

Projet PLANETE

Protocoles et Applications pour l'Internet

Sophia Antipolis et Rhône-Alpes

THÈME 1B



*R*apport
*d'**A*ctivité

2000

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
3	Fondements scientifiques	5
3.1	Méthodologie	5
3.2	Vers un Internet cellulaire	6
3.3	Optimisation de protocoles de transmission multimédia vers des récepteurs hétérogènes et mobiles	7
3.4	Méthodologie d'implantation et de vérification des applications multimédia mobiles	8
3.5	Impact des nouveaux supports de transmission sur les protocoles	8
3.6	Evolution des services de l'Internet	9
3.7	Applications interactives multi-utilisateurs	11
4	Domaines d'applications	11
4.1	Architecture de gestion hiérarchique de la mobilité	11
4.2	Internet paging	12
4.3	Gestion de la mobilité des réseaux	12
4.4	Impact des nouveaux supports sur le routage	13
4.5	Impact des nouveaux support sur le transport	14
4.6	Support de la qualité de service dans l'Internet	16
4.7	Evolution du multipoint	17
4.8	Les environnements virtuels à grande échelle	18
5	Logiciels	19
5.1	MultiCast Library	19
5.2	HMIPv6	19
5.3	Rendez-Vous	19
5.4	FreePhone	19
5.5	MiMaze	20
5.6	MiMaze3D	20
6	Résultats nouveaux	20
6.1	Gestion hiérarchique de la mobilité	20
6.2	Internet paging	20
6.3	Radio adaptative pour l'accès à l'Internet	20
6.4	Support des Réseaux Mobiles dans IPv6	21
6.5	Contrôle de congestion pour applications multimédias sur l'Internet	21
6.6	Prise en compte de la gigue dans le calcul du débit TCP courtois	22
6.7	Diffusion Multicast de flux audio et adaptation du trafic	22
6.8	Mise en œuvre d'applications radio logicielles en logiciel	23
6.9	UDLR - IPv6	23

6.10	Transmission multipoint fiable par satellites	24
6.11	Passage à l'échelle d'UDLR	25
6.12	Planification dans les réseaux hybrides	25
6.13	Le support du multicast par les satellites régénératifs	26
6.14	Gestion dynamique de la qualité de service dans l'Internet	26
6.15	Communications multicast en couches multiples	27
6.16	Routage multipoint et applications adaptatives	27
6.17	Multicast Applicatif	27
6.18	Recherche optimisée d'information de routage IP	27
6.19	Architecture de communication pour applications interactives avec grand nombre de participants	28
6.20	Moteur 3D pour un forum de discussion virtuel	29
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	29
7.1	CS Télécom	29
8	Actions régionales, nationales et internationales	29
8.1	Actions nationales	29
8.1.1	Projet @IRS	29
8.1.2	Projet Constellations de satellite	30
8.1.3	Projet Dipcast	30
8.1.4	Projet Intradiff	31
8.1.5	Projet VISI	31
8.1.6	Projet MobiSecV6	32
8.1.7	Projet MobiNet	32
8.1.8	Projet ARC MobiQoS	32
8.2	Actions financées par la Commission Européenne	32
8.2.1	Projet DSE	32
8.2.2	Projet DESS	33
8.3	Relations bilatérales internationales	33
8.3.1	NEC	33
8.3.2	Hitachi	33
9	Diffusion de résultats	33
9.1	Animation de la communauté scientifique	33
9.2	Enseignement universitaire	33
9.3	Thèses et stages	34
9.3.1	Thèses soutenues en 2000	34
9.3.2	Thèses en cours	34
9.3.3	Stages effectués dans le projet	35
9.4	Participation à des colloques, séminaires, invitations	35
10	Bibliographie	35

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Walid Dabbous [Directeur de recherche, Inria]

Responsable permanent à Grenoble

Claude Castelluccia [Chargé de recherche, Inria]

Responsable permanent à Sophia

Thierry Turetletti [Chargé de recherche, Inria]

Assistante

Françoise Trucas [Technicien de recherche, Inria]

Personnel Inria

Vincent Roca [Chargé de recherche, Inria]

Chercheurs extérieurs

Hossam Afifi [MdC INT Evry]

Slim Gara [Ingénieur de recherche et de développement, CS Télécom]

Ingénieurs experts

Ludovic Bellier [jusqu'au 30 novembre 2000]

Ali Boudani [à partir du 1^{er} février 2000]

Hahnsang Kim

Julien Labouré [depuis le 1^{er} octobre 2000]

Stephane Réty [jusqu'au 14 octobre 2000]

Rafael Rizo

Chercheurs doctorants

Imad Aad [Boursier INRIA]
Laurențiu Barză [Boursier CNOUS CS Télécom]
Antoine Clerget [France Télécom, CNET]
Ayman El-Sayed [depuis le 1^{er} novembre 2000]
Thierry Ernst [Boursier Cifre avec Motorola]
Fethi Filali [Boursier INRIA]
Emmanuel Léty [boursier MENSUR]
Fatma Louati [Boursière MENSUR]
Pars Moutaf [Boursier du gouvernement Français]
Miguel Á. Ruiz Sánchez [Boursier du gouvernement Mexicain]
Rareș Șerban [Boursier CNOUS CS Télécom]

Stagiaires

Morchid Abdelfattah [Stagiaire de l'EMI, Maroc, du 1^{er} mars au 31 mai 2000]
Cédric Dégéa [Stagiaire ESSI, du 1^{er} décembre 1999 au 15 avril 2000]
Amit Jain [Stagiaire de l'IIT, Inde, du 18 mai au 21 juillet 2000]
Céline Raison [Stagiaire ESSI, du 1^{er} décembre 1999 au 15 avril 2000]
Shan Yufeng [Stagiaire, du 1^{er} mars au 30 novembre 2000]
Mounir Benzaid [Stagiaire DEA, du 1^{er} mars au 30 juin 2000]
Frédéric Flayol [Stagiaire DEA, du 1^{er} mars au 30 juin 2000]

2 Présentation et objectifs généraux

Les activités du projet PLANÈTE bilocalisé à l'INRIA Sophia Antipolis et à l'INRIA Rhône-Alpes, sont centrées sur la conception, la mise en œuvre et l'évaluation des protocoles et des applications Internet. L'objectif principal du projet est de proposer de nouvelles architectures, services et protocoles pour un Internet dans lequel les mobiles seront supportés de façon transparente, un certain niveau de qualité de service sera disponible et les communications de groupes deviendront une réalité.

Pour réaliser cet objectif, nos thèmes de recherche s'articulent autour de quatre axes :

- la conception et l'évaluation de protocoles et applications multimédia pour mobiles sur l'Internet ;

- l'étude de l'impact des nouveaux supports de transmission sur les protocoles ;
- l'évolution des services de l'Internet ;
- les applications interactives multi-utilisateurs

Ces travaux se poursuivent en collaboration avec des projets français, européens et internationaux. Les travaux sur le contrôle de transmission ont donné lieu à plusieurs coopérations industrielles, notamment dans le cadre de projets européens, de projets RNRT et de conventions de recherche avec des partenaires académiques (UCL, MIT, UMass, université de Berne, ENS, LIP6, Eurecom, CEA-LETI, etc.) et industriels (6wind, Thomson CSF et Multimédia, FT R&D, Alcatel, CS Télécom, Bull, Motorola, Hitachi, etc.).

3 Fondements scientifiques

3.1 Méthodologie

Les services fournis par l'Internet sont en cours d'évolution. Ces évolutions ont porté entre autres sur le support de la mobilité avec l'introduction de **mobile IP**, le support du routage multipoint inter-domaine ainsi que sur le support de la qualité de service dans le réseau.

Parallèlement à cela, les besoins des utilisateurs et les progrès technologiques amènent de plus en plus d'hétérogénéité dans l'infrastructure du réseau et des machines.

- *hétérogénéité du réseau* : la prédominance du principe "IP par dessus tout" a abouti à une très grande hétérogénéité des liens et sous-réseaux constituant l'Internet. On retrouve ainsi des liaisons ATM, satellite, des réseaux locaux haut débit (avec ou sans fil), le câble, des liaisons téléphoniques, GSM, etc. Ces différents "sous-réseaux" utilisent différentes technologies et fournissent des services de niveau liaison très différents en terme de qualité de service, coût et disponibilité. Cette hétérogénéité est motivée par des raisons techniques mais également par des raisons économiques et politiques.
- *hétérogénéité des machines* : Les machines connectées sur l'Internet sont également de plus en plus diverses. Certaines sont fixes, d'autres sont mobiles, certaines ont des puissances de calcul très importantes, d'autres ont des ressources CPU très limitées, certaines sont connectées au réseau électrique, d'autres fonctionnent sur batteries. Cette hétérogénéité a également plusieurs raisons et motivations : commerciale (les machines de l'Internet proviennent de différents vendeurs), économique (les utilisateurs de l'Internet ont des budgets très différents), et technique (les utilisateurs ont des besoins différents).

Cette hétérogénéité accrue engendre de nouveaux problèmes de recherche. Dans ce contexte, le projet Planète s'intéresse particulièrement aux problèmes générés au niveau des protocoles de communication et des applications. Notre domaine est donc celui de *l'ingénierie de protocoles*. Notre approche consiste à définir de nouveaux protocoles de communication, les mettre en œuvre et les évaluer soit par expérimentation, soit par simulation. Nous procédons à l'utilisation de modèles (élaborés en collaboration avec le projet Mistral) afin d'évaluer les performances des protocoles et mécanismes étudiés. Nous appliquons des techniques de la théorie de l'information

et des files d'attente aux problèmes étudiés. Les applications que nous développons intègrent ces mécanismes et servent d'outils d'expérimentation et de démonstration.

Nous travaillons aussi sur la définition de nouveaux services et de nouvelles architectures de réseaux. La démarche entreprise est basée souvent dans ce cas sur l'expérimentation et nos travaux comprennent une partie technologique afin de mettre en œuvre nos mécanismes dans des systèmes opérationnels.

Le choix de nos axes de recherche se base, d'une part, sur le pari d'un déploiement universel de la technologie IP ("IP par dessus tout") et, d'autre part, sur une prévision concernant l'évolution des services et protocoles (support de la mobilité, du multipoint, de la qualité de service, etc.).

Les approches suivies par les groupes de recherche industriels sont souvent ciblées sur des technologies particulières dictées par le marché de la consommation et par la concurrence. Ils donnent lieu à des solutions ad-hoc pas forcément optimales (e.g. GPRS). Ceci dit, il y a un grand potentiel de recherche et de développement dans les équipes industrielles (Cisco, AT&T, etc.) et nous travaillons en collaboration étroite avec certaines d'entre elles (Thomson, Alcatel, CS Télécom, NEC, Motorola, 6wind et Hitachi)

Pour réaliser notre approche au mieux, il est essentiel de maintenir une participation à l'IETF afin de proposer et discuter nos idées dans les groupes de travail relatifs à nos thèmes d'intérêts.

3.2 Vers un Internet cellulaire

Des prévisions montrent que, dans quelques années, le nombre de téléphones mobiles connectés à l'Internet sera largement supérieur à celui des ordinateurs. Le téléphone sera l'appareil privilégié pour se connecter à l'Internet, alors qu'aujourd'hui son utilisation sur l'Internet est très marginale. Les raisons du développement du téléphone portable comme moyen d'accès à l'Internet sont multiples : sa simplicité, son coût relativement peu élevé, ses petites dimensions et son taux de pénétration croissant.

La convergence des réseaux cellulaires sans fil et de l'Internet représente un enjeu stratégique et économique évident. Cette convergence est d'autant plus importante qu'elle représente pour l'Europe une chance de rattraper le retard qu'elle a accumulé sur les technologies de l'information par rapport aux Etats Unis. En effet, bien que les Etats-Unis soient les leaders incontestables dans les domaines de l'Internet, il est reconnu que l'Europe occupe une place de premier plan dans les domaines liés aux technologies sans-fil et plus particulièrement aux technologies de téléphonie cellulaire. Cette convergence réseaux cellulaires et Internet constitue un défi technologique et scientifique très important et prendra certainement plusieurs années. Les difficultés résultent à la fois de la multitude des problèmes à traiter et de la diversité des domaines à considérer. En effet les problèmes à traiter sont des problèmes réseaux, des problèmes de terminaux, d'interface homme-machine, de tarification et bien d'autres.

Notre objectif ici est de concevoir une architecture réseau permettant cette convergence. Les industriels qui travaillent dans ce domaine ont des contraintes commerciales et économiques très importantes qui les poussent à réutiliser leurs technologies et réseaux existants. Cette approche incrémentale conduit à des architectures qui ne peuvent être optimales à la fois pour la voix et pour les données. L'exemple du GPRS (General Packet Radio Service)

développé par les opérateurs de téléphonie et basé sur le réseau GSM est très significatif. Le GPRS est un réseau de données possédant ses propres protocoles greffés au dessus du réseau GSM. L'intégration voix-données y est quasi inexistante et les fonctionnalités sont dupliquées.

