

*Projet armor**Architectures et Modèles de Réseaux**Rennes*

THÈME 1B



*R*apport
d'Activité

2002

Table des matières

1. Composition de l'équipe	1
2. Présentation et objectifs généraux	2
2.1.1. Relations internationales et industrielles.	2
3. Fondements scientifiques	3
3.1. Introduction	3
3.2. Historique	3
3.3. Qualité de service	4
3.4. Contrôle dans les réseaux	5
3.5. L'Internet	6
3.6. Les techniques d'évaluation par analyse de modèles	8
3.7. Évaluation de performances des réseaux haut débit	8
3.7.1. L'échelle des cellules.	9
3.7.2. L'échelle des rafales.	10
4. Domaines d'application	11
4.1. Panorama	11
5. Logiciels	12
5.1. Plates-formes expérimentales	12
5.2. Sécurité	12
5.3. Analyseurs de la sûreté de fonctionnement	13
5.4. Simulation	13
5.5. Étude analytique de modèles fluides	13
6. Résultats nouveaux	13
6.1. Activités autour du test	13
6.1.1. Méthodes et outils pour la génération de tests de conformité et d'interopérabilité de protocoles	13
6.1.2. Applications aux protocoles IPv6	14
6.1.3. Génération de tests de logiciels par graphes stochastiques	14
6.2. Techniques de modélisation et d'analyse de modèles	14
6.2.1. Fonctionnelles Markoviennes additives	14
6.2.2. Étude analytique de modèles fluides du premier ordre	15
6.2.3. Étude analytique de modèles fluides du second ordre	16
6.2.4. Stabilité des réseaux	16
6.2.5. Étude analytique du protocole TCP et de la politique RED	17
6.2.6. Soutien intégré	17
6.2.7. Mesures transitoires d'une file d'attente markovienne	18
6.3. Mobilité	18
6.3.1. Architecture des réseaux mobiles	18
6.3.2. Gestion des ressources dans un terminal mobile	19
6.3.3. Techniques de conception et de construction de logiciels adaptables. Application aux environnements mobiles	19
6.4. Ingénierie de trafic	20
6.4.1. MPLS et multicast	20
6.4.2. Communication multicast avec QoS	21
6.4.3. Communication multicast dans les réseaux optiques WDM	21
6.4.4. Reroutage rapide et ingénierie de trafic sur réseau optique	21
6.5. QoS et réseaux IP	22
6.5.1. Qualité pseudo-subjective des flux multimédias.	22

6.5.2.	Architecture à différenciation de services	23
6.5.3.	Métrologie des réseaux IP	23
6.5.4.	Tarification	24
6.5.5.	Algorithmes de gestion active de files d'attente pour DiffServ	25
6.6.	Activités autour du protocole IPv6	25
6.6.1.	Transition et configuration automatique	25
6.6.2.	Travaux sur le protocole ROHC	26
6.7.	Sécurité	27
6.7.1.	Contrôle d'accès des réseaux à haut débit	27
6.7.2.	Télé médecine	27
7.	Contrats industriels	28
7.1.	Cyberté : Support optimisé des interfaces sans fil multiples sur un terminal mobile IPv6 (contrat géré à l'ENST Bretagne (RSM) et à l'IRISA)	28
7.2.	Ubique : L'étude de la gestion des profils de qualité de service pour le support d'interfaces multiples	28
7.3.	VTHD : Vraiment Très Haut Débit (contrat géré à l'ENST Bretagne)	29
7.4.	CaraHD : Contrôle d'accès dans les réseaux à haut débit	29
7.5.	VTHD++ sous-projet 2 : Sécurité	29
7.6.	MIRADOR : Mécanismes de détection d'Intrusion et de Réaction aux Attaques en DOmaine militaiRe (contrat géré à l'ENST Bretagne)	29
7.7.	Qualité de service pour diffusion de comptes-rendus médicaux et Téléstaff	30
7.8.	Réalisation d'un logiciel de génération de test suivant un graphe stochastique (Contrat 991310KTQ8)	30
7.9.	ASSET : Architectural Solutiuons for Services Enhancing digital television, 1 02 C0349	30
7.10.	IDsA : Infrastructure DNS sec et Applications	30
7.11.	HADES : Haut débit et sécurité, 1 02 C0561	31
7.12.	Support for IPv6 Interoperability. Events organized by the ETSI Interoperability Service, 1 01 C0689	31
7.13.	NGNI : IPv6 Interoperability and QoS testing, 1 02 C0245	31
8.	Actions régionales, nationales et internationales	32
8.1.	Actions nationales	32
8.1.1.	ARC INRIA « Models and Algorithms for TCP/IP Networks »	32
8.1.2.	G6	32
8.2.	Actions européennes	32
8.3.	Actions internationales	32
8.3.1.	Équipe associée PAIR (Planification de l'Architecture et de l'Infrastructure d'un Réseau)	33
8.4.	Visites et invitations de chercheurs	33
9.	Diffusion des résultats	34
9.1.	Animation de la Communauté scientifique	34
9.1.1.	Activités d'édition	34
9.1.2.	Comités de programme	34
9.1.3.	Participation à des colloques, séminaires, invitations	35
9.2.	Enseignement	35
9.2.1.	Enseignement universitaire local	35
9.2.2.	Enseignement universitaire à l'étranger	35
9.3.	Activités dans les organismes de standardisation	35
10.	Bibliographie	36

1. Composition de l'équipe

ARMOR est un projet commun à l'Inria, au CNRS, à l'université de Rennes 1 et à l'école Nationale Supérieure de Télécommunications de Bretagne (ENST Bretagne). Il a été créé en mai 1999.

Responsable scientifique

Gerardo Rubino [DR Inria]

Assistante de projet

Fabienne Cuyollaa [TR Inria]

Personnel Inria

Bruno Sericola [CR]

Bruno Tuffin [CR]

Personnel de l'université de Rennes 1

Françoise André [professeur]

Bernard Cousin [professeur]

Louis-Marie Le Ny [maître de conférences]

Raymond Marie [professeur]

César Viho [maître de conférences]

Personnel de l'ENST Bretagne

Jean-Marie Bonnin [maître de conférences]

Francis Dupont [maître de conférences]

Sylvain Gombault [ingénieur d'études]

David Ros [maître de conférences]

Laurent Toutain [maître de conférences, en sabbatique comme professeur à l'EPFL, jusqu'au 30/6/02]

Personnel Insa de Rennes

Miklós Molnár [maître de conférences]

Ingénieur de recherche

Laurent Guillo [à 50%, aussi membre de l'équipe TEMICS, depuis le 1/9/02]

Chercheurs doctorants

Nelly Barbot [ATER en mathématiques à l'ENSSAT depuis le 1/9/02]

Sébastien Barbin [bourse MJENR]

Ali Boudani [bourse MAE]

Djalel Chefrour [bourse INRIA]

Stéphane Collas [convention Cifre, société Sofreten]

Joël Corral [bourse France Télécom R&D]

Thierry Feuzeu-Kwenkeu [bourse INRIA, depuis le 15/11/02]

Sophie Fortin [PRAG à l'IUT de Valence]

Gilles Guette [bourse INRIA, depuis le 1/10/02]

Alexandre Guitton [bourse MJENR, depuis le 1/10/02]

Yézékaël Hayel [bourse INRIA, depuis le 1/10/02]

Hélène Le Guen [convention Cifre, société Alitec]

Patrick Maillé [Bourse GET, détaché MINEFI, depuis le 1/09/02]

Ana Minaburo [bourse du gouvernement mexicain]

Samir Mohamed [bourse du gouvernement égyptien, bourse INRIA depuis le 1/04/02]

Francine Ngani [bourse MAE et Région Bretagne depuis le 15/11/02]

Julio Orozco [bourse du gouvernement mexicain]

Mohamed Ouarraou [bourse GET]

Landy Rabehasaina [bourse INRIA]

Franco Robledo [thèse en co-tutelle avec l'université de Montevideo, Uruguay]

Miled Tezeghdanti [bourse Inria et Région Bretagne]

Martin Varela [bourse MJENR, depuis le 1/10/02]

Lucian Suciuc [bourse GET, depuis le 1/1/2002]

Ingénieurs experts

Mathurin Body [INRIA, depuis le 1/11/02]

Olivier Courtay [GET, depuis le 1/09/02]

Bruno Deniaud [INRIA, depuis le 1/04/02]

Olivier Peningault [INRIA, depuis le 1/09/02]

Frédéric Roudaut [INRIA]

2. Présentation et objectifs généraux

L'objectif central du projet ARMOR est l'identification, la conception et la sélection des architectures les plus appropriées pour la mise en place d'un service de communication, ainsi que le développement d'outils (informatiques, mathématiques) pour la réalisation de ces tâches. Cet objectif est abordé sous deux angles complémentaires : les aspects *qualitatifs* des systèmes (architectures, protocoles, procédures de contrôle, procédures de test) et les aspects *quantitatifs*, indispensables pour dimensionner correctement ces architectures et ces services (évaluation des performances, de la sûreté de fonctionnement, de la qualité de service, de la vulnérabilité, de la performabilité).

Le projet s'intéresse aux problèmes posés, d'une manière générale, par la conception d'un service de communication. Un tel service nécessite à la fois de définir un certain nombre de fonctionnalités, de décider de l'endroit où celles-ci doivent se placer dans l'architecture et de dimensionner certains éléments du système.

En ce qui concerne les réseaux proprement dits, nous nous intéressons principalement aux problèmes liés à l'Internet et aux protocoles IP et TCP. Nous considérons différents aspects de la structure des architectures des réseaux et des services. Ceci va depuis les problèmes d'organisation topologique des liaisons jusqu'à l'étude des techniques nécessaires pour faire cohabiter et interopérer des protocoles conçus au départ pour des environnements différents, comme TCP et ATM, ou, dans le cadre du réseau Internet, pour assurer une transition " douce " de IPv4 vers IPv6. Nous nous intéressons également à des applications particulièrement importantes aujourd'hui, comme celle de la téléphonie sur un réseau IP, ou à l'intégration des technologies de transmission en mode paquet dans les réseaux mobiles de troisième génération. La mobilité et les réseaux qui suivront les réseaux de 3G sont, du fait des spécificités de l'environnement radio et de la mobilité, un domaine d'application particulièrement questionnant pour nombre de nos centres d'intérêts, depuis les aspects liés à la conception des protocoles, à la performance jusqu'aux aspects liés au contrôle et à la conception d'architecture réseau.

Outre les aspects de nature qualitative, ces tâches demandent des outils d'analyse et d'évaluation quantitative. Il s'agit des technologies d'évaluation de *modèles*, depuis les techniques classiques de simulation à événements discrets jusqu'à celles plus récentes utilisant des modèles dits *fluides*, c'est-à-dire à variables d'état continues. Nous travaillons sur l'analyse quantitative de systèmes particuliers et également sur le développement de méthodes d'évaluation spécifiques.

2.1.1. Relations internationales et industrielles.

- partenaires académiques : université du Sud Est de Nankin, en Chine, de Duke en Caroline du Nord, USA, de Montevideo, Uruguay, Fédérale de Rio de Janeiro, Brésil, de Budapest, Hongrie, d'Arizona, USA ; ITAM et UNAM de Mexico, Polytechnique de Pomona en Californie,...

Le projet ARMOR est associé au département de Recherche Opérationnelle de l'Institut d'Informatique, Faculté d'Ingénierie de Montevideo, Uruguay, avec lequel il a constitué une équipe associée Inria.

- partenaires industriels : France Télécom, Matra Ericsson, Alcatel, Philips, Siemens, Thomson TCC, EDF, ETSI,...

- autres partenariats : CELAR (DGA), groupe G6 en France (sur IPv6), groupe régional Goëtic,...
- d'autres cadres de coopération : projets RNRT (dont VTHD), européens (actuellement, dans le programme ITEA), réseau européen TF-NGN (ex. TF-TANT, changé de nom depuis le début de l'année 2001).

3. Fondements scientifiques

3.1. Introduction

Mots clés : *allocation de ressources, ATM, contrôle de congestion, contrôle de flux, contrôle de trafic, CoS (classe de service), différenciation de service, dimensionnement, disponibilité, fiabilité, files d'attente, IP, interconnexion, interopérabilité, modèle à événements discrets, modèles fluides, multicast, multimédia, performabilité, performances, processus de Markov, processus stochastiques, protocoles, QoS (qualité de service), réseaux haut débit, réseaux maillés, réseaux, sécurité, simulation, sûreté de fonctionnement, tarification, TCP, techniques de Monte Carlo, test, UDP.*

Les fondements scientifiques de nos travaux sont ceux de la conception de réseaux d'une part, et de leur analyse qualitative et quantitative d'autre part. Ceci concerne d'abord les principes scientifiques sur lesquels reposent les principaux réseaux de communication, et en particulier les réseaux basés sur le protocole IP. Nous trouvons ensuite des théories mathématiques et des méthodes algorithmiques, numériques et non numériques, sur lesquelles s'appuient les outils d'analyse que nous développons. Ces fondements sont brièvement décrits dans la suite.

3.2. Historique

La conception de protocoles et de services dans les réseaux connaît depuis plusieurs années un fort regain d'intérêt. Les protocoles utilisés actuellement (TCP/IP, X25,...) ont tous été conçus dans les années 70 avec trois hypothèses majeures : un taux d'erreur élevé sur les voies physiques, une durée de traitement par les entités protocolaires plutôt courte par rapport à la durée d'émission et un coût de transmission élevé. Depuis les années 80, avec entre autre la généralisation des réseaux locaux, le développement des fibres optiques et la conception de nouvelles techniques de codage, les hypothèses de base ont été complètement modifiées (à l'exception du domaine des réseaux sans fil). Le taux d'erreur sur les voies physiques est devenu extrêmement faible et les débits élevés (de 10 Mbit/s à plusieurs Gbit/s). La durée de traitement par les entités protocolaires qui n'a pas été réduite dans les mêmes proportions est devenue importante par rapport au délai d'émission. Les ressources en bande passante augmentent plus rapidement que prévu, ou de manière équivalente, à capacité égale leur coût a diminué. Du point de vue des performances, les implications immédiates de ces changements sont essentiellement les suivantes :

- les éléments de commutation (routeurs, commutateurs,...) sont devenus les goulots d'étranglement du réseau du fait du traitement trop long de chaque entité d'information par rapport aux temps d'émission ;
- le coût de traitement des entités protocolaires sur les stations de travail réduit considérablement le débit que les applications seraient en droit d'espérer grâce aux capacités du support physique.

Les conséquences pour les réseaux sont :

- l'explosion du nombre d'entités connectées (ou d'abonnés) ; en particulier, dans le cas d'Internet, cela entraîne un énorme besoin d'adresses, qui deviendra critique dans peu d'années, et introduit des besoins spécifiques comme celui d'un adressage universel, indépendant de la localisation ;
- l'accroissement du trafic inter-réseaux locaux correspondant à la généralisation dans les applications du modèle client-serveur (en même temps, ce trafic est en train de changer de nature ; c'est la conséquence de la généralisation des applications audio et vidéo, et plus généralement des applications multimédia) ;

- la demande accrue de performance ou plus généralement de qualité de service, en partie due aux exigences associées avec les nouveaux types de trafic évoqués plus haut ;
- le passage, dans certains types de réseaux (typiquement, dans les réseaux d'interconnexion), de la réservation des ressources à l'utilisation de priorités, voire au gaspillage de bande passante étant donnée l'évolution du coût de la transmission.

3.3. Qualité de service

Il est difficile de concevoir aujourd'hui une solution dédiée à chaque besoin applicatif. On vise donc à fournir un *service* banalisé, qui doit pouvoir mettre à la disposition de chaque application des propriétés appelées collectivement " qualité de service " (QoS). Ce service doit donc être générique, mais en même temps adaptatif, car les propriétés de QoS pourront être très différentes d'une application à une autre. D'une certaine façon, le concept de QoS est un fil conducteur dans l'organisation de nos activités de recherche. Nos travaux visent à trouver des moyens pour l'obtenir et à développer des techniques pour l'évaluer. Dans tous les cas, nos efforts sont dédiés à mieux la comprendre. Le but ultime est toujours de donner aux utilisateurs ou aux applications une certaine QoS, c'est-à-dire un service de communication respectant des contraintes numériquement établies au travers d'indicateurs appropriés, en maximisant certaines fonctions et en optimisant l'utilisation des ressources du réseau.

La QoS n'est pas un concept formellement défini. Elle recouvre un ensemble de concepts concernant par exemple le temps de réponse (durée d'émission, délai d'acheminement, gigue,...), le débit (moyen, crête, minimal,...), le taux d'utilisation, les taux de perte et d'erreur, etc. Elle se combine également avec la sûreté de fonctionnement (la fiabilité, la disponibilité sous ses diverses formes -ponctuelle, asymptotique, sur un intervalle,...-, la sécurité,...), ou encore l'évolutivité et l'extensibilité des systèmes. Ces critères sont inégalement importants selon le domaine applicatif, et sont souvent contradictoires (dans le sens où ils ne peuvent pas être raisonnablement tous satisfaits à la fois, conduisant à la recherche de compromis). L'étude de la QoS peut être vue comme un problème multidimensionnel donnant lieu à des problèmes d'optimisation multicritères, dont on sait la solution difficile et très coûteuse. De plus, certains des paramètres de QoS ont une dimension psychosensorielle (qualité des images, certains aspects des temps de réponse,...) difficile à cerner formellement. C'est le cas typiquement de la qualité de restitution d'un document vidéo pour lequel il n'y a pas de mesure formelle efficace.

La QoS peut bien sûr être vue sous deux angles distincts selon que l'on s'y intéresse du point de vue de l'utilisateur (de l'application finale) ou du point de vue d'une entité composant l'architecture du système supportant l'application (le composant majeur étant pour nous celui qui rend le service considéré). Ceci est tout à fait classique en évaluation de performances. Ces deux points de vue conduisent à l'étude de paramètres spécifiques et parfois à la résolution de problèmes assez différents.

La QoS peut concerner deux situations bien différentes, selon qu'il s'agisse d'une architecture en boucle ouverte ou en boucle fermée. Dans le premier cas, il n'y a pas de *retour* d'information issue des autres composants de l'architecture ; c'est en général une approche de type préventif qui est adoptée au niveau de la QoS, par exemple lorsqu'on cherche à éviter a priori les congestions et les pertes ; le contexte principal où on la rencontre est celui des applications ayant de fortes contraintes d'interactivité (c'est-à-dire ayant de fortes contraintes de délai) et de certaines situations ne tolérant aucune dégradation. En boucle fermée, l'environnement (éventuellement de bout en bout) restitue un signal qui permet d'adapter le comportement du composant aux besoins de l'application ou, réciproquement, d'asservir l'application aux contraintes posées par les composants utilisés. Cette approche est du type réactif, où l'on agit sur la source, de manière adaptative, pour la contraindre par exemple à diminuer son débit en cas de problème ; un exemple où l'on rencontre ce comportement est celui des applications de transmission de données, qui n'ont pas, en général, à respecter des contraintes temporelles fortes. Signalons que le délai introduit par les mécanismes de rétrocontrôle (*feedback*) n'est pas favorable au haut débit.

La QoS peut s'obtenir par un bon provisionnement des ressources. Il est donc nécessaire de disposer d'outils de monitoring précis qui peuvent permettre aux clients de renégocier et de vérifier les contrats passés avec

les opérateurs. On peut se demander à quel niveau doivent se situer les différentes fonctions d'un système de communication, pour satisfaire les demandes en QoS tout en optimisant l'utilisation des ressources disponibles. Dans la mesure où certains services doivent être fournis en respectant des contraintes, on peut classer très schématiquement les multiples approches en deux classes : d'une part nous avons celles qui traitent le réseau comme une boîte noire et qui portent tout l'effort au niveau des applications ; d'autre part, nous avons celles qui cherchent à modifier le réseau lui-même, pour améliorer l'utilisation de ses ressources, voire pour rendre possible un service autrement difficile à satisfaire. Le cadre de nos études se situe dans ce dernier cas, pour une raison essentiellement économique : comme nous l'avons dit plus haut, un réseau est un système complexe difficile à contrôler de façon globale. Par exemple, nous pensons qu'il est difficile de maîtriser complètement le comportement des sources. Il s'agit dans un certain sens d'un problème quantitatif : s'il est concevable de contrôler individuellement une source particulière, il est beaucoup plus difficile de le faire pour tout un ensemble, ou bien cela impose trop de restrictions¹. Nous concentrons donc nos efforts sur le contrôle réalisé à l'intérieur du réseau, où en particulier on dispose d'informations plus précises pour agir.

