : Anis Laouiti.

Participant : Laurent Viennot.

OLSR est un protocole de routage proposé par Hipercom dans le groupe de l'IETF MANet qui traite des réseaux sans fils ad hoc. OLSR tient à jour dans chaque nœud une partie de la topologie suffisante pour pouvoir router des paquets de nœud en nœud vers n'importe quel destinataire. MOLSR est une proposition de protocole de multicast s'appuyant sur OLSR inspirée de protocoles classiques dans les réseaux filaires comme MOSPF. La difficulté ici réside dans le fait que toute la topologie n'est pas connue mais seulement une partie. Un rapport de recherche est en cours d'écriture.

JUMBO Jointed Unicast, Multicast, Broadcast Organization

Responsable : Johanne Cohen.

Participants : Eric Fleury, Jens Gustedt.

JUMBO est une proposition de protocole de routage en réseau sans fil ad hoc motivée par la prise en compte du partage du médium. Cela est possible en modélisant la topologie comme une union de cliques : tous les nœuds d'une clique peuvent communiquer directement mais lorsque l'un émet, les autres ne peuvent pas émettre. C'est un modèle très simplifié de la réelle

nature de l'interaction des émissions, mais qui offre le premier protocole les prenant en compte. L'idée du protocole est née de tentatives d'optimisation du multicast. La principale difficulté du routage multicast réside en effet d'une manière générale à ne pas transmettre plusieurs fois par le même médium le même message. Des études sur le multicast avec ce protocole sont bien sûr envisagées.

Multicast en GPRS/UMTS

Responsable : Khaldoun Al Agha.

Participants : Isabelle Guérin, Laurent Viennot.

Le GPRS (General Radio Packet Service) est une norme en développement destinée à compléter le système GSM pour permettre la transmission de paquets de données. La future norme de téléphonie mobile UMTS ou IMT-2000 (Universal Mobile Telecommunication System / International Mobile Telecommunication) prévue en "troisième génération" inclura directement des fonctionnalités pour le transfert de données. Le multicast aura certainement une place dans ces développements futurs. Dans un système prévu pour la téléphonie, la principale difficulté du multicast réside dans l'optimisation de l'utilisation de la ressource radio (le reste du réseau étant surdimensionné comparativement ne pose pas de problème).

QoS en GPRS/UMTS

Responsable : Khaldoun Al Agha.

Participants : Isabelle Guérin, Laurent Viennot.

Les systèmes de téléphonie offrent de manière naturelle certaines qualités de service : réservation de bande passante, gigue faible, délais courts. Ce sont les qualités requises pour la téléphonie. Il paraît alors naturel d'étudier comment utiliser ces capacités dans le cadre des transmissions de données.

QoS en réseau radio totalement connecté

Responsable : Isabelle Guérin.

Participant : Laurent Viennot.

Les réseaux radio ad hoc présentent des aspects de mobilité difficiles à gérer et un médium de communication difficile à modéliser. On ne peut donc pas espérer proposer des moyens de contrôle de qualité de service très poussés dans ce type de réseaux. Cependant la bande passante réduite qu'ils offrent nécessite un minimum de contrôle pour certaines applications. Nous restreignons donc notre études à deux aspects rudimentaires de qualité de service :

- la réservation de bande passante,
- la différenciation de services (qui s'appuie généralement sur des priorités de paquets).

En première étude, nous pouvons considérer un réseau radio totalement connecté : où n'importe quel nœud peut communiquer directement avec n'importe quel autre. Un tel réseau ressemble fortement à un réseau de type ethernet. Notre premier but est donc d'essayer d'adapter

les méthodes utilisées sur ethernet aux réseaux radio totalement connectés, puis de les généraliser aux réseaux radio étendus.

QoS en Hiperlan

Responsable : Isabelle Guérin.

Participant : Laurent Viennot.

Dans un même ordre d'idée, on peut espérer généraliser les méthodes de qualité de service pour les réseaux ethernet avec priorité de paquet (normes IEEE 802.3, 1p et 1q) aux réseaux radio supportant la priorité de paquet comme HIPERLAN.

TDMA distribué

Responsable : Laurent Viennot.

Participant : Paul Muhlethaler.

Une des méthodes classiques pour proposer de la réservation de bande passante est de partager temporellement le médium entre les divers participants (chacun reçoit périodiquement un slot temporel durant lequel il est le seul à pouvoir émettre). Cette solution est parfaitement adaptée dans les réseaux cellulaires avec station de base ou dans les réseaux locaux radio avec point d'accès (norme IEEE 802.11). Un moyen de généraliser cette méthode à un réseau distribué pourrait consister à faire tourner le même algorithme de réservation par tous les nœuds du réseau, de sorte que chacun sache quand il peut émettre sans être brouillé par les autres. Une telle idée présuppose la synchronisation temporelle de tous les nœuds par une méthode distribuée...

DiffServ sans fil distribué

Responsable : Anis Laouiti.