L'architecture envisagée devra permettre à la fois d'accéder à des services temps-réels tel que la téléphonie avec une qualité meilleure que les réseaux cellulaires actuels, tout en permettant d'accéder à l'Internet à des débits importants et à faibles coûts. Nous pensons qu'une architecture basée sur le protocole IP est souhaitable. En effet le modèle "Internet" a fait ses preuves et son succès est incontestable. Un protocole de gestion de la mobilité est nécessaire pour permettre aux mobiles de se déplacer tout en gardant la connectivité IP. Bien que cette gestion puisse se faire au niveau physique (GSM, WLAN,...), une solution IP semble plus efficace car elle permet d'aboutir à un système homogène et elle autorise la mobilité dite orthogonale (vertical handoff) c'est à dire le passage d'une technologie réseau à une autre (par exemple le passage d'un réseau WLAN à un réseau GSM). D'autre part les perspectives qu'ouvrent la radio logicielle en termes de flexibilité de l'architecture de la couche physique vont dans le sens d'une intégration de cette couche et de la couche réseau.

La solution IETF de gestion de la mobilité (Mobile IP) n'a pas été développée dans un contexte dans lequel un mobile pourrait être équipé de plusieurs interfaces et où les mobiles seraient majoritaires par rapport aux machines fixes. Cette solution est peu efficace et n'est pas adaptée à ce type d'environnement. Il est donc important d'étendre le protocole Mobile IP pour des réseaux cellulaires IP.

3.3 Optimisation de protocoles de transmission multimédia vers des récepteurs hétérogènes et mobiles

Une partie de nos travaux antérieurs a porté sur les *applications adaptatives*, c'est-à-dire, des applications qui s'adaptent dynamiquement aux variations des conditions du réseau ainsi qu'à l'hétérogénéité des récepteurs. Les logiciels de vidéoconférence (*ivs*, *FreePhone*, *RendezVous*) adaptent leur codage (taux de compression, FEC) de manière dynamique aux caractéristiques du réseau (taux de perte, bande passante disponible, gigue). Cette adaptation a été possible grâce à la souplesse du logiciel (comparé aux circuits matériels spécialisés). On peut désormais obtenir davantage de flexibilité par le biais des applications radio logicielles : la couche physique, qui était jusque là figée, devient elle aussi reconfigurable. En effet, grâce à l'évolution rapide des performances des processeurs et des convertisseurs Analogique/Numérique (A/N), on peut aujourd'hui implanter avec un matériel minimal (antenne, amplificateur, convertisseur A/N) toute une pile protocolaire de communication sans fil : (dé-)modulateur, (dé-)codeur de canal, (dé-)codeur source en logiciel. Le principal intérêt d'une solution logicielle est qu'elle offre beaucoup plus de flexibilité qu'une implantation matérielle (e.g., la possibilité de reconfiguration dynamique des protocoles utilisés). Son coût est aussi réduit, par exemple un terminal multi-protocoles (CDMA, GSM, Hiperlan, 3GPP) ne contiendra qu'une seule carte de DSPs reconfigurable à la demande plutôt qu'une carte d'ASICs spécifique par protocole de communication. De plus, une implantation logicielle rend possible l'adaptation des protocoles de transmission à tous les niveaux de l'application, y compris la couche physique : par exemple en adaptant le type de modulation dynamiquement aux caractéristiques du canal de transmission (évanouissement du signal, échos, erreurs). Ce gain en flexibilité ouvre le champ à de

nouvelles investigations pour optimiser la transmission multimédia sur des réseaux hétérogènes et mobiles.

Cette flexibilité va nous permettre d'étudier des algorithmes encore plus adaptatifs pour optimiser la transmission des flots multimédia de manière dynamique au médium, tout en gérant la mobilité des récepteurs et les variations de caractéristiques du réseau : débit, taux de congestion, BER, nouveau médium, etc.

3.4 Méthodologie d'implantation et de vérification des applications multimédia mobiles

L'élaboration des applications radio logicielles est aujourd'hui très complexe et nécessite des compétences pluridisciplinaires : architecture logicielle, traitement du signal (modulation, codage, compression, contrôle d'erreurs), réseau (protocoles de transmission, algorithmes de contrôle de congestion), vérification et validation des algorithmes, etc. En effet, les différentes techniques de codage et de compression évoluent en permanence. La méthodologie de développement des applications radio logicielles doit permettre d'intégrer au fur et à mesure, les nouveaux algorithmes développés à la fois en matériel (ASIC, FPGA) et dans le logiciel (DSP, *general purpose workstations*). On a besoin d'une nouvelle architecture de développement d'applications qui puisse facilement permettre une déclinaison matérielle ou logicielle en fonction des besoins temps réel des différentes fonctions et des avancées technologiques du moment. Il est probable que l'évolution de la puissance intrinsèque des processeurs (qui double environ tous les 18 mois) permettra des solutions purement logicielles à des problèmes qui aujourd'hui nécessitent du matériel. En attendant, les approches de conception simultanée (synthèse matérielle logicielle) devraient permettre de trouver à un instant t , le meilleur compromis (coût, performance). La mise en œuvre efficace de ces solutions est une tâche assez délicate car cela nécessite des compétences sur toute la hauteur de la "pile". L'objectif de ce thème est de simplifier la mise en œuvre des applications radio logicielles. À l'extrême, on peut imaginer un environnement de développement si simplifié qu'il rend accessible l'écriture de ces applications (ou au moins la possibilité de les personnaliser) au grand public.

Un autre problème concernant le développement des protocoles de communication est qu'il devient de plus en plus difficile de les valider avec des méthodes traditionnelles en raison de leur taille et de leur complexité croissante. Nous travaillons sur l'élaboration de méthodes formelles moins contraignantes permettant de vérifier les programmes tout en réduisant les coûts de production et en accélérant le développement (en générant éventuellement un code exécutable efficace).

3.5 Impact des nouveaux supports de transmission sur les protocoles

L'Internet se déploie de plus en plus largement en intégrant une multitude de supports de transmission (liens satellites, liaisons sans fil, câble HFC, liens ATM, etc.). Ce déploiement est facilité par un des principes de base de l'Internet : le principe de bout en bout (*end-to-end*) qui stipule que le réseau doit être le plus simple possible en effectuant "au mieux" l'acheminement des paquets et que les procédures liées au contrôle de transmission (contrôle d'erreur et de flux) doivent être effectuées à l'extérieur du réseau. Ce principe a permis la simplification des

routeurs IP assurant l'interconnexion (en mode sans connexion) des différentes technologies de réseaux. Les protocoles des couches réseau et transport de l'Internet ont été conçus en se basant sur ce principe, afin de supporter une large plage de technologies ayant des caractéristiques très variées. Pourtant, certaines liaisons ont des caractéristiques spécifiques qui ont un impact très important sur les performances des protocoles de l'Internet. Parmi ces spécificités au niveau physique ou au niveau liaison, on trouve : un taux d'erreur de transmission élevé (liaisons sans fil), un délai de transmission élevé (liaisons satellite GEO), un délai de propagation variable (liaisons satellite LEO), l'asymétrie ou l'unidirectionnalité de la liaison (satellite ou câble), ainsi que le support de fonctionnalités redondantes avec les couches supérieures (GSM, ATM ou Frame Relay). L'application stricte du principe de bout en bout se heurte donc à l'existence de telles liaisons. Les problèmes qui en découlent sont multiples :

- le non fonctionnement de certains protocoles (comme par exemple ARP, DVMRP et autres sur liaison unidirectionnelle),
- la forte dégradation des performances de certains protocoles (tels que TCP et IGMP sur des liaisons à délai élevé ou variable, TCP sur HFC ou xDSL),
- la difficulté de concevoir des mécanismes d'adaptation de bout en bout (à cause de la grande variabilité des caractéristiques des liaisons),
- l'interfonctionnement des mécanismes de contrôle de congestion au niveau liaison et transport (TCP sur ATM),
- la mise en correspondance des mécanismes de support de la qualité de service au niveau IP et au niveau liaison (diffserv sur ATM ou sur Frame Relay, IP sur satellite).

Les travaux de recherche de cet axe se focalisent autour de l'étude de l'impact des nouveaux supports de transmission sur le fonctionnement et les performances des protocoles de l'Internet et en particulier sur le routage unicast et multicast, les protocoles de transport et les mécanismes de support de la qualité de service.

3.6 Evolution des services de l'Internet

L'Internet sert de support de communication à un grand nombre d'application dans le cadre des réseaux d'entreprise. Cependant, un certain nombre d'application multimédia (e.g. téléphonie IP) ne fonctionnent pas "parfaitement" sur un service "best effort".

Une première approche pour le support d'applications multimédia se résume à l'intégration de mécanismes d'adaptation aux caractéristiques du réseau, au dessus d'un service "best effort". Ces mécanismes de contrôle permettent la mise en œuvre et l'utilisation satisfaisante de ce type d'applications sur un réseau qui ne leur était pas a priori destiné. Le mythe répandu qui consistait à dire que les applications multimédia de type vidéoconférence nécessitent absolument des réseaux offrant des garanties de performance est démenti par les multiples vidéoconférences et jeux distribués qui se tiennent régulièrement sur le Mbone.

Cependant, il est clair que pour des débits relativement faibles, le partage de la bande passante entre des applications adaptatives peut aboutir à de très mauvaises performances.

Certaines applications ont des besoins très stricts de garanties de performance. Pour de telles applications, le service "best effort" de l'Internet n'est pas suffisant. Plusieurs équipes de recherche de l'Internet ont démarré des travaux sur ce thème. Une première approche a été de montrer qu'il est possible de fournir des garanties de services, en modifiant de manière relativement simple les mécanismes utilisés dans les routeurs et commutateurs de l'Internet. Ceci est fait en pratique via la mise en place de mécanismes dits d'attente proportionnelle équitable ("fair queueing" en anglais) dans les routeurs, qui permettent d'allouer explicitement des ressources du routeur et des liens qui lui sont attachés à telle ou telle connexion. Il reste cependant à développer et à mettre en place un mécanisme qui permette aux applications de spécifier au réseau qu'elles ont besoin de telles ressources, et pour combien de temps. Le deuxième travail a donc été de développer ce mécanisme, qui est en fait un protocole de signalisation car il permet aux utilisateurs de signaler leurs besoins au réseau, et vice versa au réseau de signaler aux utilisateurs s'il peut satisfaire ces besoins (et combien sera facturée l'utilisation de ces ressources). Les protocoles de signalisation traditionnels comme SS7 (utilisé dans le réseau téléphonique) ou ST2 lient la réservation de ressources avec l'établissement d'un circuit virtuel. Ceci n'est pas compatible avec l'architecture "datagramme" de l'Internet.

Le protocole de signalisation conçu pour l'Internet, appelé RSVP (Ressource reSerVation Protocol), est basé sur un concept différent. Les messages de réservation sont envoyés par chaque application en parallèle aux paquets IP, et ils décrivent aux routeurs du réseau les caractéristiques de l'application et les ressources dont elle a besoin. L'envoi en parallèle permet de réserver des ressources sans changer l'application, ce qui permet d'introduire RSVP graduellement dans l'Internet.

Le protocole RSVP permet donc de signaler des réservations pour chaque "flot" de bout en bout dans le réseau. Mais le support généralisé de ce protocole se heurte à de sérieux problèmes de passage à l'échelle. L'IETF a donc lancé (dans le cadre du groupe diffserv) des travaux sur des mécanismes ne nécessitant pas une signalisation de bout en bout pour chaque flot. L'idée de base est donc d'appliquer au niveau de chaque routeur le même "comportement local" à tous les flots appartenant à un agrégat de trafic. L'identification d'un tel agrégat peut se faire par l'intermédiaire du champ TOS dans l'entête du paquet par exemple, sans effectuer un traitement individualisé par flot. Cette approche revient à fournir des services différenciés dans le réseau, c'est à dire un service spécifique appliqué à chaque "classe" de trafic. Les études en cours dans le cadre du groupe diffserv ont abouti à la définition de deux profils de "comportement local" EF (Explicit Forwarding) et AF (Assured Forwarding). Le premier permet de fournir un service de liaison louée virtuelle, le deuxième une séparation en plusieurs classes de service.

En plus des travaux sur le support de la qualité de service dans le réseau, nous nous intéressons à l'évolution du service de routage et de contrôle de transmission multipoint. Les mécanismes proposés par Steve Deering il y a dix ans ne sont pas "scalables" à tout l'Internet. Plusieurs possibilités d'évolution sont en cours d'étude.

L'étude de l'évolution des services de l'Internet, nous amène aussi vers l'étude des architectures des routeurs pour un support efficace des mécanismes proposés. Il s'agit de définir les fonctions qui pourraient être supportées par le routeur ainsi qu'une façon optimale de les implémenter.