3.4. Contrôle dans les réseaux

Pour satisfaire les besoins croissants des applications tout en assurant une utilisation efficace des ressources disponibles, les réseaux doivent être *contrôlés* de façon appropriée. Le contrôle peut prendre diverses formes et agir à différents niveaux. Les diverses formes de contrôle n'utilisent pas toutes le même type d'information et elles ne travaillent pas toutes à une même échelle de temps. Enfin, les différents types de contrôle ne se trouvent pas systématiquement dans tous les réseaux : leur usage est souvent spécifique au mode de transport de l'information.

Tout d'abord, nous avons le *contrôle d'admission*, dont le rôle est d'accepter ou de refuser les connexions, dans le cas de services fonctionnant en mode connecté (un réseau fonctionnant en mode non connecté accepte en principe tout le trafic offert et essaye de partager ses ressources équitablement). Cette décision dépend des caractéristiques des connexions en cours et de l'état du réseau. Plus spécifiquement, les dispositifs de contrôle basent leur décision sur des informations de nature statistique censées caractériser le réseau et la source pendant la durée de la nouvelle communication (on ne réalise pas cette tâche en fonction d'un état instantané du système). L'une des difficultés principales pour mettre en place ce type de contrôle provient du fait que l'effet de la décision est irréversible, et que l'on doit tenir compte, par exemple, d'éventuelles augmentations postérieures du trafic rentrant en concurrence avec celui de la communication que l'on vient d'accepter.

Le réseau gère ou contrôle ensuite son fonctionnement au niveau du *roulage*, en sélectionnant le chemin que les informations vont suivre. Cette gestion est faite en fonction de critères divers et en tenant compte de l'état global du système ; comme nous allons le voir, le mode de connexion affecte aussi l'algorithme de roulage. Le roulage peut être statique ou dynamique. Les routes statiques sont figées dans le système et changées manuellement ou très lentement. Dans le cas d'utilisation d'algorithmes qui évaluent les routes entre deux sites de manière permanente, le roulage est dit dynamique. Pour les réseaux fonctionnant en mode non connecté tels que les réseaux IP, le roulage dynamique peut affecter la route de chaque paquet transmis. Deux paquets consécutifs peuvent ne pas suivre le même chemin à cause d'un changement dans les tables (et arriver à la destination dans l'ordre inverse à celui de leur émission). Dans le cas des réseaux qui fonctionnent en mode connecté, il est rare (sauf certains cas de téléphonie où un reroutage est effectué) que les circuits soient modifiés durant leur vie. Ceci n'empêche pas d'avoir un algorithme de roulage dynamique dans ces réseaux. Lorsque cette décision de modifier le roulage est prise pour éviter des parties saturées du réseau (typiquement dans le cas de la commutation de paquets), on parle de *contrôle de congestion*. On parle aussi de contrôle de congestion à propos de mécanismes utilisés pour restreindre l'accès à une ressource surchargée, à l'intérieur du réseau. Ce type de contrôle peut être vu comme l'un des aspects de l'administration des réseaux, concept bien entendu beaucoup plus général.

¹Ceci n'empêche pas l'existence d'une communauté scientifique très active travaillant dans cette direction (techniques de codage et de traitement du signal).

Les réseaux fonctionnant en mode datagramme ou par circuits virtuels peuvent décider de limiter le nombre d'unités d'information envoyées à chaque instant pour éviter la formation de points de congestion. On parle alors de *contrôle du flux*. Signalons que ces décisions sont prises en général en temps-réel, en tenant compte d'indicateurs d'état instantané. Le premier exemple de ce type de mécanisme est le contrôle par *fenêtre coulissante*, soit au niveau d'un lien, soit de bout en bout. Une technique proche et particulièrement importante dans le cadre des réseaux ATM, est celle de la " mise en forme " du trafic *traffic shaping*, où l'on cherche à modifier certaines caractéristiques du trafic sortant d'une source pour qu'il rentre dans le réseau en vérifiant des propriétés données.

Il ne faut pas confondre contrôle de flux et contrôle de congestion. Le premier est plus général, et on peut dire, entre autres, qu'il est mis en place par exemple pour assurer le second. Le second a pour objectif de s'assurer que le réseau peut transporter, selon les spécifications, le trafic qui lui est offert. Le contrôle du flux est toujours lié à une source et à un récepteur. On peut classer les techniques de contrôle de flux en techniques en boucle ouverte et en boucle fermée. Le *traffic shaping* est un exemple de technique utilisée en boucle ouverte et les fenêtres coulissantes sont le mécanisme de contrôle principal en boucle fermée. Il faut souligner que lorsqu'on parle de contrôle de flux en boucle ouverte, on doit aussi intégrer les techniques de contrôle d'admission dont on a déjà parlé.

Enfin, nous avons le problème du partage de la capacité d'un nœud. Celui-ci doit décider de la fraction de la bande passante et des ressources de stockage qui doivent être allouées. On parle alors d'*allocation de ressources*. Cette allocation peut être statique et rester fixe pendant toute la communication, ou variable, et s'adapter ainsi à l'évolution de l'état du système. Dans ce dernier cas il s'agit aussi de décisions temps-réel, comme pour le contrôle de flux. Le problème est en général associé à la transmission en mode connecté mais pas exclusivement (cf. RSVP dans le cadre des évolutions prévues du réseau Internet).

Observons que des problèmes spécifiques peuvent apparaître lorsque l'on connecte des réseaux de natures différentes, par exemple, fonctionnant dans des modes distincts. Un exemple est celui posé par le routage de paquets IP sur un réseau de transport ATM, c'est-à-dire, un réseau travaillant en mode datagramme utilisant les services d'un système de transport fonctionnant en mode connecté (par circuits virtuels). En particulier, il faut qu'au niveau des utilisateurs, des mesures de Qualité de Service (QoS, voir plus loin) respectent certaines contraintes, ce qui conduit à des mécanismes de contrôle qui doivent être relativement sophistiqués pour tenir compte de cette hétérogénéité de supports.

3.5. L'Internet

L'une des caractéristiques de l'Internet est l'absence d'état global dans le réseau ; sa principale implication est le fonctionnement en mode datagramme. Pour chaque information élémentaire (paquet), la décision de routage est prise localement et indépendamment des autres informations. Grâce à la gestion du réseau ce comportement simple n'est pas synonyme d'anarchie. Ainsi, par exemple, le déséquencement de paquets qui est un problème inhérent au fonctionnement en mode datagramme, est en pratique relativement rare pour un flux donné. Une autre incidence de cette absence d'état global est le paradigme de bout en bout selon lequel le contrôle est reporté aux extrémités du réseau. Un exemple en est le contrôle de flux et d'erreur du protocole TCP. Le contrôle de flux de TCP est un mécanisme essentiel à la bonne marche du réseau, en particulier celui de TCP qui représente une bonne part du trafic sur l'Internet. Il permet d'adapter le rythme d'émission des données au rythme de consommation de celles-ci par le destinataire et d'éviter une saturation des équipements intermédiaires. L'émetteur n'a pas la connaissance ni du chemin pris par les paquets, ni de la capacité des liens, ni de leur taux d'occupation instantané. Pour estimer le débit et optimiser la connexion sans nuire au réseau, l'émetteur se base sur le taux de perte observé sur ses paquets, c'est-à-dire sur les informations contenues dans les acquittements.

Les mécanismes de contrôle de flux mis en place dans l'Internet se sont avérés résistants au facteur d'échelle, et ont permis de construire le grand réseau que l'on connaît actuellement. Cependant, l'influence de ces mécanismes sur le comportement global du réseau est mal comprise. En particulier, il est difficile de déterminer la frontière précise à partir de laquelle une amélioration des performances d'un (type de) flux nuit au

fonctionnement global du réseau. Pourtant, la connaissance du comportement global de TCP est nécessaire pour pouvoir améliorer la qualité de service. L'approche analytique fournit des modèles relativement grossiers et ne permet pas d'appréhender finement le comportement d'un flux. La simulation permet une étude plus fine mais n'autorise qu'un nombre limité de connexions simultanées inférieur de plusieurs facteurs à ce que l'on rencontre dans les réseaux d'opérateurs. Le paradigme de bout en bout est en train d'évoluer vers un contrôle possible aux frontières entre deux domaines (entre un site et son fournisseur d'accès ou entre fournisseurs d'accès, la notion de domaine ou de système autonome étant définie initialement pour le routage). Cette tendance a été mise en œuvre dans un premier temps pour augmenter la sécurité des sites avec le contrôle d'accès à l'aide de routeurs filtrants et les architectures *firewall*. Avec des protocoles comme COPS, il est même possible d'associer un flux à un utilisateur, dans le but de contrôler ou de facturer l'utilisation des ressources. De plus, le contrôle aux frontières de domaine est en train de se développer avec l'introduction de la différenciation de service dans le réseau. La différenciation de service permet au routeur de traiter différemment les paquets. Les paquets dont le traitement doit être différencié du Best-Effort sont marqués comme appartenant à une certaine classe de service. Le fournisseur vérifie la conformité de ce marquage avec un contrat passé au préalable. Si ce contrat n'est pas respecté, les paquets peuvent être détruits, retardés pour être mis en conformité avec le contrat ou voir leur priorité baissée pour être rejetés plus facilement en cas de congestion. Ces différents traitements sont sélectionnés en fonction de la classe de service spécifique.

Cette absence d'état global n'empêche pas la mise en place d'états locaux pour optimiser le fonctionnement d'un équipement. Par exemple, des caches mis en place dans les routeurs permettent d'optimiser le relaiage des trames une fois qu'un flux a été identifié. Mais cet état peut être étendu à l'ensemble d'un domaine. Ainsi le protocole MPLS permet de mieux gérer les flux à l'intérieur d'un réseau d'opérateur. Une étiquette est ajoutée au paquet à l'entrée dans le réseau. Cette étiquette peut être associée à un identificateur de voie logique pour les réseaux ATM ou Frame Relay. L'opérateur peut gérer un agrégat de flux correspondant par exemple au trafic d'un Réseau Privé Virtuel. Ce type de mécanisme est l'objet d'intenses recherches à l'heure actuelle, recherches auxquelles notre groupe participe.

Enfin, signalons que des domaines jusqu'à présent sans grand intérêt pour la communauté scientifique comme celui des procédures de facturation des services réseaux font maintenant l'objet de recherches intenses de nature mathématique, conséquence du fait qu'un meilleur contrôle d'un réseau tel que l'Internet peut, en principe, être obtenu via des mécanismes de tarification sophistiqués. Il faut observer que la future génération de l'Internet sera encore plus consommatrice en ressources que l'actuelle, conséquence entre autre de l'intégration des réseaux télévisés et téléphoniques. Dès lors, le système de tarification actuel basé sur un abonnement fixe, indépendant de l'utilisation, est une stimulation à la consommation qui, bien qu'ayant été très utile au démarrage du réseau, devient impossible à gérer si l'on souhaite faire de ce dernier un réseau multi-service efficace. De nombreuses théories mathématiques de tarification basées sur l'utilisation ont été récemment développées afin de satisfaire différents critères de qualité de service et de répondre à des règles d'utilisation équitables, elles aussi mathématiquement définies. Les méthodes de tarification peuvent être rangées en différentes classes :

- Tarification basée sur la réservation de bande passante. Cette théorie s'appuie sur le protocole RSVP.
- Tarification dite " du métro parisien " où le réseau est séparé en sous-réseaux de même fonctionnement et sans garanties de service mais avec des prix différents ; on espère ici que les sous-réseaux les plus chers seront les moins engorgés.
- Tarification basée sur la priorité pour le service à chaque nœud : les classes prioritaires seront plus chères. Deux sous-classes de tarification peuvent être décrites : soit le prix par paquet pour chaque classe est fixé à l'avance, soit, pour chaque classe, il dépend du niveau d'engorgement du réseau afin de stimuler une utilisation en période creuse.
Ici encore il n'y a pas de garantie de service, mais juste une idée de garantie de service en moyenne.

- Une autre possibilité est d'utiliser des enchères (éventuellement toutes les T unités de temps pour simplifier la gestion du réseau) pour décider les requêtes qui vont être servies.
- Il existe aussi le modèle dit de la capacité espérée où les paquets ne sont servis différemment qu'en cas de congestion.
- Enfin, la tarification basée sur le taux de transfert : soit le prix souhaité est fixé par le client et une répartition équitable des vitesses de transfert est calculée, soit les vitesses de transfert sont demandées et un prix équitable est calculé par le réseau.

3.6. Les techniques d'évaluation par analyse de modèles

Rappelons d'abord les différents types d'approches que l'on peut suivre pour l'évaluation d'un modèle. La situation idéale est celle où le modèle est suffisamment simple ou suffisamment "régulier" pour permettre un traitement analytique. À l'opposé, lorsqu'il représente un système avec beaucoup de détails, conséquence de la complexité de ce système, il peut être trop difficile de mettre en évidence des relations explicites. Dans ce cas, on peut être amené à réaliser une étude par simulation. À mi-chemin entre les deux, on peut envisager une résolution numérique, qui n'apporte pas autant de connaissances sur le système que le traitement analytique, mais qui a sur la simulation l'avantage d'apporter des solutions (numériquement) exactes, et parfois représenter un coût de calcul moins important. Enfin, il est souvent possible d'approcher les résultats cherchés (soit dans une analyse mathématique, soit dans une étude numérique), avec des compromis acceptables entre la qualité du résultat et le coût nécessaire pour l'obtenir.

Dans les vingt dernières années, on a vu se développer considérablement l'ensemble des techniques mathématiques et algorithmiques de résolution de problèmes de base. Les progrès significatifs des techniques d'évaluation associés à l'augmentation considérable de la capacité de calcul des machines permettent aujourd'hui de traiter des problèmes de plus en plus complexes, avec des tailles des données de plus en plus importantes. L'une des conséquences de ceci est que la construction même des modèles, de façon fiable et efficace, n'est plus un problème secondaire mais est devenu un problème central. En outre, d'autres problèmes apparaissent, aussi bien dans le monde des techniques numériques que dans les méthodes de simulation. Du point de vue des premières, la résolution numérique de systèmes d'équations de grande taille (millions ou milliards d'équations et d'inconnues, voire une infinité) n'est pas une tâche aisée. En ce qui concerne la simulation, la prise en charge de la rareté de certains événements (la défaillance d'un système ou la perte d'une cellule dans un commutateur ATM) est un problème non trivial.

Parallèlement, les transformations technologiques dans le monde des communications ont apporté de nombreux problèmes nouveaux, à plusieurs niveaux. D'abord, les mesures usuelles de performance et de sûreté de fonctionnement, traditionnellement utilisées en informatique, ne sont plus suffisantes pour cerner un certain nombre d'aspects de ces systèmes. On parle maintenant de *performabilité* et, comme on l'a vu plus haut, de QoS. Ensuite, des approches nouvelles voient le jour : on commence à s'intéresser de plus en plus à des techniques déterministes et à l'analyse des cas les pires, on travaille à des échelles de temps qui étaient auparavant inhabituelles, ce qui conduit à travailler dans des formalismes de modélisation nouveaux comme les modèles *fluides* (voir ci-après), on introduit des concepts nouveaux comme celui de *bande passante équivalente* qui à leur tour amènent des classes de problèmes spécifiques.

Enfin, signalons que même au niveau de la simulation de type événementielle, il y a d'importants problèmes de recherche à résoudre. Un exemple de référence est celui de la simulation d'un réseau ATM au niveau cellule. Une représentation à ce niveau implique un très grand nombre d'événements pour simuler de très courtes périodes de temps. Par exemple, la simulation d'une activité durant 3 secondes sur un lien à 155 Mbit/s nécessite le traitement d'environ 10^6 événements. Si l'utilisateur veut valider des taux de perte inférieurs à 10^{-9} , ce type de simulateur doit faire face au problème de l'obtention d'estimations précises pour des probabilités d'événements très rares.

3.7. Évaluation de performances des réseaux haut débit

Regardons maintenant de plus près certains problèmes nouveaux posés par l'évaluation des performances et plus généralement de la QoS, dans le cadre des réseaux haut débit. Les premières difficultés liées à

ces problèmes d'évaluation concernent la modélisation du trafic et du processus des arrivées aux différents nœuds d'un réseau de communication. On distingue généralement trois échelles de temps différentes pour la modélisation du trafic, qui sont l'échelle des cellules (nous empruntons la terminologie à celle de la technologie ATM), l'échelle des rafales et l'échelle des appels.

- À l'échelle de temps des cellules, le trafic consiste en des entités discrètes, les cellules, produites par chaque source à un taux qui est souvent plus faible de quelques ordres de grandeur que le taux maximal des liens de sortie des nœuds.
- À l'échelle de temps des rafales, la granularité fine de l'échelle cellules est ignorée et le processus d'entrée est caractérisé par son taux instantané. Les modèles fluides apparaissent alors comme un outil de modélisation naturel.
- L'échelle des appels, caractérisée par les temps de séjour des appels arrivant ou par leurs demandes de service, représente la plus grande des trois échelles de temps décrites. Celle-ci est l'échelle de temps classique dans les études de performance (par exemple, dans les études liées aux architectures en informatique). Aujourd'hui, les caractéristiques des réseaux de communication posent des problèmes nouveaux, même à cette échelle. À titre d'exemple, on peut associer à chaque appel un réel appelé *bande passante effective*, compris entre le débit moyen et le débit crête requis et qui décrit la quantité de bande passante qui doit être allouée à cet appel de manière à conserver la probabilité de perte de cellules en dessous d'un certain seuil.

Les échelles de trafic auxquelles nous nous intéressons plus particulièrement, pour le moment, sont l'échelle des cellules et l'échelle des rafales. En effet, il s'agit des domaines où les problèmes à résoudre sont les plus novateurs et difficiles. Lorsqu'elle est pertinente, l'étude à l'échelle des appels dispose d'un très grand nombre d'outils d'analyse éprouvés.

3.7.1. L'échelle des cellules.

À cette échelle, le trafic consiste en des entités discrètes, les cellules, produites par chaque source. Les processus d'arrivée généralement utilisés dans ce contexte pour modéliser le trafic sont des processus d'arrivée par groupes markoviens, aussi notés BMAP (*Batch Markovian Arrival Process*).

Un BMAP est un processus de Markov bidimensionnel $\{A(t), J(t)\}$ où la variable $A(t)$ compte le nombre d'arrivées sur l'intervalle $(0, t)$ et où la variable $J(t)$ représente la *phase* du processus. Le nombre de phases du processus est en général fini. Le générateur infinitésimal du processus est donné par la matrice

$$\begin{bmatrix} D_0 & D_1 & D_2 & D_3 & \cdot & \cdot & \cdot \\ & D_0 & D_1 & D_2 & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & D_0 & D_1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & D_0 & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & & \cdot & \cdot \\ & & & & & & \cdot \end{bmatrix}$$

où les D_k , $k \geq 0$, sont des matrices carrées de dimension égale au nombre de phases du processus. Pour $k \geq 1$, les matrices D_k contiennent les taux de transition concernant les arrivées de taille k , avec le changement de phase approprié. La matrice D_0 contient, en dehors de sa diagonale, les taux de transition correspondant à un changement de phase sans arrivée de cellules. La matrice $D = \sum_{k=0}^{\infty} D_k$ est le générateur infinitésimal du processus de Markov $\{J(t)\}$. Le taux moyen d'arrivée en équilibre λ du processus $\{A(t), J(t)\}$ est

$$\lambda = \pi \sum_{k=1}^{\infty} k D_k \mathbf{1},$$

où π est le vecteur ligne des probabilités stationnaires du processus $\{J(t)\}$ et $\mathbf{1}$ est le vecteur colonne dont toutes les composantes valent 1.