Participants : Isabelle Guérin, Philippe Jacquet, Anis Laouiti, Paul Muhlethaler, Laurent Viennot.

Les cartes radio existant actuellement ne proposent pas de mécanisme de priorité de paquet. Il est cependant possible d'obtenir un comportement approché en contrôlant l'entrée des paquets dans le réseau. Tant qu'il n'y a pas de congestion, il n'y a pas de problème. L'idée consiste à rendre moins probable l'insertion d'un paquet lorsque le trafic devient dense et de le rendre d'autant moins probable que sa priorité est faible. Une telle idée requiert une mesure de la densité du trafic...

Couche service pour les réseaux radio

Responsable : Eric Fleury.

Participant : Jens Gustedt.

La mobilité étant fondamentale dans les réseaux sans fil, on peut concevoir des services offerts sur divers nœuds du réseau. Il s'agit alors de mettre en place un système permettant

de s'adresser au nœud le plus proche qui propose le service voulu. Les capacités de IPv6 en la matière constituent un point de départ.

8.3 Réseaux et groupes de travail internationaux

Le projet HIPERCOM suit les activités des groupes de travail de normalisation à l'ETSI : BRAN, NA8, ERM. Il participe aussi aux groupes de travail de l'IEEE, dont le comité IEEE 802.14. Il participe au groupe MANet et suit les activités d'IPCDN à l'IETF. Philippe Jacquet et Paul Mühlethaler participent à l'écriture d'un standard ETSI relatif à des communications dans l'aéronautique. Ce standard définira l'utilisation de VDL 2 (VHF Data Link mode 2) dans les stations de base vues des avions.

8.4 Relations bilatérales internationales

HIPERCOM bénéficie d'une subvention OTAN pour un programme d'échange avec l'Université de Purdue (USA).

8.5 Accueil de chercheurs étrangers

Wojciech Szpankowski, professeur à l'Université de Purdue (Indiana, USA) a passé une semaine au sein du projet. Nikita Vvedenskaya de l'Institut de l'Académie des Sciences de Moscou a passé un mois au sein du projet.

9 Diffusion de résultats

9.1 Enseignement universitaire

Soumaya Kamoun a donné des cours sur les Réseaux Industriels à l'EPF en 5ème année. Pascale Minet a donné des cours à l'INSTN (Saclay) dans le cadre du DEA Systèmes Électroniques et Traitement de l'Information. Laurent Viennot enseigne à l'École Polytechnique en tant que Chef de Travaux Pratiques à temps partiel.

9.2 Autres enseignements

Paul Mühlethaler est intervenu à l'ENSTA dans le cadre du cours "Modélisation et simulation de réseau".

Philippe Jacquet et Paul Mühlethaler ont animé une journée de formation continue à SUPELEC sur le thème des réseaux sans fil.

9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

Khaldoun Al Agha a donné un tutorial "IP mobile" à la conférence *DNAC'99: De Nouvelles Architectures pour les Communications* en décembre 1999 à Paris.

Philippe Jacquet a été co-organisateur du séminaire international ITW99 (Théorie de l'information et Réseaux) qui s'est déroulé du 27 juin au premier juillet à Metsovo (Grèce), sponsorisé par l'IEEE et l'Information Theory. Philippe Jacquet a donné plusieurs conférences :

- une conférence sur les algorithmes de prédiction à la conférence AOFA'99 sur l'analyse mathématique des algorithmes.
- une conférence sur les algorithmes de compression à la journée des arbres aléatoires organisée à l'Université de Versailles-Saint-Quentin.
- une conférence sur les performances dans les architectures et les protocoles dans les réseaux sans fil à la Cité des Sciences et de l'Industrie de la Villette dans le cadre du cycle sur les sciences et technologie de l'information et télécommunication.
- une conférence sur la modélisation des réseaux sans fil à l'Université de Reims.

Anis Laouiti a donné un tutorial "Les réseaux ad-hoc MANet" à IllKirch (67) dans le cadre d'une journée thématique sur la Mobilité organisée par *RGE Réseau Grand Est* en octobre 1999.

Amir Qayyum a donné un tutorial sur les protocoles de routage pour les réseaux adhoc au LRI (Laboratoire de Recherche en Informatique) à l'Université de Paris-Sud à Orsay. Il a présenté les travaux du groupe MANet de l'IETF. Il a également donné un tutorial sur ce sujet au CELAR (Centre d'Electronique de l'Armement) en novembre.

Pascale Minet a été membre du comité de programme de CFIP'99 (Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles) qui s'est déroulé du 26 au 29 avril à Nancy. En mai, elle a fait une présentation d'HIPERLAN type 1 et de ses travaux sur la qualité de service (i.e. respect des contraintes temporelles) à l'ENST Bretagne.

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. MUHLETHALER, 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, *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.
- [10] 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>.
- [11] 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>.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] RES-10, « Radio Equipment and Systems (RES); High Performance Radio Local Area Network (HIPERLAN); Functional specification », *rapport de recherche*, ETSI, June 1996.
- [15] 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>.