3.7 Applications interactives multi-utilisateurs

Les applications interactives multi-utilisateurs sur Internet présentent de fortes contraintes temporelles. Une architecture distribuée, sans serveur, où chaque participant transmet ses informations en multipoint, permet de résoudre les problèmes de "scalabilité" liés au traitement centralisé et à la convergence du trafic vers un nœud du réseau.

Cependant, les temps de traitement de chaque participant et l'utilisation de la bande passante du réseau pour l'acheminement des paquets doivent être contrôlés afin de satisfaire aux besoins d'interaction temps-réel de ce type d'application.

Nous nous intéressons particulièrement aux applications distribuées interactives où un grand nombre de participants sont impliqués (quelques milliers voire dizaines de milliers). L'utilisation d'un seul groupe multipoint n'est pas "scalable" pour ce type d'application. En effet, pour un très grand nombre de participants, lorsque l'ensemble des informations est transmis via un unique groupe multipoint, le trafic reçu par chaque participant devient très important. Ceci rend difficile le traitement temps-réel de l'intégralité des paquets reçus et augmente le risque de congestion sur la liaison réseau reliant le participant à l'Internet (cette liaison est souvent de faible capacité dans le cas de l'utilisation d'un modem). De plus, dans la pratique, chaque participant communique à un instant donné avec un nombre limité de participants (une dizaine au maximum). Par conséquent, une grande partie de l'information qu'il reçoit ne lui est d'aucune utilité. Cette information inutile entraîne un accroissement du temps de traitement et de la demande en CPU, ce qui peut affecter les performances de l'application. De plus, cette information inutile est transmise sur le réseau et représente un coût prohibitif en terme de bande passante.

La répartition de l'information dans plusieurs groupes multipoint apparaît donc indispensable dans la résolution de ce problème. Pour cela, l'architecture distribuée de ce type d'application doit être modifiée afin de supporter de nouveaux protocoles et des mécanismes plus adaptés à la gestion des grands groupes. Il est nécessaire d'étudier des politiques de gestion des centres d'intérêt, de regroupement dynamique de l'information au sein de groupes multipoint et de filtrage de l'information.

4 Domaines d'applications

4.1 Architecture de gestion hiérarchique de la mobilité

Le protocole Mobile IP a un défaut majeur : il traite la micro et macro-mobilité de façon identique, ce qui pose des problèmes d'échelle et de sécurité. En effet, avec Mobile IP, une machine doit communiquer à ses correspondants sa nouvelle adresse temporaire à chacun de ses déplacements et ceci quelles que soient l'amplitude et la localité de son mouvement. Partant du résultat d'une étude qui a montré que 69% des mouvements d'un utilisateur sont locaux, nous considérons qu'une solution de gestion de la mobilité hiérarchique est préférable pour les réseaux cellulaires. Nous avons proposé une solution qui sépare explicitement la gestion de la mobilité locale (à l'intérieur d'un site) de celle de la mobilité globale (entre sites de l'Internet) : lorsqu'un mobile se déplace à l'intérieur d'un site, ses mouvements sont gérés par un protocole interne et sont ainsi cachés de ses correspondants. Les résultats de cette

hiérarchisation est l'élimination de la signalisation due à la gestion de la mobilité sur l'Internet lors des mouvements locaux d'un mobile. La charge de l'Internet est ainsi réduite, et les risques d'attaque des mobiles par piratage des messages de signalisations sont minimisés. Il est à noter que différents niveaux de hiérarchie peuvent être définis à l'intérieur d'un site selon la taille et les besoins de celui-ci. Lorsqu'un mobile change de site, le déplacement inter-site, est géré par un protocole global à l'Internet. Nous avons proposé l'utilisation de Mobile IP pour la gestion de la mobilité inter-site car cette solution nous paraît bien adaptée à la gestion de la macro-mobilité d'un utilisateur. Notre solution est compatible avec le protocole Mobile IP de l'IETF. Elle peut être déployée à l'intérieur d'un site indépendamment des autres sites.

Parallèlement à notre proposition de Mobile IPv6 hiérarchique, d'autres propositions de gestion de la micro mobilité tel que Cellular IP ou HAWAII ont été récemment proposées à l'IETF. La multiplication de propositions risque de créer des problèmes d'interopérabilité car un mobile devra connaître les protocoles des différents sites qu'il visite. Notre travail actuel consiste à faire évoluer notre proposition de Mobile IPv6 hiérarchique vers une architecture hiérarchique qui permettrait le déploiement de différents protocoles de gestion de la micro-mobilité dans différentes parties de l'Internet de façon complètement transparente aux utilisateurs mobiles. Cette architecture fait l'objet d'un Internet draft qui a été présenté à l'IETF en Juillet 1999. Ce travail se déroule dans le cadre d'un projet RNRT en collaboration avec France Telecom R&D et BULL (MOBISecv6).

4.2 Internet paging

Dans les réseaux utilisant le protocole Mobile IP, un mobile doit, à chaque changement de point d'attachement, s'enregistrer auprès de son réseau d'appartenance, et ceci même s'il est inactif. La signalisation générée est très importante, notamment dans un contexte de réseau cellulaire IP dans lequel les mobiles sont majoritaires par rapport aux machines fixes. Dans le réseau de téléphonie cellulaire, un mobile ne s'enregistre auprès du réseau que s'il est actif ou s'il traverse une frontière virtuelle qui définit une zone de localisation. La taille de la zone de localisation est généralement unique et calculée statiquement par l'opérateur. Le réseau ne connaît pas de façon précise la localisation exacte du mobile mais connaît la zone dans laquelle il se déplace. Lorsque le réseau doit rentrer en contact avec le mobile, il diffuse un message de *paging* dans la zone courante du mobile qui répond en indiquant sa position exacte. L'objectif de ce travail est de développer un mécanisme de paging pour le réseau de type cellulaire IP. Le paging IP est potentiellement plus efficace que celui effectué par les réseaux de télécommunication. En effet dans les réseaux IP, l'intelligence étant dans les terminaux, on peut imaginer de développer des systèmes de paging adaptatifs et individuels dans lesquels chaque mobile calcule en permanence la taille optimale de sa zone de localisation. Une étude préliminaire montre que l'introduction de tels mécanismes de paging dans Mobile IP peut réduire la signalisation de façon très significative.

4.3 Gestion de la mobilité des réseaux

L'IETF travaille sur l'introduction des *terminaux mobiles* dans l'Internet mais ne considère pas encore les *réseaux mobiles*. Un *réseau mobile* est un réseau de routeurs et de nœuds qui se

déplace et change son point d'attachement dans la topologie Internet. Les applications possibles de réseaux mobiles incluent, entre autres, les réseaux de capteurs déployés dans les avions, les trains ou les voitures ou encore les réseaux personnels (Personal Area Networks) très prisés par la recherche dans le milieu militaire. Les problématiques de la gestion des terminaux et réseaux mobiles sont relativement différentes. Par conséquent, les solutions telles que Mobile IP qui ont été développées pour les terminaux mobiles ne sont pas adaptées aux réseaux mobiles car elles sont trop coûteuses en terme de signalisation. De nouveaux protocoles sont donc nécessaires. Nous travaillons actuellement à la conception de protocoles de gestion de la mobilité de réseaux mobiles qui utilisent le routage multicast [10]. Ce travail est effectué en collaboration avec le centre de recherche de Motorola à Paris.

4.4 Impact des nouveaux supports sur le routage

Nous nous intéressons au support du trafic IP sur des liaisons via des satellites géostationnaires (GEO). On peut en fait disposer à très faible coût du matériel de réception (antenne et carte de réception satellite). Ce type de liaison est donc intéressant pour une solution d'accès asymétrique à l'Internet : satellite pour la réception, liaison téléphonique (fixe ou GSM) pour l'émission. La spécificité de la liaison réside dans son aspect de diffusion unidirectionnelle. Il est donc possible pour un utilisateur de recevoir des paquets IP d'un satellite avec une simple parabole, mais il est impossible de renvoyer des paquets directement vers le satellite. Or, la très grande majorité des applications (courrier électronique, web, audio et vidéoconférence, jeux) supposent un échange de données de façon bidirectionnelle entre les participants. D'autre part, les protocoles de routage dynamique (point à point et multipoint) ne fonctionnent pas dans le cas d'une liaison unidirectionnelle. En plus, le relais des données multipoint par RPF (Reverse Path Forwarding) ne pourra pas être assuré par le récepteur satellite qui reçoit les données sur une liaison différente de celle qu'il utilise pour joindre la source. Un mécanisme d'encapsulation que nous avons conçu et développé dans le cadre du groupe de travail `udlr` de l'IETF permet de masquer l'aspect unidirectionnel de la liaison. Le support de ce mécanisme permet à des routeurs placés au pied d'un récepteur de reconnaître les routeurs des antennes d'émission et d'établir des tunnels qui assureront un fonctionnement normal des protocoles de routage dynamique. Ce mécanisme, couplé à un service de multiplexage embarqué sur le satellite permet de couvrir une vaste région avec des dizaines d'émetteurs et de fournir une réception à haut débit à des milliers d'utilisateurs. Les travaux sur `udlr` ont permis d'avoir un RFC en cours de devenir un "proposed standard" à l'IETF. La technologie `udlr` est actuellement industrialisée par la start-up UDCast (www.udcast.com).

Les travaux précédents ont porté sur le fonctionnement des protocoles de routage dynamique sur liaisons unidirectionnelles. Certaines études prédisent que les flux multicast représenteront à court terme 30% du trafic de l'Internet. Ceci soulève la question du choix d'un support optimal : le satellite géostationnaire par sa couverture étendue est le candidat idéal. En effet, contrairement aux liens terrestres où l'infrastructure nécessite une multiplication, même intelligente, des paquets pour chaque destinataire, la diffusion radio permet à différents récepteurs "d'écouter" le même paquet. Le satellite permet ainsi d'économiser la bande passante montante et descendante grâce à la diffusion radio puisque l'information ne monte et descend qu'une seule fois dans le faisceau. Nous nous intéressons donc à l'optimisation de la

transmission multipoint sur liaisons satellite. Certains industriels travaillent sur la préparation de la nouvelle génération de processeurs de type DVB-S qui est le standard de facto pour la diffusion, et à l'adaptation des protocoles multicast au contexte satellite "multi-faisceaux". Le satellite permettra dans ces conditions, grâce à une extension des protocoles de multicast à bord du satellite, d'économiser la bande passante de façon plus fine en réalisant la duplication uniquement à bord. Nous étudions aussi les critères de choix du type d'arbre d'acheminement pour le multipoint au dessus des liaisons satellite. Des solutions basées sur un arbre partagé (PIM-SM) pourraient être plus efficaces que les solutions basées sur l'approche "inonder puis élaguer" de DVMRP.

Le problème de l'intégration des nouveaux supports de transmission dans l'Internet se pose aussi pour les constellations de satellites en orbite basse. En effet, les constellations avec liens inter-satellites en cours de développement sont basées sur la technologie ATM. L'interconnexion de cette constellation au réseau Internet nécessite donc une mise en correspondance ("mapping") des mécanismes IP sur le réseau de la constellation (considéré comme un réseau "Non Broadcast Multiple Access"). Le support du routage IP permet de fournir aussi le routage IP multipoint. Ceci dit, l'optimisation du support du multipoint dépend de l'architecture de la constellation et reste toujours un problème ouvert. Nous avons étudié le problème du support du routage IP sur les constellations. Les études préliminaires ont donné lieu à une architecture générique pour le support du routage sur différents types de constellations en se basant sur la séparation (routage interne à la constellation - routage IP). Les études futures, qui seront menées en fonction des avancées technologiques dans le domaine porteront sur l'optimisation du routage pour des constellations particulières.

La technologie WDM permet simplement de multiplier les capacités de transmission des fibres par des facteurs de dix et plus, ce qui permettra de résoudre le manque de bande passante sur les réseaux dorsaux. Nous nous intéressons en particulier au support de TCP sur WDM. Nous commençons par une phase de tests et de compréhension des problèmes de l'infrastructure (besoin de fenêtres de transmission très grandes, difficulté de routage, non existence des tampons dans ce genre de réseaux, etc.) dans le cadre du projet RNRT VTHD. Une seconde étape sera de proposer une architecture de distribution de TAGs afin d'effectuer un "Optical path Label Switching" comme dans le cas du MPLS, se basant sur une connaissance des routages IP qui ont lieu au-dessus. Ceci permettra de construire des routeurs-commutateurs optiques de paquets. La commutation pourrait alors se faire sur des paquets de tailles variables avec des marques optiques circulant séparément sur un "chemin" permettant la résolution du port de sortie de chaque paquet. Il est aussi nécessaire d'étudier des mécanismes d'aggrégation de flux ("packet trains") afin d'optimiser l'usage de ces liaisons à très haut débit.

4.5 Impact des nouveaux support sur le transport

Considérons d'abord le transport point à point. Plusieurs algorithmes d'adaptation de bout en bout dont le *slow start* ont été intégrés dans le protocole TCP. Ces algorithmes ont pour but d'éviter la congestion dans le réseau. Cependant, avec la très grande hétérogénéité des supports de transmission (délai des liaisons satellitaires, taux d'erreur de bits élevé des liaisons sans fil, etc.), les contraintes pour l'adaptation de bout en bout sont de plus difficiles à respecter.

