

Projet HIPERCOM

Communication à hautes performances

Rocquencourt

THÈME 1B



*R*apport
d'Activité

2001

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
3	Fondements scientifiques	5
3.1	La théorie analytique de l'information	5
3.1.1	Calcul d'entropies, algorithmes de compression, dépoissonisation	6
3.1.2	Prédicteurs, rétro-information	6
3.1.3	Théorie des graphes, complexité	7
3.1.4	Analyse pire cas des algorithmes et algèbre (max,+)	7
3.2	Méthodologie de l'évaluation des algorithmes de télécommunications	8
3.2.1	Analyse déterministe des performances des algorithmes	9
3.2.2	Analyse probabiliste des performances des algorithmes	9
3.2.3	Simulation d'algorithmes de télécommunication	10
3.2.4	Algorithmes d'ordonnancement et d'attribution de priorités	11
3.3	Modélisation de trafics et d'architectures de réseaux	11
3.3.1	Les trafics On/Off	12
3.3.2	Étude des files d'attente dans les nœuds de commutation	12
3.3.3	Étude des files d'attente sous TCP	13
3.3.4	L'architecture fractale du réseau internet	13
3.4	Conception et implémentation d'algorithmes	14
4	Domaines d'applications	15
4.1	Réseaux câblés	15
4.2	Contrôle statistique de la qualité de service	15
4.2.1	Contrôle d'admission stochastique dans les réseaux	15
4.2.2	Contrôle d'admission dans les réseaux câblés	16
4.2.3	Multimédia et compression adaptative	16
4.3	Garantie déterministe de la qualité de service	16
4.3.1	Systèmes distribués temps réel avec objets persistants	16
4.3.2	Systèmes multimédia de vidéo à la demande	17
4.4	HIPERLAN	17
4.5	Les réseaux sans fil ad-hoc	17
5	Logiciels	18
5.1	Logiciel de routage sans fil : Hiperlan	18
5.2	Logiciels de routage sans fil (réels ou simulateurs) : OLSR	19
5.3	Autres logiciels	20
6	Résultats nouveaux	20
6.1	Ordonnancement distribué temps réel sérialisable de tâches : étude de faisabilité	20
6.2	Ordonnancement FIFO, monoprocesseur ou distribué : étude de faisabilité	21
6.3	Ordonnancement centralisé non-préemptif	21

6.4	Garantie déterministe de la qualité de service dans les systèmes multimédia . . .	22
6.5	Ordonnancement temps réel dans un système multimédia de vidéo à la demande	22
6.6	Application de la théorie de l'information à la compression	23
6.7	Réseaux câblés et multimédia	23
6.8	Étude des protocoles en arbre pour la couche d'accès multiple	24
6.9	Protocole d'accès en arbre appliqué à UMTS	24
6.10	Analyse de protocoles d'accès au medium sans fil	24
6.11	Réutilisation spatiale dans les réseaux radio locaux	25
6.12	Réservation de bande passante dans les réseaux radio ad-hoc	25
6.13	Analyse des performances de la diffusion par relais multipoint	26
6.14	Analyse des surcoûts de trafic des protocoles de routage pour les réseaux radio ad-hoc	27
6.15	Analyse et évaluation de protocoles d'accès au canal et de protocoles de routage dans les réseaux locaux sans fil	27
6.16	Gestion de la macro et de la micro-mobilité	28
6.17	Gestion de la mobilité rapide	29
6.18	Présentation du protocole MOLSR	29
6.19	Liens unidirectionnels dans les réseaux ad-hoc	30
6.20	Vérification de protocole de routage sans fil	31
6.21	Modélisation de TCP/IP	31
6.22	Caractéristiques du graphe multicast de l'Internet	32
6.23	Codage du graphe du web	32
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	33
7.1	ARCADE	33
7.2	BRAIN	34
7.2.1	Architecture de qualité de service dans les réseaux mobiles	34
7.3	I3	34
7.4	PRIMA	35
8	Actions régionales, nationales et internationales	36
8.1	Déploiement du réseau sans fil à l'INRIA	36
8.2	Action Soleil Levant	37
9	Diffusion de résultats	38
9.1	Enseignement universitaire	38
9.2	Participation à des colloques, séminaires, invitations	38
10	Bibliographie	39

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 [depuis le 1er août]

Lydie Vincensini [jusqu'au 3 novembre]

Personnel Inria

Cédric Adjih [CR à partir du 1er octobre]

Marc Badel [Ingénieur Principal de l'Armement]

Pascale Minet [CR]

Laurent Viennot [CR]

Ingénieur associé

Saadi Boudjit

Collaborateur extérieur

Khaldoun Al Agha

Chercheurs invités

Leonidas Georgiadis [Professeur à l'Université de Thessalonique, Grèce, le 8 et 9 mars et du 23 au 29 juin]

Wojciech Szpankowski [Professeur à l'Université Purdue, Indiana, USA, du 5 au 9 mars et du 16 au 23 juin]

Nikita Vvedenskaya [Professeur à l'Académie Russe des Sciences, Institute of Information Transmission Problems, Moscou, du 15 octobre au 15 novembre]

Chercheur post-doctorant

Matthieu Latapy [depuis le 1er septembre]

Ingénieurs experts

François Dumontet [jusqu'au 28 février 2001]

Georges Gyory [à plein temps sur IMARA à partir du 22 mars 2001]

Abdellah Najid [jusqu'au 22 octobre 2001]

Adokoé Plakoo

Amir Qayyum [jusqu'au 31 janvier 2001]

Doctorants

Cédric Adjih [Bourse Inria, Université de Versailles-Saint Quentin, jusqu'en juin 2001]

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

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

Jean Loup Guillaume [depuis le 1er septembre]

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

Stagiaires

Reda Benzair [stage DEA, Université de Versailles-Saint Quentin, du 1er avril au 30 septembre]

Said Bouhaik [stage DEA, Université de Versailles-Saint Quentin, du 1er avril au 30 septembre]

Salima Bouzoual [stage DEA I.D., Université de Paris-Sud (Orsay), du 1er mai au 30 octobre]

Walid Driss [stage ENSTA, École Polytechnique]

Michael Hyart [Université de Versailles-Saint Quentin, du 4 avril au 5 juillet]

Nicolai Larsen [Université d'Aalborg (Danemark), à partir du 1er octobre]

Thue Olesen [Université d'Aalborg (Danemark), à partir du 1er octobre]

2 Présentation et objectifs généraux

Le projet HIPERCOM se donne pour objectif de concevoir, d'évaluer et d'optimiser les algorithmes de télécommunications. Les domaines d'intervention privilégiés sont les protocoles, les nouveaux standards de télécommunications et la gestion des qualités de 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 (protocole de routage HIPERLAN, protocole de routage OLSR proposé dans le groupe MANet de l'IETF),
- les algorithmes d'ordonnancement et d'attribution de priorités prenant en compte les qualités de service des applications (démonstrateur CATSERVER, AEE).
- algorithmes de compression vidéo (démonstrateur CATSERVER),

HIPERCOM participe à différents *projets européens* (BRAIN), *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.

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 a proposé le protocole de routage OLSR [46, 48] dans le groupe MANet (réseaux mobiles ad-hoc) de l'IETF.

3 Fondements scientifiques

3.1 La théorie analytique de l'information

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

Résumé : *La théorie analytique de l'information constitue le fondement scientifique du projet HIPERCOM. La terminologie a été introduite de concert avec W. Szpankowski de l'Université de Purdue. C'est une sorte de boîte à outils pour l'analyse des algorithmes. À cheval entre l'analyse d'algorithmes et la théorie de l'information, elle utilise abondamment l'analyse complexe pour obtenir des résultats fins sur les performances des protocoles de communication. La flexibilité des modèles analytiques facilite l'identification des processus déterminants dans le comportement des algorithmes. En l'occurrence, la détermination précise des comportements asymptotiques est une source précieuse de renseignements dans les problèmes de grande taille. De cette manière les algorithmes peuvent être efficacement optimisés là où des simulations auraient été limitées par le mur de la complexité.*

3.1.1 Calcul d'entropies, algorithmes de compression, dépoissonisation

L'entropie est la mesure théorique de la quantité d'information susceptible d'être stockée sur un support ou d'être transmise sur un canal. Elle permet donc de quantifier la capacité du support ou du canal. Les échanges entre ordinateurs nécessitent des modélisations très raffinées dans lesquelles le calcul précis de l'entropie revêt une importance considérable. Nous avons calculé les développements asymptotiques des entropies de sources d'information binomiales [7]. La méthodologie suivie est celle de la dépoissonisation [6] 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 [6]. Cet outil permet d'extraire le comportement asymptotique des coefficients des séries exponentielles à partir de l'asymptotique de la fonction génératrice dans un cône du plan complexe. Cette méthodologie se situe dans la perspective directe des travaux du projet Algorithmes sur les séries génératrices et prend sa source dans les travaux de D. Knuth. Le modèle analytique reprend les séries génératrices sur les arbres digitaux de recherche et donne lieu à l'analyse asymptotique de solutions d'équations différentielles aux différences.