Les BMAP forment une classe très large. De nombreux processus d'arrivée familiers peuvent être vus comme des BMAP particuliers. Notamment, en prenant $D_0 = -\lambda$, $D_1 = \lambda$ et $D_k = 0$ pour $k \geq 2$, on obtient un processus de Poisson de taux λ . Un processus de renouvellement de type phase, de représentation

(α, T) est un BMAP avec $D_0 = T$, $D_1 = -T1\alpha$ et $D_k = 0$ pour $k \geq 2$. Si D_1 est diagonale, et $D_k = 0$ pour $k \geq 2$, on obtient un processus de Poisson dont le taux est modulé par un processus de Markov de générateur infinitésimal $D = D_0 + D_1$. Ce dernier cas particulier de BMAP est aussi appelé un MMPP (Markov Modulated Poisson Process). De plus, tout processus ponctuel peut être approché par un BMAP. Enfin, il est à noter que la superposition de n processus BMAP indépendants est encore un processus BMAP. Cette propriété est particulièrement intéressante pour la modélisation du multiplexage statistique de sources dans les réseaux haut débit.

À l'aide de ces processus BMAP, on peut par exemple modéliser le comportement d'un nœud d'un réseau de communication par une file d'attente BMAP/G/1 à capacité finie ou infinie dans le but d'évaluer des mesures de qualité de service comme la loi du nombre de clients en attente, la loi du temps d'attente ou la probabilité de perte de cellules dans le cas d'une capacité finie. Un tutoriel portant sur l'étude de cette file d'attente se trouve dans [68]. Dans le cas d'une modélisation avec une échelle de temps discrète, on obtient de manière similaire au cas du temps continu, des processus d'arrivée, notés D-BMAP qui conduisent à l'étude de files d'attente discrètes du type D-BMAP/D/1. La fine granularité de l'échelle de temps des cellules pose le problème du grand nombre de paramètres à évaluer pour définir le processus des arrivées, et l'une des principales difficultés rencontrée lors de l'étude des files d'attente associées concerne le temps de calcul des mesures recherchées. En effet, les processus BMAP ou D-BMAP sont définis par un certain nombre de matrices dont la taille pose bien évidemment les problèmes classiques de complexité des calculs.

3.7.2. L'échelle des rafales.

À l'échelle de temps des rafales, le trafic est considéré comme continu, c'est pourquoi on parle de modèles fluides, et ce trafic est en général caractérisé par son taux instantané. Les plus connus de ces modèles sont les processus dits *on/off* et leurs superpositions. On dit que le trafic provenant d'une source est *on/off* s'il alterne entre des périodes d'activité (les périodes *on*) et des périodes de silence (les périodes *off*). Les taux de transmission sont supposés constants durant chaque période *on*. L'hypothèse de base est que ces processus sont des processus de renouvellements alternés. L'état de la source est alors décrit par un processus semi-markovien. Lorsque ces périodes suivent des lois de type phase, le processus devient markovien et le taux d'entrée devient modulé par un processus de Markov.

En régime transitoire, on considère un buffer de taille finie ou infinie dont les taux d'entrée et de sortie sont fonctions de l'état d'un processus de Markov $\{X_s, s \geq 0\}$ sur un espace d'états S , avec générateur infinitésimal A . Si Q_t désigne la quantité de fluide dans le buffer à l'instant t et si ϱ_i (resp. c_i) désigne le taux d'entrée (resp. de sortie) dans le (resp. du) buffer lorsque le processus $\{X_s\}$ est dans l'état i , alors le couple (X_t, Q_t) forme un processus de Markov. La loi du couple (X_t, Q_t) est donnée par l'équation aux dérivées partielles

$$\frac{\partial F_i(t, x)}{\partial t} = -\eta_i \frac{\partial F_i(t, x)}{\partial x} + \sum_{r \in S} F_r(t, x) A(r, i), \quad (1)$$

où $\eta_i = \varrho_i - c_i$ et où l'on a posé $F_i(t, x) = \Pr\{X_t = i, Q_t \leq x\}$. La mesure qui nous intéresse dans ce contexte est la loi du processus d'occupation Q_t du buffer.

Si maintenant X représente l'état stationnaire du processus $\{X_s\}$ et si Q représente la quantité de fluide dans le buffer en régime stationnaire, alors sous les hypothèses classiques de stabilité, on a l'équation différentielle suivante :

$$\eta_j \frac{dF_j(x)}{dx} = \sum_{i \in S} F_i(x) A(i, j),$$

où $F_j(x) = \Pr\{X = j, Q \leq x\}$. Ces travaux concernent non seulement le calcul de la loi de Q [59], mais aussi l'obtention de bornes [67] de cette loi ou d'équivalents de la queue de sa distribution dans le but de contrôler l'admission de nouvelles sources par le respect de critères de qualité de service [62].

4. Domaines d'application

4.1. Panorama

Mots clés : *Extranet, ingénierie des réseaux, Internet, Intranet, multimédia, opérateurs, QoS, télécommunications, téléphonie.*

Nos domaines d'application principaux sont ceux de la conception de réseaux, aussi bien au niveau de l'infrastructure de transport de l'information qu'à celui des protocoles utilisés dans les différentes couches du réseau. Notre expertise se focalise aujourd'hui sur la technologie IP dans divers contextes (IP et QoS, IP et sécurité, IP et mobilité, IP et téléphonie,...), et sur les outils d'analyse et de dimensionnement : configuration d'architectures de télécommunication, recherche des goulots d'étranglement, comparaison des politiques d'allocation des ressources du réseau, etc. Nos travaux sur les protocoles et sur les mécanismes de contrôle trouvent également des applications avec des technologies autres que IP, par exemple, dans le cas des supports de transport ATM. Les problèmes de cohabitation ou d'interopérabilité de technologies distinctes sont aussi sources de nombreuses applications : IP et ATM, IP et WDM, interopérabilité IPv4-IPv6, etc. Dans le domaine de l'ingénierie du trafic et du dimensionnement des systèmes, l'évolution technologique pose de nombreux nouveaux problèmes d'analyse de performances. Hors ces domaines centraux, d'autres sujets importants où l'analyse quantitative joue un rôle central sont, par exemple, l'analyse des méthodes de contrôle ou les problèmes posés par la tarification, qui intéressent pour des raisons évidentes les opérateurs.

Le premier domaine dans lequel l'expertise du projet est sollicitée est celui des réseaux IP. Le contexte usuel est celui des industriels désirant développer de nouvelles techniques, ou celui d'un utilisateur qui doit mettre en place un système de communication ou faire évoluer un système existant. Ceci peut concerner un aspect spécifique du système considéré (par exemple, le modèle de cout permettant de développer une politique de facturation), ou un type particulier de réseau (par exemple, un problème de configuration dans le cas de l'utilisation de lignes asymétriques comme dans la technologie ADSL), ou encore une famille de services (par exemple, une politique de sécurité).

D'autres applications majeures de nos travaux et de notre expertise concernent les problèmes de cohabitation de technologies. On y trouve les différents aspects liés au développement explosif du monde IP : IP sur couche de transport ATM, ou sur WDM, les problèmes spécifiques liés non pas à la technologie IP courante mais à la future version IPv6, y compris ceux de la transition entre les deux versions du protocole.

Dans le monde IP, les extensions IP mobile, IP cellulaire, les aspects liés à la sécurité dans le monde IP ou à la diffusion en multicast de l'information, les techniques de compression (par exemple, de compression d'en-têtes) sont également des domaines d'application importants. Nous pouvons aussi classer les domaines principaux d'application des activités de recherche d'ARMOR par type de service concerné. Dans ce cas, l'expertise passée et présente des membres de l'équipe concerne, principalement, le transport de flux multimédia sur réseau IP, les divers aspects qui prend la gestion de la QoS dans les réseaux, les techniques de test (tests d'inter-opérabilité, tests de validation des mises en œuvre, notamment en IPv6, génération de tests). Dans ce volet se trouvent, par exemple, les problèmes de conception de mécanismes adaptés à des classes de flux particuliers et des objectifs de QoS spécifiques, aussi bien au niveau de l'accès au réseau que dans les nœuds intermédiaires. Un autre exemple est celui des nombreux problèmes liés au développement des applications de téléphonie sur une structure IP qui n'a pas été conçue pour de telles applications (mise en œuvre de fonctions de contrôle, mise en œuvre d'une technologie IP *native* -c'est-à-dire, sans utilisation de mode connecté, la facturation, etc.).

Dans les aspects liés à l'analyse et au dimensionnement, nous apportons nos compétences dans l'utilisation des différentes méthodologies associées (mesures, simulation, techniques dites *analytiques*) mais aussi dans le développement de nouveaux outils, mathématiques et informatiques. Nous développons des modèles destinés à capter des aspects spécifiques des systèmes, liés par exemple à la QoS. Nous développons également de nouvelles méthodologies de simulation, pour pallier certaines limitations des techniques existantes. Enfin, il faut observer que les réseaux offrent maintenant des services avec un certain niveau de redondance, ce qui conduit à des problèmes de sûreté de fonctionnement. Notre groupe a maintenant une longue expérience dans

l'étude spécifique de cet aspect des systèmes et des problèmes associés tels que l'analyse de la performabilité, ou de la vulnérabilité (notion visant à quantifier la robustesse d'un maillage sans tenir compte de la fiabilité de ses éléments).

5. Logiciels

5.1. Plates-formes expérimentales

Participants : Julio Orozco, Laurent Toutain, Miled Tezeghdanti.

Nous avons mis en œuvre et nous maintenons une plate-forme IPv6 intégrant différents mécanismes proposés récemment dans le cadre de la QoS dans les réseaux IP (RSVP, différenciation de services, techniques d'ordonnancement). Il s'agit d'un support de recherche qui, de plus, permet à notre groupe et à des acteurs extérieurs, de tester ces nouvelles technologies. Cette plate-forme fait partie du réseau expérimental IPv6 français (le *G6-bone*), lui-même inclus dans le réseau mondial expérimental IPv6, le *6-bone*. Elle est maintenant le Point d'Interconnexion Régional pour la Bretagne et les Pays de Loire (c'est-à-dire qu'elle joue le rôle de fournisseur de service Internet IPv6).

Une plate-forme de test de l'architecture *diffserv* a été également mise en place par le projet. Elle permet de tester les différentes catégories de service de cette architecture, à savoir EF (*Expedited Forwarding*) et AF (*Assured Forwarding*). Cette plate-forme est interconnectée au réseau européen TF-NGN (ex-TF-TANT) qui teste cette technologie de la différenciation de services.

Enfin, nous avons réalisé une plate-forme de test MPLS. Elle comprend plusieurs machines sous FreeBSD 3.3, et nous avons utilisé l'implémentation Nistswich 0.2 de MPLS. La plate-forme est locale ; elle permet de tester le fonctionnement de MPLS sur Ethernet, l'encapsulation des *labels* ainsi que la signalisation basée sur le protocole RSVP, et l'établissement des tunnels afin de satisfaire certaines contraintes de qualité de service. Le but principal de la maquette est de tester des algorithmes d'ingénierie de trafic.

5.2. Sécurité

Participants : Sylvain Gombault [correspondant], Olivier Peningault.

Nous développons des logiciels fournissant des services de sécurité. En coopération avec France Télécom R&D, nous avons réalisé NSP (*Network Security Probe*), outil de supervision destiné à l'administration de la sécurité d'un site IP. NSP repère des intrusions grâce au trafic réseau qu'elle écoute. Une intrusion est caractérisée soit par sa signature en termes de trafic réseau, soit par la présence d'un trafic non prévu par la politique de sécurité. Cette forme de détection d'intrusion est également un moyen de vérifier que la politique de sécurité est correctement appliquée par le service d'administration du réseau.

La majorité des attaques mises en œuvre sur Internet sont reproductibles en local dans les réseaux d'entreprise. Cela implique une surveillance de tous les segments sensibles du réseau de l'entreprise. Le logiciel NSP a été conçu pour travailler de manière autonome sur un seul brin du réseau, mais l'installation d'une sonde NSP par brin sensible s'avère une tâche lourde à administrer. C'est pourquoi nous avons également développé Diams (Détection d'Intrusion Au Moyen de sondes de Sécurité). Diams est un outil construit autour d'un serveur Web, écrit en Java, qui propose une administration centralisée et sécurisée afin de faciliter la configuration des sondes et la collecte de l'audit. Son but principal est de détecter des classes d'attaques que nous avons étudiées lors du développement de NSP. Diams dispose d'une interface permettant de définir des règles de filtrage, d'agents intelligents qui analysent le trafic des segments sur lesquels ils sont placés, qui assemblent les informations et les transmettent à un collecteur, et bien sûr d'outils pour visualiser les résultats, en temps réel ou en différé.

Devant l'absence de disponibilité d'outils de tests accessibles hors des États-Unis, nous avons développé Amétis (Méthodologie de Tests pour IdS) qui a permis de tester les fonctionnalités des IDS (Intrusion Detection Systems) du monde commercial et du domaine du logiciel libre. Ce travail a été réalisé en collaboration avec la société Alcatel. Une présentation d'Amétis a été faite dans [60].

5.3. Analyseurs de la sûreté de fonctionnement

Participants : Franco Robledo, Gerardo Rubino [correspondant].

Nous développons des outils logiciels pour l'évaluation de modèles de divers types, dans le but d'analyser la sûreté de fonctionnement des systèmes, ainsi que des extensions.

Par exemple, nous avons produit pour le Celar une bibliothèque de méthodes d'évaluation de la fiabilité d'architectures de réseaux maillés (topologies de WAN -*Wide Area Networks*). Les programmes de cette bibliothèque sont capables de calculer des mesures de fiabilité et d'analyser également leur sensibilité par rapport aux données. Ces évaluations se font suivant des approches de type combinatoire et aussi par des techniques de type Monte Carlo. Nous avons également développé des programmes d'analyse de la vulnérabilité, toujours pour le même type de réseaux, et des programmes d'analyse de certaines mesures de performabilité.

Nous avons également développé des logiciels permettant de construire des modèles markoviens et des bibliothèques d'analyse de ce type de modèle (en particulier dans des collaborations avec France Télécom R&D pour des analyses de mesures de QoS).

5.4. Simulation

Participants : Bernard Cousin, Raymond Marie, Miklós Molnár, Gerardo Rubino, Laurent Toutain, Bruno Tuffin [correspondant].

Notre groupe a développé des outils variés de simulation, et continue à en développer des nouveaux. Nous avons fait plusieurs contributions au simulateur du NIST pour les réseaux ATM. L'équipe a développé également un simulateur à événements discrets appelé SAMSON, spécialisé dans les problèmes de type temps réel, utilisé par plusieurs centres académiques en France (voir <http://www.rennes.enst-bretagne.fr/~toutain/samson>).

Nous avons fait des contributions au langage QNAP, qui fait actuellement partie du progiciel MODLINE développé et distribué par la société SIMULOG. De même, nous avons collaboré avec l'université de Duke (états-Unis) sur le développement du logiciel SPNP (*Stochastic Petri Net Package*) [65], un outil permettant l'évaluation de performances par réseau de Petri et implanté sur près de 200 sites. Nos contributions concernent le développement de méthodes de simulation à événements discrets et leur analyse par diverses méthodes de Monte Carlo.

Nous travaillons actuellement sur un simulateur appelé FluidSim, travaillant dans le paradigme des modèles fluides [66] (à états continus), qui est particulièrement efficace dans le cas des réseaux haut débit. Ce simulateur a déjà été utilisé avec succès pour l'analyse de certains aspects des réseaux ATM ainsi que du protocole TCP.

5.5. Étude analytique de modèles fluides

Participant : Bruno Sericola.

Nous commençons le développement d'outils logiciels (en collaboration avec Patricia Bournai de la cellule ASCII) pour la description et la résolution analytique de modèles fluides dans le but d'analyser les performances des réseaux de communication. Ces outils devraient permettre d'intégrer au fur et à mesure les nouveaux résultats obtenus non seulement dans notre projet mais aussi dans les autres centres de recherche travaillant dans le même domaine.

6. Résultats nouveaux

6.1. Activités autour du test

6.1.1. Méthodes et outils pour la génération de tests de conformité et d'interopérabilité de protocoles

Participants : Sébastien Barbin, Francine Ngani, César Viho.

Notre objectif est d'étendre notre savoir-faire en matière de tests de conformité au contexte du test d'interopérabilité des nouveaux protocoles des réseaux informatiques, avec la prise en compte des aspects quantitatifs liés à la QoS, et des nouvelles fonctionnalités telles que la mobilité et la sécurité. Il s'agit de développer des méthodes, de nouveaux algorithmes et outils appropriés, et de les mettre en œuvre dans des plates-formes d'expérimentation. À l'heure actuelle, les protocoles IPv6 sont en cela des cibles privilégiées et offrent un cadre très intéressant pour valider nos méthodes et outils de test.

Concernant les aspects formels et méthodologiques du test d'interopérabilité, les travaux de cette année ont permis de caractériser les différentes architectures de test d'interopérabilité ainsi que les méthodes de test abstraites correspondantes. Le résultat fait l'objet d'un rapport de recherche en cours de finition. En parallèle, nous avons poursuivi le travail initié l'année dernière sur la formalisation de la notion d'interopérabilité. De façon plus générale, tous nos travaux effectués dans ce contexte au cours de ces dernières années sont synthétisés dans [11]. Actuellement, nous étudions des méthodes pour la génération automatique de tests d'interopérabilité sur une architecture de test répartie.

6.1.2. Applications aux protocoles IPv6

Participants : Sébastien Barbin, Ana Minaburo, Frédéric Roudaut, Laurent Toutain, César Viho.

Concernant les activités de génération de test pour IPv6, cette année a été principalement consacrée à l'étude des nouvelles versions du draft du protocole de mobilité (MIPv6) et de protocoles de routage (RIPng et OSPF.v3). Nous avons généré des tests de conformité et d'interopérabilité pour ces protocoles. Nous avons également amélioré (en qualité et en quantité) nos tests d'interopérabilité pour les mécanismes de transition IPv4-IPv6 (DSTM, 6to4, etc.) et pour la compression d'entête (ROHC, voir 6.6.2). Ces tests ont été utilisés avec succès lors de l'événement d'interopérabilité *Plugtests IPv6 2002* organisé par l'ETSI Sophia du 19 au 23 septembre 2002 à Cannes. Les résultats de cet événement ont été présentés lors de la conférence « Where are we with IPv6 » [57].

6.1.3. Génération de tests de logiciels par graphes stochastiques

Participants : Hélène Le Guen, Raymond Marie.

Nous nous intéressons à la description sous forme de graphes probabilistes du comportement d'un logiciel en mode opérationnel. Cette description permet la génération de cas de test pertinents par parcours du graphe modélisé, tout en fournissant des données quantitatives sur le déroulement des tests, en particulier la fiabilité, ainsi qu'une estimation de la progression de la couverture de test. Une étude sur la mise en place et la gestion d'une telle campagne de validation d'un logiciel a été publiée dans [43]. Nos travaux en cours sont basés sur la définition de critères de qualité d'une campagne de test. Dans ce cadre nous avons été amenés à modéliser les échanges du logiciel et de son environnement sous forme d'une chaîne de Markov à temps discret (CMTD) et à nous intéresser à la probabilité qu'un état de la chaîne soit atteint au cours d'une séquence de test. Pour pouvoir adapter ce calcul à des chaînes comportant un grand nombre d'états, nous avons développé une technique de décomposition basée sur l'utilisation des composantes fortement connexes. La méthodologie employée et des exemples numériques démontrant l'efficacité de l'approche ont été publiés dans [44].

6.2. Techniques de modélisation et d'analyse de modèles

6.2.1. Fonctionnelles Markoviennes additives

Participant : Bruno Sericola.