Nous nous sommes intéressés à cas du TCP sur liaison satellite géostationnaire. Le délai

important de la liaison dégrade les performances de l'algorithme du *slow start*. Il n'est pourtant pas envisageable d'arrêter le support du "slow start" pour les connexions TCP qui traversent une liaison satellite : ceci aboutirait à une congestion sur les autres liaisons du réseau traversées par ces connexions. Il faudrait donc trouver des mécanismes permettant de régler le problème de bout en bout. Des travaux sur cette thématique sont actuellement en cours, en collaboration avec le projet Mistral [1].

Nous avons aussi étudié les performances de TCP sur HFC (câble télévision). Nous avons montré que, dans ce cas, la nature partagée du support rend les performances de TCP très critiques à cause de certains problèmes de famines et de rafales. Des adaptations portant à modifier l'ordonnancement de la couche MAC ont été proposées. Dans le cas de l'ADSL et du VDSL (supports point à point asymétriques), nous avons montré que, si le rapport d'asymétrie dépasse certaines limites, le protocole souffrait d'une baisse de débit à cause d'une congestion dans la voie de retour. Des solutions ont été proposées pour les deux types de support.

Le support des protocoles de contrôle de transmission sur les constellations est aussi un domaine d'intérêt pour nous. Les délais de transmission variables dans le cas des constellations en orbite basse pourraient avoir un impact sur les performances du protocole TCP. En effet, une variabilité très grande aboutirait à une mauvaise estimation du RTT, qui déclencherait des retransmissions intempestives. On retrouve aussi le problème de la localisation des mécanismes de contrôle : une passerelle intermédiaire qui joue le rôle de "proxy" permettra d'obtenir de meilleures performances, mais sa gestion (téléchargement dans un routeur intermédiaire, configuration statique, etc.) nécessite des mécanismes appropriés non disponibles actuellement sur le réseau. Nous allons considérer en plus l'impact de la couche MAC et de la nature du réseau de la constellation sur les performances des protocoles de niveau transport (TCP en particulier).

Nous continuerons naturellement ces études concernant les performances de TCP sur divers supports (e.g. Satellite, GSM-CDMA et WDM), le but étant toujours d'optimiser les performances du protocole en proposant les modifications algorithmiques adéquates aux mécanismes de contrôle d'erreurs et de congestion. L'approche adoptée est de proposer des nouveaux modèles confirmés par des simulations et ensuite de développer le code associé afin de le distribuer dans l'Internet.

La diffusion fiable est un autre problème assez complexe. Il s'agit de contrôler la congestion dans le cas d'émetteurs/récepteurs ayant des conditions hétérogènes, sans pourtant perdre une partie de l'information et en un temps minimal de préférence. Dans le cas des liaisons satellite unidirectionnelles, on devrait minimiser l'utilisation de la voie de retour terrestre. Pour cela, nous avons conçu un mécanisme de diffusion multipoint fiable basé sur la transmission de paquets de redondance (FEC) et permettant d'éviter l'envoi de demandes de retransmission par les récepteurs. Ce protocole a été testé par une expérimentation sur la liaison montante dont nous disposons à Sophia. Nous comptons continuer ces travaux afin de tester les performances de ce mécanisme dans un environnement hybride (avec des récepteurs munis de carte de réception satellite et d'autres connectés via le MBone), dans le cadre de la plate-forme d'expérimentation du projet COIAS. Ces travaux seront aussi utilisés par le W3C afin de mettre à jour par satellite les pages sur les sites miroirs.

4.6 Support de la qualité de service dans l'Internet

Les groupes de travaux `intserv`, `issll` et `rsvp` ont défini un ensemble de protocoles et de mécanismes pour l'amélioration de la qualité de service dans l'Internet. Une différence entre les approches `intserv` et `diffserv` réside dans la possibilité d'analyse possible dans le cas `intserv` (du moins dans le cas des services garanti et à charge contrôlée). Les travaux de Parekh et d'autres montrent comment calculer les bornes sur les délais. Il est par contre difficile de mettre en œuvre ce modèle de façon "scalable". Pour cela, il y eu des travaux sur l'agrégation d'états dans RSVP, les mécanismes de classification rapide, ainsi que sur les structures de données pour l'insertion et le retrait efficaces des paquets (WF2Q et SFQ). Avec le modèle `diffserv`, la différence est qu'il n'y a pas une théorie analytique évidente. Un chemin peut être constitué d'une séquence de routeurs ayant chacun son propre comportement local (PHB) et un contrat de service (SLA) associé. Pourtant, le service fourni, ainsi que le dimensionnement de ce service dépendent de la topologie réelle du réseau et du trafic effectif. Ceci est un aspect positif de `diffserv`, car il permet aux fournisseurs (et aux constructeurs de routeurs) une marge de flexibilité en ce qui concerne le déploiement des services et les structures tarifaires. Cependant, l'évaluation des comportements locaux `diffserv` est un tâche difficile et nécessite des travaux de mesures et de simulation. Nous nous proposons d'étudier en détail les blocs de base permettant de fournir la qualité de service (QoS) dans l'Internet. La qualité de service de bout en bout obtenue par chaque classe de trafic dépendra des mécanismes d'ordonnement de paquets (WFQ, CBQ) ainsi que des mécanismes de gestion active des files d'attente (RED, WRED). Notre objectif ici est d'évaluer la complexité d'implanter ces mécanismes ainsi que les performances globales attendues en terme de délai, de gigue et de disponibilité de la bande passante.

D'autre part, le dimensionnement (*provisioning*) et la configuration du réseau sont deux problèmes particulièrement intéressants cités dans les documents du groupe `diffserv`. Le "dimensionnement" consiste à déterminer et à allouer (physiquement ou logiquement) les ressources requises aux différents points dans le réseau. La "configuration" consiste à distribuer les bons paramètres aux équipements réseaux afin de réaliser les objectifs de dimensionnement. Le dimensionnement et la configuration seront notés sous l'appellation gestion de la qualité de service. Cette gestion peut être statique ou dynamique. Dans le cas statique, la gestion de la QoS dans le réseau peut être effectuée "manuellement" par l'administrateur de réseau en fonction de la topologie et de la matrice de trafic, ou bien "automatiquement" via un mécanisme de signalisation invoqué uniquement au moment de l'établissement des contrats avec les clients (TCA). La gestion dynamique est basée soit sur une signalisation soit sur des mesures. Elle est très importante pour les services qualitatifs (services sans garanties fermes au dessus de AF), car on ne peut pas prédire le trafic de façon précise, mais aussi pour les services quantitatifs (services avec garanties fermes au dessus de EF) si on veut fournir un dimensionnement flexible, ou bien des TCA dynamiques. Il est vraisemblable dans un premier temps d'arriver à construire un réseau basé uniquement sur un dimensionnement statique dès lors que l'on considère une répartition équilibrée et relativement stable des trafics. Cependant, ce mode de dimensionnement ne tenant pas compte des routes, la saturation d'un nœud liée à la convergence de multiples trafics, peut entraîner une dégradation notable de la qualité. Ceci se produit en particulier si l'on s'adresse à des clients ayant des capacités d'accès très différentes, ou si l'on considère que certaines passerelles vers d'autres réseaux ou vers des sites de serveurs

sont des nœuds de congestion possibles. Notre objectif ici est de proposer des protocoles de signalisation qui permettent de compléter l'approche "services différenciés" pour, d'une part, continuer à garantir un niveau de qualité de service constant quand le réseau approche de ses limites et, d'autre part, optimiser l'utilisation des ressources du réseau. Ces protocoles ne devront pas induire de temps de traitement prohibitifs dans les équipements de routage ni engendrer un surcharge protocolaire importante afin de ne pas retomber dans les travers de solutions de type "services intégrés".

4.7 Evolution du multipoint

La "scalabilité" des protocoles de routage multipoint est loin d'être évidente. Le routage intra-domaine est assuré par l'un des protocoles DVMRP, MOSPF, PIM-DM ou PIM-SM. Mais l'extension au routage inter-domaine (HPIM, MSDP, BGMP, MBGP) et les travaux associés sur l'allocation dynamique des adresses (MADCAP, AAP, MASC) ont abouti à une complexité assez importante qui va à l'encontre de la simplicité du modèle de base.

De nouvelles propositions remettent en cause la définition du service multipoint, soit en imposant un modèle de transmission 1 vers N uniquement (le groupe sera indentifié par le couple [Source, adresse de groupe] comme dans *Express* soit en définissant un groupe par une adresse de classe D *et* une adresse d'un point de rendez-vous (le groupe sera indentifié par le couple [RP, G] comme dans *Simple Multicast*.

Nous nous proposons d'étudier l'évolution du service multipoint et de proposer des mécanismes de contrôle de congestion adaptés, ainsi que des mécanismes de support de la qualité de service en multipoint. Nous étudierons aussi le support des flots multipoint sur un réseau diffserv.

Nous détaillons ici nos travaux sur le contrôle de congestion multipoint. Définir des mécanismes de contrôle de congestion de bout en bout pour des flôts avec contraintes temporelles, ou des flots multipoints peut être assez complexe. Ceci l'est d'autant plus qu'il faut veiller à adopter un comportement compatible avec celui des flots TCP. Obtenir l'aide des routeurs dans le réseau pour partager équitablement la bande passante est donc utile. Les propositions existantes utilisent des mécanismes complexes de gestion de files d'attente et maintiennent un état par flot dans les routeurs. Nous proposons de réaliser ce partage équitable sans introduire d'état dans les routeurs au cœur du réseau. Les paquets sont marqués près de la source, en tenant compte de la nature du flot. Dans le cœur du réseau, les routeurs se débarrassent des paquets marqués avec les plus hautes valeurs en cas de congestion. Nous avons conçu un protocole appelé TUF (Tag based fair queueing for responsive and Unresponsive Flows) permettant d'assurer le contrôle de congestion sans avoir un état par flot dans les routeurs [9]. Nous sommes en train de comparer ce protocole avec CSFQ (Core Stateless Fair Queueing) récemment proposé par Stoica. Nous obtenons avec notre approche des performances semblables. Toutefois, en tenant compte de la nature des flots, notre mécanisme est plus robuste lorsque le trafic externe est très irrégulier [21]. Nous comptons continuer cette activité et la développer sur divers aspects dont le support des liens sans fil, l'adéquation aux flux multipoint, ainsi que l'interférence avec les mécanismes de gestion active de file d'attente (RED).

Nous nous intéresserons, d'autre part, au support de la transmission multipoint au niveau applicatif. Nous regardons en particulier les approches de type "arbre autoconfigurable" grâce

auxquelles l'ensemble des récepteurs s'auto-organise, éventuellement en s'aidant d'un point de rendez-vous, pour créer un arbre de diffusion multipoint. Cette approche permet de s'affranchir du mécanisme de routage multipoint du réseau, qui peut se révéler inefficace dans le cas de nœuds mobiles par exemple. Elle permet aussi l'utilisation aisée de tunnels pour atteindre un nœud mobile. Ces tunnels seront généralement de niveau transport. Utiliser TCP (ou tout autre protocole qui serait plus adapté à une situation donnée, par exemple TCP avec acquittements sélectifs), a l'avantage de permettre de fiabiliser les transmissions avec le nœud suivant, si l'application l'exige, et d'assurer un contrôle de flux tout à la fois. UDP est également envisageable, par exemple si l'application désire garder un maximum de contrôle. Plusieurs initiatives reposant sur des arbres autoconfigurables existent. On peut citer *AMRoute* qui propose un mécanisme de construction d'arbres bien adapté au cas des réseaux ad-hoc, et *Yallcast*, qui vise un déploiement sur l'Internet. Nos travaux se situent entre ces deux propositions puisque nous reprenons certains mécanismes et concepts de chacun. Plutôt que de nous focaliser sur les algorithmes de construction d'arbre, un domaine à part entière, nous nous intéresserons davantage aux diverses conséquences que l'utilisation de ces techniques va induire.

4.8 Les environnements virtuels à grande échelle

Au sein du projet Rodéo, nous avons déjà travaillé sur l'application MiMaze (Multicast internet Maze). MiMaze est un jeu distribué sur l'Internet, basé sur le système de simulation distribuée interactive (DIS). Il utilise des mécanismes de transmission multipoint ainsi que des mécanismes de synchronisation distribuée, permettant d'améliorer la cohérence du jeu. L'architecture de MiMaze a été modifiée pour rajouter une composante 3D à l'application, dans le but d'étudier un exemple de monde virtuel partagé sur Internet. Une couche supplémentaire a été rajoutée à l'application MiMaze au dessus de la couche de communication et comprend deux modules : une applet Java et un navigateur VRML, tous deux embarqués dans une même page HTML. Le jeu distribué 3D MiMaze a ensuite été évalué, aussi bien au niveau CPU qu'au niveau du trafic multipoint généré. La "*scalabilité*" de ce type d'application ainsi que la complexité des algorithmes implantés dans MiMaze en fonction du nombre de participants ont été évaluées.

