

# *Projet PLANETE*

*Protocoles et Applications pour l'Internet*

*Sophia Antipolis, Rhône-Alpes*

THÈME 1B



*R*apport  
*d'Activité*

2001



---

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Composition de l'équipe</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Présentation et objectifs généraux</b>	<b>4</b>
2.1	Présentation générale . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Fondements scientifiques</b>	<b>4</b>
3.1	Méthodologie . . . . .	4
3.2	Vers un Internet cellulaire . . . . .	5
3.3	Optimisation de protocoles de transmission multimédia vers des récepteurs hétérogènes et mobiles . . . . .	6
3.4	Méthodologie d'implantation et de vérification des applications multimédia mobiles . . . . .	7
3.5	Impact des nouveaux supports de transmission sur les protocoles . . . . .	8
3.6	Evolution des services de l'Internet . . . . .	8
3.7	Applications interactives multi-utilisateurs . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Domaines d'applications</b>	<b>10</b>
4.1	Architecture de gestion hiérarchique de la mobilité . . . . .	10
4.2	Internet paging . . . . .	11
4.3	Gestion de la mobilité des réseaux . . . . .	11
4.4	Impact des nouveaux supports sur le routage . . . . .	12
4.5	Impact des nouveaux support sur le transport . . . . .	13
4.6	Support de la qualité de service dans l'Internet . . . . .	14
4.7	Evolution du multipoint . . . . .	15
4.8	Les environnements virtuels à grande échelle . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Logiciels</b>	<b>16</b>
5.1	MultiCast Library . . . . .	16
5.2	HMIPv6 . . . . .	17
5.3	Rendez-Vous . . . . .	17
5.4	FreePhone . . . . .	17
5.5	MiMaze . . . . .	17
5.6	MiMaze3D . . . . .	17
<b>6</b>	<b>Résultats nouveaux</b>	<b>18</b>
6.1	Gestion hiérarchique de la mobilité . . . . .	18
6.2	Internet paging . . . . .	18
6.3	Radio adaptative pour l'accès à l'Internet . . . . .	18
6.4	Support des Réseaux Mobiles dans IPv6 . . . . .	19
6.5	Mobilité et Sécurité . . . . .	19
6.6	Contrôle de congestion pour applications multimédias sur l'Internet . . . . .	20
6.7	Mise en œuvre d'applications radio logicielles en logiciel . . . . .	20
6.8	Etude de l'impact de l'asymétrie des liens sur les performances de TCP . . . . .	21

6.9	Passage à l'échelle d'UDLR . . . . .	21
6.10	Optimisation de la planification des réseaux hybrides multi-services . . . . .	21
6.11	Le support du multicast par les satellites régénératifs . . . . .	22
6.12	Evaluation de RED . . . . .	24
6.13	Les algorithmes de gestion active de files d'attentes pour le trafic multicast . . . . .	24
6.14	Mise en œuvre de la qualité de service diff-serv dans un réseau intranet . . . . .	25
6.15	Gestion dynamique de la qualité de service dans l'Internet . . . . .	25
6.16	Traitement optimisé dans les routeurs IP . . . . .	25
6.17	Communications multicast en couches multiples . . . . .	26
6.18	FEC hautes performances . . . . .	27
6.19	Solutions de sécurité adaptées aux transmissions multipoints . . . . .	27
6.20	Techniques de communication de groupe alternatives . . . . .	27
6.21	Application monde virtuel 3D avec grand nombre de participants . . . . .	28
<b>7</b>	<b>Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)</b>	<b>28</b>
7.1	Hitachi . . . . .	28
<b>8</b>	<b>Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>29</b>
8.1	Actions nationales . . . . .	29
8.1.1	Projet @IRS++ . . . . .	29
8.1.2	Projet Constellations de satellite . . . . .	29
8.1.3	Projet Dipcast . . . . .	30
8.1.4	Projet Intradiff . . . . .	30
8.1.5	Projet VISI . . . . .	31
8.1.6	Projet VIP . . . . .	31
8.1.7	Projet ARCADE . . . . .	32
8.1.8	Projet VTHD . . . . .	32
8.1.9	Projet MobiSecV6 . . . . .	32
8.1.10	Projet MobiNet . . . . .	33
8.1.11	Projet ARC MobiQoS . . . . .	33
8.2	Actions financées par la Commission Européenne . . . . .	33
8.2.1	Projet DSE . . . . .	33
8.2.2	Projet DESS . . . . .	33
<b>9</b>	<b>Diffusion de résultats</b>	<b>34</b>
9.1	Enseignement universitaire . . . . .	34
9.2	Thèses et stages . . . . .	34
9.2.1	Thèses soutenues en 2001 . . . . .	34
9.2.2	Thèses en cours . . . . .	34
9.2.3	Stages effectués dans le projet . . . . .	35
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations . . . . .	35
<b>10</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>35</b>

## 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 Turlletti [Chargé de recherche, Inria]

### Assistante à Sophia

Aurélie Richard [Technicien de recherche, Inria]

### Assistante à Grenoble

Valérie Gardès [Adjoint Technique de recherche, Inria]

### Personnel Inria

Vincent Roca [Chargé de recherche, Inria]

### Chercheur extérieur

Hossam Afifi [MdC INT Evry]

### Ingénieurs experts

Ali Boudani

Alexis Gourdon [à partir du 15 septembre 2001]

Hahnsang Kim

Julien Labouré

Ni Qiang [à partir du 1<sup>er</sup> octobre 2001]

### Chercheurs doctorants

Imad Aad [Boursier INRIA]

Lina Al-Chaal [Boursière Cifre Netcelo S.A., depuis le 20 octobre 2001]

Vijay Arya [Boursier INRIA depuis le 1<sup>er</sup> octobre 2001]

Laurențiu Barză [Boursier INRIA]

Ayman El-Sayed [Boursier du gouvernement Egyptien]

Thierry Ernst [Boursier Cifre avec Motorola jusqu'au 29 octobre 2001]

Fethi Filali [Boursier INRIA]

Fatma Louati [Boursière MENSUR]

Pars Moutaf [Boursier du gouvernement Français]

Miguel Á. Ruiz Sánchez [Boursier du gouvernement Mexicain]

Rareș Șerban [Boursier INRIA]