3.1.2 Prédicteurs, rétro-information

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

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

Philippe Jacquet a montré que le prédicteur basé sur la détection du plus long suffixe répliqué est fidèle pour tout modèle de Bernoulli et asymptotiquement fidèle pour le modèle de Markov, si la recherche de motif commence à partir de la gauche de la séquence. 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.

La rétro-information est une tentative de modélisation de l'information sous certaines hypothèses extrapolées de la physique moderne (notamment la physique quantique). En particulier la violation d'*unitarité* permet en principe des transferts d'information en sens inverse du temps (sur de courtes échelles). Sous ces hypothèses, les transferts d'information bénéficient de propriétés intéressantes et donnent lieu à des combinaisons inédites en théorie de l'information [2].

3.1.3 Théorie des graphes, complexité

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

Le réseau téléphonique mobile offre une palette de problèmes de recherche intéressants. Par exemple, les protocoles de synchronisation des balises des téléphones portables mettent en jeu des algorithmes de calcul parallèle des composantes connexes. De nombreux résultats équivalents découlent des études sur les partitions dans les graphes. Par ailleurs, les résultats sur la complexité des algorithmes sont en général énoncés sur les algorithmes de graphes. La connaissance de ces problématiques est nécessaire pour éviter de tomber dans les pièges NP-durs de l'algorithmique. Par exemple, Laurent Viennot [15] a montré que l'algorithme de sélection optimale des relais multipoints d'un nœud sans fil est NP-dur grâce à l'analogie avec le problème classique de la couverture minimale. Par contre, il a montré que l'heuristique proposée par Amir Qayyum [13] est optimale à un facteur multiplicatif $\log n$ près.

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

Les outils analytiques comme les séries génératrices et la théorie de l'information sont particulièrement utiles pour l'analyse des algorithmes en moyenne et en distribution lorsqu'ils sont soumis à des événements aléatoires. Il est tout aussi intéressant d'évaluer les algorithmes sous des 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 $(\max, +)$.

3.2 Méthodologie de l'évaluation des algorithmes de télécommunications

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

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

Résumé :

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

3.2.1 Analyse déterministe des performances des algorithmes

Le domaine de l'évaluation déterministe des 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 (voir paragraphes 6.1, 6.2), ou en cours de fonctionnement du système pour réaliser un contrôle d'admission (voir paragraphe 6.4).

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) [30] et pour un ordonnancement périodique selon une séquence prédéfinie [26] ;
- 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 (voir paragraphe 6.4).

3.2.2 Analyse probabiliste des performances des algorithmes

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

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

On distingue les protocoles à réservation dans lesquels le jeton de réservation est soumis pendant une période à des collisions, et les données qui sont transmises dans des périodes protégées. Plus les données sont importantes par rapport au slot de réservation, plus la bande passante est utilisée efficacement. Les protocoles CSMA-CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*) sont des protocoles à réservation particuliers où le début de paquet joue le rôle de jeton de réservation, le corps du paquet étant protégé des collisions subséquentes grâce à la présence de sa porteuse. Certains résultats sont décrits avec détails dans les thèses d'habilitation de Paul Mühlethaler et Philippe Jacquet, soutenues en 1998 [12, 8].

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).

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 [8].

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. 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 inférieure 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 aéronefs. 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.

3.2.3 Simulation d'algorithmes de télécommunication

Certains algorithmes de télécommunication sont difficiles à évaluer. C'est par exemple le cas pour les protocoles de routage. En fait ils opèrent sur des topologies de réseaux non triviales qui rendent difficile l'application de modèles analytiques. Dans ce cas on a recours à des simulations par ordinateurs. Le projet se constitue une bibliothèque de noyaux de simulation. Il est indispensable de maîtriser un outil de simulation standard pour pouvoir participer aux

comparaisons des résultats dans les comités de normalisation. Ainsi la politique de diffusion sans fil par relais multipoints a été simulée par Anis Laouiti [34]. Ses résultats ont montré que cette politique pouvait économiser jusqu'à 80 % du trafic généré par une inondation normale. Les simulations ont porté sur des réseaux dont l'effectif atteignait le millier d'unités.

3.2.4 Algorithmes d'ordonnancement et d'attribution de priorités

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

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

L'ordonnancement global est moins couvert et n'est vraiment exploré que depuis les débuts d'ATM et de l'Internet nouvelle génération. En général, l'ordonnancement global est réalisé au moyen de réservations et de priorités, donc à partir de connaissances partielles de l'état instantané du réseau.

Une stratégie avantageuse consiste à utiliser l'échéance de validité du paquet pour déterminer les priorités de transmission. Cette politique d'ordonnancement a été introduite par l'équipe Hipercom-Reflecs pour la gestion des contraintes temps réel dans la norme HIPER-LAN [14]. Cette politique est aussi utilisée pour la gestion des qualités de service dans le QoS-proxy construit par le projet CATSERVER. L'échéance du paquet est aussi un paramètre du standard IPv6 et peut donc avantageusement être utilisée pour gérer les qualités de service dans les routeurs.

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 [1]. 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 [11]. Le respect des échéances de terminaison de tâches sporadiques ayant une structure en graphe fait l'objet de travaux [26], [30].

3.3 Modélisation de trafics et d'architectures de réseaux

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

Résumé : *L'émergence et la montée en charge des réseaux de données, comme le Web sur l'Internet, appelle de nouveaux modèles de trafic adaptés au profil de ces nouveaux services. Par exemple, le trafic sur les réseaux de données est très*

sporadique et donne lieu à des corrélations à long terme qui n'apparaissent pas dans les modèles classiques. De même, les nouvelles architectures, notamment dans les réseaux ATM, viennent enrichir le panorama. Par ailleurs l'émergence de ces nouveaux modèles, plus difficiles que les modèles classiques, oblige un renforcement des techniques d'évaluation des performances et la mise en œuvre d'outils puissants empruntés à la théorie analytique de l'information.

3.3.1 Les trafics On/Off

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

Les conséquences pratiques concernent essentiellement les dimensionnements des tampons au niveau des routeurs IP ou dans les commutateurs ATM. En effet, des analyses de files d'attente simples montrent que les niveaux d'occupation des files d'attente suivent alors une loi à décroissance polynomiale alors que, sous le modèle poissonnien uniforme, la décroissance est exponentielle.

On analyse [9] 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 [10].

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

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

3.3.3 Étude des files d'attente sous TCP

Riche de l'expérience acquise dans l'étude des files d'attente dans les nœuds de commutation, l'équipe s'est lancée dans le problème difficile de l'analyse des performances du protocole TCP/IP en réseau routé. Le protocole TCP contrôle le flux des connexions de données en faisant varier les tailles de fenêtre de transmission. Le modèle retenu est celui d'une file d'attente entre un réseau rapide et un réseau lent. Les serveurs sont sur le réseau rapide et les clients sont sur le réseau lent. Ceci est une situation réaliste dans la mesure où les serveurs des distributeurs Internet sont souvent localisés 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 Vvedenskaya et Philippe Jacquet travaillent actuellement sur le modèle asymptotique où le nombre de connexions croît linéairement avec la taille du buffer sur le goulot d'étranglement. Sous certaines conditions, il apparaît que la taille de la place résiduelle dans le buffer tend vers une loi exponentielle. Il apparaît aussi que la distribution des tailles des fenêtres est très étalée, notamment en direction des petites fenêtres. Cet étalement est particulièrement pénalisant pour l'équité entre les clients, puisque les débits instantanés sont proportionnellement très étalés. On constate en conséquence que la distribution du temps d'envoi d'un fragment de fichier est à queue lourde. L'analyse est contrôlée par des simulations sous NS du protocole TCP [44], ainsi que par des résolutions numériques des équations obtenues après modélisation.

3.3.4 L'architecture fractale du réseau internet

Quand un service d'information doit envoyer le même contenu à un groupe d'abonnés, il recourt naturellement à un mode de distribution *multicast* si le réseau le permet (par exemple, la télévision). Le protocole internet a été initialement conçu pour des communications sous le mode *unicast*. Des études importantes sont menées afin de standardiser des protocoles de

transfert multicast les plus efficaces possible. Les enjeux sont extrêmement importants car le gain de capacité sur les liens physiques est très 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 $\alpha \approx 0.11$) [41].

3.4 Conception et implémentation d'algorithmes

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

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

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

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

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

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

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

4 Domaines d'applications

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 :

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

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

4.2 Contrôle statistique 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^[RMV96]. 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'ordonnancement^[BJS99].

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.

[RMV96] J. ROBERTS, U. MOCCI, J. VIRTAMO (éditeurs), *Action COST 242 - Performance Evaluation and Design of Broadband Multiservice Networks*, Springer-Verlag, 1996.

