

*Projet Hipercom**Communication à hautes performances**Rocquencourt*

THÈME 1B



*R*apport
d'Activité

2002

Table des matières

1. Composition de l'équipe	1
3. Fondements scientifiques	2
3.1. Présentation et objectifs généraux du projet	2
3.2. La théorie analytique de l'information	3
3.2.1. Calcul d'entropies, algorithmes de compression, dépoissonisation	3
3.2.2. Prédicteurs	4
3.2.3. Théorie des graphes, complexité	4
3.2.4. Analyse pire cas des algorithmes et algèbre (max,+)	4
3.3. Méthodologie de l'évaluation des algorithmes de télécommunications	5
3.3.1. Analyse déterministe des performances des algorithmes	5
3.3.2. Analyse probabiliste des performances des algorithmes	6
3.3.2.1. Les protocoles à résolution de collisions	6
3.3.2.2. L'accès sans fil	6
3.3.3. Simulation d'algorithmes de télécommunication	7
3.3.4. Algorithmes d'ordonnancement et d'attribution de priorités	7
3.3.4.1. Au niveau de l'ordonnancement local	7
3.3.4.2. L'ordonnancement global	7
3.4. Modélisation de trafics et d'architectures de réseaux	7
3.4.1. Les trafics On/Off	8
3.4.2. Étude des files d'attente dans les nœuds de commutation	8
3.4.3. Étude des files d'attente sous TCP	8
3.4.4. L'architecture fractale du réseau internet	9
3.5. Conception et implémentation d'algorithmes	10
3.5.1. Protocoles d'accès pour câble-modem	10
3.5.2. Un ordonnancement global	10
3.5.3. Protocole d'accès sans fil	10
3.5.4. Protocoles de routage sans fil	10
3.5.5. Services sur les réseaux sans fil	10
3.5.6. Algorithme de compression vidéo	10
4. Domaines d'application	10
4.1. Réseaux câblés	10
4.2. Contrôle statistique de la qualité de service	11
4.2.1. Contrôle d'admission stochastique dans les réseaux	11
4.2.2. Contrôle d'admission dans les réseaux câblés	11
4.2.3. Multimédia et compression adaptative	11
4.3. Garantie déterministe de la qualité de service	11
4.3.1. Systèmes distribués temps réel avec objets persistants	11
4.3.2. Systèmes multimédia de vidéo à la demande	12
4.3.3. Réseaux avec services différenciés	12
4.4. HIPERLAN	12
4.5. Les réseaux sans fil ad-hoc	12
5. Logiciels	13
5.1.1. Logiciel de routage sans fil : Hiperlan	13
5.1.2. Logiciels de routage sans fil (réels ou simulateurs) : OLSR	14
5.1.3. Autres logiciels	14
6. Résultats nouveaux	14
6.1. Analyse des protocoles radio de niveau MAC	15

6.2.	Garantie déterministe de qualité de service	15
6.3.	Extensions pour le protocole OLSR	16
6.3.1.	Gestion de la macro et de la micro-mobilité	16
6.3.2.	Gestion de la mobilité rapide	17
6.3.3.	Mode veille	18
6.4.	Sécurité dans les réseaux sans fil ad hoc	18
6.5.	Analyse des protocoles de routage ad hoc	18
7.	Contrats industriels	19
7.1.	ARCADE	19
7.2.	CELAR	20
7.3.	FABRIC	20
7.4.	PRIMA	21
8.	Actions régionales, nationales et internationales	21
8.1.	Déploiement du réseau sans fil à l'INRIA	21
8.2.	Action Soleil Levant	22
9.	Diffusion des résultats	23
9.1.	Enseignement universitaire	23
9.2.	Participation à des colloques, séminaires, invitations	23
10.	Bibliographie	24

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

Danielle Croisy

Personnel Inria

Cédric Adjih [CR]

Marc Badel [Ingénieur Principal de l'Armement]

Pascale Minet [CR]

Laurent Viennot [CR jusqu'au 4 novembre 2002, depuis le 5 novembre 2002, responsable scientifique de Gyroweb]

Collaborateurs extérieurs

Khaldoun Al Agha [depuis le 1er octobre 2000]

Géraud Allard [du 1er Septembre au 31 Octobre]

Chercheurs invités

Leonidas Georgiadis [Professeur à l'Université de Thessalonique, Grèce, du 15 au 22 septembre 2002]

Abdellah Najid [Professeur-Chercheur à l'Institut National des Postes et Telecommunications à Rabat Maroc, du 15 février au 17 avril 2002]

Amir Qayyum [Ingénieur-Chercheur à Avaz Networks à Islamabad Pakistan, du 11 mars au 22 mars 2002]

Wojciech Szpankowski [Professeur à l'Université Purdue, Indiana, USA, du 20 au 27 janvier et du 14 au 24 septembre 2002]

Nikita Vvedenskaya [Professeur à l'Académie Russe des Sciences, Institute of Information Transmission Problems, Moscou Russie, du 4 novembre au 4 décembre]

Chercheur post-doctorant

Matthieu Latapy [jusqu'au 4 novembre 2002]

Ingénieurs experts

Saadi Boudjit [jusqu'au 30 septembre 2002]

Adokoé Plakoo

Anis Laouiti [depuis le 01 juillet 2002]

Doctorants

Géraud Allard [Bourse Inria, Université Paris 6 (Pierre et Marie Curie), depuis le 1er novembre 2002]

Emmanuel Baccelli [Bourse Inria, Université de Paris-Sud (Orsay), depuis le 1er octobre 2002]

Hakim Badis [Bourse Inria, Université de Paris-Sud (Orsay), depuis le 1er octobre 2002]

Mounir Benzaid [Bourse Inria, Université de Paris-Sud (Orsay)]

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

Jean Loup Guillaume [jusqu'au 05 novembre 2002]

Anis Laouiti [Bourse Inria, Université de Versailles-Saint Quentin jusqu'au 30 juin 2002]

Fabien Mathieu [jusqu'au 05 novembre 2002]

Amina Naimi-Merahi [Bourse Inria, Université de Versailles Saint Quentin, depuis le 1er octobre 2002]

Daniele Raffo [Bourse Inria, Paris VI depuis le 1er octobre 2002]

Stagiaires

Géraud Allard [stage DEA, Université de Paris 6, du 1er Mars au 31 Août]

Fatine Bouaakil [stage de dernière année à l'INPT, du 18 février au 16 juin]

Nicolas Grzeskowiak [stage maitrise, Université de Paris Sud(Orsay), du 11 février au 31 août]

Nicolai Larsen [stage DEA, Université d'Aalborg (Danemark)]
Lilia Mesrob [stage de 4ème année de ESIEE, du 15 avril au 15 août]
Tue Olesen [l'Université d'Aalborg (Danemark) jusqu'au 1 juillet]

3. Fondements scientifiques

3.1. Présentation et objectifs généraux du projet

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 service sur les réseaux. Le terrain d'intervention est essentiellement centré sur les nouveaux réseaux et services supportant l'Internet. Bien qu'en théorie elle adresse l'ensemble du domaine des télécommunications, dans la pratique la thématique du projet HIPERCOM est plus principalement orientée vers la problématique des réseaux locaux et des boucles locales notamment sans fil et ad hoc. Néanmoins la thématique s'étend vers des problèmes plus généraux comme la théorie de l'information, la modélisation du graphe de l'internet et de ses trafics.

La demande en réseaux interactifs croît de manière explosive à la fois en quantité et en qualité. 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, séries génératrices).
- *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. Le réseau mondial s'est constitué au fur et à mesure à partir de l'aggrégation de composants divers (notamment des réseaux ATM) et sa géométrie résultante suit des modèles inédits comme celui des profils auto-similaires ou des distributions de Pareto. Le graphe du Web reprend ces caractéristiques en les amplifiant du fait de l'extrême versatilité des sites et de leur multiplication (plus de quatre milliards maintenant). 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 modems câble, protocole d'accès HIPERLAN),
 - protocoles de routage sans fil et de gestion de mobilité (HIPERLAN, OLSR implémenté dans PRIMA, ARCADE),
 - les algorithmes d'ordonnancement et d'attribution de priorités prenant en compte les qualités de service des applications, sécurité et authentification dans les réseaux sans fil (démonstrateur ARCADE, SAFARI).

HIPERCOM participe à différents *projets européens* (BRAIN), *projets nationaux* (ARCADE, IPANEMA, I3, PRIMA), ainsi qu'à l'*action* « Soleil Levant ».

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, université de Paris 6, Ecole Nationale des télécommunications.

Par ailleurs, le projet est très actif au niveau de la *normalisation*. Après ses succès à l'ETSI (HIPERLAN-1) et à l'IEEE (802.14), il défend le protocole de routage OLSR [3][10] dans le groupe MANet (réseaux mobiles ad-hoc) de l'IETF.

3.2. La théorie analytique de l'information

Participants : Philippe Jacquet, Paul Mühlethaler, Wojciech Szpankowski [Université de Purdue], Laurent Viennot.

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.

3.2.1. 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 [15]. La méthodologie suivie est celle de la dépoissonisation [14] 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 [14][47]. 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.