### Stagiaires

Anwar Alhamra [Stagiaire DEA du 1<sup>er</sup> mars au 30 juin 2001]

Firas ElHajjar [Stagiaire Faculté de Génie, Université Libanaise du 15 mars au 15 août 2001]

Samuel Heriard-Dubreuil [Stagiaire de l'ENS du 12 février au 15 septembre 2001]

Heni Kaaniche [Stagiaire ENIS du 12 mars au 31 août 2001]

Vivek Subramanian [Stagiaire Université du Texas du 15 juin au 15 août 2001]

Abdelbasset Trad [Stagiaire ENSI du 1<sup>er</sup> mars au 31 août 2001]

John Wells [Stagiaire Ensimag du 1<sup>er</sup> mars au 30 juin 2001]

## 2 Présentation et objectifs généraux

### 2.1 Présentation générale

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 trois axes :

- la conception et l'évaluation de protocoles et applications multimédia pour mobiles sur Internet ;
- l'évolution des services de l'Internet ;
- la communication de groupe

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 des projets européens, RNRT et à des 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 autre 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 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 des téléphones portables 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 opportunité 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 reconfi-



guration 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 aujourd'hui 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. 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. A 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 (diff-serv sur ATM ou sur Frame Relay, IP sur satellite).

Les travaux de recherche de 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'applications dans le cadre des réseaux d'entreprise. Cependant, un certain nombre d'applications 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. Une première approche basée sur un ordonnancement globale des ressources réseau "par flot" a été discutée. Le protocole RSVP permettant de signaler des réservations pour chaque "flot" de bout en bout dans le réseau a alors été conçu. 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 diff-serv) 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 champs 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 diff-serv 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.

Nous nous intéressons à l'évaluation de ces mécanismes en général et dans un environnement dynamique en particulier.

Par ailleurs, 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 passent pas à l'échelle de tout l'Internet. Plusieurs possibilités d'évolution sont en cours d'études.

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. Nous nous intéressons en particulier à la fonction de contrôle de congestion dans les routeurs.

### 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. Aussi, de avoir une architecture de routage scalable dans la situation où le multipoint n'est pas disponible.

## 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 quel que soit 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 [30]. 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 (<http://www.udcast.com>).

Les travaux précédents ont porté sur le fonctionnement des protocoles de routage dynamique sur liaison 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.

Nous nous intéressons aussi au passage à l'échelle des protocoles de routage sur un lien satellite avec un grand nombre de récepteurs.

## 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.

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 protocoles 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 `int-serv`, `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 `int-serv` et `diff-serv` réside dans la possibilité d'analyse possible dans le cas `int-serv` (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 `diff-serv`, 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 `diff-serv` 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 `diff-serv` 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 `diff-serv`. 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 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 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 algo-

rithmes 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

MiMaze est un jeu distribué sur 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 amené 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). Il fait aussi l'objet d'un

support INRIA dans le cadre des “Opérations de Développement Logiciel” (ODL). 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.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 2 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 2001 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 [9] et fait actuellement l'objet de draft IETF.

### 6.2 Internet paging

**Participants :** Claude Castelluccia, Pars Mutaf.

Un système cellulaire doit offrir un service de pagination aux stations mobiles pour économiser la batterie et la bande passante. L'IETF Seamoby WG est train de concevoir un protocole de pagination au niveau IP.

Au cours de l'année 2001 nous avons défini un algorithme qui permet d'auto-configurer des zones de pagination IP. Les zones de pagination IP auto-configurées sont mieux adaptées au mouvements des stations mobiles, donc elles sont plus efficaces. L'algorithme que nous avons développé permet aussi d'optimiser les tailles des zones (en nombre de cellule). Nous avons analysé les propriétés de convergence et passage à l'échelle des zones de paginations auto-configurées. La première version de cette spécification a été soumise à l'IETF et a été intégrée dans notre architecture de pagination IP adaptative pour l'Internet Cellulaire. Ce travail a été publié dans ACM SIGCOMM Computer Communication Review.

Nous avons également défini les problèmes de sécurité reliés à la pagination IP. Ce travail a été inclus dans un working group RFC (RFC3154).

### 6.3 Radio adaptative pour l'accès à l'Internet

**Participants :** Imad Aad, Claude Castelluccia.

Au cours de l'année dernière nous avons poursuivi le travail sur la différenciation de services dans IEEE 802.11 : la différenciation "par-flux". Ce travail est motivé par l'utilisation de flux avec boucle de retour, tels que TCP, qui posent des problèmes de différenciation "par-noeud". Ce travail a été publié dans l'article "Remarks on per-flow differentiation in IEEE 802.11" qui sera présenté à "European Wireless 2002", Florence, Italie, 26-28 février 2002.

D'autre part, nous avons abordé l'amélioration de performance de IEEE 802.11 dans un environnement bruité, basé sur la distinction statistique entre bruit et collision. Les résultats sont détaillés dans l'article "Enhancing IEEE 802.11 performance in noisy environments", qui est en cours de soumission à Infocom 2002.

Nous continuons à analyser les performances de IEEE 802.11 dans des environnements pseudo-statiques, et travaillons sur une nouvelle approche de modélisation de ce protocole.

## 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 2001, nous avons poursuivi nos travaux sur la gestion de la mobilité des réseaux mobiles.

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. 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 avons travaillé sur une distribution multipoint de ces messages de contrôle. Nous avons défini une solution qui 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 ont été évalué par le biais de la simulation et sont en cours de soumission. Plusieurs drafts portant sur la définition de la problématique des réseaux mobiles et les solutions que l'on propose ont été soumis et présenté à l'IETF.