[BJS99] 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.

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.

4.4 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 travailler 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 PRAXI-TELE, 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.

Par ailleurs, 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.

4.5 Les réseaux sans fil ad-hoc

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

Lorsque le réseau ad-hoc est géographiquement étendu, certaines stations peuvent être hors de portée les unes des autres. Ce cas nécessite l'emploi d'un routage interne des messages par des stations intermédiaires. La gestion de ce routage consiste à établir une sorte d'architecture molle où l'on doit tenir compte de la mobilité des stations et de la versatilité du médium

physique. La modélisation en est assez difficile. Un groupe de travail a été créé dans ce sens à l'IETF (MANet). L'équipe HIPERCOM y participe très activement sous le couvert de l'action incitative COMMOBILE (responsable Afonso Ferreira). Amir Qayyum a rédigé le draft du protocole fédérateur IMEP de MANet [CPPQ98]. Philippe Jacquet, Paul Mühlethaler et Amir Qayyum sont co-auteurs du draft du protocole OLSR (*Optimized Link State Routing* [46]). Ce draft a été renouvelé en novembre. Il existe deux classes de protocoles de routage : les protocoles réactifs qui recherchent les routes à la demande, et les protocoles pro-actifs qui établissent les routes à l'avance grâce à une gestion périodique des tables de routage. Le protocole OLSR est un protocole pro-actif. Les deux techniques, routage proactif et routage réactif, ont leurs avantages et inconvénients, selon le type d'application et l'environnement d'implémentation. A. Qayyum et A. Laouiti ont fait des simulations pour comparer OLSR, qui est un protocole proactif, avec un protocole réactif : DSR (*Dynamic Source Routing*). DSR est aussi un protocole candidat à MANet. Les résultats ont montré que les protocoles proactifs sont performants et présentent des domaines d'application importants dans les réseaux sans fil mobiles.

La comparaison entre OLSR et DSR a également montré que lorsque le nombre de nœuds du réseau devient important, les performances de OLSR dépassent celles de DSR. En outre, lorsque des liens de communication asymétriques apparaissent dans le réseau à cause de phénomènes de *fading*, d'interférences ou d'autres perturbations dans la propagation des ondes, le protocole OLSR se stabilise mieux que le protocole DSR [JL99].

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 Logiciel de routage sans fil : Hiperlan

« Hiperlan », en réalité la partie routage uniquement de la norme Européenne de réseaux sans fil Hiperlan [14], 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 :

[CPPQ98] S. CORSON, S. PAPADEMETRIOU, V. PARK, A. QAYYUM, « Internet MANET Encapsulation Protocol, Internet draft », *rapport de recherche*, IETF, August 1998, draft-ietf-manet-imep-spec-01.txt.

[JL99] P. JACQUET, A. LAOUITI, « Analysis of mobile ad-hoc network routing protocols in random graph models », *rapport de recherche n° 3835*, INRIA, décembre 1999, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3835.html>.

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 à 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’interfacier 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 relayage de trames.

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

OLSR est un des protocole 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 4 et 5). 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 à été mis en place.
- Une implémentation indépendante en C++ est en cours de développement.
- 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/>

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.
- MOLSRL : 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.

5.3 Autres logiciels

- Un simulateur graphique d'inondation dans un réseau sans fil : ce logiciel est réalisé en C++ (2000 lignes) sous Linux.
- Un simulateur de réservation de bande passante sous Linux (voir paragraphe 6.12).
- Un outil permettant de décider de la faisabilité d'un jeu de tâches distribuées temps réel avec une structure en graphe. Ces tâches sporadiques doivent respecter leurs échéances de terminaison et préserver la cohérence d'objets persistants modifiables (voir paragraphe 6.1). Cet outil a été développé en C++ et utilise la bibliothèque LEDA pour calculer les plus longs chemins dans un graphe.
- Un robot scannant le graphe du web a été mis en place dans le cadre de l'ARC Soleil Levant. Quelques routines C++ ont été développées pour rendre le robot de Sébastien Ailleret (<http://larbin.sourceforge.net/>) opérationnel.
- Un ensemble de simulateurs de réservation de bande passante fixe, ainsi qu'un outil de résolution des modèles associés de chaînes de Markov (en état stationnaire et en état transitoire) (voir paragraphe 6.7).

6 Résultats nouveaux

6.1 Ordonnancement distribué temps réel sérialisable de tâches : étude de faisabilité

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

Participants : Soumaya Kamoun, Pascale Minet.

Dans [26], nous étudions la faisabilité d'un jeu de tâches sporadiques distribuées soumises à des contraintes temps réel et partageant des objets modifiables persistants. Un jeu de tâches est dit faisable ssi il existe un ordonnancement satisfaisant les contraintes de cohérence (invariants sur les objets) et les contraintes temps réel (échéances de terminaison des tâches). Le problème est d'autant plus difficile que les tâches distribuées ont une structure en graphe.

La solution retenue assure une exécution sérialisable des tâches. Elle est basée sur (i) le partitionnement des tâches en classes et (ii) l'évitement de conflit au sein d'une même classe

grâce à un ordre total global par classe. Les tâches d'une même classe sont ordonnancées périodiquement selon une séquence prédéfinie. Les conditions de faisabilité associées sont obtenues par une analyse pire cas. Les règles permettant d'identifier les scénarios pires cas d'un jeu de tâches sont établies. Les scénarios pires cas sont modélisés sous forme d'un graphe orienté cyclique. Cette modélisation permet d'énoncer des conditions de faisabilité nécessaires et suffisantes. La complexité des conditions de faisabilité nécessaires et suffisantes obtenues étant élevée, nous proposons des conditions de faisabilité de moindre complexité. Ces conditions, qui généralement ne sont que suffisantes, sont obtenues en observant les scénarios avec une certaine granularité temporelle. L'outil développé en C++ par Soumaya Kamoun établit ces conditions de faisabilité pour un jeu de tâches, et en déduit si le jeu de tâches considéré est faisable.

6.2 Ordonnancement FIFO, monoprocesseur ou distribué : étude de faisabilité

Mots clés : ordonnancement temps réel, FIFO, tâches sporadiques, conditions de faisabilité, graphes.

Participants : Laurent George, Soumaya Kamoun, Pascale Minet.

Dans [30], nous établissons les conditions de faisabilité d'un jeu de tâches sporadiques ordonnancées FIFO. Nous considérons différents modèles de tâches (tâches simples et tâches en graphes) et établissons pour chacun de ces modèles les conditions de faisabilité associées en monoprocesseur. Nous montrons ensuite comment étendre ces résultats à un environnement distribué. Finalement nous considérons une contrainte supplémentaire : le respect de contraintes de cohérence. Seuls les ordonnancements sérialisables sont considérés valides. Les conditions de faisabilité associées sont établies. Lorsque la complexité est élevée, des conditions suffisantes sont données.

6.3 Ordonnancement centralisé non-préemptif

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

Participants : Laurent George, Paul Mühlethaler, Nicolas Rivierre.

Dans un récent travail, Laurent George, Paul Mühlethaler et Nicolas Rivierre ont obtenu plusieurs résultats techniques nouveaux sur l'ordonnancement non préemptif [GMR00].

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

[GMR00] L. GEORGE, P. MÜHLEHALER, N. RIVIERRE, « A few results on non preemptive real time scheduling », *rapport de recherche n° 3926*, INRIA, May 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3926.html>.

Dans le cas de tâches concrètes périodiques le caractère NP du problème est démontré avec une charge processeur inférieure à toute valeur positive prédéfinie. Un résultat nouveau est aussi obtenu sur la période de recherche pour s'assurer de la faisabilité du jeu de tâches. Contrairement au cas préemptif où la faisabilité peut s'établir sur un intervalle $r+PPCM$ (des périodes) il est nécessaire et suffisant de tester sur $r+2*PPCM$ (des périodes) ; r désigne le plus grand des instants de première apparition d'une tâche.

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

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

Mots clés : système multimédia, qualité de service, garantie déterministe, ordonnancement temps réel, contrôle d'admission, ordonnancement FIFO.

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

Nous étudions les conditions sous lesquelles des systèmes multimédia peuvent offrir à leurs clients une garantie déterministe de la qualité de service. Nous avons considéré les deux aspects suivants de la qualité de service :

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

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

Nous considérons un ensemble de trafics sporadiques suivant une même ligne de diffusion dans un arbre de diffusion. Chaque noeud utilise un ordonnancement FIFO et les liaisons entre les noeuds sont supposées FIFO. Nous adoptons une approche par trajectoire pour étudier le comportement d'un tel système. Nous calculons le temps de réponse pire cas de bout-en-bout de tout trafic. Ces résultats sont confirmés par simulation des scénarios. Nous en déduisons un contrôle d'admission assurant une garantie déterministe de la qualité de service.