3.2.2. Prédicteurs

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 « aaaaaaaaaaaaaa » 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. Ce résultat permet de construire un prédicteur universellement optimal sur une grande classe de modèles. Ce prédicteur est en cours de test sur des séquences génétiques. Philippe Jacquet et Wojciech Szpankowski ont montré que ce prédicteur est universellement optimal sur les modèles mélangés.

3.2.3. 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 [22] 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 [20] est optimale à un facteur multiplicatif $\log n$ près. Nous avons montré [ref networking02] que le nombre de multipoints relais dans un réseau sans fil croît en puissance un tiers du nombre de nœuds.

3.2.4. 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 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 l'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 considérable introduit par la non-commutativité de l'algèbre $(\max, +)$.

3.3. 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, Anis Laouiti, Pascale Minet, Paul Mühlethaler, Amir Qayyum, Laurent Viennot, Marc Badel.

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, séries génératrices). Lorsque les algorithmes sont difficiles à analyser, on a recours à la simulation.

3.3.1. Analyse déterministe des performances des algorithmes

Le domaine de l'évaluation déterministe des pires 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 2001. 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.

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) [4] et pour un ordonnancement périodique selon une séquence prédéfinie [16] ;

- 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.

3.3.2. Analyse probabiliste des performances des algorithmes

3.3.2.1. 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 [19][7].

Le domaine a rebondi 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).

3.3.2.2. 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 capture, 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 des signaux en puissance inverse de la distance : 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 [7].

Le domaine est devenu très actif depuis cinq ans environ, lors de l'avènement de la communication mobile et du GSM. Le cas des réseaux sans fil *ad hoc* est considéré comme extrême : les conditions d'existence des liens est soumis à des aléas comme la mobilité, les propagations et les conditions de trafic. Comme point de départ on considère deux modèles de réseaux : le modèle du graphe aléatoire et le modèle du graphe unité de dimension D [ref networking02]. Le modèle du graphe aléatoire rend assez bien compte des phénomènes de connectivité dans un réseau d'intérieur où la présence d'obstacle est la cause dominante de l'existence des

liens. Le modèle du graphe unité de dimension D (le graphe issues des paires de points à distance inférieur à l'unité distribués uniformément dans un hypercube de dimension D) est plus réaliste pour un réseau d'extérieur où l'atténuation du signal par la distance est la cause dominante de l'existence des liens. Un graphe unité en dimension 1 modélise un réseau étendu sur une route, la dimension 2 modélise un réseau terrestre, la dimension 3 un réseau entre des avions. On peut même imaginer la dimension 4, si la quatrième dimension est celle des fréquences : deux mobiles peuvent communiquer si ils sont séparés par une courte distance et si ils opèrent sur des fréquences proches (avec suffisamment de chevauchement). Bien sûr ces modèles sont des points de départ (on peut par exemple réunir dans un même modèle atténuation par distance et atténuation aléatoire), mais les résultats sont assez représentatifs et les analyses y sont loin d'être triviales.

3.3.3. 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 normalisation. Ainsi la politique de diffusion sans fil par relais multipoints a été simulée par Anis Laouiti [17]. Ses résultats ont montré que cette politique pouvait économiser jusqu'à 80 % du trafic généré par une inondation normale dans un réseau à cent noeuds. Les simulations ont porté sur des réseaux dont l'effectif atteignait le millier d'unités.

3.3.4. 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.

3.3.4.1. 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.

3.3.4.2. 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'ordonnancement a été introduite par l'équipe Hipercom-Reflex pour la gestion des contraintes temps réel dans la norme HIPERLAN [21]. 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. 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 [5]. C'est l'un des axes de recherche du projet HIPERCOM.

Le problème de l'ordonnancement global se complique dès lors que l'on doit en plus satisfaire des contraintes de cohérence [18]. Le respect des échéances de terminaison de tâches sporadiques ayant une structure en graphe fait l'objet de travaux [16], [4].

3.4. Modélisation de trafics et d'architectures de réseaux

Participants : Cédric Adjih, Philippe Jacquet, Dan Marinescu, Nikita Vvedenskaya, Géraud Allard, Amina Naimi.

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 [8] 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 [6].

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 serveur Web, *etc.* Nous avons appliqué une méthode dérivée du *champ moyen* 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. Cet algorithme est par exemple une méthode performante d'équilibrage des charges entre les serveurs *proxys* d'un même serveur Web. La connaissance de l'état global de chacun des serveurs est trop chère à acquérir, et dans ce cas l'interrogation à distance de deux serveurs choisis aléatoirement est plus efficace. 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 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.

3.4.3. 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 près de l'épine dorsale de l'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 fréquent 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 où nous mettons en évidence une loi log-normale. La loi log-normale est une loi caractéristique que l'on rencontre essentiellement en analyse financière (c'est la distributions des cours en bourse autour de leur moyenne), elle met en évidence un étalement pénalisant pour l'équité entre les clients, puisque les débits instantanés sont proportionnellement très étalés. L'analyse est contrôlée par des simulations sous NS du protocole TCP [2], ainsi que par des résolutions numériques des équations obtenues après modélisation.

Néanmoins la distribution log-normale n'implique pas de longues dépendances dans le trafic généré par le trafic d'un serveur TCP [ref AJV02]. En fait on prouve que le trafic d'un serveur TCP s'apparente à celui d'une source on-off. En appliquant les résultats sur les modèles on-off on arrive au fait que le trafic d'une connexion TCP génère des corrélations dans deux échelles de temps : à l'échelle du temps d'aller et retour avec le client (round trip time, 100 ms) et à l'échelle du temps de variation de la taille de la fenêtre (de l'ordre du round trip time multiplié par la taille moyenne de la fenêtre, 1-10 s). Cette disparité dans les échelles de temps préfigure une analyse multi-fractale du trafic TCP. Les deux types de corrélation s'évanouissent de manière exponentielle quand l'échelle de temps augmente.

Pour obtenir de longues dépendances de type Parreto dans le trafic TCP il faut imaginer la superposition de plusieurs connexion TCP avec des round trip time distribué selon une loi de Parreto. Il est alors trivial de mettre en évidence des longues dépendances dans le trafic résultant par simple application du modèles des sources on-off et de la transformée de Mellin. La distribution Parreto des round trip time dans le réseau internet ramène à se poser la question de la nature fractale de la géométrie du réseau internet. C'est ce qui est détaillé dans la section suivante.

3.4.4. 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 conséquent si on remplace 1 million 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 mesures 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 $\alpha \approx 0.11$) [1].

3.5. Conception et implémentation d'algorithmes

Participants : Cédric Adjih, Philippe Jacquet, Pascale Minet, Paul Mühlethaler, Amir Qayyum, Laurent Viennot, Géraud Allard, Thomas Clausen, Anis Laouiti.

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.

3.5.1. 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.

3.5.2. 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.

3.5.3. Protocole d'accès sans fil

à détection de collisions par signalement actif. Base de la norme HIPERLAN.

3.5.4. Protocoles de routage sans fil

basés sur la reconnaissance des voisinages et sur des transmissions à diffusion optimisées. Éléments de la norme HIPERLAN. Fondement du protocole OLSR proposé dans le groupe MANet de l'IETF (voir domaine d'application).

3.5.5. Services sur les réseaux sans fil

Protocoles pour le multicast, adaptation de la mobilité sur IP pour les réseaux ad hoc sur OLSR, algorithmes de localisation dans les réseaux sans fil.

3.5.6. Algorithme de compression vidéo

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

4. Domaines d'application

4.1. Réseaux câblés

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

- l'existence d'un canal montant permettant la transmission bidirectionnelle, condition nécessaire pour l'accès à l'Internet.
- 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 de la qualité de service

4.2.1. Contrôle d'admission stochastique dans les réseaux

Pour des systèmes de réservation de type réseaux téléphoniques à arrivées stationnaires, le comportement des systèmes de contrôle d'admission, au moins dans les versions les plus simples, est bien compris[72]. Ce type de systèmes de réservation se retrouve dans les réseaux IP, si l'on fait l'hypothèse d'applications transmettant à des débits fixes, éventuellement adaptables.

Pour des arrivées non-stationnaires ou pour des systèmes prenant en compte des considérations économiques ou des idées d'équité, les systèmes sont plus difficiles à analyser, et à contrôler ; il ne s'agit pas seulement de prendre en compte l'ordonnement[70].

Une idée pour surmonter cette difficulté est d'utiliser des algorithmes de contrôle d'admission évoluant suivant un contrôle stochastique. Il n'est alors plus nécessaire, pour ajuster l'algorithme d'admission, d'établir une relation précise entre les paramètres du trafic (distribution des arrivées par exemple), et les paramètres de l'algorithme de contrôle d'admission : ces derniers simplement sont adaptés stochastiquement en fonction des performances mesurées de l'algorithme.

C'est cette dernière adaptation stochastique qui permet au contrôle d'admission, d'une part de s'adapter à des conditions de trafic changeantes, et d'autre part d'introduire les métriques plus sophistiquées.

4.2.2. Contrôle d'admission dans les réseaux câblés

Le projet européen ESPRIT IT CATSERVER (*cable TV server*), maintenant achevé, a réalisé un serveur multimédia raccordé à l'Internet par le câble, ainsi qu'une architecture de qualité de service, permettant des algorithmes stochastiques tels que décrits dans la partie précédente.