## 6.5 Mobilité et Sécurité

**Participants :** Claude Castelluccia, John Wells.

La sécurité dans les réseaux mobiles IP est un problème majeur. En effet contrairement aux réseaux téléphoniques cellulaires, les réseaux mobiles tout-IP sont par nature très distribués et peu contrôlables. Nos études ont mis en évidence deux problèmes de sécurité de Mobile IPv6 auxquels nous proposons des solutions :

- Suivi de mouvements : Avec Mobile IPv6, une machine peut très facilement suivre à la trace les mouvements d'un mobile. Nous proposons une solution qui consiste à attribuer des pseudonymes aux mobiles. Nous avons travaillé sur des mécanismes qui permettent de protéger et de cacher les déplacements des mobiles dans l'Internet.
- Vols d'adresse IP : Avec Mobile IPv6, une machine peut très facilement voler l'adresse d'un mobile en envoyant un message de redirection. Mobile IPv6 exige que ces messages de redirection soient authentifiés mais l'authentification seule n'est pas suffisante. Il faut également prouver que la machine qui demande la redirection d'une adresse possède cette adresse. Nous proposons pour cela l'utilisation d'adresses IPv6 " cryptographiques " . Avec notre proposition, un mobile peut prouver en dévoilant sa clé publique que l'adresse qu'il utilise est unique et qu'elle lui appartient.

Ces deux propositions font l'objet de Drafts Internet et d'une publication dans la conférence NDSS2002.

## 6.6 Contrôle de congestion pour applications multimédias sur l'Internet

**Participants** : Anwar Al Hamra, Kavé Salamatian, Thierry Turletti.

Dans le cadre du projet RNRT VISI, nous intéressons au problème de l'agrégation des rapports de réception RTCP pour une application de vidéoconférence H.263+ en multipoint sur 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 [19]. Cet algorithme a été implanté au sein de la librairie JRTP LIB <http://lumumba.luc.ac.be/jori/jrtp/lib/>.

En collaboration avec l'équipe TEMICS, nous élaborons un algorithme de contrôle de débit source canal conjoint qui utilise les rapports RTCP agrégés. Les mises au point se font à la fois par simulation avec le simulateur ns-2 et par expérimentations réelles sur Internet avec un codeur hiérarchique H.263+.

## 6.7 Mise en œuvre d'applications radio logicielles en logiciel

**Participants** : El-Hajjar Feras Hatem, Hahnsang Kim, Thierry Turletti.

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 œuvre ces applications pourrait faciliter et accélérer leur implantation en permettant une vérification automatique des algorithmes implantés.

Dans cette optique, nous avons élaboré EPSPECTRA [23] : l'extension Esterel de l'environnement de développement d'applications radio logicielles Pspectra <http://www.sds.lcs.mit.edu/SpectrumWare/>. Avec ce nouvel environnement, les développeurs d'applications ont la possibilité d'utiliser les outils de simulation *Xes* et de vérification *Xeve* disponible avec le langage Esterel. Nous avons implanté deux algorithmes d'ordonnancement 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 [24].

Comme exemple d'application radio logicielle, nous avons implanté la partie *interface radio* d'une station de base GSM en utilisant l'ancien environnement PSPECTRA et le nouveau EPSPECTRA. Une version précédente de cette application avait déjà été implantée dans l'environnement VuSystem, développé lui aussi au MIT [8].

Grâce au nouvel environnement EPSPECTRA, nous avons déjà pu vérifier plusieurs propriétés qui sont critiques pour l'application comme la non présence d'interblocages (*deadlocks*) [24]. La comparaison des performances obtenues avec les deux environnements PSPECTRA et EPSPECTRA est en cours d'études.

## 6.8 Etude de l'impact de l'asymétrie des liens sur les performances de TCP

**Participants :** Fatma Louati, Walid Dabbous.

Un réseau asymétrique est un réseau qui a un chemin de retour pas suffisamment rapide en terme de bande passante pour porter le flux d'acquittements générés par les récepteurs TCP. Ce type de réseau est de plus en plus fréquents surtout après le développement des réseaux satellites où les données sont transmises via des liens satellites à des débits pouvant atteindre les 10Mbps mais où les acquittements empruntent encore des liens téléphoniques terrestres de 9.6Kbps. Le problème principal de TCP dans de tels réseaux est la congestion sur les liens lents résultant en une perte d'ACK et une augmentation du délai aller-retour.

Nous avons donc revu toutes les solutions publiées sur ce sujet, sachant qu'on peut les classer en trois catégories :

- Les solutions sollicitant le TCP Sender,
- Celles sollicitant le receiver et
- Les solutions nécessitant une collaboration de la part du routeur intermédiaire.

Actuellement nous attachons plus d'importance à la troisième catégorie de solutions puisque nous croyons qu'il est important de ne pas toucher au protocole TCP tel qu'il est implémenté au niveau des hôtes. Le filtrage des ACKs suivi éventuellement par leur reconstitution nous paraît une solution prometteuse. Nous allons étudier cette approche plus en détail l'année prochaine.

## 6.9 Passage à l'échelle d'UDLR

**Participant :** Walid Dabbous.

Etant les liens satellites intrinsèquement des liens de support d'un service de diffusion à un grand nombre de récepteurs, les liaisons satellites nous permettent de transmettre en multipoint à moindre coût. Afin que ce mécanisme soit efficace, il nécessite un support du réseau, ainsi qu'un contrôle de transmission approprié dans les systèmes finaux.

Nous pouvons supposer que dans un futur proche le nombre des récepteurs satellite seront très nombreux (de l'ordre de  $10^6$ ). Avec le mécanisme d'encapsulation "UDLR" les réponses aux requêtes multipoint seront tunnelées vers la station émettrice par défaut avec la possibilité d'avoir le problème de "feed-back implosion" pour raison du délai de transmission sur la liaison satellite.

Nous démarrons une étude en collaboration avec Hitachi dont l'objectif principal sera d'identifier les mécanismes inhérents aux protocoles de routage qui ne passeraient pas à l'échelle et de proposer des améliorations à ces protocoles permettant de pallier ce problème. La méthodologie adoptée sera l'analyse et la simulation sous ns.

## 6.10 Optimisation de la planification des réseaux hybrides multi-services

**Participants :** Walid Dabbous, Fethi Filali.

Le but de ce travail était de proposer des algorithmes permettant de déterminer les empla-

cements 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 celui 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 [13]. 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.

Nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la planification des réseaux hybrides pour le transfert multicast [12]. Nous avons développé un modèle architectural pour ce type des réseaux et une heuristique qui permet de déterminer les positions stratégiques des stations satellitaires afin de minimiser le coût de l'arbre multicast (nombre de branches) pour le transfert non fiable et le délai moyen de transfert de paquets pour le multicast fiable. De plus, nous avons développé une politique de configuration de PIM-SM dans les réseaux hybrides concernant le choix de la liste de Rendez-vous Point (RPs) et la commutation entre l'arbre basé sur le RP et celui basé sur la source. Les résultats obtenus montrent la capacité des méthodes proposées (l'heuristique de planification et la politique de configuration de PIM-SM) d'améliorer les critères de performance et de déterminer efficacement les positions des stations émettrices en utilisant conjointement PIM-SM et le mécanisme UDLR (UniDirectional Link Routing).