Un des premiers problèmes qui restent à résoudre consiste à permettre une mise en correspondance efficace, dynamique et "scalable", entre les centres d'intérêts des participants et les groupes multipoint alloués pour l'application. Le protocole de mise en correspondance doit permettre de regrouper en cours de session plusieurs centres d'intérêts dans un même groupe multipoint, ou, au contraire, d'en dissocier une partie dans de nouveaux groupes. La correspondance entre les centres d'intérêt regroupant un nombre de participants qui varie plus ou moins vite, et les groupes multipoint doit être annoncée, transmise avec fiabilité et mise à jour de façon synchronisée entre les participants.

Nous travaillons actuellement sur une approche au niveau de la couche transport, en s'appuyant sur l'utilisation d'agents multiples et sur un ensemble de groupes multipoints. Notre architecture implique un découpage dynamique en cellules de l'environnement virtuel ainsi que l'association dynamique par les agents, de ces cellules avec des groupes multipoints. La particularité et l'atout majeur d'une telle architecture réside dans sa faculté d'adaptation avec un nombre limité de groupes multipoints. En effet, la situation actuelle d'IPv4 et la difficulté

de déploiement du multipoint par les fournisseurs d'accès Internet au grand public, nous ont amenés à proposer une architecture à la fois capable de répondre aux contraintes de ce type d'application, et également d'apparaître suffisamment réaliste afin d'envisager une utilisation réelle dans l'Internet de demain.

5 Logiciels

5.1 MultiCast Library

MCL est une bibliothèque offrant des services multicast évolués. Conforme à la version courante du protocole ALC (Asynchronous Layered Coding) (en cours d'élaboration), elle permet des communications multicast (semi) fiables prenant en compte l'hétérogénéité de chacun. La bibliothèque est livrée avec une application de transfert de fichiers récursif et un générateur de trafic. Débuté en 1998, ce logiciel arrive à maturité. Il est partiellement développé dans le cadre du projet européen DSE (Distributed Systems Engineering). Pour plus d'informations, voir : <http://www.inrialpes.fr/planete/people/roca/mcl/mcl.html>

5.2 HMIPv6

HMIPv6 est une protocole de gestion de la mobilité hiérarchique reposant sur le protocole Mobile IPv6. Ce protocole est en cours de standardisation à l'IETF. Voir <http://www.inrialpes.fr/planete>

5.3 Rendez-Vous

Rendez-Vous est un outil de vidéoconférence sur l'Internet développé par Frank Lyonnet. Rendez-Vous permet des conférences en point à point et en multipoint. Il utilise le codec H.261 d'IVS (un ancien logiciel de vidéoconférence, également développé dans le projet), ainsi que des codeurs hiérarchiques expérimentaux. Rendez-Vous permet aussi la lecture de fichiers MPEG1 et MPEG2. La partie audio de Rendez-Vous est basée sur le logiciel FreePhone. Voir <http://www-sop.inria.fr/rodeo/rv>

5.4 FreePhone

FreePhone est un outil audio pour l'Internet développé par Sacha Fosse Parisi et Andrés Vega García. Il permet de gérer plusieurs conversations point à point et multipoints en parallèle. Il possède également un certains nombre de mécanismes avancés de codage (son stéréo, son 3D utilisé dans Mimaze pour restituer un environnement virtuel réaliste) et de contrôle (contrôle de débit pour l'adaptation à la bande passante disponible dans le réseau, contrôle de redondance pour l'adaptation aux pertes, etc).

Voir <http://www-sop.inria.fr/rodeo/fphone/>

5.5 MiMaze

MiMaze est le premier jeu utilisant une architecture complètement distribuée sur le Mbone. C'est un jeu interactif dans lequel les joueurs, représentés par des entités de type PacMan, se combattent dans un labyrinthe virtuel.

Voir <http://www-sop.inria.fr/rodeo/MiMaze/>

5.6 MiMaze3D

MiMaze3D est la version 3D du logiciel MiMaze. L'architecture de MiMaze a été modifiée pour utiliser VRML comme langage de description de scène 3D. Une couche supplémentaire a été rajoutée au dessus de la couche de communication. Cette nouvelle couche peut-être découpée en deux modules : une applet Java et un navigateur VRML, tous deux embarqués dans une même page HTML. L'applet Java utilise les classes de l'EAI (External Authoring Interface) fournies par le navigateur VRML, afin d'instancier, de modifier et de supprimer les noeuds VRML de la scène 3D. Voir <http://www-sop.inria.fr/rodeo/MiMaze/MiMaze3D>

6 Résultats nouveaux

6.1 Gestion hiérarchique de la mobilité

Participants : Claude Castelluccia, Ludovic Bellier.

Nous avons poursuivi en 2000 nos travaux sur la gestion hiérarchique de la mobilité dans IPv6. Ce protocole a été implanté sous FreeBSD (souche IPv6 INRIA et souche KAME). Notre protocole HMIPv6 est en cours de développement et de standardisation au sein du groupe MobileIP de l'IETF. HMIPv6 a été publié dans [8] et fait actuellement l'objet de draft IETF.

6.2 Internet paging

Participants : Claude Castelluccia, Pars Mutaf.

Au cours de l'année 2000, nous avons travaillé sur l'introduction de mécanisme de pagination dans l'Internet. Nos travaux ont consisté à développer des mécanismes adaptatifs qui calculent en permanence la zone de localisation optimale (taille et forme) de chaque mobile. Ces mécanismes permettent de réduire de façon significative la signalisation due à la gestion de la mobilité des terminaux. Ces résultats ont fait l'objet d'une publication [7] et d'un rapport de DEA.

6.3 Radio adaptative pour l'accès à l'Internet

Participants : Imad Aad, Claude Castelluccia.

Dans le cadre de l'activité "radio adaptative dans l'accès à l'Internet sans fil", nous avons travaillé au cours de l'année dernière le travail à proposer, simuler, modéliser et évaluer différents mécanismes de différenciation de services pour le protocole IEEE 802.11 (utilisé, entre

autres, par les cartes WaveLAN). Deux publications ont été faites sur ce sujet : la première [5] a été présentée dans ISCC2000 à Antibes, France, la deuxième [4] est à paraître dans INFOCOM2001, Anchorage, Alaska. Toujours dans le même thème, on aborde maintenant le protocole d'accès multiple à division de code, CDMA (Code Division Multiple Access) et son application dans la boucle locale sans fil, WLL (Wireless Local Loop).

6.4 Support des Réseaux Mobiles dans IPv6

Participants : Thierry Ernst, Claude Castelluccia.

Notre travail porte sur le support des réseaux mobiles dans IPv6. Un réseau mobile est constitué d'un routeur mobile et de l'ensemble des machines qui lui sont attachées. Le réseau mobile s'attache à différents points de l'Internet par l'intermédiaire du routeur mobile. Pendant l'année écoulée, nos travaux se sont essentiellement portés sur l'amélioration de Mobile IPv6 pour permettre le support des réseaux mobiles, ce que Mobile IPv6 ne permet pas pour le moment. Dans un premier temps, nous avons identifié les modifications de base qui doivent nécessairement être apportées à Mobile IPv6. Ceci a débouché sur des propositions faites à l'IETF dans le groupe de travail Mobile IP [22, 23]. Nous sommes actuellement en train d'étendre nos propositions pour qu'elles soient en conformité avec les spécifications liées à la sécurité (IPSec). Afin de minimiser le coût des messages de contrôle (Binding Updates) qui doivent être envoyés à l'ensemble des correspondants pour les informer de la position courante du réseau mobile dans la topologie Internet (i.e. son adresse IPv6 temporaire), nous travaillons sur une distribution multipoint de ces messages de contrôle. Un brevet a été déposé à ce sujet et un deuxième est en cours. Le premier propose l'envoi des Binding Updates à un group multipoint auprès duquel s'abonnent les correspondants. Le deuxième propose d'inclure l'adresse de plusieurs correspondants dans le Binding Update lui-même. Ceci permet de s'affranchir de l'établissement de l'arbre de distribution multipoint et du mécanisme d'abonnement / désabonnement. Ce nouveau type de procédé multipoint est basé sur les travaux en cours à l'IETF au sein du groupe "Small Group Multicast". La performance de notre approche est actuellement en cours d'évaluation par le biais de la simulation. Afin de procéder à cette évaluation, nous avons ajouté de nombreuses fonctionnalités au simulateur NS-2.

6.5 Contrôle de congestion pour applications multimédias sur l'Internet

Participants : Morchid Abdelfattah, Kavé Salamatian, Thierry Turletti, Shan Yufeng.

Dans le cadre du projet RNRT VISI, nous nous sommes intéressés au problème de l'agrégation des rapports de réception RTCP pour une application de vidéoconférence H.263+ en multipoint sur l'Internet. Nous avons élaboré un algorithme de *clustering* pour classer les rapports de qualité des récepteurs transmis périodiquement vers la source. Cet algorithme permet, en agrégeant les différents rapports RTCP reçus à différents nœuds de l'arbre de transmission multipoint, de résoudre le problème de scalabilité de RTCP tout en conservant une fréquence suffisamment élevée de l'émission des rapports de réception [17].

Nous nous sommes aussi intéressés au contrôle de congestion TCP-courtois pour des applications de vidéoconférence. Une version expérimentale de l'outil de téléphonie sur Internet

fphone a été développée, qui intègre un algorithme de contrôle de congestion TCP-courtois basé sur le protocole TFRC.

6.6 Prise en compte de la gigue dans le calcul du débit TCP courtois

Participants : Hossam Afifi, Frédéric Flayol.

Nous avons mené une étude dont le but est de concevoir un mécanisme permettant d'appliquer TCP courtois à des applications audio à débit variable. Nous supposons que les codecs audio permettent de régler le débit de codage dynamiquement ou, au pire des cas, nous changeons de codec lorsque cela est nécessaire.

Nous avons conçu un système qui comporte neuf états. Il se base sur les équations de TCP courtois dans le fonctionnement normal et plus précisément sur la contribution "Loss Delay Based Adjustment algorithm". Lorsque le délai commence à changer de manière accrue nous changeons d'algorithme. Dans les meilleurs des cas, la gigue est prise en compte et dans le pire des cas, l'algorithme ferme la fenêtre et fonctionne en "slow start" : phase préventive qui évite de charger le réseau. Cet algorithme a été développé sous Linux et a été testé en environnement de congestion afin de vérifier sa réactivité. L'algorithme prenant en compte la gigue, que nous avons conçu fonctionne de manière adéquate.

6.7 Diffusion Multicast de flux audio et adaptation du trafic

Participants : Hossam Afifi, Mounir Benzaid.

Cette étude porte sur l'adaptation de l'algorithme "TCP-Courtois dans la transmission de flux multimédias multi-couches dans un environnement multicast. Récemment, il y a eu plusieurs modèles d'adaptation TCP-friendly qui varient dans leurs complexité, efficacité et objectifs. À la différence de la proposition originale de TCP courtois, ces modélisations prennent en compte les effets des temporisateurs et des récepteurs multiples.

L'implémentation ainsi que les simulations de l'algorithme ont été basées sur le protocole RTCP (protocole annexe de RTP). Nous nous sommes basés sur un modèle portant le nom de MLDA (Multicast Loss Delay Sensitive Application du GMD Focus) qui est un protocole de contrôle de congestion TCP-friendly hybride (l'adaptation est orientée à la fois récepteur et émetteur), il supporte une mise en couche dynamique des données, c'est-à-dire que le nombre et les taux des couches sont déterminés d'une façon dynamique en se basant sur les feedbacks des récepteurs. Nous avons amélioré les mécanismes de MLDA et lui avons apporté l'usage du protocole RTCP.

Des tests ont été effectués en utilisant un réseau souffrant de congestions générée grâce à l'outil "BYPASS" (développé par Patrick Cipièrè) comportant un émetteur, un routeur et plusieurs récepteurs sous LINUX et les résultats de l'algorithme se sont avérés très satisfaisants. Le travail a été publié dans une conférence nationale [6].

6.8 Mise en œuvre d'applications radio logicielles en logiciel

Participants : Hahnsang Kim, Thierry Turetletti.

Dans le cadre du projet Européen ITEA DESS, nous nous intéressons à l'utilisation du langage formel synchrone Esterel pour implanter la partie contrôle des applications *radio logicielles*. Aujourd'hui, l'élaboration de ce type d'applications reste très complexe. L'utilisation d'une approche formelle pour mettre en oeuvre ces applications pourrait faciliter et accélérer leur implantation en permettant une vérification automatique des algorithmes implantés.