Ce travail est un travail en commun avec M. Bladt, de l'UNAM de Mexico, B. Meini, de l'université de Pise et M. Neuts, de l'université d'Arizona à Tucson. On considère une chaîne de Markov $J(t)$ à espace d'états fini E et des fonctions réelles $a(\cdot)$ et $c(\cdot, \cdot)$ définies respectivement sur E et $E \times E$ et appelées aussi, respectivement, taux de récompense et récompense impulsionnelle. On considère alors la fonctionnelle continue

$$R_j(t) = a(j) \int_0^t 1_{\{J(u)=j\}} du$$

qui compte $a(j)$ fois le temps passé dans l'état j sur l'intervalle $[0, t]$ et la fonctionnelle discontinue

$$N_{h,k}(t) = c(h, k) \sum_{0 < u \leq t} 1_{\{J(u^-)=h\}} 1_{\{J(u)=k\}}.$$

qui compte $c(h, k)$ fois le nombre de sauts de J de h à k sur l'intervalle $[0, t]$. Nous avons obtenu dans un premier temps une expression simple des transformées de Laplace-Stieljes et fonctions génératrices jointes des variables $J(t)$, $R_j(t)$ et $N_{h,k}(t)$ sachant $J(0)$.

A l'aide de cette formule générale, on obtient des expressions explicites des deux premiers moments de la récompense cumulée sur l'intervalle $[0, t]$. En choisissant correctement les fonctions $a(\cdot)$ et $c(\cdot, \cdot)$, on peut obtenir des formules pour les deux premiers moments de nombreuses mesures d'intérêt. Par exemple, en choisissant $c(\cdot, \cdot) = 0$ et $a(i) = 1$ pour $i \in B$ et 0 sinon, on obtient les moments du temps total de séjour dans B sur l'intervalle $[0, t]$. En choisissant $a(\cdot) = 0$ et $c(h, k) = 1$ si $k \in B$ et 0 sinon, on obtient les moments du nombre total d'états de B visités sur l'intervalle $[0, t]$.

Enfin, lorsque $c(\cdot, \cdot) = 0$, nous avons développé différentes méthodes de calcul de la matrice semi-markovienne $W(x, t)$ définie par

$$W_{i,j}(x, t) = \Pr\left\{\sum_{j \in E} R_j(t) \leq x, J(t) = j \mid J(0) = i\right\}.$$

Un premier algorithme est basé sur une formule explicite conduisant à une méthode stable dont la précision est spécifiée à l'avance. Une deuxième technique consiste en l'inversion numérique de la transformée de Laplace-Stieljes de cette matrice et nous avons développé une troisième méthode basée sur le produit de convolution des matrices $W(x, t)$. Pour cette dernière, on utilise la solution explicite pour des valeurs de t modérées et l'on implémente sur cette base le produit de convolution pour des valeurs de t plus grandes. Ces résultats, qui s'inscrivent en pratique dans le domaine de la performabilité des systèmes informatiques et des réseaux de communication, ont été publiés dans [18].

6.2.2. Étude analytique de modèles fluides du premier ordre

Participants : Nelly Barbot, Bruno Sericola.

Nous nous sommes concentrés sur les aspects théoriques de ces files dont les taux d'entrée et de service sont contrôlés par une chaîne de Markov à temps continu. Deux mesures associées ont été principalement considérées : le processus d'occupation et la période d'occupation.

En régime transitoire, nous avons étudié une file d'attente fluide de capacité infinie pilotée par une chaîne de Markov sur un espace d'états infini. La fonction de répartition jointe du niveau du réservoir et de l'état de la chaîne de Markov satisfait un système infini d'équations aux dérivées partielles. Nous avons déterminé les conditions d'unicité de sa solution et ainsi étendu une solution existante dans le cas fini, sous forme d'une série entière, à une vaste classe de processus d'entrée. Ceux-ci sont représentés par une chaîne de Markov de générateur infinitésimal tri-diagonal par blocs. Par dualité, nous avons adapté cette étude à la distribution de la première période d'occupation de la file fluide.

Nous avons étudié le régime stationnaire d'une file d'attente fluide alimentée par le flux de sortie d'une file M/M/1. La distribution jointe du niveau d'occupation du réservoir et de l'état de la file M/M/1 a été obtenue sous forme d'une série entière. Les coefficients associés correspondent aux coordonnées de puissances successives d'une matrice infinie. Nous les avons explicités via l'inversion de fonctions génératrices matricielles. L'expression obtenue est très simple en comparaison des représentations intégrales de fonctions de Bessel présentes dans la littérature et a été publiée dans [12].

Les files d'attente fluides en réseau linéaire ont également été considérées. La distribution transitoire jointe des niveaux des réservoirs fluides et de l'état de la chaîne de Markov en amont vérifie un système d'équations aux dérivées partielles. Dans le cas d'un réseau piloté par une file d'attente M/M/1, la caractérisation du

processus de sortie des réservoirs nous a permis d'obtenir les distributions transitoires du niveau de chaque réservoir du réseau. Le régime stationnaire de ce modèle a été également traité. Les équations précédentes deviennent des équations différentielles dont nous avons déduit une expression de la distribution jointe du niveau de chaque réservoir et de l'état de la file M/M/1.

Tous ces résultats sont détaillés dans le document de thèse [9].

6.2.3. Étude analytique de modèles fluides du second ordre

Participants : Landy Rabehasaina, Bruno Sericola.

Nous avons étudié les propriétés stochastiques de modèles fluides du second ordre. Plus précisément, nous nous intéressons à une file fluide de capacité infinie de niveau Q_t à l'instant t vérifiant l'équation différentielle réfléchie en 0

$$dQ_t = b(X(t), Q_t)dt + \sigma(X(t), Q_t)dB_t + dL_t$$

où X est un processus stationnaire ergodique (appelé l'environnement) pas forcément markovien, B est un mouvement brownien, b est typiquement la différence entre le taux d'entrée et le taux de service (également appelé *drift*), σ est une fonction de variance locale et $L(t)$ est un processus croissant permettant de conserver le niveau Q_t positif ou nul. Nous avons poursuivi l'étude de la stabilité et avons prouvé, toujours sous des conditions de Lipschitz en la deuxième variable pour b et σ , que la condition $E(\limsup_{y \rightarrow +\infty} b(X(0), y)) < 0$ et $\inf_{x,y} \sigma(x, y) > 0$ (coefficient de diffusion non dégénéré) implique que Q_t converge en distribution (et même en totale variation) vers une variable aléatoire W finie quand t tend vers l'infini, et ce indépendamment de la condition initiale, ce qui était un des problèmes soulevés précédemment.

Nous avons ensuite étudié la distribution de W . Nous avons prouvé que si X satisfaisait un théorème central limite fonctionnel alors pour tout $x \geq 0$

$$P(W > x) \leq C \exp(-dx)$$

pour deux constantes C et d positives, ce qui veut essentiellement dire que W est à décroissance au pire exponentielle. Nous avons déterminé une borne inférieure pour la quantité $d^* = -\limsup_{x \rightarrow +\infty} (\ln P(W > x))/x$ dans le cas où X est une CMTC.

Enfin, l'étude du cas particulier où X est une CMTC, $b(x, y) = \lambda(x) - \mu(x)y$ et $\sigma(x, y) = \sigma(x)y$ (modèle linéaire) est en cours. Ce modèle est étudié non seulement dans le domaine des réseaux de télécommunication, mais également en finance. Nous obtenons pour le moment une expression explicite de $E(W)$.

6.2.4. Stabilité des réseaux

Participants : Landy Rabehasaina, Bruno Sericola.

Nous nous sommes également intéressé à la stabilité d'un réseau de N files fluides, dont les niveaux à l'instant t sont notés Q_t^1, \dots, Q_t^N . Cette fois ci, le vecteur colonne $Q_t = (Q_t^1, \dots, Q_t^N)$ vérifie une équation différentielle stochastique avec réflexion sur le bord de R_+^N notée vectoriellement

$$dQ_t = b(X(t), Q_t)dt + \sigma(X(t), Q_t)dB_t + PdL_t \quad (2)$$

où b est un vecteur colonne (b^1, \dots, b^N) , σ est une matrice diagonale $diag(\sigma^1, \dots, \sigma^N)$, B est un mouvement brownien N -dimensionnel, et P est la matrice de routage du réseau. Sous l'hypothèse de croissance des fonctions $b^i(x, y^1, \dots, y^N)$ en chacun des y^k pour $k \neq i$, $i = 1, \dots, N$, et si le i -ème élément $\sigma^i(x, y^1, \dots, y^N)$ ne dépend que de x et de y^i , alors nous établissons un théorème de comparaison pour les processus satisfaisant l'équation (2) et nous prouvons, sous l'hypothèse que les files sont initialement vides, le critère de stabilité

$$E \left(\limsup_{y^k \rightarrow +\infty, k \neq i} \sup_{y^i} b^i(X(0), y^1, \dots, y^N) \right) < 0 \quad \forall i.$$

Ces résultats ont été présentés dans [37]. Nous retrouvons en particulier les résultats existant déjà dans la littérature, quand les b^i et σ^i ne dépendent pas de y^1, \dots, y^N .

6.2.5. Étude analytique du protocole TCP et de la politique RED

Participants : Sophie Fortin, Bruno Sericola.

Ce thème de recherche est basé sur l'étude et la modélisation du protocole de transport **TCP** (*Transport Control Protocol*) de la famille des protocoles **TCP/IP**. Celui-ci a pour rôle le contrôle de flux des données sur Internet, pour toutes les applications ayant une nécessité de transmission intégrale des données telles que le courrier électronique, les applications **http** et **ftp**, et les applications d'accès à distance tel que **telnet**.

La principale fonction de **TCP** est donc de s'assurer de la bonne réception des données. Pour ce faire, le destinataire des paquets **TCP** renvoie à l'émetteur des accusés de réception sous la forme de petits paquets appelés **ACKs** (*ACKnowledgements*) qui indiquent le numéro du premier bit encore manquant. Une perte est alors détectée (ou plus exactement supposée) soit par l'expiration d'une temporisation T_0 avant l'arrivée de l'**ACK** (perte de type **TO**), soit par l'arrivée de trois **ACKs** dupliqués (pertes de type **TD**), c'est-à-dire indiquant tous le même paquet comme étant toujours manquant.

Outre la retransmission des données supposées perdues, **TCP** intègre un algorithme de modification du débit de la transmission. Dans cet algorithme sont notamment inclus la division par deux de ce débit en cas de détection de perte, puis l'augmentation progressive du débit, de façon exponentielle suite au rétablissement de la connexion après une perte de type **TO** (phase de démarrage lent ou *slow start*), ou de façon linéaire après une perte de type **TD** ou après le dépassement d'un seuil maximal de démarrage lent (phase d'évitement de congestion ou *congestion avoidance*).

Le modèle choisi pour l'évolution du flux d'une connexion **TCP** est la chaîne de Markov à temps discret $X_n = (W_n^c, W_n^{th})$, où W_n^c représente la taille de la fenêtre courante (le débit instantané) et W_n^{th} le seuil marquant le passage d'une période de démarrage lent à une période d'évitement de congestion. De taille raisonnable (18 états pour une fenêtre maximale W_{max} de 8 paquets, et environ 30000 états pour $W_{max} = 250$ paquets), cette chaîne de Markov fournit de nombreuses mesures de performance dont notamment : le débit moyen d'émission et de réception des données, la durée moyenne entre deux pertes et le nombre de paquets émis et réceptionnés durant cet intervalle de temps (en phase de démarrage lent ou en phase d'évitement de congestion), la durée moyenne de récupération après une perte de type **TO**, la proportion de temps durant laquelle la source a pu émettre des données avec le débit maximal autorisé (W_{max}), etc.

Ces résultats, présentés dans [23], se sont avérés très proches de de mesures réelles du trafic sur Internet dans le cas de réseaux de type **WAN**. Ils montrent que notre modèle s'avère justifié dans ce contexte, ajoutant aux précédents modèles des mesures plus précises et plus variées que, par exemple, la simple détermination du débit moyen d'émission.

La suite des recherches se concentre sur l'adaptation de notre modèle à des outils de gestion de la charge d'un réseau. En effet, le modèle actuel suppose que tous les nœuds du réseau fonctionnent suivant une politique *drop-tail* (quand le buffer est plein, toute nouvelle donnée est perdue). Nous 'etudions la politique **RED** (*Random Early Discard*) dont le principe de base est de d'écarter volontairement certains paquets avant débordement du buffer, et avec une probabilité dépendant de la charge instantanée du buffer. Les flux **TCP** subissant ainsi des pertes vont alors diminuer leur débit, ce qui aura pour effet de désengorger par avance le réseau, évitant ainsi un débordement du buffer et la diminution brutale de tous les flux **TCP** passant par ce nœud.

6.2.6. Soutien intégré

Participant : Raymond Marie.

L'an dernier, nous avons étudié les conséquences de l'approximation usuelle qui consiste à remplacer dans les modèles la tâche intermittente de la réparation (le réparateur ne travaille que x heures par jour) par un réparateur virtuel travaillant 24 heures par jour avec une vitesse d'exécution pondérée par le facteur $x/24$. Nous avons généralisé l'étude précédente en considérant plusieurs réparateurs [30]. Une autre étude a porté sur la modélisation et l'évaluation de la fiabilité d'une structure redondante présentant un risque de panne à la sollicitation [28]. Dans [29], nous avons proposé une heuristique pour réaliser une allocation de modules redondants lorsque les facteurs de choix sont d'une part le nombre de modules et d'autre part la classe de fiabilité choisie pour chaque type de module. L'architecture fiabiliste du système global étant a priori une structure complexe non série-parallèle.

6.2.7. Mesures transitoires d'une file d'attente markovienne

Participants : Louis-Marie Le Ny, Bruno Sericola.

Nous considérons des files d'attente dont le processus des arrivées est de type BMAP et les distributions des temps de service sont des lois de type phase (voir 3.7.1 et [68]). En utilisant la technique d'uniformisation des chaînes de Markov, nous avons développé dans [45] un algorithme stable permettant le calcul de la distribution de probabilité de la période d'activité du serveur. Le cas particulier de la file M/M/1 y est aussi détaillé, afin de mieux mettre en évidence l'intérêt de cette méthode.

En utilisant la même technique, nous nous intéressons actuellement à d'autres mesures de performances en régime transitoire pour cette file BMAP/PH/1.

6.3. Mobilité

Ces dernières années une grande variété de technologies sans fil sont apparues, certaines d'entre elles devenant accessibles au plus grand nombre. Si dans un premier temps les univers de la téléphonie et de la transmission de données informatiques sont restés très disjoints, une tendance à l'intégration est manifeste. Cette intégration permettra d'économiser les coûts de déploiement et d'augmenter les services disponibles en fournissant un service de transport de données capable de supporter les services multimédia.

L'équipe ARMOR est impliquée dans ce mouvement à plus d'un titre. D'une part l'analyse de performance s'applique à l'univers des communications sans fil comme étant un support de communication peu constant générant des erreurs. D'autre part, les compétences de l'équipe en technologie IP et plus particulièrement IPv6, la conduisent tout naturellement à s'occuper d'une des composantes majeures d'IPv6 : la mobilité IPv6. Enfin, la mobilité et l'intégration de différentes technologies de communication sans fils dans un même réseau impose de réétudier et d'adapter les architectures de la téléphonie mobile et de l'Internet.

6.3.1. Architecture des réseaux mobiles

Participants : Jean-Marie Bonnin, Lucian Suciu.

Il existe deux grandes approches pour concevoir l'architecture des réseaux d'après la troisième génération. La première consiste à étendre le principe de la téléphonie mobile en modifiant peu à peu l'architecture des réseaux de téléphonie mobile actuels pour y intégrer les services de données et le support de différentes technologies d'accès sans fils (c'est l'approche de l'UMTS et plus généralement de l'IMT 2000). La seconde approche consiste à partir de la technologie IP mobile et à modifier l'architecture interne du terminal mobile en lui laissant l'intelligence et la capacité de décision. Bien sûr une approche hybride intéresse particulièrement les opérateurs qui craignent de ne pouvoir imposer la première approche à tous les marchés, elle consiste à introduire un contrôle par le réseau dans les approches orientées IP mobile.

Dans le cadre d'une collaboration étroite avec France Télécom, l'équipe ARMOR étudie la première approche et l'approche hybride. Cette dernière a donné lieu à un travail de thèse [10] où l'on étudie la mobilité dans les réseaux radio-mobiles. Elle s'inscrit dans l'optique de la définition d'un réseau radio-mobile tout IP aussi bien au niveau du réseau d'accès que dans le cœur du réseau. Le cœur du réseau est supposé ici construit autour du protocole Mobile IP pour gérer la macro-mobilité, déplacements entre différents réseaux d'accès. Nous nous intéressons donc principalement au réseau d'accès et notamment au processus

du handover à l'intérieur d'un même réseau. Le premier travail de cette thèse consiste à étudier les deux versions IPv4 et IPv6 du protocole Mobile IP avec un intérêt particulier pour la version IPv6 qui est utilisée pour l'implémentation des propositions apportées dans la thèse. Ensuite, nous identifions les difficultés de Mobile IP à gérer les mouvements locaux limités à un réseau d'accès et nous définissons les besoins d'un nouveau protocole de micro-mobilité. Puis, grâce aux besoins définis, nous évaluons les principales solutions de micro-mobilité existantes et nous déterminons les points à améliorer. Enfin, nous proposons une solution de gestion hiérarchique de la mobilité IP contrôlée par le réseau. Cette proposition inclut la phase de décision de l'exécution du handover dans le mécanisme de gestion de la mobilité et introduit le contrôle du handover par le réseau. Cela assure des transferts optimaux entre cellules radio des nœuds mobiles prenant en compte l'état actuel du réseau d'accès ; en outre, le temps d'exécution des handovers est optimisé grâce à la planification puis l'anticipation des transferts des nœuds mobiles. L'implémentation de notre proposition sur la maquette de mobilité IPv6 de France Télécom R&D, Rennes, ainsi que sa simulation permet de démontrer l'utilité de notre proposition et d'évaluer les gains en performances. Une seconde thèse étudiera plus particulièrement la gestion de la qualité de service dans ce contexte.

La première approche quant-à elle donne lieu à une thèse que débute Franck Lebeugle. Elle étudie l'intégration du support de différentes technologies d'accès (UMTS, Satellite, WLAN, ...). L'objectif étant de permettre à l'opérateur de déployer un seul et même équipement pour gérer différentes technologies d'accès. Ce « RNC étendu » pourrait ainsi gérer de manière centralisée la qualité de service et d'optimiser la charge des différents réseaux d'accès.

6.3.2. Gestion des ressources dans un terminal mobile

Participants : Jean-Marie Bonnin, Lucian Suci.

Une collaboration plus étendue porte sur la seconde approche. Celle-ci consiste à étudier les mécanismes qui permettrait au terminal mobile de prendre des décisions pertinentes quand à l'utilisation d'une interfaces : activation, dé-activation, envoi de donnée sur une interface plutôt que sur une autre En effet, avec la démocratisation des interfaces sans fil, les ordinateurs portables disposeront de plus en plus fréquemment de plusieurs interfaces réseau, voire même de plusieurs interfaces sans fil. L'utilisateur a donc besoin de mécanismes qui sélectionnent de façon transparente et automatiquement la meilleure interface suivant les réseaux d'accès, auxquels l'utilisateur peut être raccordé, les besoins des applications qu'il exécute et le coût qu'il est prêt à assumer. Ce travail de thèse consiste à étudier un mécanisme de profils de QoS contenant : - les informations nécessaires à l'activation d'une interface et l'association à un réseau de données, - les informations permettant de renseigner les applications quant-aux ressources disponibles ce qui leur permettra une adaptation plus performante. Ces différents profils renseigneront un processus de sélection automatique de la meilleure interface pour un flux donné à un instant donné. Plusieurs algorithmes de sélection seront comparés.

6.3.3. Techniques de conception et de construction de logiciels adaptables. Application aux environnements mobiles

Participants : Françoise André, Bruno Deniaud, Djalel Chefrou.

La nécessité de concevoir et de construire des logiciels adaptables, c'est à dire aisément configurables, spécialisables et modifiables à la fois statiquement et dynamiquement, est maintenant fortement ressentie pour prendre en compte

- les rapides évolutions techniques, matérielles ou logicielles,
- l'hétérogénéité des environnements de travail,
- les variations des conditions opératoires.