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.

## 6.11 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 problématiques 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 "inonder puis élaguer" de DVMRP [14]. Nous sommes en cours d'intégration d'UDLR et 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.

Notre objectif principal est d'étudier le comportement de service multicast dans la nouvelle génération des réseaux hybrides (satellite-terrestre) pour lesquels nous avons développé une architecture générale. Premièrement, nous nous sommes focalisés sur le problème d'implosion des messages envoyés par le récepteurs satellites en réponse à des requêtes IGMP. Nous avons proposé une méthode qui permet de réduire de façon efficace et acceptable la charge de ces pour des larges groupes multicast.

Ensuite, nous avons proposé et comparé plusieurs approches qui peuvent être utilisées pour activer le multicast à bord de satellite DIPCAST. Nous avons montré que l'approche utilisant une Table de Commutation Multicast (TCM) à bord contenant la liste des spots concernés pour chaque groupe multicast est la plus efficace. En effet, elle permet une intégration transparente et efficace des liens satellitaires dans l'Internet en donnant la possibilité au processeur embarqué de surveiller les requêtes et les rapports IGMPs circulant sur le segment satellite et de mettre à jour les entrées de la table TCM.

Dans la deuxième phase de ce travail, nous avons étudié le comportement inattendus de DVMRP, PIM-DM, et PIM-SM dans les réseaux hybrides. Pour DVMRP et PIM-DM, nous avons identifié des configurations possibles dans lesquelles les récepteurs satellite reçoivent des paquets dupliqués et nous avons proposé une méthode qui permet de résoudre ce problème. Ensuite, nous avons développé une politique de configuration de PIM-SM dans les réseaux hybrides concernant le choix de la liste de RPs et la commutation entre le RPT et le SPT.

Nous travaillons sur un nouveau protocole nommé SMRP (Satellite Multicast Routing Protocol) qui permet d'intégrer d'une manière efficace les composants de système DIPCAST, à savoir le satellite et les stations terrestres, dans le réseau multicast terrestre. SMRP s'exécute entre les différents composants de DIPCAST et donne la possibilité aux utilisateurs finaux de recevoir le flux multicast via le satellite. De plus, il est indépendant de protocole de routage multicast utilisé.

## 6.12 Evaluation de RED

**Participants :** Fatma Louati, Walid Dabbous.

L'objectif de ce travail était de faire une récapitulation des plus récents algorithmes proposés dans la littérature pour gérer les files d'attente des routeurs à savoir BLUE, SRED, ARED, etc.. Une étude plus approfondie du mécanisme RED a été faite mettant en évidence par des simulations les effets de RED sur les performances du trafic TCP. RED se base sur les tailles moyennes des files d'attente des routeurs en les gardant réduites dans le but de pouvoir absorber le plus de rafales possibles. Pour ce fait, des paquets sont rejetés aléatoirement avant même la détection de congestion.

Afin de savoir si RED fournit bien les résultats que la théorie promet en terme de taille de file d'attente et de taux de pertes de paquets, nous avons effectué des simulations à l'aide du simulateur de réseau NS. Les résultats donnés sous forme de courbes décrivaient les variations des délais d'attente dans les routeurs et les pertes de paquets. Les conclusions étaient que RED parvient à réduire le délai d'attente dans les routeurs mais en revanche augmentait considérablement les pertes.

## 6.13 Les algorithmes de gestion active de files d'attentes pour le trafic multicast

**Participants :** Walid Dabbous, Fethi Filali.

Le support efficace de la communication multicast dans l'infrastructure réseau et les protocoles existants relève plusieurs questions ouvertes, incluant le contrôle de congestion multicast, le routage multicast, et l'équité inter et intra groupes multicast.

Nous travaillons sur un nouveau mécanisme de gestion active de files d'attente pour les flux multicast nommé MFQ (Multicast Fair Queueing). MFQ est indépendant de la politique d'équité inter-multicast utilisée et il se réagit avec un module d'allocation de bande passante qui implémente soit une politique d'équité soit un modèle de facturation multicast. Il essaye en utilisant un seul buffer FIFO de garantir l'allocation attendue de la bande passante. L'équité multicast peut être une fonction de nombre de groupes multicast, de nombre de flux par groupe, et de nombre de récepteurs par flux. MFQ utilise, une nouvelle notion : Multicast Allocation Layer, qui permet de garantir une granularité de queueing/dropping très fine.

Nous avons réalisé des simulations pour évaluer les performances de MFQ pour des différents schémas d'allocation de la bande passante. Les résultats obtenus montrent que, d'une part, MFQ permet d'obtenir l'allocation attendue pour les flux adaptatifs et non adaptatifs, et d'autre part, il est capable de s'adapter dans le cas où des sources hétérogènes. Nous avons validé nos propositions en analysant des multiples scénarios des liens qui représentent des goulots d'étranglement, et ceci en comparant les résultats obtenus avec ceux attendus. En particulier, nous avons montré que MFQ converge très rapidement et qu'il s'adapte au changement dans le nombre de récepteurs par flux et le nombre des flux multicast actifs.

Les travaux ont donné lieu à un poster à NGC'2001 [15].

### 6.14 Mise en œuvre de la qualité de service diff-serv dans un réseau intranet

**Participants :** Ali Boudani, Walid Dabbous.

Cette activité consiste à définir des scénarios de simulation pour l'évaluation de la qualité de service diff-serv. Ce travail a donné lieu à un rapport remis aux partenaires du projet Intradiff : définition de scénarios.

L'étape prochaine sera la réalisation des simulations avec NS (Network simulator) qui vont nous permettre de tester les différents mécanismes élémentaires de la QoS d'une part et d'autres part faire des simulations avec des topologies plus proches de celle du réseau d'expérimentations dont les résultats seront comparés après.