En particulier, nous avons modifié l'environnement de développement d'applications radio logicielles Pspectra¹ pour que sa partie contrôle utilise le langage formel Esterel [12]. De cette manière, les développeurs d'applications auront la possibilité d'utiliser les outils de simulation *Xes* et de vérification *Xeve* fournis avec le langage Esterel. Nous avons implanté deux algorithmes de scheduling différents pour la partie contrôle de Pspectra : le premier est basé sur le modèle *Data-Pull* utilisé par l'environnement Pspectra original alors que le second utilise le modèle *Data-flow* traditionnel. L'analyse des performances obtenues avec le nouvel environnement Pspectra est en cours.

6.9 UDLR - IPv6

Participants : Duros Emmanuel, Patrick Cipièrè, Rafael Rizo.

La technologie IPv6, qui est aujourd'hui expérimentale, devrait être intégrée dans les réseaux opérationnels dans un délai de trois à cinq ans. Les principales tendances technologiques qui se dégagent de cette évolution sont les suivantes :

- développement des technologies portables et sans fil,
- développement des communications par satellite,
- développement de la fourniture de services (WWW, messagerie, etc.) autour de l'Internet,
- intégration des services audio et vidéo dans les services Internet,
- migration des applications informatiques vers ces nouveaux standards avec une distribution accrue des logiciels.

Depuis cette année, nous pouvons émettre des paquets de type IPv6 sur notre liaison satellite. La mise à jour des drivers d'émission et de réception pour supporter cette version du protocole IP a été réalisée. Nous avons aussi validé le fonctionnement du mécanisme de *tunneling* en IPv6.

Pour tester cette technologie, nous avons mis en place une plate-forme nationale IPv6 intégrant le lien satellite. Cette architecture permet de déployer des services telles que la vidéoconférence, applications distribuées, mobilité et gestion de la qualité de services.

1. <http://www.sds.lcs.mit.edu/SpectrumWare/>

6.10 Transmission multipoint fiable par satellites

Participants : Antoine Clerget, Walid Dabbous, Stéphane Réty, Rafael Rizo.

Étant intrinsèquement des liens de diffusion, les liaisons satellites nous permettent de transmettre en multipoint à moindre coût. Contrairement aux connexions multipoints routées sur des réseaux terrestres, les ressources réseaux consommées ne dépendent pas du nombre de récepteurs. Il y a de nombreuses applications à la transmission multipoint fiable par satellite : mise à jour de bases de données, diffusion de logiciels, informations météo, boursières, ... Toutefois, sur satellite géostationnaire, il faut être capable de gérer des délais importants (de l'ordre de 250 ms aller-retour vers le satellite) dus au temps de propagation du signal. De plus, comme pour tout lien radio, le taux d'erreur du lien (BER) est beaucoup plus important que pour des liens de type câble ou fibre optique. C'est souvent grâce à d'importants codes correcteurs d'erreur de bas niveau que l'on corrige ces erreurs, ce qui réduit de manière considérable le débit utile du lien. On souhaiterait pouvoir s'en affranchir, et faire gérer les pertes de paquets par la couche transport.

Par ailleurs, en visant un très grand nombre de destinataires, on se heurte à des problèmes d'hétérogénéité : certains reçoivent les données directement du satellite, pour d'autres, elles sont relayées par une antenne à travers le Mbone. Les chemins menant à ces destinataires sont donc très hétérogènes en terme de bande passante et de taux d'erreur. L'objectif est d'assurer à chacun une transmission fiable tout en minimisant le temps de réception de chaque utilisateur.

Pour assurer la fiabilité tout en répondant aux contraintes mentionnées ci-dessus et pour supporter un grand nombre de participants, nous avons développé des solutions basés sur des techniques de FEC (Forward Error Correction). Pour transmettre un fichier, nous le sectionnons en blocs sur lesquels nous calculons des paquets de redondance. Ces paquets de redondance sont transmis sur différents groupes multipoints de sorte que :

- chaque récepteur puisse ne s'abonner qu'à un sous ensemble de ces groupes multipoints afin d'adapter son débit à la réception tout en recevant l'intégralité du fichier,
- chaque récepteur puisse recevoir le fichier en temps optimal par rapport au débit demandé,
- ces propriétés soient encore vérifiées pour un récepteur qui commencerait à écouter en cours de session.

Pour répondre à ces différentes contraintes, nous avons conçu un protocole de transport en multipoint fiable. Ce protocole est basé sur un mécanisme hybride entre la transmission de paquets de redondance et d'acquittements. L'envoi de paquets de redondance (Forward Error Correcting) permet d'éviter l'envoi de demandes de retransmission par les récepteurs en cas de pertes de paquets. Nous avons développé une librairie de multipoint fiable mettant en œuvre ce mécanisme FEC.

Après des premiers tests de la librairie sur un réseau local, nous nous sommes intéressés à la mise en place d'une application de transfert de fichiers en multipoint fiable. L'application `rmftp` que nous avons développée utilise deux groupes multicast : un premier groupe pour diffuser les messages d'annonce de nouveaux transferts et un second servant aux transferts des

données. Cette application a été testée dans une plate-forme européenne dans le cadre du projet " Convergence Internet-ATM-Satellite " (COIAS).

6.11 Passage à l'échelle d'UDLR

Participants : Rafael Rizo.

Nous pouvons supposer que, dans un futur proche il y aura de plus en plus de récepteurs satellite udlr. On pourrait atteindre des nombres de l'ordre de 10^6 récepteurs. Avec le mécanisme d'encapsulation udlr, les réponses aux requêtes IGMP seront tunnelées vers la station émettrice par défaut, avec la risque d'avoir un problème de "feed-back implosion" en raison du délai de transmission sur la liaison satellite.

Une étude concernant le passage à l'échelle du protocole IGMP sur liaison satellite a été réalisée : la solution proposée est basée sur un mécanisme de temporisateurs exponentiels (inspiré de " Scalable Feedback for Satellite Broadcast " ACM/IEEE MobiCom '97 de Jorg Nonnenmacher et Ernst Biersack). Le principe repose sur le choix de délais aléatoires utilisant une fonction de distribution exponentielle. Une étude à l'aide d'un programme qui simule le mécanisme UDLR a été réalisée.

6.12 Planification dans les réseaux hybrides

Participants : Walid Dabbous, Fethi Filali.

Le but de ce travail était de proposer des algorithmes permettant de déterminer les emplacements des stations émettrices satellitaires. Pour ce faire, nous avons établi un modèle d'un réseau hybride multiservices constitué d'un ensemble des réseaux régionaux à haut débit qui sont connectés entre eux, éventuellement, par des liens de communications terrestres à grand débit. Un réseau régional peut correspondre, par exemple, à un relais universitaire appartenant à une zone géographique limitée. Ces réseaux régionaux sont reliés à un satellite géostationnaire via des stations satellitaires d'émission et de réception.

Les deux classes de trafic retenues dans notre étude sont la classe best-effort et la classe garantie. Le réseau hybride est appelé à supporter ces deux types de trafic et à répondre aux exigences des applications utilisateurs. Pour chaque type de trafic, nous avons fixé et évalué une ou plusieurs métriques de performance moyennant un modèle analytique. Aussi, nous avons séparé l'étude du trafic unicast de celui multicast. La métrique de performance retenue pour le trafic unicast est le délai moyen du transfert d'un paquet entre la source et la destination. Quant au trafic multicast, nous avons jugé nécessaire d'étudier séparément le trafic multicast fiable et celui non fiable. Le coût moyen de l'arbre multicast est retenu comme métrique de performance pour le trafic non fiable et le délai moyen du transfert d'un paquet pour le trafic multicast fiable.

Fixant comme objectif l'optimisation des paramètres de performances des différentes classes du trafic, nous avons développé des algorithmes de dimensionnement des réseaux hybrides multiservices [RR-3925]. L'algorithme général de planification des réseaux hybrides proposé renferme deux étapes critiques. La première est celle d'évaluation d'un réseau hybride multiservices et la deuxième sert à sélectionner les emplacements optima des stations satellitaires.

Ainsi, des algorithmes de sélection de ces endroits parmi les réseaux régionaux terrestres ont été proposés. Le choix se fait en optimisant les paramètres de performance tels que : le délai de transfert, le débit, les probabilités de blocage, etc. Les différents algorithmes et méthodes d'optimisation que nous avons proposés ont été intégrés dans l'outil HyNePT (Hybrid Network Planning Tool) développé à l'issue de ce travail.

6.13 Le support du multicast par les satellites régénératifs

Participants : Walid Dabbous, Fethi Filali.

Le groupe du travail UDLR de l'IETF a proposé le mécanisme LLTM (Link Layer Tunneling Mechanism) qui permet d'émuler les liens unidirectionnels (tels que les liens satellitaires) comme étant des liens bidirectionnels et ainsi de les intégrer d'une manière transparente dans l'Internet. Cependant, beaucoup des directions de recherche restent à y penser et entre autres le support efficace du multicast sur ce type des liens. Dans ce cadre, nous intéressons à l'étude de comportement des algorithmes de construction des arbres multicast dans la nouvelle génération des satellites multi-zones où la zone de couverture du satellite est découpée en un ensemble des sous-zones. Les récepteurs satellitaires de chaque zone utilisent une fréquence d'écoute particulière. Le résultat majeur de cette année est la détermination des problèmes qui peuvent avoir lieu aussi bien pour le protocole de gestion des groupes IGMP que pour les protocoles de routage.

Nous avons commencé à étudier, dans le cadre du projet RNRT DIPCAST, les critères de choix du type d'arbre d'acheminement pour le multicast au dessus des liaisons satellite. Des premières solutions basées sur un arbre partagé (PIM-SM) pourraient être efficaces que les solutions basées sur l'approche "innoder puis élaguer" de DVMRP. Nous sommes en cours d'intégration d'UDLR et de l'extension de la partie satellite par le support de multiple-beams et la commutation à bord du satellite dans le Network Simulator (NS) pour pouvoir faire des simulation que nous permettront d'évaluer nos propositions.

6.14 Gestion dynamique de la qualité de service dans l'Internet

Participants : Walid Dabbous, Slim Gara, Rareş Şerban.

La gestion dynamique de la QoS dans l'Internet peut être réalisée en utilisant des mécanismes de signalisation. Deux approches sont possibles : avoir un protocole de signalisation hors bande et utiliser l'état dans paquets (DPS ou Data Packet State). Nous avons focalisé notre étude sur les différents protocoles de signalisation proposés (RSVP, COPS, YESSIR, Beagle, BGRP, Boomerang, MPLS) afin d'évaluer leur adéquation pour la gestion dynamique des ressources *dans* un domaine diffserv. Un rapport a été rédigé dans le cadre du projet Intradiff. Il a aussi été publié dans la conférence Communications'2000 à Bucharest [16]. L'étude sera focalisée l'année prochaine sur la spécification du service et sur les mécanismes de négociation permettant d'assurer la gestion dynamique dans un domaine et entre domaines diffserv.

6.15 Communications multicast en couches multiples

Participants : Vincent Roca, Julien Labouré.

L'utilisation de couches multiples est une solution simple et efficace au problème d'hétérogénéité des machines réceptrices (en terme de puissance de traitement et de réseau d'accès). De plus, elle est facilement couplée à un module de contrôle de congestion basé sur l'adhésion ou le désabonnement à des groupes multicast. Nous travaillons sur l'approche ALC (Asynchronous Layered Coding) qui est en cours de standardisation au sein du groupe RMT de l'IETF. Plusieurs aspects nous intéressent, dont l'organisation des données au sein des couches et la réalisation d'une applications de transfert de fichiers efficace. Une implémentation est en cours de réalisation (MCL).

6.16 Routage multipoint et applications adaptatives

Participants : Laurentiu Barza, Walid Dabbous.

Le routage multicast évolue vers un model un-à-plusieurs comme il est décrit dans le modèle SSM (Source Specific Model). La diffusion de vidéo sur l'Internet est un des domaines qui bénéficieront le plus de l'utilisation d'un algorithme de routage dédié à ce type d'applications.

Nous avons conçu un model de routage adaptatif, dans lequel une application vidéo collabore avec un algorithme de routage adaptatif afin de fournir à l'utilisateur le bon niveau de qualité de service qu'il peut avoir dans les conditions du réseau. Le flux vidéo est transmis dans des couches cumulatives de sorte que l'application s'adapte selon le niveau d'abonnement. Notre algorithme détermine le meilleur chemin possible en tenant compte des paramètres de qualité de service tels que la bande passante et le délai. Nous avons conçu cet algorithme en nous basant sur le modèle SSM. Il fait l'objet d'un rapport de DEA.

6.17 Multicast Applicatif

Participants : Vincent Roca, Ayman El-Sayed.

Alors que le domaine des communications multicast suscite un nombre croissant de travaux au sein de la communauté, et que d'importants efforts sont déployés pour mettre en place des infrastructures opérationnelles, susceptibles de résoudre bon nombre de limitations de l'actuel MBONE, une idée est apparue ces derniers mois qui prend le contre-pied de la tendance générale: le multicast applicatif.

Dans cette approche, seules les machines terminales sur lesquelles s'exécute l'application interviennent. Elles s'auto-organisent afin de créer un arbre de diffusion n'utilisant que des communications point-à-point. Toute l'infrastructure de routage IP multipoint est donc évitée. Nous avons travaillé sur cette idée et nous continuerons dans le cadre d'une thèse doctorat.