6.5 Ordonnancement temps réel dans un système multimédia de vidéo à la demande

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

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

Dans le cadre de systèmes multimédia offrant des services de vidéo à la demande, nous proposons une architecture tirant avantage de la technologie Fibre Channel (performance,

disponibilité, équilibrage de charge et flexibilité). Le système de stockage est basé sur des boucles Fibre Channel permettant d'interconnecter les disques magnétiques, les boucles sont interconnectées aux serveurs par l'intermédiaire de switches Fibre Channel. Nous montrons comment dimensionner ce système, afin d'offrir une garantie déterministe de la qualité de service. Pour ce faire, nous considérons deux ressources critiques : le disque magnétique et la boucle. Notre analyse est validée par confrontation avec des résultats de simulation déjà publiés. Nous avons déterminé le nombre optimum de disques à connecter sur une boucle ainsi que le nombre maximum de clients pouvant être acceptés par une boucle. La taille des buffers chez le serveur est évaluée. Ces différents paramètres sont utilisés pour réaliser le contrôle d'admission d'un nouveau client.

6.6 Application de la théorie de l'information à la compression

Mots clés : pattern matching, théorie de l'information, compression, bio-génétique.

Participants : Philippe Jacquet, Wojciech Szpankowski [Université de Purdue].

Dans [JSA00] et [22], nous décrivons et analysons un algorithme de prédiction basé sur la *pattern matching* et nous décrivons une application particulière à la bio-génétique. Cet algorithme appliqué à la compression converge rapidement en particulier sur les textes courts. Cette propriété est importante dans les réseaux de données où la taille des paquets est limitée. En général les compression deviennent efficaces lorsque la taille du texte est déjà importante.

Dans [23] nous déterminons les propriétés de l'algorithme de compression de Lempel et Ziv sous le modèle des sources d'information markoviennes à une seule mémoire.

6.7 Réseaux câblés et multimédia

Mots clés : réseau câblé, modem câble, accès multiple, qualité de service, contrôle d'admission, compression vidéo, SPIHT.

Participant : Cédric Adjih.

Dans sa thèse [17], Cédric Adjih a abordé trois thèmes liés :

- L'accès multiple sur les réseaux câblés.
- Un algorithme de contrôle d'admission adaptatif.
- Une compression/décompression vidéo par ondelettes adaptative.

Au niveau le plus bas, une condition nécessaire pour le haut débit est une transmission efficace des paquets de données IP. A cause du grand délai de propagation, la couche d'accès multiple (MAC) des réseaux câblés constitue un déficit important : partant du cadre défini par le groupe de travail 802.14 de l'IEEE, nombreux choix dans les algorithmes de gestion de MAC sont possibles. Différentes variantes d'algorithmes d'accès multiple ont été expérimentées dans cette thèse. Les résultats, (en partie présentés dans [43] et [42]), consistent en une étude des

[JSA00] *Mathematics and Computer Science: Algorithms, trees, combinatorics and probabilities*, Birkhäuser, 2000, ch. A universal predictor based on pattern matching, preliminary results.

caractéristiques de variantes de protocoles d'accès multiple, ainsi que la mise en évidence de phénomènes d'inéquités dans certains cas.

Une fois le problème de la transmission résolu, la transmission de flux multimédia pose le problème de « qualité de service » en période de congestion. Une architecture reposant sur la réservation de bande passante fixe et la discrimination des utilisateurs : privilégiés/non privilégiés, est présentée. Dans ce cadre, un algorithme de contrôle d'admission adaptatif est introduit, pour garantir une bon « service » aux utilisateurs privilégiés sous forme d'une faible probabilité d'échec des réservations. Une extension aux requêtes élastiques (à débit configurable) est introduite et analysée. Des méthodes analytiques, des résolutions numériques et des simulations sont utilisées.

L'algorithme de contrôle d'admission précédent suppose dans sa dernière version des applications à débit variable. Une modification de la méthode d'implémentation d'un algorithme de compression d'images, SPIHT, a été proposée, puis implémentée pour le système de vidéo bien connu RealMedia, comme une méthode de compression vidéo adaptative acceptant des niveaux de qualité de service. Elle a été utilisée dans le démonstrateur du projet Européen CATSERVER.

6.8 Étude des protocoles en arbre pour la couche d'accès multiple

Participants : Cédric Adjih, Philippe Jacquet, Paul Mühlethaler, Philippe Robert.

Dans [51, 50, 49, 43, 42] nous présentons les différentes adaptations et études qui ont été menées dans le cadre de l'introduction du protocole en arbre dans la norme IEEE 802.14. Nous avons étudié ces protocoles, à la fois de manière analytique et par simulations (comme le prévoit le cadre d'évaluation du comité 802.14). En particulier, l'impact de l'utilisation de trames, de leur longueur, et de la façon de répartir les collisions a été modélisé. Une preuve du bon fonctionnement des algorithmes en arbres LIFO à entrée bloquée a été donnée, et ainsi que des analyses des performances de nombreuses variantes d'algorithme de résolution de collision en arbre et de leur comportement.

6.9 Protocole d'accès en arbre appliqué à UMTS

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

Dans l'article [24], nous étudions la possibilité d'appliquer le protocole en arbre pour améliorer la résolution de conflits sur l'accès aléatoire du système UMTS, lequel utilise le mécanisme « slotted aloha ». Ce dernier exclut toute forme de priorité entre les utilisateurs. Nous montrerons également la manière dont on peut introduire la priorité au premier niveau de l'accès aléatoire à travers le protocole en arbre.

Cet article expose également une étude analytique pour la validation du protocole proposé.

6.10 Analyse de protocoles d'accès au medium sans fil

Mots clés : Réseau sans fil, protocole MAC, accès au médium, qualité de service, IEEE

802.11, Bluetooth, HomeRF, HIPERLAN1, HIPERLAN2.

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

Dans [35], nous nous intéressons à cinq protocoles d'accès au medium 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 concernant le réseau sans fil dans son ensemble, sont spécifiques à la couche MAC ou encore 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 ?

6.11 Réutilisation spatiale dans les réseaux radio locaux

Participants : Khaldoun Al Agha, Paul Mühlethaler, Adokoé Plakoo, Laurent Viennot.

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

Modéliser la possibilité d'utiliser en plusieurs endroits la même ressource radio (réutilisation spatiale) constitue donc une étude fondamentale pour pouvoir utiliser au mieux les possibilités de la radio. Une étude inspirée des travaux existants en GSM a été menée par Khaldoun Al Agha et Laurent Viennot [33]. Un modèle de propagation a été validé grâce à de nombreuses mesures expérimentales dans différents environnements. Ce modèle permet par exemple de trouver une densité maximale d'émetteurs qui soit acceptable (c'est à dire produisant peu d'interbrouillages).

La réutilisation spatiale trouve un cadre naturel dans les réseaux ad-hoc multisauts puisque le multisaut provenant des difficultés de portée laisse espérer de la réutilisation spatiale. D'un autre coté le multisaut est une source évidente de création de noeuds cachés très pénalisant pour les performances. Il est possible en jouant sur la portée et sur le seuil de détection de collision de favoriser l'un ou l' autre des phénomènes. Des études théoriques existent déjà dans le cas de très grands réseaux et avec des modèles très généraux. Actuellement nous étudions ce problème d'optimisation avec IEEE 802.11, un routage OLSR et différentes hypothèses de topologie et de trafic.

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

Participants : Saadi Boudjit, Isabelle Guérin, Karell Bertet [L3i, Université de La

Rochelle], Laurent Viennot.

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

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

Isabelle Guérin-Lassous, Karell Bertet et Laurent Viennot ont d'autre part étudié le problème de l'optimisation de l'acceptation d'un maximum de requêtes de réservation tout en respectant cette contrainte [28]. Diverses variantes du problème se révèlent NP -complètes. Des heuristiques sont proposées pour certaines variantes.

6.13 Analyse des performances de la diffusion par relais multipoint

Mots clés : Réseau sans fil, réseaux mobiles ad-hoc, inondation, multipoint relai, graphes aléatoires.

Participants : Philippe Jacquet, Pascale Minet, Anis Laouiti, Laurent Viennot.

Dans [29], [47], nous analysons les performances du protocole de routage *ad hoc* OLSR présenté comme standard au groupe MANET de l'IETF. OLSR est un protocole pro-actif de la classe « état des liens » qui est optimisé afin de supporter la mobilité dans les réseaux ad hoc. Ce protocole donne lieu à de nombreuses implémentations et expérimentations dans le monde entier. En particulier nous nous intéressons au concept des *relais multipoints* (ou encore « Multi-point relays » : MPR) qui constituent l'innovation la plus importante de ce protocole et lui apportent le principal gain en performance. Nous évaluons les performances dans deux modèles de réseaux radio : le graphe aléatoire et le graphe unité. Le graphe aléatoire convient mieux aux réseaux d'intérieur. Le graphe unité s'adresse davantage aux réseaux d'extérieur. Nous comparons les performances de OLSR avec les performances des protocoles d'état des liens à inondation totale, comme OSPF.