Le projet a conçu un algorithme de 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). Et en même temps, 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.

Une compression adaptative permet de contrôler des qualités de service multimédia. Dans un réseau partagé, comme les réseaux câblés TV, le maintien du service multimédia passe par un contrôle dynamique des taux de compression. En cas de surcharge locale, les services continuent à être fournis au prix d'une dégradation de qualité contrôlée, sans pour autant devenir prédateurs les uns des autres.

4.2.3. 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.

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.

4.3.3. Réseaux avec services différenciés

Dans les réseaux avec services différenciés (DiffServ), nous avons étudié comment offrir une garantie déterministe de la qualité de service aux flux de la classe EF (Expedited Forwarding), classe la plus prioritaire. Nous avons considéré les deux paramètres de qualité de service suivant : le délai de bout-en-bout et la gigue de bout-en-bout. L'établissement d'une borne sur le temps de réponse de bout-en-bout permet d'en déduire un contrôle d'admission pour les flux de la classe EF.

4.4. HIPERLAN

Suite aux résultats du projet Européen ESPRIT LAURA (1993-1996) auquel l'équipe a fortement contribué, et à l'aboutissement et à l'adoption de la norme HIPERLAN en 1996, le projet a participé au projet Euclid IPANEMA (1998-2000). Ce dernier a porté la norme HIPERLAN sur des réseaux radio à 2,4 GHz et les a fait travaillé sous IPv6 dans le cadre d'un réseau tactique militaire. Ces réseaux ont 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.

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

Des implémentations sous Linux et MSDOS existent déjà, elles ont été faites en collaboration avec PRAXITELE.

Par ailleurs, grâce à l'aide du conseil régional, l'INRIA a déployé 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.

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 en y défendant le protocole OLSR. L'équipe est co-auteur du draft du protocole OLSR (*Optimized Link State Routing* [3]). 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. Laouiti et T. Clausen 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 [71].

Les protocoles réactifs souffrent de coûts élevés lors de l'établissement des routes. Ceci provient en grande partie du caractère massif des inondations des paquets de recherche de route. Une solution intéressante de ce problème consiste à utiliser les multipoints relais du protocole OLSR pour propager les paquets de découverte de route. Lors de son stage de DEA, Géraud Allard a conçu et simulé un protocole réactif, MPRDV, utilisant les multipoints relais pour la découverte et la propagation des routes. Le coût du trafic de contrôle est réduit de manière très substantielle (même en comptant le coût additionnel du contrôle des voisinages). Le protocole MPRDV peut ainsi passer à l'échelle et fonctionner sous un plus grand nombre de nœuds que les protocoles réactifs de base. Il est fort question de rédiger un draft en commun avec les auteurs d'AODV pour suggérer cette extension pour les protocoles réactifs.

5. Logiciels

Les logiciels développés par HIPERCOM en 2001 touchent aux différents domaines de recherche du projet. Une première partie des logiciels s'intéresse au routage sans fil, parce qu'en ce domaine des implémentations sont souhaitables, au moins pour des simulations, et mieux encore, pour tests en grandeur réelle.

5.1.1. Logiciel de routage sans fil : Hiperlan

« Hiperlan », en réalité la partie routage uniquement de la norme Européenne de réseaux sans fil Hiperlan [21], est l'une des premières implémentations de routage pour les réseaux sans fil effectuée par le projet Hipercom, et la plus stable.

Divers drivers de communication pour réseaux sans fil avec routage interne ont déjà été développés par le projet HIPERCOM au fil des années. Ils concernent les cartes Wavelan (Orinoco) 2.4 GHz seconde génération de Lucent Technology ; l'un de ceux-ci fonctionne sous Linux ou sous FreeBSD ; l'autre sous Windows.

Ces drivers sont en déploiement pour le réseau sans fil de l'INRIA Rocquencourt par le service MIRIAD : http://www-rocq.inria.fr/miriad/themes/reseau/hiperlan/reseau_hiperlan.html

Cette année, les logiciels, leurs améliorations réalisées et les nouveautés sont les suivantes :

- Une mise à jour du driver, des scripts, et de chaîne de compilation pour Windows 2000 et XP.
- Sur les versions récentes de Linux, la partie routage de Hiperlan a été portée hors du noyau, fonctionnant en mode utilisateur, à titre expérimental pour l'instant.
- Un analyseur de trafic sur réseaux sans fil IEEE 802.11, permettant la capture au vol des paquets échangés en vue de mises au point.
- Des modifications et instrumentations ont été effectuées dans des drivers fonctionnant sous Linux afin d'observer la configuration du réseau (ensemble des stations entendues avec leur puissance d'émission) et diverses statistiques de mesures et de pouvoir utiliser ces données au niveau utilisateur.
- Développement de divers utilitaires réseau (scripts) en langage shell et en Python, permettant la configuration du driver.

- Un outil graphique autour du driver Hiperlan permettant la configuration du driver ainsi que la visualisation de tous les noeuds mobiles déployés sur le site de l'INRIA. L'outil est également utilisé pour la visualisation des noeuds OLSR.
- Développement d'un outil graphique en JAVA permettant d'interfacer le driver Hiperlan et de visualiser la topologie d'un réseau sans fil maillé.
- Etude approfondie de la modularisation du driver Hiperlan afin de dissocier les fonctions élémentaires (émission, réception) des actions de plus bas niveau comme la gestion de la topologie ou le relaiage de trames.

5.1.2. Logiciels de routage sans fil (réels ou simulateurs) : OLSR

OLSR est un des protocoles de routage de recherche proposé du projet Hipercom, qui est activement développé et étudié.

Les implémentations fonctionnant en grandeur réelle de ce protocole sont les suivantes :

- L'implémentation pour Linux et FreeBSD du protocole de routage OLSR pour réseau sans fil conforme aux nouvelles versions du draft IETF (version 5 et 6). La version 5 du draft prend en considération et gère les interfaces multiples des routeurs OLSR. Ces nouvelles versions sont implémentées en mode utilisateur et le routage se fait au niveau IP sans aucune modification dans la pile des protocoles, tout comme la version précédente. Elles intègrent aussi la mesure de la puissance de réception du signal, ce qui permet d'améliorer la stabilité du réseau. Un réseau de test dans les conditions réelles a été mis en place.
- Une implémentation indépendante en C++ est en cours de développement. Une implémentation sous windows a été réalisée. Une implémentation en python. A noter l'implémentation d'OLSR dans la couche ANANAS développé par le projet ARES (Rhone-Alpes).
- D'autres implémentations indépendantes du protocole OLSR avec l'Université de Aalborg : implémentations des versions 1, 2 et 3 du protocole, diffusés via le WWW : <http://olsrd.sourceforge.net/>
- De nombreuses implémentations indépendantes du protocole OLSR à travers le monde. A noter l'implémentation du Naval Research Laboratory sous Linux (NRLOLSR). La plupart des informations sont disponibles sur la page OLSR accessible à partir de la page web du projet.

Les implémentations dérivées ou indépendantes, destinées à la simulation du protocole sont les suivantes :

- 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.
- Une implémentation sous le simulateur de réseau standard, NS2, du protocole OLSR version 3.
- MOLSR : une implémentation de l'algorithme de construction de l'arbre multicast des spécifications du Multicast OLSR. Ce code sera porté sous OPNET pour des simulations plus poussées.
- Une extension du protocole de routage OLSR, l'extension des liens unidirectionnels, a été implémentée sous OPNET.
- Un émulateur de topologie de routage sans fil sous IP basé sur du filtrage de paquet.

5.1.3. Autres logiciels

- Un robot scannant le graphe du web a été mis en place dans le cadre de l'ARC Soleil Levant. Un programme en python a été développé pour mener des crawls spécifiques.

6. Résultats nouveaux

6.1. Analyse des protocoles radio de niveau MAC

Mots clés : réseaux sans fil, protocole MAC, accès au médium, IEEE802.11, Bluetooth, HomeRF, HIPERLAN1, HIPERLAN2, qualité de service, exigences utilisateur, polling, 1-RR, E-RR, temps de réponse pire cas.

Participants : Laurent George [Université de Paris 12], Antoine Mercier [ECE], Gilles Mercier [Université de Paris 12], Pascale Minet, Paul Muhlethaler.

Dans [27], nous nous intéressons à cinq protocoles d'accès au médium sans fil : IEEE802.11, Bluetooth, HomeRF, HIPERLAN1 et HIPERLAN2. Nous étudions la prise en compte par ces protocoles des exigences de l'utilisateur. Ces exigences (i) concernent le réseau sans fil dans son ensemble, (ii) sont spécifiques à la couche MAC ou encore (iii) sont imposées par les trafics résultant de l'application considérée. Différents problèmes ont été identifiés :

- comment refléter au niveau de l'accès au médium sans fil les exigences de l'utilisateur ? A l'exception d'HIPERLAN1, le trafic asynchrone n'est transmis que si le trafic synchrone lui laisse suffisamment de bande passante. Comment par exemple gérer un trafic asynchrone soumis à des contraintes temps réel ?
- comment offrir une qualité de service de bout-en-bout dans un réseau sans fil multi-saut, incluant les aspects routage et mobilité ?
- Comment ces solutions coexistent-elles dans le même environnement (risque d'interférence), comment coopèrent-elles ?