### 6.15 Gestion dynamique de la qualité de service dans l'Internet

**Participants :** Walid Dabbous, Rareș Șerban.

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). Après avoir étudié 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, nous nous intéressons à la définition des briques de base permettant d'effectuer la gestion dynamique des ressources à savoir : les outils de mesure ou de "monitoring", les algorithmes d'allocation de bande passante et de contrôle de ressource, les protocoles de signalisation, ainsi que les mécanismes de négociation entre plusieurs domaines. Ce travail ré-alisé dans le cadre du projet RNRT ARCADE, devrait permettre en particulier la validation de l'intérêt de la gestion dynamique et l'établissement de règles de politique afin qu'elle soient intégrées dans les PDP COPS.

### 6.16 Traitement optimisé dans les routeurs IP

**Participants :** Walid Dabbous, Miguel Á. Ruiz Sánchez.

La principale fonction d'un routeur est de réexpédier les paquets arrivant à ses ports d'entrée. Évidemment le volume de trafic a un impact sur la performance de la capacité de réexpédition des routeurs. Les problèmes de performance des routeurs sont très importants, d'autant plus que l'on constate à l'heure actuelle une croissance du trafic dans l'Internet.

Un des problèmes qui se pose est celui de retrouver l'information de routage, pour chaque paquet arrivant au routeur, de manière suffisamment rapide. Grâce à nos travaux concernant l'optimisation de la recherche d'information de routage et à une étude approfondie effectuée des différents mécanismes qui ont été proposés récemment sur le domaine, nous en avons établi une classification. Cette classification est basée aussi bien sur les structures de données utilisées que sur l'aspect algorithmique des approches. Cette classification ainsi qu'une comparaison des performances sont détaillées dans [6].

Un autre problème qui se pose lors de la réexpédition de paquets est celui de la congestion. En effet, lorsque le nombre de paquets devant être réexpédiés est supérieur à la capacité du lien de sortie, les "buffers" commencent à se remplir et si cette surcharge persiste le service se voit fortement dégradé. Le délai des paquets augmente et finalement le routeur terminera par jeter des paquets. Dans un état de congestion le service perçu par les utilisateurs dépend fortement de la politique de service de paquets ainsi que du choix de paquets à jeter. Actuellement dans les routeurs IP, les paquets sont servis dans le même ordre d'arrivée et les paquets à jeter sont ceux qui arrivent et trouvent le buffer plein. Ces politiques bien que simples à mettre en œuvre ne peuvent pas empêcher que certaines connexions puissent accaparer le routeur au détriment des autres connexions. Nos travaux dans ce thème portent sur la conception de mécanismes dans les routeurs pour le contrôle de la congestion et qui empêchent que des applications malveillantes puissent accaparer la bande passante. Ces mécanismes permettront de rendre le service dit "best effort" plus robuste. En effet, en offrant "l'isolation" des connexions on offre aussi une plus grande flexibilité au niveau des protocoles de transport à utiliser. En particulier, d'autres protocoles de transport différents de TCP et plus adaptés à certaines applications peuvent être utilisés puisque le contrôle de la congestion est réalisé dans le routeurs.

## 6.17 Communications multicast en couches multiples

**Participants :** Vincent Roca, Julien Labouré.

Le but de cet activité est de pouvoir traiter efficacement et de façon individualisée les transmissions entre des sources et des récepteurs largement hétérogènes d'un point de vue réseau (réseau haut débit, modem, sans fil) et/ou puissance de traitement (station de travail, assistant personnel).

Pour cela nous travaillons sur des *techniques de transmission au sein de groupes multipoints multiples*. Associées à une technique de codage en couches (une couche par groupe), nous avons là un moyen efficace de faire face à l'hétérogénéité des participants, un récepteur sélectionnant un ou plusieurs groupes en fonction de ses possibilités et de celles du réseau.

L'approche multi-couches est intéressante pour la transmission vidéo multi-définition en mode streaming. Nous nous intéresserons tout particulièrement au transport de flux MPEG4, une technologie qui devrait se développer dans un futur proche avec la diffusion d'émissions TV sur le web. Nous regardons enfin, pour des applications de transfert de fichiers, des techniques d'ordonnancement plus efficaces en terme de débit et de taille maximale de fichiers.

### *Valorisation*

Cette activité est valorisée par des publications et des discussions avec les auteurs de documents sur ALC ("Asynchronous Layered Coding"), LCT ("Layered Coding Transport") et FEC ("Forward Error Correction") au sein du groupe "Reliable Multicast Transport" de l'IETF.

Elle est aussi valorisée par la diffusion d'un gros logiciel (en OpenSource, sous licence GNU GPL).

Nous avons aussi des contacts avec des sociétés susceptibles d'être utilisateur telles Activia Networks ([www.activia.net](http://www.activia.net)), Netcelo (cf. ci-dessous) et CanalWeb (<http://www.canalweb.com>) avec qui nous travaillons sur une proposition de projet RIAM.

Enfin le travail a été reconnu par l'INRIA qui nous a attribué un support dans le cadre des

ODL, ou “Opérations de Développement Logiciel”. Un ingénieur a ainsi été recruté (à partir d’octobre 2001).

### 6.18 FEC hautes performances

**Participants :** Zainab Khallouf, Vincent Roca.

#### Techniques FEC (“Forward Error Correction”) hautes performances

Nos travaux sur la bibliothèque MCL nous ont montré l’importance majeure des techniques FEC (ou “Forward Error Correction”) de correction proactive et/ou réactive d’erreurs. Deux points sont apparus comme limitant dans le codec FEC que nous avons récupéré et utilisé à ce jour : la nécessité de découper les informations en petits blocs, et le temps de codage/décodage. Afin de repousser ces limites, nous démarrons une étude sur des approches alternatives, plus adaptées aux communications hautes performances que nous visons. L’objectif final est d’intégrer le module qui sera développé dans notre bibliothèque MCL.

##### *Valorisation*

Cette activité est récente. Elle fera l’objet d’un sujet de DEA durant l’année 2001-2002.

### 6.19 Solutions de sécurité adaptées aux transmissions multipoints

**Participants :** Lina Al-Chaal, Vincent Roca.

La sécurité est un besoin récurrent dès lors que l’on considère des applications commerciales. Plusieurs solutions sont ainsi en cours d’élaboration au sein du groupe SMUG (“Secure Multicast Group”) de l’IETF. Cependant ces solutions sont destinées à résoudre le problème général (en particulier avec des groupes multicast ouverts et dynamiques). Nous pensons que les applications ayant le plus fort besoin de sécurité n’appartiennent pas à cette catégorie.