6.18 Recherche optimisée d'information de routage IP

Participants : Walid Dabbous, Miguel Á. Ruiz Sánchez.

L'Internet évolue de diverses façons: on constate une croissance du trafic, les caractéris-

tiques du trafic même changent et de nouveaux services sont demandés. Pour faire face à cette évolution, il faut des routeurs performants. Nos travaux se focalisent sur les mécanismes nécessaires dans les routeurs pour faire face à cette évolution et en particulier sur l'optimisation de ces mécanismes. Une opération fondamentale dans un routeur est la recherche d'information de routage, lors de la réexpédition de paquets. Nos travaux concernant l'optimisation de cette opération comprennent non seulement l'opération de recherche elle-même mais aussi la capacité de réaliser une mise à jour progressive de la table de routage. Ceci compte tenu du fait que dans le cœur de l'Internet la mise à jour peut avoir une fréquence de quelques centaines par seconde. Dans cette philosophie, nous avons réalisé la mise en œuvre d'un mécanisme de recherche d'information de routage [18] ayant de meilleures performances que celles de l'approche traditionnelle du "trie Patricia".

Nous avons réalisé également une analyse des différents algorithmes qui existent à l'heure actuelle pour optimiser la recherche d'information dans les tables de routage. À partir de cette analyse nous avons établi une classification du point de vue des structures de données ainsi que de la méthode utilisée. Cette proposition [3] a été acceptée dans le numéro spécial de la revue IEEE Network concernant la réexpédition accélérée et la classification de paquets dans les routeurs.

6.19 Architecture de communication pour applications interactives avec grand nombre de participants

Participants : Emmanuel Léty, Thierry Turletti.

Les travaux de recherche ont essentiellement porté sur les applications de réalité virtuelle avec un grand nombre de participants. En effet, pour un très grand nombre de participants et lorsque l'ensemble des informations transmises sur le réseau transite sur un unique groupe multipoint, le trafic reçu par chaque participant devient trop important. Ceci peut entraîner de nombreuses pertes de paquets au niveau réseau et une saturation au niveau CPU. La répartition de l'information dans plusieurs groupes multipoints nous est apparue indispensable dans la résolution de ce problème. Pour cela, plusieurs politiques de filtrage et de gestion des centres d'intérêt des participants ont été étudiées.

Cette réflexion nous a conduit à proposer une approche au niveau de la couche transport, s'appuyant sur l'utilisation d'agents multiples et sur un ensemble de groupes multipoints. Notre architecture implique un découpage dynamique en cellules de l'environnement virtuel, ainsi que l'association dynamique, par les agents, de ces cellules avec des groupes multipoints. La particularité et l'atout majeur d'une telle architecture résident dans sa faculté d'adaptation à un nombre limité de groupes multipoints. En effet, la situation actuelle d'IPv4 et la difficulté de déploiement du multipoint par les fournisseurs d'accès Internet au grand public nous ont amenés à proposer une architecture à la fois capable de répondre aux contraintes de ce type d'application, et également d'apparaître suffisamment réaliste afin d'envisager une utilisation réelle dans l'Internet de demain.

L'utilisation de plusieurs agents dans notre architecture nous a permis de proposer plusieurs mécanismes destinés à prendre en compte l'hétérogénéité des participants (de différentes capacités réseaux et CPU) dans l'environnement virtuel, afin de réaliser le meilleur découpage

possible de l'environnement virtuel en cellules et l'association de ces cellules avec des groupes multipoints.

6.20 Moteur 3D pour un forum de discussion virtuel

Participants : Emmanuel Léty, Céline Raison, Cédric Dégéa.

Nous avons travaillé sur la conception d'un moteur 3D pour un environnement virtuel de type "chat 3D", c'est à dire permettant la discussion en-ligne. L'objectif principal du projet a consisté à concevoir une application concrète d'environnement virtuel distribué afin de valider le moteur réseau multipoint, en décrivant et en réalisant un moteur 3D fluide et portable (Windows, Linux et Solaris).

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 CS Télécom

Nous avons démarré une collaboration avec CS Télécom sur le thème support de la qualité de service dans l'Internet. Les activités menées dans le cadre de cette collaboration sont décrites dans la section de même titre dans la rubrique "Domaines d'application" (section 4.6).

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions nationales

8.1.1 Projet @IRS

Nous participons au projet RNRT @IRS dont l'objectif est de développer et d'expérimenter les protocoles Internet de Nouvelle Génération ainsi que les fonctions associées qui permettront, d'une part, d'offrir aux usagers des services adaptés à leurs besoins quel que soit le point d'accès (fixe ou mobile) et, d'autre part, de tirer partie d'une infrastructure de télécommunication de plus en plus performante et hétérogène (ATM, Satellite, Réseaux sans fil, Réseaux Locaux...) Le projet @IRS cible plus particulièrement les mécanismes de gestion de la qualité de service et de la mobilité associés au protocole IPv6, nouvelle génération du protocole IP. Ces deux thèmes majeurs de recherche et de développement sont menés dans le contexte d'emploi d'applications interactives et multi-parties, ce qui implique le choix de solutions adaptées aux communications multipoints. L'étude de l'incidence de ces mécanismes sur les fonctions de routage fait également partie intégrante des travaux. Le projet s'inscrit sur une période de deux ans, au terme de laquelle les solutions étudiées et développées durant le projet auront été démontrées sur une plate-forme nationale, à l'aide d'applications innovantes représentatives des besoins technologiques futurs. Les résultats du projet conduiront à l'émergence de produits Internet Nouvelle Génération et à l'intégration progressive de la technologie IPv6 de façon cohérente dans les réseaux et les systèmes d'information. La technologie IPv6, qui est aujourd'hui expérimentale, devrait être intégrée dans les réseaux opérationnels dans un délai de trois à cinq ans.

Le projet @IRS présente de ce fait un intérêt scientifique et industriel majeur pour l'industrie française des télécommunications et celle des applications. Les partenaires du projet sont Dassault Electronique, l'Aerospatiale, le LAAS, le LIP6, l'université de Strasbourg, et l'INRIA Rhône-Alpes.

8.1.2 Projet Constellations de satellite

Depuis quelques années, des progrès spectaculaires ont été effectués dans le domaine des réseaux, par l'accroissement des débits et la mise en place de qualité de service permettant d'acheminer des applications multimédias. Les recherches qui ont été faites commencent à déboucher sur des produits, que ce soit dans les domaines ATM ou Internet. Les questions qui se posent au niveau recherche sont maintenant assez radicalement différentes. Deux points vont encore complètement modifier l'environnement des réseaux : (1) l'arrivée des constellations de satellites et (2) le besoin de maîtriser l'environnement réseau qui ne fait qu'augmenter en complexité.

Nous participons au projet RNRT "constellations de satellites pour le multimédia", dans le cadre duquel nous souhaitons nous attaquer aux différents problèmes posés par les constellations de satellites pour le transport d'applications multimédias. Ce projet est découpé en cinq conventions complémentaires.

1. La première convention concerne les problèmes posés par les constellations de satellites du point de vue de la qualité de la transmission sur l'interface radio.
2. La seconde convention se préoccupe de la gestion des ressources disponibles (fréquence, mémoire, capacité), la gestion des handover, le routage en tenant compte de la dynamique des satellites. Cette gestion des ressources demande une signalisation importante qui sera également étudiée dans cette convention.
3. La troisième convention concerne l'utilisation des protocoles ATM et IP dans le cas de communication avec un système satellitaire, toujours en regardant le problème de l'utilisation efficace des ressources (taux d'erreur, codage) et dans le but d'obtenir un contrôle de la qualité de service (maintien de la qualité de transport de bout en bout...).
4. La quatrième convention se propose de concevoir et de réaliser un nouvel environnement capable de contrôler la complexité et de maîtriser les paramètres d'une constellation de satellites.
5. La cinquième convention concerne le développement d'un atelier contenant un environnement de simulation pour dimensionner, tester, évaluer les performances de systèmes (ou sous-systèmes) de télécommunications basés sur des constellations de satellites.

8.1.3 Projet Dipcast

Nous participons au projet RNRT Dipcast dont l'objectif principal est de proposer un réseau satellitaire géostationnaire qui réponde aux évolutions du trafic sur l'Internet, qui s'oriente de plus en plus vers la diffusion. Pour répondre à l'augmentation exponentielle des flux dans

l'Internet, il apparaît fondamental d'utiliser les protocoles d'IP multicast, dont le satellite géostationnaire est aujourd'hui un excellent vecteur. Mais, pour répondre à la demande de bande passante et de souplesse, ces satellites évoluent vers des configurations multifaisceaux en montée et en descente pour lesquelles les réponses transparentes traditionnelles ou régénératives monofaisceaux ne sont pas suffisantes. Il faut donc envisager une seconde génération de processeur DVB et de duplication bord. Cette duplication doit être compatible avec les générations précédentes et suivre l'évolution des protocoles multicast terrestres". Le projet Dipcast vise donc à la réalisation d'une double plateforme matérielle et logicielle permettant de définir cette nouvelle génération de processeurs. Il se répartit en trois sous-projets : système, plate-forme matérielle (le DVB routeur) et plate-forme logicielle (protocoles et applications).

Les partenaires du projet sont Alcatel Space Industries, le CNES, le LAAS, CRIL Ingénierie, l'ENSICA, l'ENSEEIH, l'INRIA, ISIS et POLYCOM.

8.1.4 Projet Intradiff

Nous participons au projet RNRT Intradiff dont l'objectif est d'étudier aux limites les mécanismes de gestion statique des ressources proposés par l'approche diffserv et de proposer des solutions de gestion dynamique des ressources pour optimiser l'utilisation des ressources du réseau. En effet, dans les prochaines années, le réseau Intranet de l'entreprise se construira autour d'une offre opérateur intégrant directement le service IP. Cette approche suppose d'offrir une qualité de service IP native pour, d'une part, fournir les services dits "legacy" et, d'autre part, supporter les nouvelles applications multimédia (téléphonie, visioconférence,?). A partir d'une définition de différents scénarios de profils de trafic de réseaux d'entreprise, le projet Intradiff a pour but d'étudier l'implémentation optimale de la qualité de service IP selon deux axes complémentaires. Le premier vise à étudier le comportement aux limites de l'approche "services différenciés" proposée par l'IETF, qui repose sur un dimensionnement statique des ressources du réseau. La méthodologie retenue consiste à déployer une plate forme expérimentale puis à extrapoler les résultats obtenus sur de grands réseaux au moyen de simulations. Le second axe propose de compléter l'approche "services différenciés" par l'étude de protocoles de signalisation permettant une gestion plus fine des ressources, de façon à garantir un niveau de qualité de service constant quand le réseau approche de ses limites et à optimiser l'utilisation des ressources. Les protocoles seront définis en lien étroit avec le groupe de travail diffserv de l'IETF, implémentés sur la plate forme puis modélisés de façon à comparer les deux modes de gestion des ressources. La plate forme utilisée dans le projet INTRADIFF s'appuie sur un accès à un réseau opérateur et intègre des équipements de bordure IP ainsi que des routeurs d'accès.

Les partenaires du projet sont CS Télécom, Thomson CSF Detexis (6wind), Cégétel et l'INRIA.

8.1.5 Projet VISI

Participation au projet RNRT VISI (Vidéo Interactive sur Internet) avec les partenaires Thomson Multimedia, Eurecom, Edixia, France Telecom et le projet TEMICS à l'IRISA. L'objectif du projet est de faciliter et d'améliorer la transmission de contenus vidéos sur l'Internet,

c'est-à-dire de réduire l'écart de qualité existant avec la diffusion conventionnelle de type hertzien ou câble. Les applications ciblées sont la consultation de documents vidéo pré-enregistrés (VOD) et temps réel (visioconférence, téléenseignement, et ventes aux enchères). Nous nous occupons principalement du contrôle de congestion et du contrôle d'erreur pour ces types d'applications. En particulier, nous étudions des mécanismes de coordination source/réseau/client ainsi que des mécanismes FEC à base de canaux de redondance.

8.1.6 Projet MobiSecV6

Participation au projet RNRT MobiSecV6. Le but de ce projet est de permettre à des utilisateurs mobiles :

- de se déplacer dans l'Internet tout en conservant leurs connexions actives,
- de disposer d'une adresse principale universelle permettant au mobile d'être accessible dans tout l'Internet,
- de pouvoir accéder à des services et des données via les protocoles de mobilité avec la même sécurité qu'ils soient dans leur réseau d'origine ou à l'extérieur de ce dernier.

Le projet regroupe trois partenaires : Bull, l'INRIA et le CNET. Le rôle de l'Inria dans ce projet est de contribuer à la spécification du protocole de gestion de la mobilité au sein de l'IETF (Internet Engineering Task Force) en proposant notamment une gestion hiérarchique de la mobilité pour mieux répondre aux besoins de performances et de sécurité.