Ceci est particulièrement vrai quand on considère les environnements mobiles qui offrent une grande diversité de réseaux sans fil et d'ordinateurs portables, qui sont soumis à de fortes variations de bande passante, de disponibilité de ressources et qui sont en constante évolution.

Si le besoin d'adaptation est bien perçu, sa mise en oeuvre dans les logiciels est vécue comme une contrainte et une grosse source de difficultés car elle ne fait pas partie des fonctionnalités de base de l'application.

Notre objectif est de fournir aux concepteur de logiciels (notamment à ceux destinés à s'exécuter en environnement mobile) des méthodes et des outils pour faciliter la prise en compte de l'adaptation. Nous proposons pour cela d'utiliser les concepts suivants :

- cadre de conception (framework) permettant de construire des logiciels modulaires et spécialisables,
- méta-modèle permettant de séparer les aspects applicatifs des aspects d'adaptation.

Actuellement nous ciblons particulièrement un domaine d'application : celui des applications multimédia en environnements mobiles. Dans ce cadre il s'agit d'adapter des applications gourmandes en ressources et devant s'exécuter sur des ordinateurs portables reliés par des réseaux sans fils. Nous devons prendre en compte la diversité

- des portables (par exemple : PDA, station de travail portative,...)
- des réseaux (par exemple : GSM, UMTS, 802.11a, Bluetooth,...)

avec comme objectif de satisfaire au mieux la qualité de service requise par l'utilisateur via une bonne utilisation des ressources de l'environnement.

Les points qui font l'objet de la recherche sont essentiellement les suivants :

- définition des besoins des applications en terme de qualité de service (propriétés non fonctionnelles)
- définition des propriétés de l'environnement (qualité des ressources offertes)
- définitions des variations à prendre en compte (au niveau applicatif et au niveau environnement)
- définition de stratégies d'adaptations
- gestion des ressources de l'environnement
- coordination des adaptations de plusieurs composants coopérants
- coordination des adaptations dans un cadre multi-applications.

Les compétences des autres membres du projet Armor dans le domaine des réseaux mobiles (aspects techniques et aspects protocoles), ainsi que sur la nature des flux transportés sont un élément essentiel pour la maîtrise des paramètres de l'adaptation.

6.4. Ingénierie de trafic

6.4.1. MPLS et multicast

Participants : Bernard Cousin, Jean-Marie Bonnin, Ali Boudani, Miled Tezeghdanti, Alexandre Guitton.

Actuellement, avec les protocoles de routage interne (intra domaine), la détermination des routes à l'intérieur d'un domaine est automatisée et un seul chemin est utilisé à la fois. Ceci conduit à la sous-utilisation de certains liens et à la saturation de certains autres. Une gestion plus fine des flux à l'intérieur d'un domaine permettrait une meilleure utilisation des ressources et par conséquent une meilleure qualité de service. Pour répondre à ces besoins, la technique MPLS (MultiProtocol Label Switching) a été développée. Ce protocole intègre le matériel de commutation de niveau 2 déjà existant (comme les commutateurs ATM) et le protocole IP, tout en conservant le plan de signalisation IP (c'est-à-dire le routage). MPLS apporte de nouvelles fonctionnalités au routage IP classique. Il rend disponible les fonctions de gestion de la qualité de service d'ATM. Il autorise aussi la conception d'un routage contraint par la qualité de service ou routé par la source.

Si certains mécanismes liés à MPLS sont déjà standardisés au sein de l'IETF ou en passe de l'être, d'autres parmi les plus prometteurs restent encore à explorer. Nous nous proposons d'étudier la gestion de l'agrégation et l'intégration du multicast dans un réseau à commutation de labels. D'une part, cela suppose l'étude de l'interaction des algorithmes de routage multicast (PIM, CBT, MOSP, DVMRP,...) et de la commutation de labels. Nous étudions plus particulièrement la cohérence des politiques et des mécanismes de gestion de la qualité de service avec le trafic multicast. D'autre part, MPLS autorise l'agrégation des multitudes de flux qui

circuleront dans le réseau. Cette agrégation permettant d'économiser les ressources du réseau et d'améliorer les performances, il nous paraît intéressant d'étudier les implications d'une telle agrégation sur les politiques de gestion de la qualité de service.

Dans ce cadre, nous avons proposé un nouveau protocole permettant l'acheminement de paquets multicasts, appelé SEM ("Simple Explicit Multicast") [20]. Ce protocole s'adresse principalement aux groupes ayant peu de membres. Nous considérons indépendamment chaque couple formé d'un émetteur et d'un groupe multicast. L'immense avantage de notre protocole est de ne pas nécessiter la création ni la gestion d'information de routage spécifique au multicast puisqu'il utilise celles présentes dans la table de routage unicast. De plus nous utilisons judicieusement les noeuds de branchement présent dans l'arbre de distribution multicast du le groupe considéré pour minimiser le traitement. Enfin notre protocole permet d'utiliser au mieux les mécanismes d'accélération proposés par MPLS.

6.4.2. *Communication multicast avec QoS*

Participants : Raymond Marie, Miklós Molnár.

Les communications multipoint peuvent demander différentes qualités de service (une bande passante minimale sur l'arbre, un délai limité entre deux points arbitraires du groupe, une gigue maximale, une probabilité de perte bornée, ...). Le premier pas vers la satisfaction des critères de qualité est la construction (et la maintenance) d'un support d'arbre couvrant qui corresponde le mieux aux critères demandés. Dans les différents cas, les supports optimaux sont différents les uns des autres. Après avoir étudié le problème de l'arbre couvrant de bande passante maximale, nous avons analysé le problème de l'arbre assurant un délai de bout en bout minimal et nous avons proposé un algorithme rapide pour trouver une solution quasi-optimale [34].

Dans la réalité, les valeurs mesurées (délai, capacité disponible des liens, etc.) dans les réseaux changent souvent. Pour cette raison, les métriques permettant l'optimisation peuvent être modélisées par des variables aléatoires. Souvent, la connaissance des valeurs est incomplète. Nous avons étudié le problème du routage multicast lorsque l'information sur les mesures est incomplète pour les applications dans les cas des métriques additives et dans celles qui sont dites "*bottleneck*".

6.4.3. *Communication multicast dans les réseaux optiques WDM*

Dans les réseaux optiques WDM, la gestion des communications multicast possède des particularités intéressantes. Le but d'une technologie toute optique est l'accélération de la transmission des messages (si les routeurs traitent directement les ondes lumineuses de l'entrée à la sortie sans conversion opto-électronique, il n'y a pas de délai ajouté par les couches numériques). Dans des réseaux WDM, le nombre des longueurs d'onde par lien est limité ; le problème de coloriage optimal du réseau et celui de la conversion de longueur d'onde sont bien connus. Pour les communications multipoints, d'autres phénomènes limitent le choix du support de la diffusion : certains routeurs ne peuvent pas dupliquer les messages. La construction des arbres couvrants partiels doit tenir compte de l'éventuelle impossibilité de duplication des flux optiques. En général, il n'y a pas de garantie pour trouver un seul arbre couvrant qui corresponde aux contraintes des noeuds. Les heuristiques utilisées pour ce problème particulier d'optimisation de la structure couvrante partielle proposent une forêt assurant la connectivité des membres du groupe à partir d'une source donnée. Les arbres appartenant aux forêts construites sont souvent trop longs et/ou le nombre des couleurs utilisées pour la transmission est trop élevé. Pour des solutions connues, nous avons proposé un post-traitement algorithmique afin de diminuer la longueur de la forêt et les ressources utilisées par la communication multipoint [42].

6.4.4. *Reroutage rapide et ingénierie de trafic sur réseau optique*

Participants : Miled Tezghdanti, Miklós Molnár, Laurent Toutain, Jean-Marie Bonnin.

Le contrôle d'admission (dans le cas où le réseau ne peut pas satisfaire toutes les demandes), le routage (trouver un itinéraire qui satisfait les critères de QoS spécifiés par l'application) et la réservation de ressources (allouer les ressources du réseau nécessaires pour ce flux et en tenir compte lors des prochaines demandes) constituent les trois piliers de l'architecture de QoS pour les réseaux IP. La tolérance aux fautes des réseaux

est un aspect important au niveau du routage. Le recouvrement suite à une défaillance dans un lien ou dans un routeur (aussi connu sous le nom de convergence de protocole de routage) est toujours de l'ordre de quelques dizaines de secondes, ce qui constitue un facteur pénalisant pour les applications temps réels. En fait, une application temps réel ne peut pas tolérer une telle période de non disponibilité du chemin utilisé entre la source et la destination. Pour remédier au problème de convergence des protocoles de routage, on propose un algorithme simple et efficace pour le calcul d'une route de secours optimale et disjointe de la route initiale (cf [52] et [54]). Cet algorithme est une extension de l'algorithme bien connu de Dijkstra. Il suppose un réseau 2-connexe et un protocole de routage à état de liens comme OSPF et ISIS. La complexité de l'algorithme est $O(n^2)$ où n représente le nombre des routeurs, elle correspond à la complexité habituelle du calcul des tables de routage et n'augmente pas notablement la charge des routeurs. En contrepartie, l'application de notre méthode nécessite la modification de la structure de la table de routage pour maintenir les routes de secours. En cas de défaillance, la méthode permet un recouvrement rapide par rapport aux mécanismes prévus à cet effet dans les protocoles précédemment cités.

D'un autre côté, pour des raisons historiques, les opérateurs ont déployé des architectures de réseaux comportant une importante superposition de couches technologiques. Une telle architecture implique des coûts de gestion importants et n'est pas nécessairement adaptée à l'évolution récente du trafic. De plus avec l'évolution des technologies, certaines des fonctions indispensables sont dupliquées dans plusieurs couches (protection dans WDM et dans SDH).

L'architecture GMPLS apporte une solution mais en laissant différents problèmes ouverts. La généralisation de MPLS aux réseaux de transport nécessite de nombreuses adaptations. En particulier, l'architecture GMPLS utilise des extensions aux protocoles de routage et de signalisation largement déployés dans les réseaux IP (OSPF, ISIS) et dont les propriétés de convergence et de stabilité demandent à être vérifiées. Les extensions proposées modifient la nature des informations de routage échangées en ajoutant un nombre importants de paramètres spécifiques aux technologies de transport. GMPLS étend de plus le plan de contrôle de MPLS pour prendre en compte le multiplexage à répartition dans le temps (ex. SONET ADMs), le routage par longueur d'onde ou spatial (ex. par port d'entrée ou une fibre vers un port de sortie ou une fibre). La prise en compte de ces technologies utilisant par nature des bandes passantes discrètes (par rapport à MPLS qui manipule des bandes passantes continues) pose de nombreux problèmes, sur le routage, la signalisation, de contrôle d'admission. Plus généralement, les techniques d'optimisation et d'ingénierie de trafic utilisées dans MPLS doivent être considérablement adaptées pour ces technologies discrètes.

Dans le cadre du projet incitatif GET AGAVE (Architecture GMPLS : Analyse, Validation, Expérimentation), nous étudions l'intérêt de l'architecture GMPLS. Ce projet permet d'offrir une mise en œuvre anticipée des standards liés à GMPLS sur plate-forme expérimentale VTHD. En particulier, nous nous intéressons aux points suivants, comme l'étude du re-routage rapide et l'impact de GMPLS sur les propriétés de stabilité et de convergence de OSPF et IS-IS.

6.5. QoS et réseaux IP

6.5.1. Qualité pseudo-subjective des flux multimédias.

Participants : Samir Mohamed, Gerardo Rubino, Martin Varela.

Nous étudions le problème de l'évaluation en temps réel de la qualité d'un flux multimédia transmis au-dessus sur un réseau à commutation de paquets tel que l'Internet, pour ensuite contrôler ces flux à l'aide de cette quantification.

Il est admis par la communauté scientifique que seuls les tests dits subjectifs sont à l'heure actuelle opérationnels pour évaluer la qualité d'un flux audio. C'est d'ailleurs la méthode adoptée dans le test MOS (Mean Opinion Score) utilisé par l'ITU-T dans ses mesures. Il s'agit de prendre comme valeur de la qualité la moyenne des évaluations faites par un groupe d'observateurs humains, dans des conditions très précises et après filtrages statistiques pour éliminer les éventuelles incohérences.

Nous avons développé une approche basée sur les réseaux de neurones, que nous appelons ici « analyse pseudo-subjective », dans laquelle nous entraînons ces réseaux pour qu'ils se comportent comme les observateurs humains, permettant de faire cette évaluation de façon précise, efficace et, si besoin, en temps réel. Ensuite, nous explorons l'utilisation de ce type d'outil pour faire du contrôle.

Nous avons proposé une méthode basée sur les réseaux de neurones pour modéliser la façon selon laquelle les auditeurs évaluent le son transmis à travers le réseau et, donc, sujet à des distorsions dues au support de transport. Notre méthode arrive avec succès à capturer la relation non-linéaire entre les évaluations des auditeurs, basées sur une note (sur une échelle prédéfinie), et certaines caractéristiques du signal transmis qui tiennent compte des pertes, de la taille des paquets, etc. L'algorithme de codage est également pris en compte par notre méthode. Le résultat est un réseau neuronal pour lequel nos expérimentations montrent de bonnes performances pour l'évaluation de la qualité du son.

Dans le cadre de un DEA, nous avons approfondi notre étude de l'intégration de la qualité subjective de la parole et des paramètres du réseau et du codage, pour concevoir des algorithmes de contrôle qui conduisent à un bon niveau de QoS. Traditionnellement, la QoS est gérée en utilisant des mesures de réseaux (par exemple, les cadences des pertes et les délais). Notre travail a deux objectifs : d'abord, nous construisons un automate basé sur les réseaux de neurones, pour mesurer en temps réel la qualité subjective de la parole (en utilisant le résultat des évaluations d'un groupe de sujets participant au test de scores moyens d'opinion – MOS : *Mean Opinion Score*). Les facteurs les plus importants que nous prenons en compte dans cette partie de l'étude sont les paramètres de réseau (cadence de perte de paquet, distribution des pertes), et les paramètres de codage (le type de codec utilisé, le type de redondance utilisée et l'intervalle de mise en paquet des données). Nous nous sommes aussi intéressés à l'étude de différents modèles des processus de pertes sur l'Internet, avec le but de raffiner la performance de nos outils.

Nous avons aussi travaillé sur l'évaluation de la qualité subjective du flux vidéo, toujours au-dessus d'un réseau à commutation de paquets tel qu'IP. L'idée est de faire des mesures en temps réel et dans le même modèle que celui utilisé par les sujets humains pour les MOS, et d'intégrer des facteurs tels que la cadence de perte, la largeur de la bande passante, le rapport du nombre de macro-blocs codés en intra et en inter dans la séquence vidéo, le type de codec visuel, etc... Les résultats obtenus [16] sont positifs, et nous nous proposons par la suite d'appliquer nos outils à l'étude des flux mixtes audio/vidéo.

En parallèle avec ce qui précède, nous nous sommes intéressés à l'apport qui peut être obtenu via l'utilisation d'une classe spéciale de réseaux de neurones, les RNN (*Random Neural Networks*), introduits par Gelenbe il y a un peu plus de dix ans[64]. Nos premiers résultats montrent que ces réseaux se comportent mieux que les réseaux de neurones classiques pour notre application.

6.5.2. Architecture à différenciation de services

Participants : David Ros, Julio Orozco, Laurent Toutain.

L'équipe participe depuis décembre 2000 aux expérimentations DiffServ dans le cadre du projet européen TF-NGN ; en particulier, nous avons dirigé les activités de recherche concernant le Comportement Assuré (AF). Des tests ont été réalisés à distance sur des plate-formes (routeurs Cisco 7200 et 7500, liaisons ATM) en Espagne, Allemagne, Italie et à l'IRISA. Notre étude a porté principalement sur la distribution de la bande passante entre flux dans une classe AF [50], notamment sur l'impact que les mécanismes de marquage ont sur le partage de la bande passante entre flux TCP.

Nous nous intéressons également à la qualité de service sur le lien radio dans les réseaux téléphonie de 3eme génération. Dans ce type de réseau, le débit du lien va varier dynamiquement en fonction de la qualité de transmission. Ce débit variable peut induire des goulot d'étranglement. Nous reprenons actuellement les travaux précédemment réalisés dans l'équipe [69] qui portaient sur des congestion dans le cœur de réseau pour les appliquer sur ce lien radio.

6.5.3. Métrologie des réseaux IP

Participants : Laurent Toutain, Joël Corral, Mohamed Ouarraou, Bruno Tuffin.

Comme expliqué précédemment, avec la différenciation de service, l'Internet s'éloigne du modèle Best Effort, où le traitement est à peu près équitable entre les flux, pour s'orienter vers un modèle où la quantité d'information transmise sera fonction d'un contrat liant le site à son fournisseur d'accès. Il est donc important d'offrir des outils de mesure qualifiant la qualité obtenue. La mesure de la qualité de service dans l'Internet trouve son origine dans les travaux du groupe de travail IPPM (IP Performance Metrics) de l'IETF. Ce groupe définit des métriques universelles et des méthodologies permettant de disposer de référentiels fiables lorsque l'on compare le service offert par deux opérateurs. Les métriques déjà définies traitent du délai simple d'un paquet dans le réseau, de la perte simple d'un paquet dans le réseau, du temps d'aller simple des paquets dans le réseau et du temps d'aller retour. D'autres métriques sont en cours de définition, comme la mesure de la gigue ou du *streaming*. L'UITT a défini dans la recommandation I.380, des métriques relativement similaires. Des organismes comme RIPE (Réseaux IP Européens) ou des projets comme Surveyor développent des outils autour de sondes mesurant périodiquement les performances du réseau. Ces métriques ne sont utilisées que pour mesurer les flux Best Effort (connectivité, stabilité des routes, temps d'aller simple,...) mais elles doivent être étendues pour prendre en compte les flux étiquetés par diffServ, comme le montre les mesures effectuées sur le flux EF (Expedited Forwarding) dans le cadre du programme de recherche Européen TF-NGN.

Nous travaillons sur la définition de méthodes de mesures passives, c'est-à-dire basées sur l'écoute de flux existants, ou actives (basées sur l'émission d'un trafic de test), dont toutes les autres pourront être dérivées, est le temps d'aller simple d'un paquet dans le réseau. Cela a conduit dans le cadre d'un projet incitatif du Groupement des Ecoles de Télécommunication à la réalisation de sonde Saturne. Elles utilisent des équipements incluant un système GPS, nécessaire pour disposer d'une horloge commune très précise. Une estampille temporelle est placée dans des paquets de test émis sur le réseau. Le récepteur disposant de la même base de temps, on peut en déduire le délai de traversée du paquet. Après avoir mis en œuvre et calibré l'outil de mesure, nous travaillons sur les méthodes de mesure et d'échantillonnage les plus efficaces pour perturber le trafic au minimum. Nous nous intéressons également aux extensions de ces techniques au protocole IPv6. Ces derniers travaux sont fait dans le cadre du projet européen 6QM. Les sondes Saturnes seront également utilisées dans le projet RNRT Metropolis.

Dans le cadre du projet VTHD, les différentes antennes de l'INRIA sont équipées de sondes Saturne pour permettre un maillage presque complet du réseau. Dans le cadre du projet du laboratoire franco-mexicain, nous effectuons des mesures de trafic entre la France et l'ITAM à Mexico. Ce réseau nous permet d'obtenir des métriques sur des liens internationaux.

Dans ce même domaine de la métrologie, Mohamed Ouarraou réalise une thèse ayant pour but de définir des méthodes de mesure permettant, à l'aide d'outils statistiques, de retrouver le comportement de différents flux. L'étude portera principalement sur la modélisation et les méthodes d'estimation des pertes de paquets et des délais d'aller-retour. L'analyse statistique permettra en particulier de quantifier la dispersion des estimateurs, et donc de dimensionner le nombre de paquets de test et leur taille pour obtenir une mesure de précision donnée et choisir la meilleure politique d'émission des paquets de tests. De plus, un des objectifs est d'obtenir, par exemple sur une topologie comme celle du réseau VTHD, une base de données temps réel des délais de bout en bout, permettant de faire de la prédiction de trafic.