Ainsi nous nous intéressons à la mise en place de communications de groupe au sein d’un réseau construit au dessus de VPN sécurisés. Nous nous intéressons également à la problématique d’authentification et d’intégrité des échanges.

##### *Valorisation*

Cette activité est récente. Elle est développée dans le cadre d’une collaboration avec la société Netcelo (<http://www.netcelo.com/>) sous la forme du co-encadrement d’une doctorante (convention CIFRE, octobre 2001). Elle a également fait l’objet d’un stage de magistère en 2000-2001.

### 6.20 Techniques de communication de groupe alternatives

**Participants :** Ayman El-Sayed, Vincent Roca.

Si le service de routage multipoint est globalement attractif, en revanche il est peu approprié à certaines situations : pour un faible nombre de récepteurs construire et maintenir un arbre de diffusion est extrêmement coûteux ; il se peut aussi que le service multipoint ne soit pas déployé, ou encore que la présence de nœuds fortement mobiles conduise à d’importantes inefficacités.

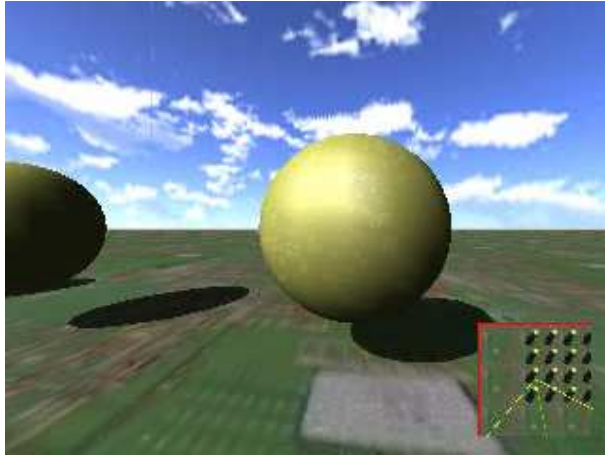


FIG. 1 – Le champs de vision d'un utilisateur

Nous travaillons donc sur une solution alternative dans laquelle le routage multipoint est émulé au sein des machines terminales. Ces machines s'auto-organisent alors en une topologie dont les nœuds sont reliés au moyen de tunnels point-à-point. Un prototype est actuellement en cours de réalisation.

## Valorisation

Cette activité a démarré début 2000. Elle a fait l'objet d'une publication (une deuxième en cours).

### 6.21 Application monde virtuel 3D avec grand nombre de participants

**Participants :** Laurențiu Barză, Walid Dabbous, Alexis Gourdon, Thierry Turletti.

Nous travaillons sur la conception d'une application LSVE (*Large Scale Virtual Environment*) qui représente un monde virtuel 3D dans lequel un grand nombre de participants peuvent se déplacer et communiquer entre eux en échangeant du texte, du son, des images et de la vidéo. Cette application a pour but d'illustrer les possibilités offertes par un réseau à très haut débit (le réseau VTHD) et d'optimiser les performances du protocole de communication scalable SCORE [2].

Un prototype de l'interface graphique est en cours de réalisation et utilise OpenGL, voir Figure 6.21.

## 7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

### 7.1 Hitachi

Nous avons démarré une collaboration avec le laboratoire de recherche d'Hitachi à Sophia Antipolis sur le thème du passage à l'échelle des protocoles de l'Internet sur des liens

satellites.

## 8 Actions régionales, nationales et internationales

### 8.1 Actions nationales

#### 8.1.1 Projet @IRS++

Nous participons au projet RNRT @IRS++ suite du projet @IRS dont l'objectif est de définir une Architecture Intégrée de Réseaux et de Services Internet de Nouvelle Génération répondant aux derniers standards de l'Internet (IPv6) et s'attaquant au problème fondamental de la Qualité de Service (QoS). Le projet @IRS++ s'inscrit dans la continuité du projet @IRS en abordant de nouvelles problématiques :

- l'intégration fixe/mobile, ou comment disposer d'un accès à ses applications ou ses informations au travers de l'Internet quel que soit le lieu et le mode d'accès ;
- les communications de groupe, ou comment échanger, partager, travailler au sein d'une communauté d'utilisateurs ;
- la mise en place dynamique de nouveaux services, à la demande des usagers ou suite à de nouvelles offres d'opérateurs.

Les partenaires du projet sont : 6WIND, EADS-LV, EURECOM, RENATER, INRIA, LAAS-CNRS, LIP6, LSIIT, LSR-IMAG et REALIX.

Notre équipe est impliquée dans la partie intégration fixe-mobile. Notre tâche consiste à concevoir et à réaliser un serveur d'authentification AAA basé sur le protocole DIAMETER. Les travaux dans le cadre de cette tâche sont découpés en quatre phases. D'abord la conception de l'architecture du système puis le développement d'un prototype du "BASE Protocol". Cette phase a pour but de réaliser plusieurs serveurs Unix et de les tester dans un réseau distribué entre plusieurs domaines. La troisième phase consiste à ajouter les extensions de Mobile Ipv6 pour DIAMETER. Il sera nécessaire d'effectuer aussi des tests en réseau entre deux domaines. La quatrième et dernière phase consiste à combiner l'agent qui détecte les messages de Mobile Ipv6 et qui les transforme en messages DIAMETER.

Ces travaux ont déjà démarré et seront continués au cours de l'année 2002.