Dans [53], nous étudions le réseau sans fil Bluetooth et analysons son aptitude à supporter des applications ayant des contraintes temps réel. La qualité de service perçue par un utilisateur dépend des performances du protocole d'accès au médium. Dans Bluetooth, ce protocole est basé sur un polling maître/esclave. Nous analysons les protocoles de polling proposés pour Bluetooth et définissons des critères de comparaison. Il existe deux principales catégories de polling : le polling systématique de tous les esclaves et le polling des seuls esclaves ayant une certaine activité sur le médium. Nous dressons un état de l'art pour ces deux catégories. Nous nous intéressons ensuite à deux pollings appartenant à la première catégorie : (i) le 1-RR où le maître sollicite le message d'un esclave puis passe à l'esclave suivant, et (ii) le E-RR où le maître attend d'avoir transmis tous ses messages destinés à cet esclave et d'avoir reçu tous les messages de cet esclave, avant de passer à l'esclave suivant. Nous calculons une borne sur le pire temps de réponse d'un message sporadique en attente de transmission par un esclave. Cette borne est obtenue par une analyse temps réel pire cas. Nous terminons par une étude numérique de différentes configurations de trafics sur le maître et les esclaves. Nous comparons nos bornes avec les temps de réponse pire cas exacts et identifions les configurations nos bornes sont atteintes.

Paul Muhlethaler a d'autre part publié un livre sur la norme MAC IEEE 802.11 [24].

6.2. Garantie déterministe de qualité de service

Mots clés : qualité de service, garantie déterministe, classe EF, DiffServ, ordonnancement temps réel, contrôle d'admission, ordonnancement FIFO, ordonnancement EDF, système multimédia, Fibre Channel, dimensionnement, boucle FC, disque magnétique.

Participants : Laurent George [Université de Paris 12], Steven Martin [ECE], Dana Marinca, Pascale Minet.

Nous nous intéressons au problème de garantie de qualité de service dans un système distribué implémentant des services différenciés selon l'approche Diffserv. Nous étudions plus particulièrement la classe EF (Expedited Forwarding), classe la plus prioritaire. La classe EF a été conçue pour des flux avec des contraintes temps réel de bout-en-bout. Nous étudions plus particulièrement deux paramètres de qualité de service : le

temps de réponse de bout-en-bout et la gigue de bout-en-bout, paramètres de la plus grande importance pour les flux multimédia. Nous proposons deux solutions permettant d'offrir une garantie déterministe de la qualité de service de bout-en-bout. Ces solutions sont basées sur l'analyse temps réel pire cas des flux sporadiques dans la classe EF. Nous supposons que (i) la classe EF est traitée prioritairement à toute autre classe, (ii) le traitement d'un message est non-préemptif. Pour l'ordonnancement au sein de la classe EF, nous considérons deux cas :

- Dans [42], l'ordonnancement utilisé sur chaque nœud du réseau au sein de la classe EF est EDF(Earliest Deadline First). Nous montrons comment calculer une borne sur le temps de réponse de bout-en-bout d'un flux dans la classe EF. Nous comparons cette borne avec celle fournie par un simulateur que nous avons développé.
- Dans [43], nous considérons un ensemble de trafics sporadiques de la classe EF suivant une ligne de diffusion dans un arbre de diffusion. Le temps de réponse de bout-en-bout de tout trafic de la classe EF doit être inférieur à l'échéance de bout-en-bout du trafic. Chaque nœud utilise un ordonnancement FIFO au sein de la classe EF. L'évaluation du temps de réponse pire cas est basée sur une approche par trajectoire, qui permet d'obtenir un temps de réponse de bout-en-bout moins pessimiste que d'autres approches existantes. Les résultats théoriques ainsi obtenus sont confirmés par un outil de simulation que nous avons réalisé.

Dans les deux cas, nous montrons comment dériver de cette étude un contrôle d'admission pour la classe EF. Le rôle du contrôle d'admission est de décider si un nouveau flux peut être accepté dans la classe EF sans remettre en cause les garanties déterministes accordées aux flux déjà acceptés dans cette classe.

La technologie Fibre Channel (FC) présente de nombreux avantages (performances, disponibilité, flexibilité). Dans [44], nous proposons d'utiliser cette technologie dans un système multimédia offrant des services de vidéo à la demande. Le réseau de stockage est basé sur (i) des boucles FC interconnectant des disques magnétiques et sur (ii) des switches FC connectant les boucles aux serveurs multimédia. Nous montrons comment dimensionner les boucles FC pour offrir une garantie déterministe de la qualité de service aux clients du système multimédia. Nous avons modélisé le comportement des disques magnétiques et celui des boucles FC. Les évaluations de performances résultant de cette analyse, sont validées par confrontation avec des résultats de simulation déjà publiés. Grâce à cette analyse, nous avons déterminé le nombre optimal de disques connectés à une boucle FC ainsi que le nombre maximum de clients acceptables par une boucle. Nous avons également étudié l'influence des performances des disques et du nombre de blocs lus par requête disque. Nous avons évalué la taille des buffers chez le serveur et chez le client.

6.3. Extensions pour le protocole OLSR

Mots clés : *mobilité, macro-mobilité, micro-mobilité, Mobile IP réseau mobile ad-hoc, routage, OLSR, MANET, mobilité rapide, Fast Moving OLSR.*

Participants : Khaldoun Al Agha, Mounir Benzaid, Pascale Minet, Paul Muhlethaler, Anis Laouiti, Philippe Jacquet, Laurent Viennot.

6.3.1. Gestion de la macro et de la micro-mobilité

Mobile IP permet à un hôte mobile de rester accessible en conservant son adresse IP permanente (liée à son réseau d'abonnement) tout en visitant différents réseaux. Par contre, l'adresse temporaire du mobile change chaque fois que celui-ci change de réseau d'attachement. Chaque changement de réseau d'attachement nécessite un enregistrement du mobile auprès de son réseau d'abonnement. Cette procédure est longue, lorsque le mobile est loin de son réseau d'abonnement (délai d'un RTT dans Internet). Ceci peut provoquer des interruptions des communications avec les mobiles d'environ 5 secondes, ceci est inacceptable dans le cas de changements fréquents (cas de la micro-mobilité). D'où l'idée de combiner Mobile IP à un protocole de gestion de la micro-mobilité.

Le protocole de routage OLSR est retenu, car il se présente comme une optimisation du protocole OSPF, lequel est recommandé par les experts de l'IAB (Internet Architecture Board). Le protocole Mobile IP est alors chargé de gérer la macro-mobilité (ou mobilité inter-domaine), et le protocole OLSR gère la micro-mobilité (ou mobilité intra-domaine).

Plus précisément, un réseau d'accès OLSR IP constitue un sous-domaine IP et permet d'accéder à Internet via un gateway OLSR. Le déplacement d'un mobile à l'intérieur d'un réseau d'accès OLSR IP (mobilité intra-domaine) est géré par le protocole OLSR sans intervention de Mobile IP (i.e. pas de mise-à-jour de l'enregistrement auprès du réseau d'abonnement). Le changement de réseau d'accès OLSR IP (mobilité inter-domaine) est géré par le protocole Mobile IP.

Dans [32], nous proposons une architecture hiérarchique basée sur ces principes, permettant d'intégrer la gestion de la micro-mobilité dans un réseau ad-hoc et la gestion de la macro-mobilité dans Internet. Cette architecture de contrôle de la mobilité a été définie dans le cadre du projet ARCADE où elle est mise en oeuvre.

Le réseau d'accès multi-saut et sans fil de cette architecture est basé entièrement sur IP, utilise le protocole de routage OLSR et répond aux exigences des futurs réseaux sans fil « tout IP ».

6.3.2. Gestion de la mobilité rapide

Avec l'expansion des réseaux mobiles ad-hoc dans les lieux publics (ex. : gares, aéroports,...) et l'utilisation de plus en plus répandue de la norme 802.11, la gestion de la mobilité rapide devient une nécessité.

Le protocole OLSR permet de gérer le déplacement des mobiles à l'intérieur du réseau d'accès OLSR IP. Cependant, lorsqu'un mobile se déplace rapidement, son voisinage change fréquemment. La fréquence du contrôle de l'état des liens ne permet pas de suivre en continu le mobile dans son déplacement. Par conséquent, des messages sont perdus suite à l'utilisation de routes obsolètes.

Afin de permettre les déplacements rapides des mobiles à l'intérieur du réseau d'accès OLSR IP, nous proposons l'extension Fast Moving OLSR. Cette extension d'OLSR doit satisfaire les deux objectifs suivants :

- la fréquence des messages de contrôle doit être proportionnelle à la mobilité,
- la bande passante consommée par ces messages de contrôle doit rester raisonnable.

C'est pourquoi dans l'extension Fast Moving OLSR, l'état des liens entre un mobile rapide et ses relais multipoint sont contrôlés avec une fréquence élevée. Par ailleurs, le nombre de relais multipoint d'un mobile en déplacement rapide est fortement limité.