Dans [20], nous discutons le fonctionnement des relais multipoints (MPR) pour diffuser efficacement des trafics de type broadcast dans les réseaux mobiles sans fil. Les relais multipoints sont une technique pour réduire le nombre de retransmissions redondantes dans le réseau lors de la diffusion d'un message broadcast. Nous discutons le principe et le fonctionnement des MPR, et proposons une heuristique pour choisir ces MPR dans un environnement mobile sans fil. Nous analysons également la complexité de cette heuristique et montrons que le calcul d'un ensemble de relais multipoints de taille minimale est NP -complet. En conclusion, nous présentons quelques résultats de simulations pour montrer l'efficacité des relais multipoints.

6.14 Analyse des surcoûts de trafic des protocoles de routage pour les réseaux radio ad-hoc

Participants : Said Bouhaik, Philippe Jacquet, Laurent Viennot.

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

Philippe Jacquet et Laurent Viennot ont proposé la première étude comparant les surcoûts de trafic obtenus avec ces deux méthodes de construction des routes [21] (complément de [JV00]). Deux types de surcoûts ont été identifiés. Tout d'abord, les routes obtenues par inondation ne sont pas toujours optimales. Contrairement aux protocoles pro-actifs qui produisent des routes de plus courts chemins, les protocoles réactifs présentent donc un surcoût proportionnel au trafic de données. Une étude analytique dans le cas unidimensionnel dense et des simulations dans diverses situations sont proposées.

Said Bouhaik a de plus confirmé lors de son stage de DEA l'obtention de routes plus longues pour les protocoles réactifs. En simulant des créations de routes avec les protocoles AODV et DSR sous le simulateur ns2, il a observé des résultats cohérents avec les études citées ci-dessus. Il a de plus pu mettre en évidence un effet néfaste des optimisations de type « expanded ring search » sur la longueur des routes. Ces protocoles utilisent en effet de telles optimisations pour limiter le coût des inondations en limitant leur portée (TTL borné). Malheureusement, cela a pour conséquence de produire des routes d'autant moins optimales.

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

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

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

Participants : Reda Benzair, Abdellah Najid, Paul Mülhethaler, Amir Qayyum.

La norme IEEE 802.11 est en passe de devenir la référence pour les réseaux locaux sans fil. Nous avons développé un modèle de simulation pour ce standard IEEE 802.11. Cet outil nous a permis de qualifier de façon fine son fonctionnement. En particulier, nous avons pu mesurer précisément les performances de IEEE 802.11 suivant les débits de transmission retenus (1,2,5.5, 11 Mbit/s) et étudier les performances pour la transmission en diffusion. Dans cet outil, nous

[JV00] P. JACQUET, L. VIENNOT, « Overhead in Mobile Ad-hoc Network Protocols », *rapport de recherche n° 3965*, INRIA, 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3965.html>.

avons visé à optimiser la vitesse d'exécution d'une simulation pour permettre la simulation de scénarios de routage (nécessairement assez compliqués). Pour cela nous avons proposé une simplification pour la modélisation de IEEE 802.11 qui permet de diviser par 2 le nombre des évènements utilisés. Nous montrons que cette simplification reste extrêmement fiable.

Nous avons cherché à évaluer des protocoles de routage fonctionnant au dessus de la norme IEEE 802.11. Au dessus de cette couche, nous avons disposé un démon de routage de type OLSR. Ce démon de simulation a été étroitement dérivé du véritable démon de routage OLSR. Les résultats de simulation montrent :

- l'impact des noeuds cachés ; ces derniers augmentent le taux de collision sur les paquets broadcast et dégradent les performances du routage,
- l'influence des algorithmes de retransmissions et notamment en cas de mobilité,
- le gain obtenu par l'optimisation des relais multipoint,
- la robustesse du protocole de routage OLSR.

Cet outil de simulation permet d'envisager des optimisations fines du réseau en fonction des types de trafic envisagés et de la topologie du réseau. Ce travail est en cours.

D'autre part, dans sa thèse [13], Amir Qayyum s'intéresse à deux problèmes majeurs dans le domaine des réseaux mobiles sans fil :

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

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

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

6.16 Gestion de la macro et de la micro-mobilité

Mots clés : Mobilité, Mobile IP, OLSR, macro-mobilité, micro-mobilité.

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

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 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 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.

Une architecture de contrôle de la mobilité est définie dans le cadre du projet ARCADE.

6.17 Gestion de la mobilité rapide

Mots clés : Mobilité rapide, Mobile IP, OLSR, Fast Moving OLSR, micro-mobilité, routage, réseau ad-hoc.

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

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.

6.18 Présentation du protocole MOLSR

Mots clés : Multicast, routage multicast, MOLSR, OLSR, arbre de diffusion, mobilité, réseau ad-hoc.

Participants : Philippe Jacquet, Pascale Minet, Anis Laouiti, Laurent Viennot, Thomas

Clausen, Cédric Adjih.

Le protocole Multicast Optimized Link State [48] appartient à la famille des protocoles de routage multicast qui maintiennent un arbre de diffusion par source dans un groupe de diffusion. MOLSR est l'extension multicast pour le protocole de routage unicast OLSR. MOLSR est conçu de façon à tirer profit de ce qui est fait dans le protocole OLSR. Il utilise les différentes tables de voisinage, de topologie et de routage, afin de minimiser le trafic de contrôle et d'économiser la bande passante en utilisant les relais multipoint définis dans OLSR.

MOLSR peut fonctionner dans un environnement hétérogène composé de mobiles supportant MOLSR et d'autres qui ne font tourner que le protocole de base OLSR. La seule condition nécessaire est que les mobiles offrant les services multicast assurent une connectivité minimale entre les clients (membres du groupe multicast) et les sources. Ceci est possible du fait que le trafic de contrôle généré par les mobiles MOLSR sera relayé par tous les mobiles même s'ils ne supportent pas l'extension multicast (caractéristique importante d'OLSR).

Le principe de MOLSR consiste à construire et maintenir un arbre multicast pour chaque tuple (source, groupe) d'une façon distribuée sans aucune entité centrale tout en offrant les plus courts chemins de la source aux membres du groupe. OLSR réagit à chaque modification dans le voisinage ou la topologie en recalculant l'ensemble des relais multipoint et la table de routage. MOLSR profite de ces mises à jour pour optimiser les arbres multicast et détruire les branches obsolètes.

Les mobiles qui n'offrent pas les services multicast peuvent s'abonner à un groupe par l'intermédiaire du protocole WIGMP (Wireless Internet Group Membership Protocol). Ce protocole, similaire au protocole IGMP, a été adapté à un environnement mobile sans fil. Il permet à un routeur multicast de connaître et gérer les hôtes dans son voisinage.

6.19 Liens unidirectionnels dans les réseaux ad-hoc

Participants : Cédric Adjih, Salima Bouzoual, Thomas Clausen, Philippe Jacquet.

L'un des problèmes pouvant se présenter dans les réseaux sans fil, est l'existence possible de liens unidirectionnels, c'est-à-dire d'une configuration telle qu'un noeud puisse transmettre vers un autre, sans que ce dernier puisse transmettre vers le premier avec succès.

Une proposition d'extension du protocole OLSR [45] a été proposée pour prendre en compte les liens unidirectionnels.

L'analyse et la mesure des performances de cette extension ont été synthétisés en détail dans [56].

D'abord, quelques failles logiques ont été découvertes après implémentation de l'extension, qui modifie assez généralement le fonctionnement du protocole, ce qui justifie les études de vérification automatique entreprises dans la section 6.20.

Une étude analytique du surcoût relatif (une borne en réalité) est donnée dans [56]. Une implémentation a été réalisée sur le code OLSR existant et sous OPNET ; la campagne de simulations et l'analyse des résultats montre que le contrôle des liens unidirectionnels génère un surcoût non négligeable qui justifie les optimisations proposées, en conformité avec l'étude analytique. Le résultat principal est que le surcoût est de l'ordre de plusieurs dizaines de pourcents de paquets de contrôle transmis en plus, par lien activé dans le réseau. Asymptotiquement

pour de grands réseaux, ce surcoût dépend fondamentalement de l'efficacité de l'optimisation multipoint du protocole OLSR ; si celle-ci est efficace, le surcoût par lien activé reste de cet ordre, sans compter la possible augmentation du nombre de liens unidirectionnels lorsque le réseau croît.

6.20 Vérification de protocole de routage sans fil

Participant : Thomas Clausen.