Pour améliorer la QoS, une voie différente de celles discutées ici s'appuie sur l'ingénierie de trafic. Cette approche est décrite dans la section 6.4.

6.5.4. Tarification

Participants : Bruno Tuffin, David Ros, Patrick Maillé, Yézékaël Hayel.

Comme nous l'avons décrit en section 3.5, la tarification est probablement un des moyens les plus efficaces de contrôler le niveau de congestion d'un réseau de communication. De plus, elle est indispensable à la différenciation de service.

Notre travail porte principalement sur les méthodes de tarification sans réservation de ressources. Nous avons réalisé un état de l'art de ces méthodes [51][41], mettant l'accent, par rapport au reste de la littérature, sur la modélisation mathématique des méthodes. Les méthodes dites d'enchères au second prix, du Cumulus et de PMP sont celles parmi lesquelles nous avons obtenu des résultats nouveaux.

Nous avons travaillé sur la méthode d'enchères pour la bande passante où, toutes les T unités de temps, l'utilisateur déclare la capacité qu'il souhaite obtenir ainsi que la valeur qu'il associe à une unité de bande passante. Celle-ci est alors allouée par le réseau de sorte que ceux qui valuaient le plus le service soient considérés d'abord. Le prix facturé à chaque utilisateur est celui qu'auraient payé les utilisateurs exclus par l'enchère proposée. Cette tarification, dite d'enchère au second prix, permet de ne pas payer plus que la valeur estimée du service, et possède des propriétés d'équité. Dans [17], nous avons donné une modification de la règle d'allocation de la bande passante trouvée dans la littérature. Sans cette règle, les propriétés mathématiques de stabilité, d'efficacité et d'équité ne seraient pas correctes.

Dans [48], nous étudions une méthode simple et prometteuse appelée le "Cumulus Pricing Scheme", qui s'attaque à la différenciation de services et au passage à l'échelle entre autres problèmes. Notre but a été de déterminer, d'un point de vue mathématique, les valeurs de paramètres optimisant les revenus du fournisseur d'accès, sous la contrainte que chaque utilisateur est incité à révéler la quantité trafic qu'il pense (préalablement) utiliser. Ceci a conduit à une petite variation du modèle original de la littérature puisque, dans notre modèle, les points du cumulus, ainsi que les mesures effectuées sont traduits en termes financiers.

Le modèle du métro parisien (PMP), où le réseau est séparé en sous-réseaux logiques indépendants, a aussi été analysé. Notre modèle nous a permis d'obtenir les prix optimaux maximisant les revenus d'un opérateur en fonction de la demande.

6.5.5. Algorithmes de gestion active de files d'attente pour DiffServ

Participants : David Ros, Julio Orozco.

Dans l'architecture DiffServ de l'IETF, les algorithmes de gestion active de files d'attente (AQM) occupent une place importante. De nombreuses propositions liées à l'élimination selective des datagrammes IP, dérivées de l'algorithme RED [63], ont été présentées dans la littérature. Un problème bien connu de ces mécanismes (et qui reste encore ouvert) est celui du choix des paramètres des algorithmes. En ce sens, nous étudions d'un côté l'effet des différents paramètres sur la performance de l'algorithme RIO [61] à trois niveaux de priorité, et d'un autre des algorithmes d'AQM adaptatifs appropriés au contexte de la différenciation de services.

6.6. Activités autour du protocole IPv6

6.6.1. Transition et configuration automatique

Participants : Laurent Toutain, Francis Dupont.

Le protocole IPv6 devrait remplacer à terme le protocole actuel de l'Internet, IPv4. Il ne présente pas vraiment de particularités additionnelles majeures, sauf au niveau de l'adressage, où IPv6 apporte une richesse considérable qui peut être exploitée pour changer de nombreux principes dans les réseaux. Néanmoins, IPv6 n'est pas compatible IPv6 (il est donc nécessaire de proposer des mécanismes de transition adaptés. Nous avons développé une technique appelée DSTM (Dual Stack Transition Mechanism) qui devrait être tout prochainement standardisée par l'IETF (voir [30], une description préliminaire se trouve dans [AT99]). L'idée principale est basée sur des encapsulations du protocole IPv4 dans des paquets du protocole IPv6 afin de traverser les sous-réseaux IPv6. Des mécanismes de résolution de noms dans le réseau sont alors nécessaires, afin d'apporter la traduction d'adresses entre les deux mondes. Nous travaillons sur le dimensionnement du pool d'adresses IPv4 nécessaire et sur la durée d'attribution de ces adresses.

DSTM est maintenant présent dans les piles BSD et Linux. 6wind propose également dans ses équipements un TEP DSTM. Une mise en œuvre sur l'architecture Windows NT a été réalisée en Corée par l'ETRI, mais bien que peu documentée, elle permet de démontrer la faisabilité de DSTM sous Windows.

Une modification par rapport à la spécification initiale de DSTM a été la spécification d'autres protocoles que DHCPv6 pour les dialogues entre le serveur DSTM et le client DSTM ou le TEP. Les premières versions ont utilisé les RPC de Sun, mais le manque de souplesse en particulier au niveau du filtrage par les firewalls, nous a conduit à préférer XML. Ceci permet d'unifier les requêtes DSTM et celles faites par les Tunnel Brokers. Un autre avantage lié à la syntaxe XML est de permettre l'utilisation de SSL pour chiffrer le dialogue et authentifier les extrémités. Les extensions AIIH permettant à un site uniquement IPv4 de déclencher une

allocation d'adresse IPv4 temporaire sur un client DSTM ont aussi été mises en œuvre, par contre l'impact sur la sécurité, en particulier les attaques par déni de services, n'ont pas été étudiées. Le chiffrement des paquets IPv4 transportés dans le tunnel IPv6 en utilisant IPsec peut être également envisagé. Dans ce cas, les clés doivent être échangées de manière sûre pendant la phase d'attribution de l'adresse IPv4 temporaire.

Le champ d'utilisation de DSTM a été étendu. Le mécanisme initial permettait à des équipements IPv6 situés dans un Intranet de communiquer avec des équipements extérieurs. Ce scénario a été étendu par le draft `raft-richier-dstm-vpn`. Il permet à des équipements accédant uniquement à un réseau IPv6 d'obtenir d'un serveur DSTM une adresse IPv4 temporaire et l'adresse d'un TEP. Ce TEP peut être situé dans une entreprise dans ce cas les adresses IPv4 allouées peuvent être privées. Le client n'aura accès qu'aux ressources internes de l'entreprise. Cette technologie pourrait jouer un rôle important dans les futurs réseaux UMTS et GPRS.

Dans un environnement domotique, il n'est pas possible de se baser sur la technicité des utilisateurs pour configurer un réseau. L'auto-configuration est souvent soulignée comme un des atouts du protocole IPv6. Elle permet à un équipement de s'insérer dans un réseau existant en construisant automatiquement son adresse de niveau 3 et en découvrant les routeurs environnants. Mais les mécanismes actuels ne sont pas suffisants si l'on veut s'affranchir de toute connaissance protocolaire. En effet, même si un réseau domotique à une étendue réduite, il peut être topologiquement complexe. Différents supports pourront être mis en œuvre. On peut facilement imaginer un réseau de type IEEE 802.11 ou Ethernet connecte les équipements informatiques, mais des réseaux d'autre nature peuvent tout à fait co-exister. Par exemple, certains équipements électriques pourront être pilotés par des ordres émis sur le câblage électrique, les réseaux IEEE 1394 pourront connecter les équipements audio-visuels et plusieurs réseaux personnels sans-fil pourront être présents dans le domicile. De plus l'accès au réseau Internet pourra être fourni par plusieurs opérateurs (ADSL, UMTS,...). Devant la complexité d'un tel réseau, il est difficile de déléguer sa gestion au seul opérateur.

Notre proposition, conjointe avec le projet Ares de l'INRIA Lyon, est un des documents de base pour la création d'un nouveau groupe de travail à l'IETF appelé zerouter. Un BOF aura lieu lors de la réunion d'Atlanta dans lequel ces sujets seront abordés. Cette solution propose d'étendre les fonctionnalités d'OSPFv3 pour lui permettre d'auto-configurer la partie de l'adresse IPv6 décrivant la topologie interne du réseau. Les mécanismes de diffusion fiable de l'information intrinsèque à OSPF, nous permettent d'effectuer un consensus sur le lien local et de diffuser cette information pour éviter les collisions de valeur dans les autres liens.

On peut remarquer que dans cette optique d'auto-configuration, les mécanismes de DSTM peuvent être également vus comme des mécanismes d'auto-configuration pour IPv4.

6.6.2. Travaux sur le protocole ROHC

Participants : Laurent Toutain, Ana Minaburo, Louis-Marie Le Ny.

Dans les réseaux téléphoniques de troisième génération, l'utilisation d'un mécanisme de compression robuste peut réduire le temps de transmission et augmenter l'utilisation d'une ressource très convoitée tel que le support de transmission Hertzien. Pour les services interactifs de voix sur IP et les liaisons cellulaires, le protocole utilisé pour transporter les données multimédia est le protocole RTP [73]. La taille de l'en-tête d'un paquet IPv6/UDP/RTP varie de 60 octets à 120 octets, et de 40 octets à 100 octets pour un paquet IPv4/UDP/RTP. La charge utile, compte-tenu de l'algorithme de compression de la voix et des contraintes temps réel, varie entre 15 et 20 octets.

La compression d'en-têtes est possible sur différentes couches de référence mais c'est au niveau de la couche réseau IP qu'elle est la plus efficace, puisque le compresseur a connaissance du format des paquets (et de celui des couches supérieures). Mais la compression signifie également réduction de la redondance dans l'information transmise, ce qui est antagoniste avec des transmissions bruitées. Les travaux présentés dans ce document sont basés sur les résultats de standardisation de l'IETF du groupe ROHC (Robust Header Compression) et en particulier sur le RFC 3095. Ce document présente la méthode de compression d'en-têtes, tel que l'a définie l'IETF, mais discute également des problèmes liés au portage de ces algorithmes dans les réseaux de troisième génération où le modèle architectural est différent. Nous présentons aussi une mise en œuvre sur BSD pour IPv6 utilisée pour effectuer des mesures du temps de réponse, du taux de transfert et de la robustesse de l'algorithme.

Les deux entités de ROHC dans des réseaux sont le compresseur et le décompresseur. Une interface IP entre deux nœuds dans le réseau peut avoir N compresseurs et N décompresseurs. Dans les architectures 3GPP et PPP une interface IP peut en effet utiliser plusieurs canaux de la couche inférieure pour transporter les paquets.

Le compresseur supporte un ou plusieurs profils de ROHC (un profil définit la nature des en-têtes qui doivent être compressés). Pendant la négociation, le compresseur peut indiquer au décompresseur les profils supportés, et le décompresseur peut accepter ou non de travailler avec ces profils. Aussi dans la négociation les caractéristiques de la liaison doivent faire l'objet d'un consensus de la part de deux extrémités. Le compresseur reçoit les paquets non compressés de la couche IP, il les traite et envoie les données de l'en-tête dans les différents formats définis pour ROHC pour former le contexte. Ces paquets avec l'en-tête réduits sont ensuite envoyés à la couche 2 qui transmet les données à l'autre extrémité de la liaison. Si la liaison est bidirectionnelle, le compresseur peut recevoir information du décompresseur, si non le compresseur travaille en mode unidirectionnel.

Le décompresseur reçoit les données provenant du compresseur distant. Il construit un contexte à partir de cette information. Un checksum, envoyé dans les données, permet au décompresseur de s'assurer que le contexte évolue comme celui du compresseur. En cas de dérive, le décompresseur essaiera plusieurs algorithmes pour compenser les erreurs de transmission. Si ceux-ci échouent, le décompresseur enverra un acquittement négatif au compresseur pour que celui-ci réemetre un contexte complet. Si la liaison est en mode unidirectionnelle, le décompresseur devra attendre la retransmission périodique du contexte.

Nous avons réalisé la première mise en œuvre des mécanismes de ROHC pour le protocole IPv6. Cela a permis de mettre en valeur un certain nombre d'incohérences dans la description des standards, fortement orienté pour la version 4 du protocole IP. Nous avons pu mesurer l'efficacité de la compression en présence d'erreur de transmission. Nous proposons actuellement, au sein de l'IETF, des améliorations aux standards ROHC pour augmenter l'efficacité de la compression. En effet, les réseaux cellulaires de troisième génération fournissent périodiquement le BER (Bit Error Rate) et le RTT (Round Trip Time). Le compresseur peut les utiliser pour obtenir une meilleure estimation de la qualité du lien radio. Nous proposons donc d'utiliser ces valeurs pour déterminer plus précisément le coefficient de confiance défini dans le RFC 3095.

Dans le cadre de la diffusion de données multimédia, nous étudions les interactions entre le mode unidirectionnel de ROHC, de la différenciation de service et du multicast.

6.7. Sécurité

Participant : Sylvain Gombault.

6.7.1. Contrôle d'accès des réseaux à haut débit

Dans un contexte de réseau haut débit où la qualité de service a une grande importance dans les services que proposent les opérateurs, il est nécessaire de disposer de mécanismes de sécurité qui n'empêchent pas un réseau de remplir ses engagements en terme de QoS. Nous avons proposé une architecture de contrôle d'accès autorisant le filtrage de flux IPv6/Gigabit Ethernet tout en limitant les perturbations à la qualité de service pouvant être négociée. Les éléments principaux pour assurer cette propriété sont une carte d'analyse rapide de trafic étudiée par France Telecom-RD et un algorithme de classification rapide de paquet à temps d'analyse faible et borné que nous avons développé. Une maquette expérimentale est en cours de développement.

6.7.2. Télé médecine

Les études que nous menons s'articulent autour de la définition des services qui vont permettre de proposer des applications médicales qui prennent en compte les besoins de QoS et de sécurité. Nous avons choisi d'expérimenter ces travaux dans le cadre d'une application de Téléstaff qui se définit comme une réunion à distance entre professionnels de santé et qui s'appuie sur des moyens informatiques et réseaux. Nous avons défini la notion de portail Web Téléstaff [72] et imaginé comment automatiser un grand nombre de tâches d'administration du système pour faciliter au maximum l'accès de l'outil aux médecins qui ne sont pas toujours à l'aise face à l'outil informatique [70]. Une expérimentation a été menée avec des médecins. L'ensemble de ces travaux a fait l'objet d'une thèse [71].

7. Contrats industriels

7.1. Cyberté : Support optimisé des interfaces sans fil multiples sur un terminal mobile IPv6 (contrat géré à l'ENST Bretagne (RSM) et à l'IRISA)

Participants : Jean-Marie Bonnin, Françoise André, Francis Dupont, Bruno Deniaud, Djalel Chefrou, Lucian Suci.

Il s'agit d'un projet RNRT précompétitif, d'une durée de 27 mois commencé au 1er janvier 2002 dont France Télécom R&D est le leader.

Les réseaux sans fil sont amenés à se démocratiser rapidement ; ils seront présents aussi bien dans les bâtiments résidentiels (Bluetooth, HomeRF), dans les entreprises (HiperLAN, IEEE 802.11) que dans notre environnement extérieur (GSM, GPRS, UMTS). Les terminaux mobiles supportant plusieurs technologies d'accès les utiliseront en fonction de leur déplacement, leur besoin et la continuité de couverture offerte entre l'extérieur et l'intérieur des bâtiments. Aujourd'hui, au sein d'un terminal, le changement d'interface radio induit par le changement de technologie d'accès ne se fait pas de façon optimum : d'une part parce que les pilotes de périphérie sans fil masquent les spécificités des liaisons radio en émulant les couches 2 des réseaux filaires (par exemple Ethernet et PPP) et d'autre part parce que le changement des caractéristiques de qualité de service n'est pas pris en compte. L'objectif de notre projet est d'offrir la possibilité à l'utilisateur de tirer au mieux parti de ces différentes technologies. Il permettra de passer d'une technologie sans fil à une autre de manière transparente pour les applications, du moins tant que les caractéristiques de qualité de service rendent cette transparence possible. Il permettra aussi l'utilisation simultanée de plusieurs interfaces radio de façon à profiter au mieux de leur différentes caractéristiques. Pour cela le projet définira une architecture permettant à un équipement IPv6 de gérer plusieurs interfaces radio tout en profitant de leurs caractéristiques spécifiques. Une interface générique entre les couches 2 et 3 du terminal prenant en compte les problèmes de handover, les paramètres de qualité de service et la sécurité sera développée pour permettre l'accès simultané ou successif aux différentes technologies d'accès sans fil disponibles.

7.2. Ubique : L'étude de la gestion des profils de qualité de service pour le support d'interfaces multiples

Participants : Jean-Marie Bonnin, Lucian Suci.

Il s'agit d'un CRE France Télécom R&D, d'une durée de deux ans débuté en avril 2002.

Avec la démocratisation des interfaces sans fil, les ordinateurs portables disposeront de plus en plus fréquemment de plusieurs interfaces réseau, voire même de plusieurs interfaces sans fil. Or, pour un utilisateur nomade, il peut être imposé au terminal de changer d'interface, ce qui, aujourd'hui, conduit l'utilisateur généralement à clore et à relancer toutes ses applications en cours, voire de redémarrer le terminal. L'utilisateur a donc besoin de mécanismes qui sélectionnent de façon transparente et automatiquement la meilleure interface suivant les réseaux d'accès, auxquels l'utilisateur peut être raccordé, les besoins des applications qu'il exécute et le coût qu'il est prêt à assumer.

Dans un premier temps, un profil de qualité de service générique dont les instances être pouvant être renseignées par les applications et par l'utilisateur en fonction des besoins sera défini au niveau du terminal utilisateur. D'autre part, un profil décrivant les caractéristiques des interfaces doit être défini pour chaque type d'interface supportée par le mobile. Lorsque l'interface est active, le profil doit être renseigné avec les valeurs correspondant à la communication établie. Il s'agit donc de définir les paramètres à prendre en compte dans les différents profils de qualité de services en fonction des interfaces connues et des besoins applicatifs recensés. Ces derniers incluent, par exemple, des informations relatives au coût de communication acceptable pour une application donnée. Puis, il faut concevoir les mécanismes de surveillance des profils de qualité de service et de notification des changements à la pile IP et éventuellement aux applications capables d'en

tenir compte. Les mécanismes de sélection d'interface doivent prendre en compte les mécanismes de sécurité et d'optimisation de la communication (compression d'en-tête), afin d'éviter des perturbations intolérables pour les communications en cours. Plusieurs algorithmes de sélection d'interfaces doivent être proposés et évalués dans le cadre d'une étude comparative. Enfin, il est nécessaire de prévoir les mécanismes permettant de négocier les paramètres de qualité de service avec le réseau d'accès lorsque celui-ci change et éventuellement de les renégocier si les besoins évoluent ou dans le but de réduire le coût de la communication. L'ensemble du travail s'inscrit dans le contexte IP, et plus particulièrement IPv6. Il est donc nécessaire que l'ENST Bretagne s'implique fortement dans les groupes de travail de l'IETF SeaMoby1 et IPv6 et de suivre les travaux du groupe MobileIP et des groupes de spécification du 3GPP ("Terminals").

7.3. VTHD : Vraiment Très Haut Débit (contrat géré à l'ENST Bretagne)

Participants : Sylvain Gombault, Laurent Toutain.

Projet RNRT consistant à mettre en œuvre et à expérimenter un réseau IP à très haut débit.

VTHD est un réseau IP sur WDM mis en place pour étudier les impacts du très haut débit dans les réseaux. Ce réseau relie, entre autre, les centres de recherche de FT R&D, de l'INRIA et du GET. Nous étudions dans ce réseau l'impact de la différenciation de service à très haut débit. En effet vu les débits offerts, complexifier le traitement des paquets dans les routeurs peut avoir ces conséquences sur les performances du réseau. Nous avons participé à la définition des classes de service et défini des outils de mesure des temps d'aller simple dans le réseau. Nous avons également participé à l'introduction d'IPv6 dans VTHD, le nœud rennais servant, pour l'instant, à l'interconnexion de VTHD au pilote IPv6 de RENATER.