Ainsi un mobile en déplacement rapide peut être joint par l'intermédiaire de ses relais multipoint. Il peut également joindre ses correspondants.

Dans [34], nous avons décrit les principes de Fast Moving OLSR. Nous en avons évalué les performances par simulation. Plus précisément, nous avons mesuré le taux de perte de messages CBR (Constant Bit Rate) destinés à un mobile en fonction de sa vitesse de déplacement. Nous avons montré que ce taux de perte peut être faible tout en maintenant le trafic de contrôle à un niveau raisonnable.

L'extension de la zone de couverture des réseaux ad-hoc et la prise en compte de la mobilité rapide par les protocoles de routage pourraient offrir une solution complémentaire à l'UMTS pour les réseaux mobiles de la quatrième génération (4G).

6.3.3. Mode veille

La consommation énergétique des interfaces radio étant forte, il est important de concevoir de concevoir des mécanismes de veille pour les nœuds d'un réseau ad hoc. Des solutions ont été analysées dans [61].

6.4. Sécurité dans les réseaux sans fil ad hoc

Participants : Daniele Raffo, Philippe Jacquet, Paul Mühlethaler, Laurent Viennot.

Le succès de plus en plus important des réseaux sans fil WiFi amène naturellement à se poser le problème de leur sécurité. Dans le cadre d'un réseau sans fil ad hoc le problème de la sécurité comprend deux étages : l'intégrité du réseau et l'intégrité des données qui y transite. L'intégrité des données est un problème classique dans le monde internet et de nombreuses solutions existent déjà (IPSEC, etc) et il s'agit surtout de choisir la bonne. L'intégrité du réseau est plus délicat à traiter car un routeur sous contrôle malfaisant peut complètement détruire le fonctionnement du réseau (par exemple en suspendant sa propre fonction de routage ou en diffusant de fausses informations de routage). Il importe donc de disposer de procédures efficaces afin de détecter et de neutraliser les intrusions malfaisantes. Une manière simple consiste à effectuer une authentification de chacun des routeurs de proche en proche. Pour cela il existe des procédures basées sur une infrastructure de clés publiques. Cette solution est à moitié satisfaisante car elle suppose l'existence d'une infrastructure centralisée alors que le concept de réseaux ad hoc appelle à une infrastructure distribuée non concertée. Nous envisageons des solutions basées sur le concept du « petit monde » (small world) où chacun des nœuds détient des certificats vers un sous-ensemble des nœuds du monde de façon à ce que la probabilité que deux nœuds aient un certificat en commun soit grande. Le nombre de certificats à détenir est de l'ordre de la racine carrée du nombre de nœuds dans le monde, ce qui est encore beaucoup. Nous travaillons sur une optimisation où le nombre de certificats sera réduit au logarithme de ce nombre.

6.5. Analyse des protocoles de routage ad hoc

Mots clés : *routage ad hoc, MANET, modélisation, analyse de trafic de contrôle, simulation de protocole.*

Participants : Thomas Clausen, Philippe Jacquet, Anis Laouiti, Pascale Minet, Nicolai Larsen, Tue Olesen, Paul Mühlethaler, Laurent Viennot.

L'opération de diffusion (broadcast en anglais) est une brique de base dans la constitution d'un protocole de routage ad hoc. L'algorithme élémentaire consiste à faire répéter le message par chaque nœud du réseau, opération qui peut s'avérer fort coûteuse en environnement radio. L'équipe a proposé depuis longtemps une optimisation s'appuyant sur le concept de relais multipoints. L'approche a été récemment validée [49] dans deux modèles de réseau ad hoc : le graphe aléatoire à la Erdős-Rényi qui offre un modèle probabiliste acceptable pour les situations intra-muros et le graphe d'intersection de disques, modèle géométrique plus adapté aux situations en extérieur. La méthode de diffusion par multipoints relais a de plus été comparée par simulation [41] à d'autres propositions récentes au problème de l'optimisation de la diffusion.

D'autre part, certains protocoles suivent le cheminement des messages lorsqu'ils sont diffusés pour construire des routes. Cette procédure astucieuse a un défaut principal : elle peut aboutir fréquemment à des routes de longueur non optimale. L'équipe a de ce point de vue étudié comment optimiser la procédure de diffusion pour qu'elle fournisse de meilleures routes [40][41].

Pour pouvoir analyser et comparer les protocoles de routage, il est nécessaire de modéliser les réseaux ad hoc. Or cette tâche qui touche à la fois aux aléas de la propagation radio et à la mobilité des nœuds est loin d'être évidente. Nous avons déjà mentionné les travaux de l'équipe dans ce domaine pour l'étude de la diffusion par les relais multipoints [49]. Nous avons de plus proposé un modèle permettant d'abstraire la mobilité, la densité des nœuds et la forme du trafic de données par quelques paramètres probabilistes simples [36]. De même, un protocole donné peut être modélisé par quelques paramètres. Le modèle permet alors d'analyser la quantité de trafic de contrôle qu'un protocole donné va produire. En reprenant des simulations de divers protocoles apparues dans la littérature, nous avons pu déduire les paramètres associés à ces protocoles dans notre modèle. Notre modèle a ensuite permis d'expliquer la forme de certaines courbes de simulation (qui

deviennent des droites avec des échelles appropriées). Le modèle permet alors de plus de comparer différents protocoles pour toutes les variations possibles des paramètres du réseau ad hoc.

Les simulations sont cependant toujours nécessaires pour régler notre modèle ou pour étudier l'impact de l'interaction avec d'autres protocoles IP. Nous avons notamment étudié l'impact de TCP dans les réseaux ad hoc pour divers protocoles [38][37] et avons montré que son influence pouvait pénaliser très fortement certains protocoles. Une autre étude porte sur l'utilisation d'une topologie partielle pour construire les routes [39]. L'utilisation d'une topologie partielle permet de réduire significativement le trafic de contrôle notamment pour les protocoles proactifs qui diffusent cette topologie. En effet, dans le cas d'un réseau radio, la densité des liens de connexion peut être très forte (en $O(n^2)$) rendant presque obligatoire l'utilisation d'une topologie partielle. Les simulations conduites dans [39] permettent de valider cette approche. Un réglage du protocole OLSR est de plus proposé pour rendre la topologie partielle calculée par le protocole plus ou moins dense. En forte mobilité, l'utilisation d'une topologie plus complète peut s'avérer payante. Cependant, trouver un bon compromis entre le surcoût de trafic de contrôle généré par une topologie plus dense et la possibilité de calculer de nouvelles routes lors de cassure de liens reste encore un sujet de recherche largement ouvert.

7. Contrats industriels

7.1. ARCADE

Participants : Khaldoun Al Agha, Mounir Benzaid, Saadi Boudjit, Pascale Minet.

Le projet ARCADE, ARchitecture de Contrôle Adaptative Des Environnements IP est un projet RNRT qui a débuté en janvier 2001 : <http://www-rp.lip6.fr/arcade>. Il a une durée de 2 ans et regroupe les partenaires suivants :

- LIP6 (chef de file),
- INRIA (Rocquencourt et Sophia),
- France Télécom R&D,
- Thomson-CSF Communications,
- QoSMIC

Le but de ce projet ARCADE est de dresser un modèle général permettant de maîtriser les réseaux IP. Cette maîtrise se fonde sur la détermination d'un profil pour chaque utilisateur et client, dans le but de pouvoir lui faire correspondre des ressources adaptées. Ces ressources peuvent être dynamiquement allouées et doivent être contrôlées suivant une politique déterminée. Le contrôle s'effectuera sur la sécurité, la mobilité et la qualité de service.

Dans le cadre de ce projet, nous montrons comment prendre en compte la mobilité des noeuds. La solution proposée s'appuie sur Mobile IP pour la macro-mobilité (i.e. mobilité inter-domaine) et sur OLSR pour la micro-mobilité (i.e. mobilité intra-domaine). Plus précisément, un réseau d'accès OLSR IP constitue un sous-domaine IP et permet d'accéder à Internet via une passerelle OLSR. Le déplacement d'un mobile à l'intérieur d'un réseau d'accès OLSR IP (mobilité intra-domaine) est géré par le protocole OLSR. Le changement de réseau d'accès OLSR IP (mobilité inter-domaine) est géré par le protocole Mobile IP. Un réseau d'accès OLSR IP est constitué d'une partie fixe filaire reliant une passerelle à des stations de base et d'une partie aléatoire sans fil (ad-hoc) composée des noeuds mobiles. L'architecture proposée est composée de quatre entités fonctionnelles :

- le home agent : serveur de mobilité dans le réseau d'abonnement du mobile ; il implémente Mobile IP ;
- la passerelle OLSR : routeur permettant l'attachement du réseau d'accès OLSR IP à Internet ; il implémente Mobile IP et OLSR ;

- la station de base OLSR : noeud possédant deux interfaces : une interface filaire pour communiquer avec la passerelle et une interface sans fil pour communiquer avec les noeuds mobiles ad-hoc ; il implémente OLSR sur ses deux interfaces ;
- le noeud mobile OLSR : noeud dans le réseau ad-hoc possédant uniquement une interface sans fil ; il implémente Mobile IP et OLSR.