Nous nous intéressons ici à l'exactitude des algorithmes et protocoles de routage sans fil, de type OLSR. Le bon fonctionnement de OLSR est assuré par une succession d'actions simples dont, a priori, chacune est logiquement correcte : identification des voisins (symétriques), choix local en chaque noeud d'un sous-ensemble des voisins (les MPR), diffusion optimisée à tout le réseau de ce sous-ensemble, et calcul des routes sur tous les sous-ensembles reçus.

Néanmoins, les informations échangées entre les noeuds d'un réseau sans fil passent par le biais de paquets, qui peuvent être perdus, retardés, ou diffusés à une partie seulement du réseau. Pour ces raisons, il est souhaitable de prouver l'exactitude du protocole au moins dans certaines situations.

Les résultats obtenus à cette date concernent principalement la première étape de la modélisation de protocole à l'aide d'outils de vérification.

Les modèles élaborés sont des modèles qui s'appuient sur le « monde MANET » (groupe de travail de routage sans fil à l'IETF : couche MAC, mobilité, ...). Les modèles construits concernent plus particulièrement, la version 3 du protocole OLSR ; ils sont développés sur une version d'un outil de vérification automatique « Uppaal » [KPY98]. L'objectif est maintenant d'ajuster le modèle aux versions plus récentes du protocole, et de pouvoir vérifier le protocole pour un nombre de noeuds plus conséquent (en combattant l'explosion du nombre d'états).

6.21 Modélisation de TCP/IP

Participants : Cédric Adjih, Philippe Jacquet, Nikita Vvedenskaya [Institute of Information Transmission, Moscou].

TCP/IP, qui constitue l'essentiel du trafic sur les réseaux IP, a un comportement différent du trafic de Poisson. En effet, une connexion TCP/IP a non seulement une mémoire (un état), mais cet état évolue, par conception, en fonction de l'état du réseau, créant un couplage compliquant et son comportement et l'analyse. Pour cette raison, TCP/IP a été au coeur de nombreux efforts de simulation et d'analyse.

Pour notre part, nous analysons le protocole TCP, dans le cas asymptotique où plusieurs serveurs de fichiers infinis (en boucle) se partagent une file d'attente unique. Le résultat de cette analyse est dans [44]. Ce modèle permet de séparer le comportement du protocole de la taille des données à transmettre. L'analyse par le *champ moyen* permet d'accéder aux comportements asymptotiques quand le nombre de serveurs croît. En général, ce type d'analyse est extrêmement compliquée, voire impossible, quand on veut se passer du passage à la limite. Les résultats

[KPY98] KIM G. LARSEN, P. PETTERSSON, W. YI, « UPPAAL in a Nutshell », *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, 1998.

montrent les distributions des débits entre les serveurs ; ces débits peuvent différer énormément entre des serveurs en apparence identiques.

6.22 Caractéristiques du graphe multicast de l'Internet

Participants : Cédric Adjih, Leonidas Georgiadis [Université de Thessalonique], Philippe Jacquet, Wojciech Szpankowski [Université de Purdue].

Les caractéristiques du graphe du réseau Internet sont loin d'être parfaitement connues. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la structure des arbres multicast de ce réseau : il s'agit de comprendre la structure du graphe des arbres multicast, à partir des données expérimentales, et d'établir des modèles susceptibles de fournir une justification.

Dans [41], nous montrons que la loi en puissance rencontrée expérimentalement dans les arbres *multicast* peut s'expliquer à partir d'un modèle de la géométrie de l'internet qui prend en compte une loi en puissance pour les contenances des sous arbres du réseau. Une instance particulière de ce modèle consiste à définir des sous arbres *auto-similaires* comme dans les objets fractals.

6.23 Codage du graphe du web

Participants : Jean-Loup Guillaume, Matthieu Latapy, Laurent Viennot.

Le graphe du web est constitué des liens hypertextes entre les pages. C'est l'objet naturel pour étudier la structure du web, c'est-à-dire la façon dont les pages sont reliées entre elles. Les plus récents moteurs de recherche du web utilisent le graphe du web pour évaluer la pertinence d'une page web. Ceci confirme l'importance du graphe du web et l'intérêt de l'étudier.

Le principal problème lorsqu'on envisage de calculer sur un graphe de plus d'un milliard de sommets consiste à le représenter efficacement. Sous sa forme la plus épurée le graphe du web est constitué d'une liste d'urls, et pour chaque url, la liste des urls vers laquelle elle pointe.

Jean-Loup Guillaume, Matthieu Latapy et Laurent Viennot ont proposé un codage simple des urls qui consiste à compresser le texte constitué des urls triées par ordre lexicographique [52]. Les urls sont ensuite codées par leur ordre d'apparition dans ce texte. Le texte constitué des listes de successeurs peut lui même être compressé. Pour obtenir de meilleurs temps d'accès, ces textes peuvent être découpés en blocs compressés indépendamment. Pour obtenir un temps d'accès très rapide aux listes de successeurs, on peut coder les liens en utilisant la localité de ceux-ci. En effet, une page web pointe le plus souvent sur des pages locales qui sont par conséquent proches dans l'ordre lexicographique. En codant un lien par la différence des numéros de la destination et de la source, un petit nombre est le plus souvent obtenu. On peut alors coder un lien sur un, deux ou trois octets selon la taille du nombre obtenu. Pour donner un ordre d'idée, ces techniques permettent de coder une url en moins de 6 octets en moyenne (au lieu de 70 caractères en moyenne pour la chaîne non compressée) et un lien en moins de 1.5 octets (au lieu de 3 octets avec une numérotation simple).

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 ARCADE

Participants : Khaldhoun Al Agha, Mounir Benzaid, 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'implémentation de cette extension sur PC Linux muni d'une carte IEEE 802.11 est en cours.

7.2 BRAIN

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

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

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

Le projet s'est terminé début 2001. Durant cette courte période, le projet Hipercom a principalement travaillé sur l'architecture de qualité de service.

7.2.1 Architecture de qualité de service dans les réseaux mobiles

Philippe Jacquet et François Dumontet ont finalisé la définition de l'architecture BRENTA supportant la mobilité et la qualité de service. Ce travail est l'aboutissement d'une étude exhaustive des interactions système et réseau pouvant intervenir dans la réservation de qualité de service : réservation de ressources réseaux (bande passante, gigue, délais de transmission) et réservation de ressources systèmes (temps de CPU, espace mémoire). Des interactions plus complexes ont été mises en évidence avec les problèmes de « power management » (capacité des batteries, consommation de l'interface radio, mises en veille radio). Le résultat est une architecture idéale permettant de prendre en compte tous les paramètres d'un système aussi complexe.

7.3 I3

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

I3 est une action coopérative INRIA. I3 a pour partenaires : LIP6, ENST, Hipercom et Planet. Le travail dans I3 consiste à offrir une qualité de service pour un client de réseau Internet.

Pour gérer cette qualité, nous considérons que le contrôle du réseau doit continuer à s'effectuer par la machine utilisateur comme dans la première génération d'Internet, en permettant ainsi une décentralisation des décisions et permettre à chaque équipement de participer pleinement au contrôle du réseau. Il est bien évident que cette proposition demande une redéfinition

de l'architecture par une discussion directe entre la machine utilisateur et les organes de commandes internes au réseau : le ou les PDP (Policy Decision Point).

L'architecture qui a été proposée offre les avantages suivants :

- Chaque machine utilisateur met une partie de sa puissance à la disposition du réseau ce qui va permettre de réduire très fortement les coûts du réseau (les routeurs de bord qui commencent à être annoncés sont très cher alors que les routeurs de la génération I3 sont simples).
- La qualité de service, la sécurité et la mobilité sont gérés au niveau utilisateur et non plus au niveau de grands groupes d'utilisateurs. Il peut y avoir une spécificité de l'utilisateur.
- La sécurité peut être prise en charge dès la sortie de la machine utilisateur sans attendre d'être dans le routeur de bord.
- La mobilité avec qualité de service est beaucoup plus facile à prendre en compte car elle se gère par la machine utilisateur et non pas par la machine sur laquelle il va y avoir une connexion.

7.4 PRIMA

Participants : Marc Badel, Belkacem Bensadallah, Philippe Jacquet, Anis Laouiti, Olivier Lecomte, Paul Mühlethaler, Abdallah 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 spécialisé dans le domaine de la radio industrielle,
- le HCR (Haut Comité pour les Réfugiés),
- Eurocontrol, un organisme Européen qui s'occupe de l'organisation du transport aérien,
- MATRA SI.

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

- COMATIS doit fournir les modems radio ainsi que la couche d'accès MAC,
- le HCR et Eurocontrol fournissent des 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 aura une durée de 27 mois. Durant les premiers mois, les tâches menées à l'INRIA concernant ce projet ont été :

- participation à la spécification de la couche d'accès MAC,
- 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 se poursuivent sur le projet PRIMA les tâches effectuées en 2001 sont 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, Belkacem Bensadallah, Olivier Lecomte, 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 nœuds 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 nœuds. 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 à 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 coopérative avec le LIAFA (Université Paris 7) et le LIRMM (Université Montpellier II). Les informations suivantes sont extraites des pages web de l'action (adresse : <http://hipercom.inria.fr/soleil/>).