Nous nous intéressons également à la diffusion de vidéo haute qualité sur ce réseau. En outre, nous avons la responsabilité du sous-projet concernant les aspects sécurité. En collaboration avec France Télécom, nous devons proposer un contrôleur d'accès IPv6/Gigabit Ethernet qui ne nuise pas à la qualité de service.

7.4. CaraHD : Contrôle d'accès dans les réseaux à haut débit

Participant : Sylvain Gombault.

Il s'agit d'un CRE France Télécom. Nous enrichissons le contrôleur d'accès en offrant des possibilités de comptage de trafic et de filtrage sur les champs de données des datagrammes. Ce contrat inclut une étude qui devra indiquer les paramètres à considérer dans le cadre d'un contrôle d'accès IPv6. Les résultats de ce projet intéressent directement le sous-projet 2 de VTHD++.

7.5. VTHD++ sous-projet 2 : Sécurité

Participant : Sylvain Gombault.

Il s'agit d'un projet RNRT. Nous avons la responsabilité du sous-projet concernant les aspects sécurité. En collaboration avec France Télécom, nous devons proposer un contrôleur d'accès IPv6/gigabit Ethernet dont on puisse quantifier l'impact sur la qualité de service.

7.6. MIRADOR : Mécanismes de détection d'Intrusion et de Réaction aux Attaques en DOMAINE militaiRe (contrat géré à l'ENST Bretagne)

Participant : Sylvain Gombault.

MIRADOR est un Programme d'Etude Amont (PEA) lancé par la DGA/CELAR/CASSI, visant à réaliser une plate-forme coopérative et évolutive d'outils de détection d'intrusion, dotée de facultés de réaction. Alcatel en assure la maîtrise d'œuvre, les autres partenaires de ce projet sont le CERT ONERA et Supélec. Dans [24], nous décrivons la fonction de réaction que nous avons étudiée et réalisée dans le cadre du PEA MIRADOR. Nous proposons une taxonomie des actions composant la réaction et montrons comment les différents paramètres de cette taxonomie sont utilisés pour fournir une fonction de réaction fiable, flexible et intégrée à l'architecture de Mirador. Par exemple, nous définissons pour chaque action un rôle pris parmi 4 :

Information, Dissuasion, Correction ou Compensation. Ce rôle nous permet de gérer l'état de vulnérabilité d'un système qui a fait l'objet d'une intrusion. Nous présentons ensuite les éléments de configuration de cette fonction de réaction et décrivons l'algorithme de lancement des différentes actions en tenant compte de leur rôle et de leur mode de déclenchement (automatisé ou manuel). Nous terminons en présentant l'ergonomie de l'interface graphique offerte à l'administrateur de sécurité.

7.7. Qualité de service pour diffusion de comptes-rendus médicaux et Téléstaff

Participant : Sylvain Gombault.

Ces travaux sont menés par Theleme, groupe de recherche qui associe des équipes à compétences technologiques (IRISA, École Polytechnique de l'université de Nantes, ENST Bretagne), des équipes médicales (CHU de Brest, CHU de Rennes) et la société ETIAM. Le groupe Theleme pilote au travers de l'IRISA, cette ACI de Télé médecine du MENRT dont le but est d'évaluer les besoins des applications de télé médecine en terme de QoS et de sécurité.

Nous avons choisi comme support à cette étude, le Téléstaff qui se définit comme une réunion à distance entre professionnels de santé. Cette étude nous a conduits à définir les besoins en terme de sécurité et à proposer un format de document Téléstaff qui garantit la confidentialité des informations médicales tout en respectant les normes européennes CEN-TC251 qui définissent un format commun d'échange de données médicales. L'étude du Téléstaff menée conjointement avec les professionnels de santé nous a permis de réaliser une maquette permettant d'en valider les concepts.

7.8. Réalisation d'un logiciel de génération de test suivant un graphe stochastique (Contrat 991310KTQ8)

Participants : Hélène Le Guen, Raymond Marie.

Il s'agit d'une convention Cifre pour une thèse de trois ans. Le partenaire est la société Alitec.

La société Alitec développe des logiciels de test pour les nouveaux protocoles de télécommunication. Le sujet de thèse proposé dans le cadre de cette convention concerne l'utilisation des modèles markoviens pour attacher une mesure de couverture sur les tests effectués lors d'une campagne et de trouver des techniques d'amélioration de leur efficacité.

7.9. ASSET : Architectural Solutions for Services Enhancing digital television, 1 02 C0349

Participants : Bernard Cousin, Miled Tezeghdanti, Mathurin Body.

Ce projet veut définir et développer l'architecture logicielle nécessaire à la constitution de studios de télévision numérique répartis et performants. Cela passe par une double unification : une unification des techniques des traitements des contenus numériques intervenant dans la production des émissions de TV, et une unification des procédés d'interconnexions des différents équipements de production, de traitement, de stockage de visualisation. Cette unification devant se faire alors que l'hétérogénéité des contenus et des équipements est incontournable. Notre équipe propose son expertise dans le domaine des protocoles à haut débit. Nous développons une architecture d'interconnexion utilisant la différenciation de services et offrant un service de transmission multicast.

Le projet ASSET a pour but de réaliser une maquette d'un studio d'enregistrement de type "news rooms", et ainsi de favoriser le développement de nouvelles technologies en Europe.

Projet européen IST. Nos partenaires sont : Thomson broadcast systems, Dalet a.n.n, Compaq-HP Group, INESC Porto, Managed Storage, SHS Multimedia, IRT.

7.10. IDSA : Infrastructure DNS sec et Applications

Participants : Bernard Cousin, Gilles Guette, Olivier Courtay, Olivier Peningault, Francis Dupont.

Aujourd'hui, l'accès à des services sur l'Internet repose sur l'utilisation massive de l'infrastructure DNS ("Domain Name System"). Ce système mondial permet de résoudre l'association entre adresse IP et nom : sa sécurité est donc essentielle. Dans le projet IDSA, nous proposons de travailler sur :

- la sécurisation des transactions DNS, rendant ainsi les mises à jour des informations sûres.
- la sécurisation des données, c'est-à-dire des informations contenues dans les messages DNS. Cette partie comprend l'authentification de l'origine des données et l'intégrité de celles-ci .

Disposant d'une telle infrastructure, qui couvre une grande partie de la planète, il est possible d'envisager de l'utiliser pour d'autres applications que la résolution de noms : pour soit sécuriser leur emploi, soit pour permettre à ces applications de fournir un service de sécurisation. En effet, un DNS peut permettre la distribution de clés publiques et/ou de certificats attachées à un nom ou une adresse IP.

De plus, les services rendus par cette architecture DNSsec devrait permettre de rendre sûr et facile l'accès pour l'utilisateur nomade mais aussi l'utilisateur mobile. En effet, cette architecture fournira les données nécessaire à la sécurisation de la mobilité de l'utilisateur (signalisation de mobilité IPv6) mais aussi permettra d'accéder à des services de manière sécurisée par la mise en place de VPN par exemple.

Projet NRRT. Nos partenaires sont : France telcom R&D, AFNIC, et ENST-Bretagne.

7.11. HADES : Haut débit et sécurité, 1 02 C0561

Participants : Bruno Sericola, Bruno Tuffin.

HADES (HAut DEbit et Sécurité) est un PEA (Plan d'Etude Amont) sur la sécurisation des réseaux haut débit qui a été accepté par le CELAR. Ce PEA prévoit la définition des équipements de sécurité répondant aux besoins de sécurisation des réseaux Gigabit/s et une étude permettant d'identifier les orientations pour les réseaux Térabit/s. Il s'agit pour nous de modéliser et d'évaluer les performances de diverses architectures et protocoles permettant de rejeter les paquets considérés à risque. Les partenaires de ce projet sont : AQL, ENSTB, INT Evry, INRIA, Sagem, Sorep.

7.12. Support for IPv6 Interoperability. Events organized by the ETSI Interoperability Service, 1 01 C0689

Participants : César Viho, Frédéric Roudaut, Sébastien Barbin, Francis Dupont, Ana Minaburo, Laurent Toutain.

Il s'agit d'un contrat avec l'ETSI, d'une durée de 14 mois (octobre 2001 à novembre 2002).

Dans ce contrat, les travaux réalisés par ARMOR consistent à apporter notre expertise pour aider l'ETSI (European Telecommunication Standardization Institute) de Sophia-Antipolis à organiser l'événement d'interopérabilité IPv6 de septembre 2002. Ils comportent trois phases qui sont synthétisées ci après.

Avant l'événement d'interopérabilité, l'INRIA fournit à l'ETSI son aide en apportant des conseils et informations techniques afin de définir le programme technique de l'événement. l'INRIA doit préparer des tests de conformité et des scénarios d'interopérabilité pour l'événement.

Au cours de l'événement, nous fournissons notre aide à l'ETSI pour l'organisation et la programmation des campagnes de tests. Nous exécutons les tests et scénarios que nous avons générés au préalable, et nous fournissons notre assistance aux participants dans la compréhension des erreurs qui sont détectées.

Après l'événement, l'INRIA fait un rapport, à l'intention de l'ETSI mais également de l'IETF (Internet Engineering Task Force), concernant d'une part les progrès des constructeurs dans le développement de leurs piles, et d'autre part, la détection des bogues, ambiguïtés et incohérences mis en évidence dans les spécifications.

7.13. NGNI : IPv6 Interoperability and QoS testing, 1 02 C0245

Participants : César Viho, David Ros, Frédéric Roudaut, Sébastien Barbin, Francis Dupont, Ana Minaburo, Laurent Toutain.

Dans ce projet NGNI (Next Generation Network Initiative) financé par la commission européenne, d'une durée de 6 mois (décembre 2001 à mai 2002), il s'agissait de sensibiliser les membre participants à la nécessité d'avoir des test benchmarks en Europe, d'analyser les besoins des acteurs principaux du développement des NGN (Next Generation Network) en Europe et de faciliter le test des piles IPv6 développés par les partenaires européens.

Quatre approches principales ont été utilisées pour mener à bien ces travaux.

- Un état de l'art complet sur le test de conformité et d'interopérabilité des protocoles IPv6.
- La mise en œuvre de plates-formes pour les tests d'interopérabilité entre les partenaires.
- La participation et l'organisation d'événements d'interopérabilité (le « TAHI IPv6 interop event » de Janvier 2002 et le « ETSI IPv6 Plugtests event » de septembre 2002).
- Participations et présentations de papiers dans les principales conférences concernant IPv6 pour informer les principaux acteurs des évolutions dans le déploiement d'IPv6.

8. Actions régionales, nationales et internationales

8.1. Actions nationales

8.1.1. ARC INRIA « *Models and Algorithms for TCP/IP Networks* »

Participants : Sophie Fortin, Bruno Sericola.

Cette ARC (Action de Recherche Coopérative) regroupe les projets INRIA MISTRAL (coordinateur), ARMOR, PLANETE, TREC, l'avant-projet RAP, le LIRMM (Montpellier), France Telecom R&D (Lannion, Sophia et Issy-les-Mlx), et l'EPFL (Lausanne) de février 2002 à février 2004. Nous travaillons principalement sur la modélisation des transferts TCP de courte durée, sur les politiques de gestion active de files d'attente pour le contrôle de congestion et sur l'évaluation des mécanismes liés à la différenciation de service.

8.1.2. G6

Participants : Laurent Toutain, Francis Dupont.

Le projet ARMOR participe activement au G6, groupe francophone des utilisateurs d'IPv6, la future version du protocole de base de l'Internet. Le projet exploite le point d'accès régional pour le pilote IPv6 de Renater et le 6bone. Armor est également très actif dans le groupe G6test pour la définition de tests pour le protocole IPv6.

8.2. Actions européennes

Le projet a participé aux expérimentations de différenciation de service effectuées pour Renater sur le réseau TF-NGN.

8.3. Actions internationales

- G. Rubino a été le correspondant local des relations internationales de l'Inria jusqu'au mois de mai 2002.
- Nous travaillons avec l'université de Duke (États Unis) sur la modélisation par réseaux de Petri, avec l'université d'Arizona, l'université de Pise et l'UNAM de Mexico sur les processus de Markov, et avec l'Itam de Mexico sur les mesures de qualité des flux multimédia et sur les méthodes de simulation.
- R. Marie est membre des groupes de travail IFIP 6.3 (Performance of Communication Systems) et 7.3 (Computer System Modeling and Performance Evaluation). G. Rubino est membre du groupe de travail IFIP 7.3.
- J. M. Bonnin et M. Tezeghdanti participent à une collaboration avec l'université du Sud Est de Nankin (Chine) financée par le LIAMA (Laboratoire Franco-Chinois) pour une durée de 1 an. Cette collaboration se situe dans le domaine de l'ingénierie de trafic dans les cœurs de réseaux MPLS.

8.3.1. Équipe associée PAIR (Planification de l'Architecture et de l'Infrastructure d'un Réseau)

Le projet a constitué une équipe associée avec le Département de Recherche Opérationnelle de la Faculté d'Ingénierie de Montevideo, Uruguay, équipe que dirige le professeur Héctor Cancela. Cette formalisation de notre coopération est datée de septembre 2001. L'objectif des recherches démarrées dans ce nouveau cadre est l'étude de techniques de planification de l'architecture d'un réseau à large étendue (i.e., conception de la topologie, choix des composants,...) en tenant compte de contraintes variées (coûts et bénéfices, performances, sûreté de fonctionnement, vulnérabilité, performabilité,...).

La planification des réseaux de télécommunication modernes est une tâche complexe et en générale coûteuse. Elle a comme axe principal l'optimisation, et intègre comme élément majeur dans la boucle du processus d'optimisation des activités d'analyse et d'évaluation quantitatives. L'équipe de planification doit tenir compte des besoins (existants ou prévus), des coûts des différents éléments composant les systèmes, des contraintes sur les performances, la fiabilité, la qualité de service, etc., et, de plus, des contraintes spécifiques à chaque système particulier. La forte complexité du problème dans sa globalité ainsi que celle des principaux sous-problèmes dans lesquels il est nécessaire de le décomposer, font qu'il s'agit d'un excellent support de recherche. Il y a une place considérable pour l'amélioration de la méthodologie aujourd'hui employée par les industriels, qui est souvent très rudimentaire (constat des industriels eux-mêmes). Les volumes d'investissement associés font qu'une diminution des coûts globaux de quelques %, à qualité de service constante, peut avoir un intérêt économique important.

Notre effort de recherche se portera d'abord sur l'étude des méthodes d'optimisation les plus appropriées pour aborder le problème général décomposé en deux sous-problèmes de base : la planification du réseau d'accès et celle du *backbone* (le cœur). La formalisation usuelle de ces problèmes n'est pas la même et l'on dispose potentiellement d'un nombre important de techniques pour les traiter. Nous travaillons également sur les moyens d'intégrer des modèles appropriés permettant de capter certains aspects liés aux performances et à la sûreté de fonctionnement.

8.4. Visites et invitations de chercheurs

Le projet a reçu les visites des collègues suivants :

- Dans le cadre de l'équipe associée PAIR (voir 8.3.1), nous avons reçu le responsable uruguayen de l'équipe, Héctor Cancela, qui a passé deux mois dans l'équipe, janvier et février. Nous avons également reçu le professeur Elvio Accinelli, de la Faculté d'Ingénierie de Montevideo, qui a passé deux mois dans l'équipe pour travailler avec Bruno Tuffin sur des problèmes de tarification dans les réseaux. Elvio Accinelli est un spécialiste de l'économie mathématique.
- Nous avons reçu Kenjiro Cho travaillant pour SONY Computer Science Laboratory et le projet WIDE au Japon.
- Marcel Neuts, professeur émérite, à l'université d'Arizona, à Tucson, et Guy Latouche, professeur à l'université Libre de Bruxelles, ont séjourné dans le projet une semaine en décembre, pour travailler sur les modèles fluides.
- Jing Feng, enseignant-chercheur à l'université de Nankin (SEU), est venue travailler un mois en décembre à l'intégration des développements concernant l'ingénierie de trafic dans les réseaux IP/MPLS effectués en Chine dans les outils de simulation développés sous NS au sein de l'équipe.
- Rachid Zagrouba, étudiant en DEA à l'ENSI co-encadré par Jean-Marie Bonnin, a effectué une visite de un mois en juin pour travailler sur la gestion de la qualité de service dans les cœurs de réseau UMTS et préparer son admission en thèse. Il reviendra en décembre pour quelques mois pour débiter un travail de thèse qui se déroulera par la suite à France Télécom R&D.
- Dans le cadre d'un accord de coopération franco-ivoirien, notre équipe a reçu Monsieur Adje Assouhoum, enseignant ivoirien de l'université de Cocody à Abidjan, du 11 au 25 septembre 2002. Monsieur Adje est responsable du DESS NTIM (Nouvelles Technologies Informatiques

et Multimédias) une toute nouvelle formation de l'université d'Abidjan. Sa présence à Rennes nous a permis d'échanger de nombreuses informations sur nos formations respectives. Plusieurs membres du laboratoire sont intervenus et interviendront à nouveau pour soutenir cette formation dans leur domaine respectif d'expertise.

- Nous avons également reçu Franco Robledo, étudiant en thèse (co-tutelle), pour quatre mois (septembre-décembre).

9. Diffusion des résultats

9.1. Animation de la Communauté scientifique

B. Cousin et L. Toutain participent au thème « Réseaux haut débit et multimédia » du GDR ARP (Architecture, Réseaux et parallélisme) du CNRS.

9.1.1. Activités d'édition

- R. Marie est co-éditeur de la revue *Performance Evaluation*.
- G. Rubino est co-éditeur de la revue *Naval Research Logistics*.
- L. Toutain est co-éditeur chez Hermes du traité sur le routage et l'Internet. Il est également responsable de la collection « Réseau » chez « Techniques de l'ingénieur » et il est membre du comité éditorial de la Collection Pédagogique de Télécommunications, patronnée par le GET (Groupe des écoles de Télécommunications).

9.1.2. Comités de programme

R. Marie a été membre des comités de programme des conférences internationales suivantes :

- PERFORMANCE TOOLS'2002 (12th International Conference on Modelling Techniques and Tools for Computer Performance Evaluation) ; Imperial College of Science Technology and Medicine, Londres, 14–17 avril 2002 ;
- ACM SIGMETRICS'2002 (International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems), 15–19 juin, 2002, Marina Del Rey, California.

G. Rubino a été membre des comités de programme des conférences internationales suivantes :

- V International Conference on Operation Research, La Havane, 4–8 mars 2002 ;
- PERFORMANCE TOOLS'2002 (12th International Conference on Modelling Techniques and Tools for Computer Performance Evaluation) ; Imperial College of Science Technology and Medicine, Londres, 14–17 avril 2002 ;
- ACM SIGMETRICS'2002 (International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems), 15–19 juin, 2002, Marina Del Rey, California ;

Bruno Sericola a été membre du comité de programme de la conférence internationale ASMT (9th International conference on Analytical and Stochastic Modelling Techniques), Darmstadt, Allemagne, juin, 2002.

César Viho a été membre du comité de programme de la conférence internationale CARI'2002 (Conference Africaine sur la Recherche en Informatique), Yaoundé, Cameroun, octobre, 2002.

9.1.3. Participation à des colloques, séminaires, invitations

César Viho est membre du G6test, le sous-groupe du G6 (Groupe francophone des utilisateurs de IPv6) qui s'occupe des problèmes de test de conformité et d'interopérabilité des nouveaux protocoles IPv6. Il a co-organisé avec l'ETSI Sophia-Antipolis le « Plugtest IPv6 » de tests d'interopérabilité des protocoles IPv6 qui a eu lieu à Cannes en septembre 2002.

César Viho a été invité à présenter un papier intitulé "On the importance of interoperability events" au Workshop "New trends in Communications Systems Testing" de la conférence TestCom'2002 en mars 2002 à Berlin.