Articles et chapitres de livre

- [16] C. ADJIH, N. ARGIRIOU, M. CHAUDIER, E. DEBERDT, F. DUMONTET, L. GEORGIADIS, P. JACQUET, « An architecture for IP quality of service provisioning over CATV networks », *EMMSEC 1999, Stockholm, Sweden*, 1999.
- [17] K. A. AGHA, H. LABIOD, « MA-WATM: a new approach to an adaptive wireless ATM network », *Journal on Special Topics in Mobile Networks and Applications* 4, 2, 1999.
- [18] K. A. AGHA, « Resource Management in Wireless Networks Using Intelligent Agents », *International journal of network management* 10, 1, Jan-Feb 2000.
- [19] J.-L. DORNSTETTER, D. KROB, M. MORVAN, L. VIENNOT, « Some Algorithms for Synchronizing Clocks of Base Transceiver Stations in a Cellular Network », *Discrete Applied Mathematics, special issue on Wireless Networks and Mobile Computing*, 1999, à paraître.
- [20] P. JACQUET, P. MÜHLETHALER, « Simulations of High Performance Radio LAN TType 1 with ATM Traffics », *Wireless Personal Communications*, 2000, à paraître.

- [21] P. JACQUET, W. SZPANKOWSKI, «Entropy calculation via analytic depoissonization», *IEEE Transaction on Information Theory* 45, 4, May 1999.
- [22] P. JACQUET, «Traffic and queueing from an unbounded set of independent memoryless on/off sources», *Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation*, 2000, à paraître.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [23] C. ADJIH, P. JACQUET, P. ROBERT, «Differentiated admission control in large networks», *in: 19th int. conf. on Computer Communications (INFOCOM'2000)*, Tel-Aviv, Israel, March 2000. à paraître.
- [24] K. A. AGHA, K. BOUSSETTA, «Dynamic slot Allocation for multicasting in GPRS systems», *in: IEEE VTC 2000-Spring: Vehicular Technology Conference*, IEEE PRESS, Tokyo, Japan, 2000.
- [25] K. A. AGHA, «Hybrid Channel Assignment Using Dynamic Resource Sharing», *in: Vehicular Technology Conference (IEEE VTC'99-Fall)*, Amsterdam, Holland, September 1999.
- [26] L. GEORGE, P. MINET, «A solution preserving consistency of replicated objects with hard real-time constraints», *in: ISCA 12th int. conf. on Parallel and Distributed Computing Systems, PDCS'99*, S. Olariu, J. Wu (éditeurs), p. 460–467, Fort Lauderdale, Florida, USA, August 1999.
- [27] M. HABIB, C. PAUL, L. VIENNOT, «Partition refinement and graph decomposition», *in: Symposium on Discrete Algorithms (SODA'99)*, 1999.
- [28] 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. à paraître.
- [29] E. PACITTI, P. MINET, E. SIMON, «Fast algorithms for maintaining replica consistency in lazy master replicated databases», *in: 25th int. conf. on Very Large DataBases, VLDB'99*, p. 25–38, Edinburgh, Scotland, UK, September 1999.
- [30] A. QAYYUM, L. VIENNOT, A. LAOUITI, «Multipoint relaying: an efficient technique for flooding in mobile wireless networks», 2000. à paraître.

Rapports de recherche et publications internes

- [31] L. GEORGE, P. MÜHLETHALER, N. RIVIERRE, «A few results on non-preemptive scheduling», *rapport de recherche*, INRIA Rocquencourt, 1999, à paraître.
- [32] M. HABIB, C. PAUL, L. VIENNOT, «Linear time recognition of P4-indifference graphs», *rapport de recherche n° RR-3779*, INRIA Rocquencourt, octobre 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3779.html>.
- [33] P. JACQUET, V. JOLY, «Capacity of Retro-Information Channels», *rapport de recherche n° 3836*, INRIA Rocquencourt, December 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3836.html>.
- [34] P. JACQUET, A. LAOUITI, «Analysis of Mobile Ad-hoc Network Routing Protocols in Random Graph Models», *rapport de recherche n° 3835*, INRIA Rocquencourt, December 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3835.html>.

-
- [35] P. JACQUET, Y. SUHOV, N. VVEDENSKAYA, «Dynamic Routing in the Mean-Field Approximation», *rapport de recherche*, INRIA Rocquencourt, December 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3789.html>.
- [36] S. MARTIN, «Contrôle d'admission et politique d'assignation d'échéances intermédiaires», *rapport de recherche*, septembre 1999, Mémoire de stage ESIEE.
- [37] E. PACITTI, P. MINET, E. SIMON, «Fast algorithms for maintaining replica consistency in lazy master replicated databases», *rapport de recherche n° RR-3654*, INRIA Rocquencourt, April 1999, Long version, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3654.html>.