Cadre de l'étude et objectifs de l'action

L'analyse de la topologie du graphe logique formé par les pages web et les liens hypertextes qui les relient a permis de rendre plus performants les moteurs de recherche du web. Ces techniques sont encore basées sur une vision statique du graphe. Pour aller plus loin, il nous semble primordial de tenir compte de la nature dynamique de ce graphe, de son évolution au cours du temps. Une des questions qui nous a amené à cette réflexion est la suivante :

« Comment se diffuse une information au travers du web ? »

Du point de vue d'un moteur de recherche, comment identifier une page dont la notoriété semble croissante ?

Le but de cette action est de proposer des outils pour analyser, représenter, calculer sur ce type de graphes dynamiques. Il s'agit donc de travailler en amont des applications possibles. Outre l'analyse du web, on peut aussi penser aux algorithmes de routage dans des réseaux dynamiques (comme les réseaux mobiles), à l'analyse de l'évolution des trafics dans l'internet,... On peut ainsi identifier toute une classe de problèmes dynamiques qui sont résolus en construisant à intervalle de temps régulier une photo d'un graphe et en résolvant le problème sur cette image figée. Une modélisation dynamique permettrait de traiter plus finement ce genre de problèmes. L'évolution de phénomènes dynamiques dans de vastes graphes est donc le thème central de l'action proposée. Diverses études dans ce cadre sont envisagées.

Plusieurs pans de la science peuvent venir s'articuler autour de ce thème. Les récents développements des modèles dynamiques discrets sont un premier pas vers la compréhension de l'évolution dynamique de tels systèmes. D'autre part, l'émergence d'algorithmes totalement dynamiques pour les graphes forment une base algorithmique pour envisager de calculer efficacement sur ce type de graphes. Ces algorithmes sont basés sur la mise au point d'une structure de données qui puisse être mise à jour rapidement lors de changements dans le graphe. Enfin, on peut envisager d'utiliser des modèles physiques comme ceux utilisés pour la diffusion pour modéliser certains phénomènes dynamiques.

Codage du graphe du web

Ce travail a déjà été évoqué dans le paragraphe 6.23.

Méthodes de classement des moteurs de recherche

Mohamed Bouklit, stagiaire de DEA financé par l'ARC a étudié les méthodes de classement des pages web basées sur la structure du graphe du web. Son travail compare la méthode « page rank » à l'origine du moteur de recherche Google et la méthode HITS développée par Kleinberg. Un même modèle Markovien est proposé pour montrer la convergence de ces deux algorithmes. Ce rapport est disponible sur <http://hipercom.inria.fr/soleil/>.

Modèles et structures de données pour le graphe du web

Jean-Loup Guillaume, durant son stage de DEA, a étudié les liens entre la topologie du graphe du web et les hits observés sur les fichiers de log de serveurs web. Son travail a tout d'abord mis en évidence une localité dans les liens hypertextes qui est à l'origine du travail évoqué au paragraphe 6.23 sur le codage du graphe du web. Il a d'autre part proposé un modèle de surfeur du web étendant celui utilisé pour justifier « page rank » en incluant une dynamique dans le modèle. Il faut en effet que le graphe du web est en constante évolution alors que le modèle de « page rank » considère un scan du web comme une image statique. Sur un fichier de log d'un site web, on peut en effet distinguer plusieurs types de hits :

- ceux dus à des liens locaux au site,
- ceux dus à des liens extérieurs pointant vers le site,
- ceux dus à un lien privilégié (l'utilisateur a enregistré un lien vers le site et le recharge, ou a tapé directement l'url dans son navigateur),
- ceux dus à une réponse donnée par un moteur de recherche.

Une étude qualitative de ses différents types est proposée. Ce rapport est disponible sur <http://hipercom.inria.fr/soleil/>.

9 Diffusion de 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.

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

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 participé au colloque AofA 2001 qui s'est tenu dans l'île de Tatihou au large du Cotentin.

Philippe Jacquet a participé à la journée modélisation de TCP organisée à l'ENS.

Philippe Jacquet a participé à la journée Veille Technologique organisée à l'IRISA à Rennes en septembre 2001.

Philippe Jacquet a participé aux réunions de l'IETF qui se sont déroulées à Minneapolis et Salt Lake City.

Philippe Jacquet a participé au *mini-workshop* sur les réseaux mobiles organisées par University Central Florida.

Pascale Minet a été membre du comité de programme de RTS'2001 (Real-Time Systems), qui s'est déroulé du 6 au 8 mars à Paris. Elle a présenté le protocole de routage multicast MOLSR au groupe MANET de l'IETF à Salt Lake City.

Paul Mühlethaler a participé à la journée INRIA-ParisTech. (ENST)

Paul Mühlethaler a participé au séminaire Aristote de l'École Polytechnique.

Paul Mühlethaler a présenté à l'ART une étude prospective sur l'utilisation des réseaux sans fil.

Paul Mühlethaler a participé aux réunions de l'IETF qui se sont déroulées à Minneapolis et à Londres.

Paul Mühlethaler est membre de la commission des spécialistes de 37ème, 61ème et 63ème section de l'Université de Paris 13.

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 les réseaux ad-hoc au séminaire de l'institut Gaspard-Monge de l'Université de Marne-la-Vallée le 12 juin 2001. Il a de plus fait une présentation sur les graphes dynamiques lors de la réunion du groupe TAROT d'automne 2001. TAROT est un Thème transversal du Groupe de Recherches (GdR) Architecture, Réseaux & Systèmes, Parallélisme (ARP) du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) (voir <http://wwwhds.utc.fr/TAROT/>).

10 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] L. GEORGE, D. MARINCA, P. MINET, « A solution for a deterministic QoS in multimedia systems », *International Journal on Computer and Information Science Vol. 1*, No. 3, October 2000, p. 106–119.
- [2] P. JACQUET, V. JOLY, « Capacity of retro-information channels », *in : 2000 IEEE International Symposium on Information Theory*, p. 182, Sorrento, Italie, June 2000.
- [3] P. JACQUET, P. MINET, P. MÜHLETHALER, N. RIVIERRE, « Data transfer for HIPERLAN », *Wireless Personal Communications 1*, 4, January 1997, special issue on the High Performance Radio Local Area Network (HIPERLAN).
- [4] P. JACQUET, P. MINET, P. MÜHLETHALER, N. RIVIERRE, « Increasing reliability in cable-free radio LANs - low level forwarding in HIPERLAN », *Wireless Personal Communications 1*, 4, January 1997, special issue on the High Performance Radio Local Area Network (HIPERLAN).
- [5] P. JACQUET, P. MINET, P. MÜHLETHALER, N. RIVIERRE, « Priority and collision detection with active signaling - the channel access mechanism of HIPERLAN », *Wireless Personal*

- Communications 1*, 4, January 1997, special issue on the HIGH PERFORMANCE Radio Local Area Network (HIPERLAN).
- [6] P. JACQUET, W. SZPANKOWSKI, « Analytical depoissonization and its applications », *Fundamental Study 201*, 1–2, 1998.
 - [7] P. JACQUET, W. SZPANKOWSKI, « Entropy calculation via analytic depoissonization », *IEEE Transaction on Information Theory* 45, 4, May 1999.
 - [8] 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.
 - [9] P. JACQUET, « Long term dependences and heavy tails in traffics and queues generated by memoryless on/off sources in series », *rapport de recherche n°RR-3516*, INRIA, 1998, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3516.html>.
 - [10] P. JACQUET, *Traffic and queueing from an unbounded set of independent memoryless on/off sources*, Wiley, 2000, ch. 11, p. 269–283.
 - [11] 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.
 - [12] P. MUHLETHALER, *Contribution à la conception et à l'analyse d'algorithmes pour l'accès multiple et l'ordonnancement sous contraintes temporelles*, thèse de doctorat, Université de Versailles Saint-Quentin, juillet 1998, mémoire d'habilitation.
 - [13] A. QAYYUM, *Analysis and evaluation of channel access schemes and routing protocols in wireless LANs*, thèse de doctorat, Université de Paris Sud, November 2000.
 - [14] RES-10, « Radio Equipment and Systems (RES); HIGH PERFORMANCE Radio Local Area Network (HIPERLAN); Functional specification », *rapport de recherche*, ETSI, June 1996.
 - [15] L. VIENNOT, « Complexity Results on Election of Multipoint Relays in Wireless Networks », *rapport de recherche n°RR-3584*, INRIA Rocquencourt, 1998, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3584.html>.

Livres et monographies

- [16] K. AL AGHA, G. PUJOLLE, G. VIVIER.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [17] C. ADJIH, *Multimédia et accès à l'Internet haut débit : la filière du câble*, thèse de doctorat, Université de Versailles-Saint Quentin, Juin 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/tu-0682.html>.