Cette architecture est retenue pour les raisons suivantes :

- elle permet d'une part d'augmenter la bande passante entre la passerelle OLSR et les mobiles, et d'autre part de partager la charge entre les stations de base ;
- elle gère la micro-mobilité de manière transparente pour Mobile IP ;
- elle permet à un mobile de se déplacer hors de portée radio d'une station de base, ceci grâce au protocole OLSR.

Le couplage de Mobile IP avec OLSR permet de gérer la mobilité inter-domaine et intra-domaine. Afin de permettre les déplacements rapides des mobiles à l'intérieur du réseau d'accès OLSR IP, nous proposons l'extension Fast Moving OLSR. Cette extension permet de joindre un mobile en déplacement rapide par l'intermédiaire d'un nombre limité de relais multipoint. L'état des liens entre un mobile rapide et ses relais multipoint sont contrôlés avec une fréquence élevée.

L'intégration de Mobile IP et OLSR est en cours de réalisation sur PC/portable Linux muni d'une carte IEEE802.11. Elle fera l'objet d'une démonstration lors de la clôture du projet ARCADE.

7.2. CELAR

Participants : Cédric Adjih, Marc Badel, Philippe Jacquet, Anis Laouiti, Pascale Minet, Paul Muhlethaler, Adokoé Plakoo.

Le projet Démonstrateur de réseau mobile ad-hoc MANET/OLSR est un projet financé par le CELAR (Centre d'Electronique de l'Armement). Il a débuté en septembre 2002 et a une durée d'un an. Le but de ce projet est de permettre au CELAR de disposer d'une plate-forme permettant (i) de faire des démonstrations en vraie grandeur d'un réseau mobile ad-hoc, (ii) d'évaluer les performances de ce réseau mobile ad-hoc. Les applications visées concernent les réseaux tactiques.

Ce projet comprend deux phases :

- La première phase concerne l'installation et la validation du démonstrateur. Ce démonstrateur est composé de 10 routeurs OLSR et de 8 terminaux (VAIO et iPAQ), routeurs et terminaux sont équipés de cartes 802.11b et dotés d'outils de mesure. L'évaluation de performances est en cours.
- Dans la deuxième phase, nous étudierons les évolutions futures de ce démonstrateur. Deux extensions d'OLSR sont envisagées :
 - nous étudierons comment porter le protocole de routage OLSR sur IPv6 ;
 - nous nous intéresserons également au routage multipoint et au protocole permettant à un terminal ou à un routeur de s'abonner à un groupe.

7.3. FABRIC

Participants : Philippe Jacquet, Amina Naimi.

Les contractants du projet européen FABRIC sont Philips, Thomson Multimedia, INRIA, université technique d'Eindhoven, TNO, MDH, UCL, université de Pise, CSEM.

Ce projet s'intéresse à la conception d'une architecture permettant d'offrir la distribution de vidéo et d'internet sans fil dans une maison (réseau domestique). Le projet Hipercom travaille sur les modèles mathématiques des trafics et de leur contrôles, et participe à la conception de la partie WiFi de la plateforme expérimentale.

7.4. PRIMA

Participants : Marc Badel, Philippe Jacquet, Anis Laouiti, 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 2001 est en collaboration avec :

- COMATIS une PME spécialisée 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 scénarii 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, d'une durée de 27 mois, s'est terminé fin juin 2002 ; 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,
- 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.

Les travaux, sur le projet PRIMA sont achevés, les tâches effectuées ont été les suivantes :

- fin de la spécification de la couche d'accès MAC,
- étude comparative des algorithmes de routage,
- simulation de différents scénarios 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,
- mise en place d'un démonstrateur OLSR constitué de mini routeurs équipés de cartes IEEE 802.11.

8. Actions régionales, nationales et internationales

8.1. Déploiement du réseau sans fil à l'INRIA

Participants : Cédric Adjih, Marc Badel, Saadi Boudjit, Paul Mühlethaler, Adokoé Plakoo.

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.

Des drivers fonctionnent sous Windows (98, NT, 2000, XP). Dans le cadre de ce déploiement, Saadi Boudjit a développé un outil graphique en Java de visualisation du réseau. Ce visualisateur est basé sur une heuristique simple de visualisation de réseau mobile, les noeuds bougent en fonction des liens qui les relient comme si ces derniers étaient soumis à des forces gravitationnelles. Cette heuristique fonctionne assez bien, néanmoins le visualisateur développé permet d'assigner de positions statiques à certains noeuds. Cette approche permet de conjuguer une approche automatique avec une action humaine. Elle permet de prendre en compte certaine spécificité du réseau Hiperlan comme l'existence de lien filaire souvent plus long que les liens radio et d'exploiter les connaissances a priori du réseau. Cet outil de visualisation est modulaire, il peut s'adapter à d'autres types de réseau maillé comme OLSR. Dans le but d'obtenir une administration simple et standardisé du réseau HiPERLAN Saadi Boudjit développe actuellement une adaptation d'un standard « SNMP » aux réseaux locaux sans fil. Le travail consiste en l'extension de la base de données (MIB) de l'agent snmpd en une base contenant une entrée pour le réseau Hiperlan. Ce travail pourra également servir pour un réseau de type OLSR.

8.2. Action Soleil Levant

Participants : Philippe Jacquet [Hipercom], Cédric Adjih [Hipercom], Matthieu Latapy [Hipercom], Laurent Viennot [Hipercom], Michel Morvan [Liafa], Daniel Krob [Liafa], Henri Berestycki [Liafa - Lan], Jean-Loup Guillaume [Liafa], Yacine Boufkhad [Liafa], Christophe Prieur [Liafa], Ha Duong Thi Phan [Liafa], Michel Habib [Lirmm], Lhouari Nourine [Lirmm], Christophe Paul [Lirmm], Bruce Reed [Lirmm - Équipe Combinatoire], Mohamed Bouklit [Lirmm].

Soleil Levant est une action de recherche en coopération en collaboration avec le LIAFA (Université Paris 7) et le LIRMM (Université Montpellier II). Une présentation de l'action se trouve sur le web (adresse : <http://hipercom.inria.fr/soleil/>). Suite à Soleil Levant, une proposition de projet Inria-Liafa a vu le jour : Gyroweb. Gyroweb se situe dans la continuité de la problématique posée dans Soleil Levant autour des graphes dynamiques avec pour principal domaine d'application le graphe du web. Les graphes permettent de modéliser la structure intrinsèque de nombreux systèmes complexes. Le *graphe du web*, par exemple, défini par les liens hypertextes entre les pages web de la toile d'Internet, modélise la structure du web. Quand un tel système évolue au cours du temps, le graphe sous-jacent évolue, c'est ce que nous appelons un *graphe dynamique*. Trouver des méthodes pour analyser, modéliser, représenter l'évolution d'un graphe est au cœur de l'activité que nous proposons. Arriver par exemple à mesurer et à comprendre comment des liens sont rajoutés dans le graphe du web est une information précieuse.

Le principal défi que nous nous lançons est celui de cartographier le web aussi bien à un niveau macroscopique - quelle est la structure globale qui relie les différentes organisations présentes sur le web ? (évolue-t-elle beaucoup ? quelles sont les parties stables ?) - qu'à un niveau microscopique - comment détecter un point chaud d'évolution dans le web ? (par exemple des liens qui s'ajoutent rapidement vers un ensemble de pages, ou un site web en rapide évolution, ou encore une communauté en formation) -. Une *communauté* est une structure transversale dans le web, il s'agit d'un ensemble de pages qui sont fortement reliées les unes aux autres bien qu'appartenant à des sites web différents (des pages traitant d'un même sujet par exemple).

Identifier des communautés, détecter leur évolution est un des challenges de la cartographie du web qui est loin d'être résolu à l'heure actuelle.

Cependant, notre approche se situe plutôt dans un contexte réseau que base de données. En effet, les études que nous envisageons sur le web ont pour base l'utilisation du graphe du web et son évolution. De plus, l'action Soleil Levant a permis de mettre en évidence les problèmes liés à la mesure du graphe du web qui sont principalement liés aux réseaux et à l'organisation d'Internet.

Outre des résultats algorithmiques sur les graphes dynamiques [66], des travaux de modélisations de la dynamique pour le graphe des connexions d'un réseau ad hoc [36] ont été obtenus au cours de Soleil Levant. Des résultats de synthèse sur le graphe du web ont aussi été proposés [45][35].

9. Diffusion des résultats

9.1. Enseignement universitaire

Philippe Jacquet a enseigné les réseaux mobiles ad hoc dans deux formations de Cap Gémini.

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. Elle est également intervenue sur le Routage dans les réseaux mobiles ad-hoc, dans le cadre du DEA Informatique Fondamentale et Applications de l'université de Marne-la-Vallée.

Laurent Viennot enseigne à l'École Polytechnique en tant que Chef de Travaux Pratiques à temps partie et donne un cours sur les réseaux ad hoc et sur le graphe du web au DEA Algo.

Paul Muhlethaler donne un cours à l'ENSTA sur l'accès multiple « protocoles et modélisation » cours ES 304. Il a également enseigné la norme IEE 802.11 à l'ENST en Bretagne.