#### 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 constella-

tions 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 "Diff-Serv" 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 "Diff-serv" 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 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 VIP

Participation au projet RNRT VIP (Visiophonie sur IP sans fils) avec les partenaires THALES Communications, COMSIS, ENST, ETIS, France Telecom R&D, L2s, LIP6, et les projets SIGMA2 et TEMICS de l'IRISA. L'objectif du projet est la conception et le développement de nouvelles technologies pour des applications de communication vidéo temps-réel (telles que visiophonie et visioconférence) sur des canaux de type Internet sans fils. Ces applications constituent en effet un enjeu important pour la mise en place et le succès des systèmes de communication radiomobiles de 3ème génération. Les problèmes posés par la communication vidéo sur des réseaux IP (Internet grand public, Intranet) commencent à être maintenant bien connus. Ils ont déjà fait l'objet de nombreux développements. Bon nombre de ces travaux se situent dans un contexte compatible avec les syntaxes normalisées (MPEG-4, H.263+). Plus récemment on a vu apparaître des techniques dites "à descriptions multiples" se situant en rupture avec les syntaxes normalisées. Ces techniques sont néanmoins encore jeunes et leur ap-

plicabilité n'est pas garantie. Cependant toute cette problématique est profondément modifiée dans des environnements de communication sans fils, qui fait l'objet du projet.

### 8.1.7 Projet ARCADE

Nous sommes aussi impliqué dans le projet RNRT ARCADE dont le but est de dresser un modèle général permettant de maîtriser les réseaux IP. Cette maîtrise se fonde sur la détermination d'un profil pour chaque utilisateur et client, dans le but de pouvoir lui faire correspondre des ressources adaptées. Ces ressources peuvent être dynamiquement allouées et doivent être contrôlées suivant une politique déterminée utilisant des algorithmes ad hoc. Le contrôle s'effectuera sur la sécurité, la mobilité et la qualité de service qui inclura le multipoint. Pour arriver à un environnement de contrôle cohérent sur l'ensemble des fonctionnalités nécessaires à la maîtrise d'un réseau, il est nécessaire de définir une architecture de convergence. La partie de cette architecture qui sera conçue et développée concerne les serveurs de politique et la définition d'une interface intelligente (une extension du protocole COPS) entre le serveur de politique et les nœuds du réseau IP. Le contrôle du choix de la politique utilisera également une fonction de coût qui permettra éventuellement une facturation des services offerts par le réseau. Les partenaires du projet sont LIP6, INRIA, France Télécom, Thomson-CSF et QoSMIC.

Notre tâche consiste à étudier l'intérêt de la gestion dynamique et est décrite dans la section correspondante ci-dessus.

### 8.1.8 Projet VTHD

Le projet VTHD a pour ambition de déployer une plate-forme d'expérimentation IP à haut débit afin de développer les briques technologiques qui seront nécessaires au déploiement des réseaux Internet et Intranet de deuxième génération. La solution retenue associe intimement les objectifs de qualité de service et de capacité en bande passante en adoptant une architecture de rupture IP/WDM tirant parti des technologies optiques de multiplexage en longueur d'onde mais intégrant les modèles de qualité de service en développement dans l'Internet. La viabilité de la solution retenue est évaluée dans le contexte de services en temps réel interactifs et d'applications avancées de données. Le projet VTHD vise à contribuer significativement à une action de fédération des efforts pour un Internet de nouvelle génération. Les principaux partenaires du projet sont FT R&D, INRIA, ENST, INT, Eurecom et ENSTB. Notre tâche consiste à développer un application d'environnement virtuel intégrant des flux audio et vidéo, ainsi que l'expérimentation de l'audio sur IP dans un contexte haut débit et hétérogène.

### 8.1.9 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. Ce projet s'est terminé en décembre 2000.

#### 8.1.10 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. Ce contrat s'est terminé en Septembre 2001.

#### 8.1.11 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. Cette action s'est terminée en Avril 2001.

### 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 objectifs 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. Pour plus d'informations, voir : <http://cec.to.alespazio.it/DSE/>

#### 8.2.2 Projet DESS

Participation 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* <http://www.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 oeuvre 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]. Dans ce projet, nous avons étendu ce nouvel environnement de programmation avec le langage formel Esterel.

## 9 Diffusion de résultats

### 9.1 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** : Réseaux : cours de 3eme année de l'ENSIMAG (Grenoble), par Vincent Roca

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

### 9.2 Thèses et stages

#### 9.2.1 Thèses soutenues en 2001

1. Thierry Ernst a soutenu sa thèse sur le sujet : "Le Support des Réseaux Mobiles dans IPv6".

#### 9.2.2 Thèses en cours

1. Imad Aad travaille sur "La radio adaptative dans l'accès à l'Internet sans fil".
2. Lina Al-Chaal travaille sur "Solutions de sécurité adaptées aux transmissions multipoints".
3. Vijay Arya travaille sur l'élaboration d'algorithmes de contrôle de transmission multimédia pour la nouvelle génération de mobiles.
4. Laurențiu Barză travaille sur le sujet : "Les environnements virtuels partagés".
5. Ayman El-Sayed travaille sur "les Techniques de communication de groupe alternatives".
6. Fethi Filali travaille sur le sujet : "Support du routage multicast sur satellite régénératif".
7. Fatma Louati travaille sur le sujet : "Etude des performances de TCP dans un réseau hétérogène".
8. Pars Mutaf travaille sur le sujet : "La gestion de la mobilité dans les réseaux tout-IP".
9. Șerban Rareș travaille sur le sujet : "Gestion dynamique des ressources dans l'Internet".
10. Miguel Á. Ruiz Sánchez travaille sur le sujet : "Architecture de routeurs IP".

### 9.2.3 Stages effectués dans le projet

1. Anonymité de la mobilité dans IPv6, John Wells, Ensimag.
2. Mise en œuvre d'applications radio logicielles, El-Hajjar Firas, Faculté de Génie, Université Libanaise.
- 3.
4. Contrôle de transmission multipoint vidéo «TCP-courtois» pour vidéoconférence sur IP, Anwar Al Hamra, stage de DEA RSD, UNSA.

### 9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

- Participation de Thierry Turetletti au comité du Workshop Packet Video, 30 avril - 1<sup>er</sup> Mai 2001, Taejon, Corée, 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.
- Claude Castelluccia a participé à l'IETF, à Infocom 2001. Il a participé au comité de programme de IPCN2001 (Paris), Globecom2001 Service Portability Workshop (SF), IEEE Services & Applications in the Wireless Public Infrastructure (Paris), MS3G2001 (Lyon), IEEE LCN2001 (Orlando), IFIP Networking 2002 (Pisa).

## 10 Bibliographie

### Livres et monographies

- [1] W. DABBOUS (éditeur), *Système Multimédias Communicants*, Hermes Science Publications, juin 2001.

### Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [2] E. LETY, *Une Architecture de Communication pour Environnements Virtuels Distribués à Grande-Echelle sur l'Internet*, thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2000.

### Articles et chapitres de livre

- [3] C. CASTELLUCCIA, P. MUTAF, « An Adaptive Per-Host IP Paging Architecture », *ACM SIG-COMM Computer Communication Review*, October 2001.
- [4] C. CASTELLUCCIA, « Extending Mobile IP with Adaptive Individual Paging », *ACM Mobile Communication Review (MC2R)*, April 2001.
- [5] C. GUILLEMOT, T. TURLETTI, *Algorithmes de codage et de contrôle de transmission vidéo sur réseaux hétérogènes*, Hermes Science Publication, 2001, ch. 1.
- [6] E. B. MIGUEL Á. RUIZ SÁNCHEZ, W. DABBOUS, « Survey and Taxonomy of IP Address Lookup Algorithms », *IEEE Network Magazine* 15, 2, March/April 2001, p. 8–23.
- [7] V. ROCA, *Distributed Computing Environment for Collaborative Engineering*, Springer Verlag, 2002.

- [8] T. TURLETTI, H. BENTZEN, D. TENNENHOUSE, *Toward the Software Realization of a GSM Base Station*, IEEE Press, 2001, ch. 5.
- [9] X. ZHAO, C. CASTELLUCCIA, M. BAKER, « Flexible Network Support for Mobile Hosts », *MONET Special Issue on Management of Mobility in Distributed Systems*, April 2001.

### Communications à des congrès, colloques, etc.

- [10] I. AAD, C. CASTELLUCCIA, « Enhancing IEEE 802.11 performance in noisy environments », *in : submitted to IEEE Infocom 2002*, NY, USA, June 2002.
- [11] I. AAD, C. CASTELLUCCIA, « Remarks on per-flow differentiation in IEEE 802.11 », *in : European Wireless 2002*, Florence, February 2002.
- [12] F. FILALI, W. DABBOUS, F. KAMOUN, « Efficient Planning of Satellite-Terrestrial Hybrid Networks for Multicast Applications », *in : In the proceedings of ICC'2001*, IEEE, Hensilki, Finland, June 2001.
- [13] F. FILALI, W. DABBOUS, F. KAMOUN, « On the Planning of Multiservices GEO Satellite-Terrestrial Hybrid Networks », *in : In the proceedings of IEEE Softcom'2001*, IEEE, Split, Dubrovnik (Croatia) Ancona, Bari (Italy), October 2001.
- [14] F. FILALI, W. DABBOUS, « Issues on the IP Multicast Service Behaviour over the Next-Generation of Satellite-Terrestrial Hybrid Networks », *in : In the proceedings of ISCC'2001*, IEEE, Hammamet, Tunisie, July 2001.
- [15] F. FILALI, W. DABBOUS, « Multicast Fairness-Independent and Fine-Grained AQM Mechanism for Multicast Flows », *in : Poster Session, NGC'2001*, Springer, London, UK, November 2001.
- [16] G. MONTENEGRO, C. CASTELLUCCIA, « Statistically Unique and Cryptographically Verifiable Identifiers and Addresses », *in : Network and Distributed System Security Symposium (NDSS2002)*, February 2002.
- [17] V. ROCA, A. EL-SAYED, « A Host-Based Multicast (HBM) Solution for Group Communications », *in : Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Networking (ICN'01)*, Colmar, France, juillet 2001.
- [18] V. ROCA, « Un Etat de l'Art sur les Techniques de Transmission Multipoint Fiable », *in : 4èmes Journées Réseaux*, Lyon, France, décembre 2001.
- [19] K. SALAMATIAN, T. TURLETTI, « Classification of Receivers in Large Multicast Groups using Distributed Clustering », *in : Proc. of Packet Video*, Korea, April 2001.

### Rapports de recherche et publications internes

- [20] C. CASTELLUCCIA, F. DUPONT, « A Simple Privacy Extension for Mobile IPv6 », *rapport de recherche*, IETF, February 2001, draft-castelluccia-mobileip-privacy-00.txt.
- [21] T. ERNST, L. BELLIER, A. OLIVEREAU, C. CASTELLUCCIA, H. LACH, « Mobile Networks Support in Mobile IPv6 (Prefix Scope Binding Updates) », *rapport de recherche*, IETF, July 2001.
- [22] J. KEMPF, C. CASTELLUCCIA, AL., « Requirements and Functional Architecture for an IP Host Alerting Protocol », *rapport de recherche*, IETF, 2001.
- [23] H. KIM, T. TURLETTI, A. BOUALI, « EPspectra : A Formal Approach to Developing DSP Software Applications », *rapport de recherche n°4293*, INRIA, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4293.html>.

- 
- [24] H. KIM, T. TURLETTI, « An Esterel-based development environment for designing software radio applications », *rapport de recherche n° RR. 4256*, INRIA, September 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4256.html>.
  - [25] G. MONTENEGRO, C. CASTELLUCCIA, « Statistically Unique and Cryptographically Verifiable Identifiers and Addresses », *rapport de recherche*, IETF, July 2001, draft-montenegro-sucv-01.txt.
  - [26] P. MUTAF, C. CASTELLUCCIA, « DPAC : Dynamic Paging Area Configuration », *rapport de recherche*, IETF, September 2001, draft-mutaf-dpac-00.txt.
  - [27] P. MUTAF, C. CASTELLUCCIA, « IP Paging Security Requirements », *rapport de recherche*, IETF, May 2001, draft-mutaf-paging-security-requirements-00.txt.
  - [28] H. SOLIMAN, C. CASTELLUCCIA, K. EL-MALKI, L. BELLIER, « Hierarchical MIPv6 mobility management », *rapport de recherche*, IETF, July 2001, draft-ietf-mobileip-hmipv6-04.txt.
  - [29] H. SOLIMAN, C. CASTELLUCCIA, K. EL-MALKI, « Per-flow movement in MIPv6 », *rapport de recherche*, IETF, July 2001, draft-soliman-mobileip-flow-move-00.txt.
  - [30] H.-Y. L. T. ERNST, C. CASTELLUCCIA, « Network Mobility Support in IPv6 : Problem Statement and Requirements », *rapport de recherche*, IETF, July 2001.