Articles et chapitres de livre

- [18] J.-L. DORNSTETTER, D. KROB, M. MORVAN, L. VIENNOT, « Some Algorithms for Synchronizing Clocks of Base Transceiver Stations in a Cellular Network », *Journal of Parallel and Distributed Computing* 61, 2001, p. 855–867.
- [19] M. HABIB, C. PAUL, L. VIENNOT, « Linear time recognition of P4-indifference graphs », *Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science* 4, 2, 2001, p. 173–178.
- [20] P. JACQUET, A. LAOUITI, P. MINET, L. VIENNOT, « Performance analysis of OLSR multipoint relay flooding in two ad hoc wireless network models », *RSRCP Special issue on Mobility and Internet*, December 2001, à paraître.

- [21] P. JACQUET, A. LAOUITI, P. MINET, L. VIENNOT, « Performance analysis of OLSR multipoint relay flooding in two ad hoc wireless network models », *RSRCP Special issue on Mobility and Internet*, 2001, à paraître.
- [22] P. JACQUET, W. SZPANKOWSKI, I. APOSTOL, « A universal predictor based on pattern matching with application to molecular sequences », *IEEE Transaction on Information Theory, Special Issue in memory of Aaron Wyner*, à paraître.
- [23] P. JACQUET, W. SZPANKOWSKI, J. TANG, « Average profile of the Lempel-Ziv Parsing Scheme for a Markovian Source », *Algorithmica*, 2001.
- [24] K. AL AGHA, P. JACQUET, N. VVEDENSKAYA, « Analysis of a priority stack random access protocol in W-CDMA systems », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2001, à paraître.
- [25] K. AL AGHA, D. ZEGHLACHE, G. PUJOLLE, « VCB : an Efficient Resource Sharing Scheme for Cellular Mobile Systems », *Telecommunication Systems, Kluwer*, 2001, à paraître.
- [26] S. KAMOUN, P. MINET, « Periodic scheduling of distributed tasks with consistency and hard real-time constraints », *International journal of computer and information science* 2, 3, September 2001, p. 106–118, ISSN 1525-9293.
- [27] P. MÜHLETHALER, A. NAJID, « Performance analysis of OLSR multipoint relay flooding in two ad hoc wireless network models », *RSRCP Special issue on Mobility and Internet*, December 2001, à paraître.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [28] K. BERTET, I. GUÉRIN LASSOUS, L. VIENNOT, « Impact of Interferences on Bandwidth Reservation for Ad Hoc Networks : a First Theoretical Study », in : *The IEEE Symposium on Ad-Hoc Wireless Networks (GLOBECOM SAWN'2001)*, 2001.
- [29] T. CLAUSEN, P. JACQUET, A. LAOUITI, P. MÜHLETHALER, A. QAYYUM, L. VIENNOT, « Optimized Link State Routing protocol for ad hoc networks », in : *INMIC 2001*.
- [30] 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.
- [31] K. AL AGHA, T. AL-MESHHADANY, L. PERATO, « Resource allocation in W-CDMA using mobile agents », in : *IST'01 : International Symposium on Telecommunications*, Teheran, IRAN, September 2001.
- [32] K. AL AGHA, L. VIENNOT, « Spatial reuse in wireless LAN networks », in : *IFIP PWC'01 : Personal Wireless Communications*, Kluwer, Lapeenranta, Finland, August 2001.
- [33] K. AL AGHA, L. VIENNOT, « Spatial reuse in wireless LAN networks », in : *Personal Wireless Communications (IFIP PWC'2001)*, Kluwer, 2001.
- [34] 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.
- [35] A. MERCIER, P. MINET, L. GEORGE, G. MERCIER, « An overview and comparative evaluation of wireless protocols », in : *IEEE International Conference on Wireless LANs and Home Networks ICWLHN'01*, Singapore, December 2001.
- [36] L. PERATO, K. AL AGHA, « Mobile agents for improving the web access in the UMTS system », in : *IEEE VTC 01-Fall : Vehicular Technology Conference*, IEEE Publisher, Atlantic City, USA, October 2001.

- [37] L. PERATO, K. AL AGHA, « Reduction of signaling on cellular systems with mobile agents : the POP3 application », *in : IEEE PIMRC'01 : Personal Indoors and Mobile Radio Communications*, IEEE Publisher, San Diego, USA, September 2001.
- [38] T. AL-MESHHADANY, K. AL AGHA, « A new code allocation scheme for UMTS system », *in : IEEE VTC'01-Fall : Vehicular Technology Conference*, IEEE Publisher, Atlantic City, USA, October 2001.
- [39] T. AL-MESHHADANY, K. AL AGHA, « OSSC : A new scheme for code allocation in WCDMA », *in : IEEE PIMRC'01 : Personal Indoors and Mobile Radio Communications*, IEEE Publisher, San Diego, USA, September 2001.
- [40] T.H. CLAUSEN, G. HANSEN, L. CHRISTENSEN, G. BEHRMANN, « The Optimized Link State Routing Protocol, Evaluation through Experiments and Simulation », *in : IEEE Symposium on "Wireless Personal Mobile Communications"*, September 2001.

Rapports de recherche et publications internes

- [41] C. ADJIH, L. GEORGIADIS, P. JACQUET, W. SZPANKOWSKI, « Is the internet fractal? The multicast power law revisited », *rapport de recherche*, INRIA, April 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4157.html>.
- [42] C. ADJIH, P. JACQUET, P. MÜHLEHALER, « Stack algorithms at high load : analysis of unfairness or singular behaviours », *rapport de recherche*, INRIA, March 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4130.html>.
- [43] C. ADJIH, P. JACQUET, P. MÜHLEHALER, « Stack algorithms in implicit framing, free access and blocked access for CAN networks », *rapport de recherche*, INRIA, March 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4129.html>.
- [44] C. ADJIH, P. JACQUET, N. VVEDENSKAYA, « Performance evaluation of a single queue under multi-user TCP/IP connections », *rapport de recherche*, INRIA, March 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4141.html>.
- [45] T. CLAUSEN, P. JACQUET, A. LAOUITI, P. MINET, P. MUHLEHALER, A. QAYYUM, L. VIENNOT, S. BOUZOUAL, « Optimized Link State Routing over Unidirectional Links », *rapport de recherche*, IETF, July 2001, draft-ietf-manet-olsr-00.txt.
- [46] T. CLAUSEN, P. JACQUET, A. LAOUITI, P. MINET, P. MUHLEHALER, A. QAYYUM, L. VIENNOT, « Optimized Link State Routing Protocol », *rapport de recherche*, IETF, December 2001, draft-ietf-manet-olsr-05.txt.
- [47] P. JACQUET, A. LAOUITI, P. MINET, L. VIENNOT, « Performance analysis of OLSR multipoint relay flooding in two ad hoc wireless network models », *rapport de recherche*, INRIA, September 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4260.html>.
- [48] P. JACQUET, P. MINET, A. LAOUITI, L. VIENNOT, T. CLAUSEN, C. ADJIH, « Multicast Optimized Link State Routing », *rapport de recherche*, IETF, December 2001, draft-ietf-manet-olsr-molsr-01.txt.
- [49] P. JACQUET, P. MÜHLEHALER, P. ROBERT, « Framing protocols on upstream channel in CATV networks, asymptotic A », *rapport de recherche*, INRIA, February 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4114.html>.
- [50] P. JACQUET, P. MÜHLEHALER, P. ROBERT, « Performant implementation of tree collision resolution algorithms for CATV networks », *rapport de recherche*, INRIA, January 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4107.html>.

- [51] P. JACQUET, P. MÜHLETHALER, P. ROBERT, « A slotted medium access control scheme designed for CATV networks », *rapport de recherche*, INRIA, January 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4106.html>.
- [52] L. V. J.L. GUILLAUME, M. LATAPY, « Efficient and simple Encodings for the Web Graph », *rapport de recherche*, LIAFA, 2001, soumis.
- [53] P. MÜHLETHALER, A. NAJID, « An Efficient Simulation Model for Wireless LANs Applied to the IEEE 802.11 Standard », *rapport de recherche*, INRIA, April 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4182.html>.

Divers

- [54] R. BENZAIK, *Rapport de DEA*, Mémoire, Université de Versailles-Saint Quentin, 2001.
- [55] S. BOUHAÏK, *Rapport de DEA : Analyse de la longueur des routes dans le routage ad hoc*, Mémoire, Université de Versailles-Saint Quentin, 2001.
- [56] S. BOUZOUAL, *Rapport de DEA : Évaluation des performances du protocole de routage OLSR étendu aux liens unidirectionnels*, Mémoire, Université de Paris Sud, 2001.
- [57] W. DRISS, *Rapport de stage de fin d'études : La stack IP multicast dans les réseaux sans fil*, Mémoire, ENSTA, 2001.