Thomas Clausen a donné des cours de « Systèmes Distribués » à l'Université de Aalborg au Danemark.

9.2. Participation à des colloques, séminaires, invitations

Philippe Jacquet a donné une conférence plénière, invité au colloque AofA 2002 à Strobl, Autriche. Il a participé à la journée modélisation de TCP organisée à l'ENS. Il a également participé aux réunions de l'IETF qui se sont déroulées à Minneapolis, et Atlanta. Philippe Jacquet a participé au *mini-workshop* sur les réseaux mobiles organisé par l'University Central Florida.

Pascale Minet a été membre du comité de programme de :

- RTS'2002 : Real-Time Systems, conférence qui s'est déroulé en mars 2002 à Paris.
- ICWLHN 2002 : Int. Conf. on Wireless LANs and Home Networks, Atlanta, Georgia, 2002.
- SNPD'02 : 3rd int. conf. on Software engineering, artificial intelligence, Networking and Parallel/Distributed computing, Spain 2002.
- ICIS'02 : 2nd Int. conf. on Computer and Information Science, Korea 2002.

Paul Mühlethaler a été invité au séminaire medhoc 2002 le 6 septembre 2002 pour présenter des résultats de simulation du protocole de routage dans les réseaux ad hoc OLSR. Il a présenté un état de l'art sur la norme 802.11 et ses différentes applications à la conférence DNAC 2002. (De nouvelles architectures de communication), le 3 décembre 2002 à Paris.

Anis Laouiti a présenté la solution MOLSR aux journées TAROT organisées le mois de Mars 2001 ; il a aussi présentée celle-ci en conjonction avec WIGMP durant le meeting de Londres au groupe MANET.

Laurent Viennot a été invité à présenter ses travaux sur le graphe du web au séminaire Graphe du Web du LRI le 18 décembre 2002 et dans l'AS Algorithmique des grands graphes le 6 décembre 2002. Il a aussi présenté ses travaux sur les multipoints relais pour les réseaux ad hoc à la conférence HICCS'35 à Hawaï en janvier 2002.

10. Bibliographie

Bibliographie de référence

- [1] C. ADJIH, L. GEORGIADIS, P. JACQUET, W. SZPANKOWSKI. *Is the internet fractal ?*. in « SODA 2002 », San Francisco, USA, 2002.
- [2] C. ADJIH, P. JACQUET, N. VVEDENSKAYA. *Performance evaluation of a single queue under multi-user TCP connections*. rapport technique, INRIA, March, 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4141.html>.
- [3] T. CLAUSEN, P. JACQUET, A. LAOUITI, P. MÜHLETHALER, P. MINET, A. QAYYUM. *draft-ietf-manet-olsr-07.txt*. in « Optimized Link State Routing (OLSR) IETF draft », MANET working group, 2002.
- [4] L. GEORGE, S. KAMOUN, P. MINET. *First come first served : some results for real-time scheduling*. in « ISCA 14th int. conf. on Parallel and Distributed Computing System PDCS'2001 », Dallas, Texas, August, 2001.
- [5] L. GEORGE, D. MARINCA, P. MINET. *A solution for a deterministic QoS in multimedia systems*. in « International Journal on Computer and Information Science », numéro No. 3, volume Vol. 1, October, 2000, pages 106-119.
- [6] P. JACQUET. éditeurs K. PARK, W. WILLINGER., *Traffic and queueing from an unbounded set of independent memoryless on/off sources*. Wiley, 2000, chapitre 11, pages 269-283.
- [7] 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.
- [8] P. JACQUET. *Long term dependences and heavy tails in traffics and queues generated by memoriless on/off sources in series*. rapport technique, numéro RR-3516, INRIA, 1998, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3516.html>.
- [9] P. JACQUET, V. JOLY. *Capacity of retro-information channels*. in « 2000 IEEE International Symposium on Information Theory », pages 182, Sorrento, Italie, June, 2000.
- [10] P. JACQUET, P. MINET, A. LAOUITI, L. VIENNOT, T. CLAUSEN, C. ADJIH. *Multicast Optimized Link State Routing*. rapport technique, IETF, December, 2001, draft-ietf-manet-olsr-molsr-01.txt.
- [11] P. JACQUET, P. MINET, P. MÜHLETHALER, N. RIVIERRE. *Data transfer for HIPERLAN*. in « Wireless Personal Communications », numéro 4, volume 1, January, 1997, special issue on the HIgh PErformance Radio Local Area Network (HIPERLAN).
- [12] P. JACQUET, P. MINET, P. MÜHLETHALER, N. RIVIERRE. *Increasing reliability in cable-free radio LANs - low level forwarding in HIPERLAN*. in « Wireless Personal Communications », numéro 4, volume 1, January, 1997, special issue on the HIgh PErformance Radio Local Area Network (HIPERLAN).
- [13] P. JACQUET, P. MINET, P. MÜHLETHALER, N. RIVIERRE. *Priority and collision detection with active signaling - the channel access mechanism of HIPERLAN*. in « Wireless Personal Communications », numéro 4, volume 1, January, 1997, special issue on the HIgh PErformance Radio Local Area Network (HIPERLAN).

- [14] P. JACQUET, W. SZPANKOWSKI. *Analytical depoissonization and its applications*. in « Fundamental Study », numéro 1-2, volume 201, 1998.
- [15] P. JACQUET, W. SZPANKOWSKI. *Entropy calculation via analytic depoissonization*. in « IEEE Transaction on Information Theory », numéro 4, volume 45, May, 1999.
- [16] S. KAMOUN, P. MINET. *Periodic scheduling of distributed tasks with consistency and hard real-time constraints*. in « International journal of computer and information science », numéro 3, volume 2, September, 2001, pages 106-118, ISSN 1525-9293.
- [17] A. LAOUITI, A. QAYYUM, L. VIENNOT. *Multipoint Relaying : An Efficient Technique for Flooding in Mobile Wireless Networks*. in « 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'2001) », IEEE Computer Society, 2001.
- [18] 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.
- [19] P. MUHLETHALER. *Contribution à la conception et à l'analyse d'algorithmes pour l'accès multiple et l'ordonnement sous contraintes temporelles*. thèse de doctorat, Université de Versailles Saint-Quentin, juillet, 1998, mémoire d'habilitation.
- [20] A. QAYYUM. *Analysis and evaluation of channel access schemes and routing protocols in wireless LANs*. thèse de doctorat, Université de Paris Sud, November, 2000.
- [21] RES-10. *Radio Equipment and Systems (RES) ; High Performance Radio Local Area Network (HIPERLAN) ; Functional specification*. rapport technique, ETSI, June, 1996.
- [22] L. VIENNOT. *Complexity Results on Election of Multipoint Relays in Wireless Networks*. rapport technique, numéro RR-3584, INRIA Rocquencourt, 1998, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3584.html>.

Livres et monographies

- [23] K. A. AGHA, G. PUJOLLE, D. ZEGHLACHE. *VCB : an Efficient Resource Sharing Scheme for Cellular Mobile Systems*. volume 19(1), January, 2002.
- [24] P. MUHLETHALER. *802.11 et les Reseaux sans Fil*. 2002.
- [25] *Quatrièmes Rencontres Francophones sur les aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel)*. éditeurs T. NOEL, L. VIENNOT., INRIA, may, 2002, ISBN 2-7261-1204-8.

Thèses et habilitations à diriger des recherche

- [26] A. LAOUITI. *Unicast et Multicast dans les réseaux ad hoc sans fil*. thèse de doctorat, Université de Versailles-Saint Quentin, Juillet, 2002.

Articles et chapitres de livre

- [27] A. MERCIER, P. MINET, L. GEORGE, G. MERCIER. *Adequacy between multimedia application requirements and wireless protocols features*. in « IEEE Wireless Communications », December, 2002.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [28] K. A. AGHA, T. AL-MESHHADANY, L. PERATO. *Resource allocation based on handover prediction in WCDMA*. in « IEEE VTC'02-Fall : Vehicular Technology Conference », IEEE Publisher, Vancouver, Canada, September, 2002.
- [29] T. AL-MESHHADANY, K. A. AGHA. *Analysis of the code allocation mechanism in the WCDMA*. in « IEEE MWCN'02 : International Workshop On Mobile and Wireless Communications Networks », Stockholm, Sweden, September, 2002.
- [30] T. AL-MESHHADANY, K. A. AGHA. *VCB by mean of soft2hard handoff in WCDMA*. in « IEEE MWCN'02 : International Workshop On Mobile and Wireless Communications Networks », Stockholm, Sweden, September, 2002.
- [31] H. BADIS, K. A. AGHA. *Un modèle générique pour la simulation du protocole de routage OLSR*. in « DNAC'02 : De Nouvelles Architectures pour les Communications », Paris, France, December, 2002.
- [32] M. BENZAID, P. MINET, K. A. AGHA. *A framework for integrating Mobile IP and OLSR ad hoc networking for future wireless mobile systems*. in « 1st Mediterranean Ad-Hoc Networks workshop, Med-Hoc-Net'02 », Sardinia, Italy, September, 2002.
- [33] M. BENZAID, P. MINET, K. A. AGHA. *A Framework for Integrating Mobile-IP and OLSR Ad-Hoc Networking for Future Wireless Mobile Systems*. in « Med-Hoc-Net'02 », Sardinia, Italy, September, 2002.
- [34] M. BENZAID, P. MINET, K. A. AGHA. *Integrating fast mobility in the OLSR routing protocol*. in « 4th IEEE int. conf. on Mobile and wireless Communications networks, MCWN02 », Stockholm, Sweden, September, 2002.
- [35] M. BOUKLIT, A. JEAN-MARIE. *Une analyse de PageRank, une mesure de popularité des pages web*. in « Quatrièmes Rencontres Francophones sur les aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel) », may, 2002, Mèze.
- [36] T. CLAUSEN, P. JACQUET, L. VIENNOT. *Ad-hoc Network Protocols versus Mobility and Data Traffic Activity*. in « Med-hoc-Net », september, 2002, Sardaigne.
- [37] T. CLAUSEN, P. JACQUET, L. VIENNOT. *Comparative Study of CBR and TCP Performance of MANET Routing Protocols*. in « Workshop MESA », 2002, ETSI.
- [38] T. CLAUSEN, P. JACQUET, L. VIENNOT. *Comparative Study of Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks*. in « Med-hoc-Net », september, 2002, Sardaigne.