8.1.7 Projet MobiNet

Nous avons une convention Cifre avec le centre de recherche de Motorola à Paris. Dans le cadre de ce contrat, nous travaillons sur la gestion de la mobilité des réseaux embarqué et participons à l' IETF.

8.1.8 Projet ARC MobiQoS

Nous dirigeons et participons au projet ARC MobiQoS en collaboration avec l'ENST-Bretagne et l'Université de Berne en Suisse. Dans le cadre de ce projet, nous étudions la problématique de la gestion de la QoS dans des environnements mobiles et sans fil.

8.2 Actions financées par la Commission Européenne

8.2.1 Projet DSE

Le projet Planète participe au projet européen DSE (Distributed Systems Engineering) en tant que sous-traitant. Ce projet a pour objectif de développer un environnement de travail coopératif, fondé sur des technologies CORBA et HLA (High Level Architecture), et offrant des services de gestion de groupe et de session élaborées voir <http://cec.to.alespazio.it/DSE/>.

8.2.2 Projet DESS

Le projet Planète participe au projet européen ITEA DESS (*Software Development Process for Real Time Embedded Software Systems*). Les partenaires principaux sont Barco, Bull Italia, Daimler-Chrysler, Philips, Siemens AG, Thomson CSF et multimedia, GMD-FIRST, INRIA, IRISA, et K.U.Leuven. Le but du projet est de définir une méthodologie pour implanter de manière efficace des systèmes temps-réel embarqués.

Le but de nos travaux est d'expérimenter et d'évaluer le langage formel synchrone Esterel pour implanter la partie contrôle des applications *radio logicielles* voir <http://www-sop.inria.fr/rodeo/swr.html>. Le terme de radio logicielle désigne une radio dont la plupart des fonctions de la couche physique sont implantées en logiciel. Aujourd'hui, l'élaboration des applications radio logicielles est très complexe et nécessite des compétences pluridisciplinaires : architecture logicielle, traitement du signal (modulation, codage, compression, contrôle d'erreurs), réseau (protocoles de transmission, algorithmes de contrôle de congestion), vérification et validation des algorithmes, etc. L'utilisation d'une approche formelle pour mettre en œuvre ces applications pourrait faciliter l'implantation et la validation de ces applications. Nous nous proposons d'ajouter le langage formel Esterel à PSPECTRA qui est un environnement de développement d'applications radio logicielles développé au LCS/MIT. L'environnement de programmation PSPECTRA permet d'implanter des applications modulaires temps-réel à fortes teneur en traitement du signal. Il a été utilisé pour implanter plusieurs sortes de radio logicielles comme des récepteurs radio, TV et téléphone cellulaire AMPS ainsi qu'un récepteur multi-bandes[2]. Nous nous proposons d'interfacer ce nouvel environnement de programmation avec le langage formel Esterel.

8.3 Relations bilatérales internationales

8.3.1 NEC

Nous avons démarré des discussions avec NEC Allemagne afin de travailler sur le thème support de la qualité de service dans un environnement mobile.

8.3.2 Hitachi

Nous avons des contacts avec Hitachi pour travailler sur udlr.

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la communauté scientifique

Le projet Planète a participé à l'organisation de la conférence ISCC'00 qui s'est tenue à Antibes en juillet 2000.

9.2 Enseignement universitaire

Réseaux : cours de tronc commun du DEA Réseaux et Systèmes Distribués, université de Nice-Sophia Antipolis, par W. Dabbous (12h), S. Gara (12h).

Transmission multipoint : cours d'option du nouveau DEA Réseaux et Systèmes Distribués (24h), université de Nice-Sophia Antipolis, par W. Dabbous.

Réseaux : cours de 3ème année de l'ENSIMAG (Grenoble), par V. Roca,

Réseaux Mobiles : cours en DEA (Ensimag), DESS (UJF) et 3ème année ENSERG par C. Castelluccia (36h).

9.3 Thèses et stages

9.3.1 Thèses soutenues en 2000

1. Emmanuel Léty a soutenu sa thèse sur le sujet : "Architecture de communication pour les environnements virtuels à grande échelle sur l'Internet". à l'université de Nice Sophia Antipolis.

9.3.2 Thèses en cours

1. Imad Aad travaille sur "La radio adaptative dans l'accès à l'Internet sans fil". Il est inscrit à l'université Joseph Fournier.
2. Laurențiu Barză travaille sur le sujet : "Evolution du service IP multicast". Il est inscrit à l'université de Nice Sophia Antipolis.
3. Antoine Clerget travaille sur le sujet : "routage et contrôle de transmission point à point et multipoint dans un réseau hétérogène". Il est inscrit à l'ENST Paris.
4. Thierry Ernst travaille sur le sujet : "Le Support des Réseaux Mobiles dans IPv6". Il est inscrit à l'université Joseph Fournier.
5. Fethi Filali travaille sur le sujet : "Support du routage multicast sur satellite régénératif". Il est inscrit à l'université de Nice Sophia Antipolis.
6. Fatma Louati travaille sur le sujet : "Mécanismes pour le support de la qualité de service dans l'Internet". Il est inscrit à l'université de Nice Sophia Antipolis.
7. Pars Mutaf travaille sur le sujet : "La gestion de la mobilité dans les réseaux tout-IP". Il est inscrit à l'université Joseph Fournier.
8. Șerban Rareș travaille sur le sujet : "Gestion dynamique des ressources dans l'Internet". Il est inscrit à l'université de Nice Sophia Antipolis.
9. Miguel Á. Ruiz Sánchez travaille sur le sujet : "Architecture de routeurs IP". Il est inscrit à l'université de Nice Sophia Antipolis.

9.3.3 Stages effectués dans le projet

1. Agrégation de flots RTCP, Abdelfattah Morchid, EMI, Maroc.
2. Réalisation d'un monde virtuel 3D multi-utilisateurs sur IP multipoint, Cédric Dégéa et Céline Raïsson, Projet ESSI-3/DESS, Sophia Antipolis.
3. Etude de protocoles MAC adaptatifs pour systèmes 3GPP, Amit Jain, IIT, Inde.
4. Etude de protocoles de contrôle de congestion TCP courtois, Shan Yufeng, Shandong University of Technology, Chine.
5. Diffusion Multicast de flux audio et adaptation du trafic, Mounir Benzaid, stage de DEA RSD, UNSA.
6. Prise en compte de la gigue dans le calcul du débit TCP courtois, Frédéric Flayol, stage de DEA RSD, UNSA.

9.4 Participation à des colloques, séminaires, invitations

- Walid Dabbous a donné une conférence sur l'Internet par satellite à l'Université de tous les Savoirs le 6 septembre 2000. La conférence peut être accédée via :
<http://www.2000enfrance.com/sites/utls/>
- Participation de Vincent Roca à l'école d'été "Réseaux Haut Débit et Multimédia" (RHDM2000), tutoriel sur les techniques de multicast applicatif, juillet 2000.
- Participation de Thierry Turletti au comité du Workshop Packet Video, 1-2 Mai 2000, Forte Village Resort, Italie ainsi qu'au comité du "Symposium on Applications and the Internet", San Diego, Californie, 8-12 janvier 2001. Membre éditeur du journal "Wireless Communications and Mobile Computing" de Wiley Interscience.

10 Bibliographie

Articles et chapitres de livre

- [1] C. BARAKAT, E. ALTMAN, W. DABBOUS, «On TCP Performance in a Heterogeneous Network : A Survey», *IEEE Communication Magazine*, 1, janvier 2000, p. 40–46.
- [2] C. GUILLEMOT, T. TURLETTI, *Algorithmes de codage et de contrôle de transmission vidéo sur réseaux hétérogènes*, Hermes Science Publication, 2000, ch. 1.
- [3] M. . R. SÁNCHEZ, E. BIRSACK, W. DABBOUS, «Survey of forwarding lookup algorithms for routers», *IEEE Network Magazine*.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [4] I. AAD, C. CASTELLUCCIA, «Introducing service differentiation into IEEE 802.11», *in: Proceedings of the fifth IEEE symposium on Computers and Communications (ISCC2000)*, p. 438–443, Antibes - Juan les Pins, France, juillet 2000.
- [5] I. AAD, C. CASTELLUCCIA, «Differentiation mechanisms for IEEE 802.11», *in: to appear in IEEE Infocom 2001*, Anchorage - Alaska, Avril 2001.
- [6] M. BENZAID, H. AFIFI, «Adaptation de la technique TCPfriendly au multicast en couches», *in: Actes de JDIR '2000*, novembre 2000.
- [7] C. CASTELLUCCIA, «Extending Mobile IP with Adaptive Individual Paging: A Performance Analysis», *in: Proceedings of the fifth IEEE symposium on Computers and Communications (ISCC2000)*, Antibes - Juan les Pins, France, juillet 2000.
- [8] C. CASTELLUCCIA, «HMIPv6: A Hierarchical Mobile IPv6 Proposal», *in: ACM Mobile Computing and Communication Review (MC2R)*, avril 2000.
- [9] A. CLERGET, W. DABBOUS, «TUF: Tag-Based Unified Fairness», *in: to appear in IEEE Infocom 2001*, Anchorage - Alaska, Avril 2001.
- [10] T. ERNST, C. CASTELLUCCIA, H.-Y. LACH, «"Extending Mobile IPv6 with Multicast to Support Mobile Networks in IPv6"», *in: 1st European Conference on Universal Multiservice Networks (ECUMN)*, Colmar, France, octobre 2000, <http://www.inrialpes.fr/planete/people/ernst/>.
- [11] T. ERNST, «Extending Mobile IPv6 with Multicast to support Mobile Networks in IPv6», *in: IP based Cellular Network conference (IPCN)*, Upper Side, Paris La Defense, France, Mai 2000.
- [12] H. KIM, T. TURLETTI, «A new methodology to develop DSP applications in S/W», *in: Talk at the 7th Synchronous Workshop*, novembre 2000.
- [13] E. LÉTY, T. TURLETTI, F. BACCELLI, «Cell-based Multicast Grouping in Large-Scale Virtual Environments», *in: Poster présenté à ACM/SIGMETRICS*, Santa Clara, California, juin 2000.
- [14] M. PARS, «Paging Support for Mobile IPv6», *in: Rapport de DEA*, UJF, Grenoble, juillet 2000.
- [15] V. ROCA, «On the Use of On-Demand Layer Addition (ODL) with Multi-Layer Multicast Transmission Techniques», *in: 2nd Workshop on Networked Group Communication (NGC2000)*, novembre 2000.
- [16] R.SERBAN, S.GARA, W.DABBOUS, «Internet QoS Signaling Protocols», *in: IEEE Communications 2000*, Bucharest, Romania, décembre 2000.
- [17] K. SALAMATIAN, T. TURLETTI, «Classification of heterogeneous receivers for video diffusion over the Internet», *in: 15th Annual IEEE Computer Communications Workshop (CCW 2000)*, Florida, octobre 2000.
- [18] M. Á. R. SÁNCHEZ, W. DABBOUS, «Un mécanisme optimisé de recherche de route IP», *in: Proceedings CFIP 2000 (Coloquie Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles)*, p. 217–232, Toulouse, France, octobre 2000.

Rapports de recherche et publications internes

- [19] L. BARZA, « QoS architecture for layered multicast video », *Rapport de dea*, INRIA, Sophia Antipolis, Septembre 2000.
- [20] C. CASTELLUCCIA, L. BELLIER, « Hierarchical Mobile IPv6 », *Internet draft :draft-castelluccia-mobileip-hmipv6-00.txt*, juillet 2000.
- [21] A. CLERGET, W. DABBOUS, « Tag-based Fair Bandwidth Sharing for Responsive and Unresponsive flows », *Rapport de recherche n° 3846*, INRIA, décembre 1999.
- [22] T. ERNST, L. BELLIER, C. CASTELLUCCIA, H.-Y. LACH, « Mobile Networks Support in Mobile IPv6 », *Internet Draft n° draft-ernst-mobileip-v6-network-00.txt*, IETF, juillet 2000, Work in progress.
- [23] T. ERNST, L. BELLIER, C. CASTELLUCCIA, H.-Y. LACH, « Mobile Networks Support in Mobile IPv6 », *Internet Draft n° draft-ernst-mobileip-v6-network-01.txt*, IETF, décembre 2000, Work in progress.
- [24] F. FILALI, W. DABBOUS, « Optimization of GEO Satellite Links Deployment in the Internet », *rapport de recherche n° 3925*, INRIA, Avril 2000.
- [25] V. ROCA, « On-Demand Layer Addition (ODL): Making Multi-Layer Multicast Transmissions Cheaper », *Rapport technique n° 0239*, INRIA, février 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rt-0239.html>.
- [26] H. SOLIMAN, C. CASTELLUCCIA, K. ELMALKI, L. BELLIER, « Hierarchical MIPv6 mobility management », *Internet Draft n° draft-ietf-mobileip-hmipv6-02.txt*, IETF, décembre 2000, Work in progress.