- [39] T. CLAUSEN, P. JACQUET, L. VIENNOT. *Investigating the Impact of Partial Topology in Proactive MANET Routing Protocols*. in « The 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC) », october, 2002, Honolulu.
- [40] T. CLAUSEN, P. JACQUET, L. VIENNOT. *Optimizing Route Length in Reactive Protocols for Ad Hoc Networks*. in « Med-hoc-Net », september, 2002, Sardaigne.
- [41] T. CLAUSEN, N. LARSEN, T. OLESEN, L. VIENNOT. *Investigating Data Broadcast Performance in Mobile Ad Hoc Networks*. in « The 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC) », october, 2002, Honolulu.
- [42] L. GEORGE, S. MARTIN, P. MINET. *End-to-end real-time guarantees for the EF traffics in the DiffServ model*. in « 3rd int. conf. on Software engineering, artificial intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing, SNPD02 », Madrid, Spain, June, 2002.
- [43] L. GEORGE, S. MARTIN, P. MINET. *Ordonnancement FIFO et garantie déterministe de qualité de service en environnement distribué*. in « 10ème conférence internationale sur les systèmes temps réel, RTS'2002 », Paris, France, Mars, 2002, Prix de la meilleure communication.
- [44] L. GEORGE, P. MINET, D. MARINCA. *A Fibre Channel dimensioning for a multimedia system with deterministic QoS*. in « Networking'2002 », Pisa, Italy, May, 2002.
- [45] J.-L. GUILLAUME, M. LATAPY. *The Web Graph : an Overview*. in « Quatrièmes Rencontres Francophones sur les aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel) », may, 2002, Mèze.
- [46] J.-L. GUILLAUME, M. LATAPY, L. VIENNOT. *Efficient and Simple Encodings for the Web Graph*. in « The Third International Conference on Web-Age Information Management (WAIM) », august, 2002, Beijing.
- [47] P. JACQUET. *Poissonization and depoissonization, or how to enumerate the bones of a fish without killing it*. in « Plenary speaker AofA 2002 », Strobl, AUTRICHE, 2002.
- [48] P. JACQUET. *TCP and long term dependences*. in « Performance 2002 », Rome, ITALIE, 2002, invited pannel.
- [49] P. JACQUET, A. LAOUTI, P. MINET, L. VIENNOT. *Performance Analysis of OLSR Multipoint Relay Flooding in Two Ad Hoc Wireless Network Models*. in « The second IFIP-TC6 NETWORKING Conference », may, 2002, Pise.
- [50] P. JACQUET, P. MUHLEHALER, T. CLAUSEN, A. LAOUTI, A. QAYYUM, L. VIENNOT. *Optimized link state routing for ad hoc network best Paper Award 2001*. in « INMIC 2001 », 2001.
- [51] P. JACQUET, W. SZPANKOWSKI. *A combinatorial problem arising in information theory : precise minimax redundancy for Markov sources*. in « Colloquium on Mathematics and Computer Science : Tree, Combinatorics and Probabilities, pp311-328, Birkhauser », Versailles, FRANCE, 2002.
- [52] A. LAOUTI, P. MUHLEHALER, A. NAJID, E. PLAKOO. *Simulation Results of the OLSR Routing Protocol for Wireless Network*. in « Medoc 2002 », 2002.

- [53] A. MERCIER, P. MINET, L. GEORGE, G. MERCIER. *Worst case real-time analysis of different polling schemes in a Bluetooth piconet*. in « 1st Mediterranean Ad-Hoc Networks workshop, Med-Hoc-Net'02 », Sardinia, Italy, September, 2002.
- [54] P. MUHLETHALER. *La norme 802.11 des bases aux derniers développements : histoire d'un succes, la conquete de nouvelles application*. in « DENAC », Paris, FRANCE, 2002.
- [55] A. MUNARETTO, H. BADIS, K. A. AGHA, G. PUJOLLE. *A Link-state QoS Routing Protocol for Ad Hoc Networks*. in « IEEE MWCN'02 : International Workshop On Mobile and Wireless Communications Networks », Stockholm, Sweden, September, 2002.
- [56] W. S. P. JACQUET, I. APOSTOL. *A universal predictor based on pattern matching for mixing sources*. in « ISIT 2002 », Lausanne, SUISSE, 2002.
- [57] L. PERATO, K. A. AGHA. *Handover Prediction for Cellular Systems in a Multi-Services Context*. in « IEEE WPMC'02 : International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications », Hawaii, USA, October, 2002.
- [58] L. PERATO, K. A. AGHA. *Handover Prediction : User Approach versus Cell Approach*. in « IEEE MWCN'02 : International Workshop On Mobile and Wireless Communications Networks », Stockholm, Sweden, September, 2002.
- [59] L. PERATO, K. A. AGHA. *Web access for the UMTS air interface by using mobile agents*. in « IEEE WCNC'02 : Wireless Communications and Networking Conference », IEEE Publisher, Orlando, USA, March, 2002.
- [60] A. QAYYUM, Y. TOOR, P. JACQUET, P. MUHLETHALER, T. CLAUSEN. *Sleep Mode Operation of a Routing Protocol in Mobile Ad Hoc Networks*. in « IEEE ICN and ICWLHN 2002 », Atlanta USA, 2002.
- [61] A. QAYYUM, Y. TOOR, P. JACQUET, P. MUHLETHALER. *Power conservation in OLSR for ad hoc networks, World Multiconference on Systemic, Cybernetics and Informatics*. in « SCI 2002 », Orlando, USA, 2002.
- [62] A. QAYYUM, Y. TOOR, P. JACQUET, P. MUHLETHALER. *Sleep mode operation of a routing protocol for ad hoc network*. in « Networks 2002 », Atlanta, USA, 2002.
- [63] G. VIVIER, C. BONNET, K. A. AGHA. *SAMU Project : Tests and Improvements of UMTS for Users in a Car*. in « IEEE VTC'02-Spring : Vehicular Technology Conference », IEEE Publisher, Birmingham, Alabama, May, 2002.

Rapports de recherche et publications internes

- [64] G. ALLARD, K. A. AGHA. *Analysis of the OSSC mechanism in a non-synchronous transmission environment*. rapport technique, numéro 1312, LRI : Laboratoire de Recherche en Informatique, April, 2002, <http://www.lri.fr>.
- [65] M. BENZAID, P. MINET, K. A. AGHA. *Integrating fast mobility in the OLSR routing protocol*. rapport technique, numéro 4510, INRIA, June, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4510.html>.

- [66] A. FERREIRA, L. VIENNOT. *RR-4403 : A Note on Models, Algorithms, and Data Structures for Dynamic Communication Networks*. rapport technique, numéro RR-4403, INRIA, mars, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4403.html>.
- [67] P. JACQUET, W. SZPANKOWSKI, I. APOSTOL. *A universal predictor based on pattern matching*. rapport technique, IEEE transaction on information theory, 2002.
- [68] F. MATHIEU, L. VIENNOT. *Structure intrinsèque du graphe du web*. rapport technique, numéro RR-4663, INRIA, december, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4663.html>.

Divers

- [69] G. ALLARD. *Rapport de DEA : Spécification et simulation d'un protocole de routage réactif pour les réseaux ad-hoc utilisant la technique de relais multipoint*. rapport technique, Université de Paris VI, 2002.

Bibliographie générale

- [70] L. BRESLAU, S. JAMIN, S. SHENKER. *Measurement-based admission control : what is the research agenda ?*. in « Proc. Int'l Workshop on Quality of Service '99 », London, UK, May, 1999.
- [71] P. JACQUET, A. LAOUITI. *Analysis of mobile ad-hoc network routing protocols in random graph models*. rapport technique, numéro 3835, INRIA, décembre, 1999, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3835.html>.
- [72] éditeurs J. ROBERTS, U. MOCCI, J. VIRTAMO., *Action COST 242 - Performance Evaluation and Design of Broadband Multiservice Networks*. Springer-Verlag, 1996.