Jean-Marie Bonnin a effectué en août une visite de deux semaines à l'université de Nankin (SEU) pour travailler sur les algorithmes permettant d'optimiser la répartition des flux dans un réseau. Il a fait deux conférences intitulées : " La qualité de service dans les réseaux mobiles " et " L'ingénierie de trafic dans les cœurs de réseaux IP ".

Jean-Marie Bonnin a effectué en mai une visite d'une semaine dans le laboratoire Cristal de l'ENSI de Tunis. Il s'agissait d'entamer une collaboration concernant la mobilité IP et la gestion de la qualité de service dans les réseaux mobiles. Une conférence sur ce thème à d'ailleurs été donnée.

Jean-Marie Bonnin a participé en décembre au colloque organisé par le LIAMA à Paris pour présenter les évolutions de l'ingénierie de trafic dans les cœurs de réseau IP.

R. Marie a donné en septembre une conférence invitée à Rome, Italie, dans le cadre de la réunion annuelle du groupe de travail IFIP 7.3, intitulée « On the Effect of Interruptions in the Repair Process of a Maintenance Workshop ».

9.2. Enseignement

9.2.1. Enseignement universitaire local

Les membres de l'équipe ont des responsabilités d'enseignement diverses dans l'environnement local (Ifsic, Cnam Rennes, IUT de Rennes, Insa, ENST de Bretagne, Institut mathématique de Rennes).

Au niveau Bac+5, B. Cousin, R. Marie, G. Rubino, B. Sericola, C. Viho, L. Toutain, S. Gombault, J-M. Bonnin, donnent différents cours en DEA de probabilités, en DEA d'informatique, en DIIC 3^e année et en DESS ISA, à l'université de Rennes 1, ainsi qu'à l'ENST Bretagne et à l'ENSAI. Les thèmes principaux sont les réseaux, les protocoles, les problèmes de dimensionnement, la sûreté de fonctionnement, etc.

B. Cousin est responsable du DESS ISA (Informatique et ses applications) à l'université de Rennes 1. S. Gombault est le responsable de l'option RSIFI (Réseaux et Systèmes d'Information pour la Finance) de l'ENST Bretagne ; il est aussi co-responsable du mastère sécurité des systèmes d'information qui a été créé en septembre 2002 en collaboration avec Supélec. L. Toutain est le responsable du mastère RSIE (Réseaux et Systèmes d'Information pour les Entreprises) de l'ENST Bretagne ; il fait également des enseignements sur les réseaux à l'ISIA, Sophia Antipolis.

9.2.2. Enseignement universitaire à l'étranger

G. Rubino a fait un cours sur l'évaluation de performances des réseaux de communication dans le DEA Modélisation et Ingénierie du Logiciel Scientifique à l'université libanaise de Beyrouth, au mois d'avril. Ce DEA est co-organisé par cette université, l'EPFL, l'université de Reims et l'IRISA.

Dans son année sabbatique à l'EPFL, Laurent Toutain a été chargé de cours sur les réseaux.

Bernard Cousin est responsable du DESS NTIM à l'université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire).

Jean-Marie Bonnin gère un module de cours du DEA d'informatique et réseau de l'ENSI de Tunis sur " les réseaux mobiles de données ". Il assure aussi un module sur le routage dans le DESS NTIM à l'université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire).

Bernard Cousin est responsable du DESS NTIM à l'université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire).

9.3. Activités dans les organismes de standardisation

Participants : Francis Dupont, Laurent Toutain, César Viho, Bernard Cousin, Jean-Marie Bonnin.

L'équipe Armor mène une activité importante en matière de normalisation/standardisation. Cela se traduit par :

1. La participation à des groupes de travail de plusieurs organismes de normalisation tels que IETF (Internet Engineering Task Force), ETSI (European Telecommunication Standardization Institute), 3GPP (3rd Generation Partnership Project), etc.
2. Des propositions ou des contributions à la définition des normes et à des RFCs (Request For Comments).
3. La collaboration avec des organismes de normalisation dans la réalisation de travaux liés à la normalisation tels que la définition de processus de certification, etc.

Nous sommes également très actifs dans les groupes de travail (et les mailing-lists associés) traitant des protocoles de nouvelle génération.

Les travaux de cette année ont été dans des propositions concernant les protocoles de la nouvelle version IPv6 du protocole Internet, surtout pour la mobilité IPv6 (MIPv6), les mécanismes de transitions de IPv4 vers IPv6 (Dual Stack Transition Mechanism (DSTM), etc), les protocoles de sécurité (IPsec, etc), les protocoles de mobilité « Universal Mobile Telecommunications System » (UMTS).

Les détails de ces activités ainsi qu'une liste non exhaustive des normes et RFCs auxquelles l'équipe Armor a participé se trouvent dans [56].

10. Bibliographie

Bibliographie de référence

- [1] H. CANCELA, M. EL KHADIRI. *A recursive variance-reduction algorithm for estimating communication-network reliability*. in « IEEE Transactions on Reliability », numéro 4, volume 44, décembre, 1995, pages 595-602.
- [2] G. CIZAULT. *IPv6, théorie et pratique*. O'Reilly, 1999 (2^e édition), ouvrage collectif, avec coordination de L. Toutain.
- [3] P. LEGUESDRON, J. PELLAUMAIL, G. RUBINO, B. SERICOLA. *Transient analysis of the M/M/1 queue*. in « Advances in Applied Probability », numéro 3, volume 25, septembre, 1993, pages 702-713.
- [4] H. NABLI, B. SERICOLA. *Performability analysis : a new algorithm*. in « IEEE Transactions on Computers », numéro 4, volume 45, 1996, pages 491-494.
- [5] G. RUBINO, B. SERICOLA. *Sojourn times in Markov processes*. in « Journal of Applied Probability », volume 26, 1989, pages 744-756.
- [6] G. RUBINO, B. SERICOLA. *A finite characterization of weak lumpable Markov processes. Part II : The continuous time case*. in « Stochastic Processes and their Applications », volume 45, 1993, pages 115-126.
- [7] G. RUBINO, B. SERICOLA. *Interval availability analysis using denumerable Markov processes. Application to multiprocessor systems subject to breakdowns and repairs*. in « IEEE Transactions on Computers », numéro 2, volume 44, Février, 1995, pages 286-291, Special Issues on Fault-Tolerant Computing.
- [8] L. TOUTAIN. *Réseaux locaux et Internet*. Hermès, 1999 (2^e édition).

Thèses et habilitations à diriger des recherche

- [9] N. BARBOT. *Files d'attente fluides en environnement markovien*. thèse de doctorat, université de Rennes 1, décembre, 2002.
- [10] Y. KHOUADJA. *Protocoles IP de micro-mobilité dans les réseaux radio-mobiles*. thèse de doctorat, université de Rennes 1, décembre, 2002.
- [11] C. VIHO. *Test de conformité et d'interopérabilité : vers une approche répartie*. habilitation à diriger les recherches, université de Rennes 1, décembre, 2002.

Articles et chapitres de livre

- [12] N. BARBOT, B. SERICOLA. *Stationary solution to the fluid queue fed by an M/M/1 queue*. in « Journal of Applied Probability », numéro 2, volume 39, juin, 2002.
- [13] H. CANCELA, G. RUBINO, M. URQUHART. *An algorithm to compute the all-terminal reliability measure*. in « OPSEARCH », numéro 6, volume 38, 2001, pages 567-579.
- [14] F. LE MOUËL, F. ANDRÉ, M. T. SEGARRA. *AeDEn : An Adaptive Framework for Dynamic Distribution over Mobile Environments*. in « Annales des télécommunications », volume (à paraître), 2002.
- [15] A. MINABURO. *IPv6 : Théorie et pratique*. Editions O'Reilly, Gisèle Cizault, mars, 2002, chapitre 8 : Supports de transmission. Compression d'en-têtes, <http://www.editions-oreilly.fr/catalogue/ipv6-3ed.html>.
- [16] S. MOHAMED, G. RUBINO. *A Study of Real-Time Packet Video Quality Using Random Neural Networks*. in « IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology », décembre, 2002.
- [17] B. TUFFIN. *Revisited Progressive Second Price Auctions for Charging Telecommunication Networks*. in « Telecommunication Systems », numéro 3-4, volume 20, juillet, 2002.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [18] M. BLADT, B. MEINI, M. NEUTS, B. SERICOLA. *Distribution of reward functions on continuous-time Markov chains*. in « 4th International Conference on Matrix Analytic Methods in Stochastic Models (MAM4) », Adelaide, Australia, juillet, 2002.
- [19] A. BOUDANI, B. COUSIN. *A New Approach to Construct Multicast Trees in MPLS Networks*. in « Seventh IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC02) », Taormina, Italy, juillet, 2002.
- [20] A. BOUDANI, B. COUSIN. *SEM : A New Small Group Multicast Routing Protocol*. in « ICT'03 », Tahiti, mars, 2003.
- [21] D. CHEFROUR, F. ANDRÉ. *ACEEL : modèle de composants auto-adaptatifs. Application aux environnements mobiles*. in « Actes du colloque Systèmes à composants adaptables et extensibles », Grenoble, octobre, 2002.

- [22] S. COLLAS, B. TUFFIN. *Creation of a Dynamic Model Language and Application of Monte Carlo Methods for the Reliability Analysis of Industrial Complex Systems*. in « Actes de Lambda-Mu 13 », Lyon, mars, 2002.
- [23] S. FORTIN, B. SERICOLA. *Refined TCP Performance Evaluation with Simple Modeling*. in « 10th IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS 2002) », Fort Worth, USA, octobre, 2002.
- [24] S. GOMBAULT, M. DIOP. *Fonction de réaction*. in « NATO Information Systems Technology Symposium on Real Time Intrusion Detection », Lisbon, Portugal, mai, 2002.
- [25] Y. KHOUAJA, K. GUILLOUARD, J.-M. BONNIN, P. BERTIN. *Hierarchical mobility controlled by the network*. in « MMT'2002, Workshop on Multiaccess, Mobility and Teletraffic for Wireless Communications », Rennes, France, juin, 2002.
- [26] A. KRINIK, G. RUBINO. *Transient probabilities of classical queueing systems using dual processes*. in « 5th International Conference on Lattice Path Combinatorics and Discrete Distributions », univ. d' Athènes, Grèce, juin, 2002.
- [27] C. LECOT, B. TUFFIN. *Quasi-Monte Carlo Methods for Estimating Transient Measures of Discrete Time Markov Chains*. in « Proceedings of the fifth International Conference on Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods in Scientific Computing », Singapoure, novembre, 2002.
- [28] R. MARIE, E. ARBARETIER, F. PELLICCIA. *Heuristics for the Computation of the Availability / Reliability for Passive r/n Redundancy with Potential Breakdowns on Solicitations*. in « Proceedings of the Third International Conference on Mathematical Methods in Reliability, Methodology and Practice (MMR'2002) », Trondheim, Norway, juin, 2002.
- [29] R. MARIE, E. ARBARETIER, S. PIERRON, A. BOUSSETA. *Algorithmes d'optimisation pour la conception des systèmes et de leur soutien*. in « Actes de Lambda-Mu 13 et ESREL 2002 », Lyon, mars, 2002.
- [30] R. MARIE. *On the Effect of Interruptions in the Repair Process of a Maintenance Workshop*. in « Proceedings of the 14th Annual NOFOMA Conference », Trondheim, Norway, juin, 2002.
- [31] R. MARIE, S. PIERRON. *Algorithmes d'allocation d'indicateurs de sûreté de fonctionnement*. in « Actes de Lambda-Mu 13 et ESREL 2002 », Lyon, mars, 2002.
- [32] A. MINABURO. *ROHC Interaction in the 3GPP Architecture*. in « International Conference on IP-BASED CELLULAR NETWORKS (IPCN Upperside 2002) », Paris, avril, 2002.
- [33] S. MOHAMED, G. RUBINO. *Evaluation of packet video quality in real-time using Random Neural Networks*. in « ICANN 2002 », UAM, Madrid, Espagne, aout, 2002.
- [34] M. MOLNÁR. *Arbres pour communications multi-points avec un délai de bout en bout quasi-optimal*. in « Algotel'2002 », Mèze, mai, 2002.

- [35] L. MURRAY, G. RUBINO, M. URQUHART. *BSS Priority Queue*. in « XXVIII Conférence latinoaméricaine d'informatique », Montevideo, Uruguay, novembre, 2002.
- [36] L. MURRAY, G. RUBINO, M. URQUHART. *The Bounded Sequential Searching (BSS) Priority Queue in Discrete Event Simulation*. in « XI Latin-Iberian American Congress of Operations Research (CLAIO) », Concepcion, Chili, octobre, 2002.
- [37] L. RABEHASAINA, B. SERICOLA. *Stability of a fluid queue and applications*. in « 1st Madrid Conference on Queueing Theory (MCQT'02) », Madrid, Spain, juillet, 2002.
- [38] G. RUBINO. *Evaluation of the Maximum Level Reached by a Queue Over a Finite Period*. in « International Performance and Dependability Symposium (IPDS) 2002 », Washington, U.S., juin, 2002.
- [39] G. RUBINO. *Modeling nodes of communication networks at the bit and packet levels*. in « ISCIS XVII : Seventeenth International Symposium On Computer and Information Sciences », UCF, Orlando, Florida, U.S., octobre, 2002.
- [40] G. RUBINO. *On the usual paradigm in Queueing Theory applied to the analysis of communication systems. Invited*. in « Fourth Biennial International Conference on Statistics, Probability and Related Areas », NIU, DeKalb, Illinois, U.S., octobre, 2002.
- [41] B. TUFFIN. *Pricing schemes in Telecommunication networks*. in « 4th Latin-american workshop on economy theory (Jolate'02) », Mexico City, octobre, 2002.
- [42] A. ZSIGRI, A. GUITTON, M. MOLNÁR. *Construction of Ligth-Trees for WDM Multicasting under Splitting Capability Constraints*. in « 10th International Conference on Telecommunications (ICT'2003) », Papeete, French Polynesia, février, 2003.
- [43] H. LE GUEN. *System validation by statistical usage testing*. in « Proceedings of the Fifteenth International Conference : Software & Systems Engineering & their Applications (ICSSEA'2002) », Paris, France, décembre, 2002.
- [44] H. LE GUEN, R. MARIE. *Visiting probabilities in non irreducible Markov chains with strongly connected components*. in « Proceedings of the 9th International Conference on Analytical and Stochastic Modelling Techniques (ASMT'2002) », Darmstadt, Germany, juin, 2002.
- [45] L.-M. LE NY, B. SERICOLA. *Busy Period Distribution of the BMAP/PH/1/ Queue*. in « Proceedings of the 9th International Conference on Analytical and Stochastic Modelling Techniques (ASMT'2002) », Darmstadt, Germany, juin, 2002.
- [46] L.-M. LE NY, B. TUFFIN. *A simple analysis of heterogeneous multi-server threshold queues with hysteresis*. in « Proceedings of Applied Telecommunication Symposium (ATS) », San Diego, USA, avril, 2002.
- [47] L.-M. LE NY, B. TUFFIN. *Modeling and analysis of multi-class threshold-based queues with hysteresis using Stochastic Petri Nets*. in « Petri Nets 2002 », série Lecture Notes in Computer Science, Springer Verlag, 2002.

Rapports de recherche et publications internes

- [48] Y. HAYEL, B. TUFFIN. *A Mathematical Analysis of the Cumulus Pricing Scheme*. rapport technique, numéro 1466, IRISA, juillet, 2002.
- [49] J. INCERA, G. RUBINO. *On the standard paradigm in applying queueing theory to packet networks analysis*. rapport technique, numéro 1471, IRISA, octobre, 2002.
- [50] O. MEDINA, J. OROZCO, D. ROS. *Bandwidth Sharing under the Assured Forwarding PHB*. rapport technique, numéro 1478, IRISA, septembre, 2002.
- [51] B. TUFFIN. *Charging the Internet without bandwidth reservation : an overview and bibliography of mathematical approaches*. rapport technique, numéro 1434, IRISA, janvier, 2002.

Divers

- [52] A. BOUDANI, B. COUSIN. *The MPLS Multicast Tree (MMT)*. draft IETF : draft-boudani-mpls-multicast-tree-02.txt, novembre, 2001.
- [53] J. CORRAL, M. OURRAOU, L. TOUTAIN. *Une architecture pour mesurer la performance de réseaux IP à différenciation de services (SATURNE)*. in « JDIR'2002 : journées doctorales informatique et réseaux », LAAS, Toulouse, mars, 2002.
- [54] A. MINABURO, G. RUBINO, L.-M. LE NY, L. TOUTAIN. *Analyse de l'algorithme de compression d'en-têtes ROHC sur les liaisons bas débit*. in « JDIR'2002 : journées doctorales informatique et réseaux », LAAS, Toulouse, mars, 2002.
- [55] A. MINABURO, L. TOUTAIN. *ROHC interaction in the UMTS Network*. in « G6 Renater Aristote, Where we are with IPv6 », Paris, octobre, 2002.
- [56] C. VIHO, G. RUBINO. *Activités de normalisation de l'équipe Armor*. Rapport pour la DirDRI, janvier, 2003.
- [57] C. VIHO, L. TOUTAIN, P. COUSIN. *About Interoperability Testing Events : The example of the ETSI IPv6 Plugtests events*. in « G6 Renater Aristote, Where we are with IPv6 », Paris, octobre, 2002.
- [58] C. VIHO. *On the Importance of Interoperability Testing Events*. in « Invited paper for the Workshop session of TestCom'2002 Conference », Berlin, mars, 2002.

Bibliographie générale

- [59] D. ANICK, D. MITRA, M. M. SONDDHI. *Stochastic theory of a data-handling system with multiple sources*. in « Bell System Tech. J. », numéro 8, volume 61, 1982, pages 1871-1894.
- [60] J. CAPOULADE, P. CARLE, E. COCHEVELOU, F. CUPPENS, M. DIOP, S. DUBUS, S. GOMBAULT, L. MÉ, C. MICHEL, B. MORIN. *Mirador : A cooperative approach of IDS*. in « ESORICS'2000 : 6th European Symposium on Research in Computer Security », Toulouse, France, octobre, 2000.

- [61] D. CLARK, W. FANG. *Explicit Allocation of Best-Effort Packet Delivery Service*. in « IEEE/ACM Transactions on Networking », numéro 4, volume 6, août, 1998, pages 362-373.
- [62] A. ELWALID, D. MITRA. *Effective bandwidth of general markovian traffic sources and admission control of high speed networks*. in « IEEE/ACM Transactions on Networking », numéro 3, volume 1, 1993.
- [63] S. FLOYD, V. JACOBSON. *Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance*. in « IEEE/ACM Transactions on Networking », numéro 4, volume 1, août, 1993, pages 397-413.
- [64] E. GELENBE. *Random neural Networks with Negative and Positive Signals and Product Form Solution*. in « Neural Computation », numéro 4, volume 1, 1989, pages 502-510.
- [65] C. HIREL, K. TRIVEDI, B. TUFFIN. *SPNP Version 6.0*. éditeurs B. HAVERKORT, H. BOHNENKAMP, C. SMITH., in « Computer Performance Evaluation : Modelling Tools and Techniques », série Lecture Notes in Computer Science, volume 1786, Springer Verlag, 2000, pages 354-357.
- [66] J. INCERA, R. MARIE, D. ROS, G. RUBINO. *FluidSim : a Tool to Simulate Fluid Models of High-Speed Networks*. in « Performance Evaluation », numéro 1-4, avril, 2001.
- [67] Z. LIU, P. NAIN, D. TOWSLEY. *Exponential bounds with applications to call admission*. in « Journal of the ACM », numéro 3, volume 44, 1997.
- [68] D. M. LUCANTONI. *The BMAP/G/1 queue : A tutorial*. in « Performance Evaluation of Computer and Communications Systems », Lectures Notes in Computer Science 729, Springer Verlag, éditeurs L. DONATIELLO, R. NELSON., pages 330-358, 1993.
- [69] O. MEDINA. *Étude des algorithmes d'attribution de priorités dans un Internet à différenciation de services*. thèse de doctorat, université de Rennes 1, mars, 2001.
- [70] P. TADONKI. *E-management of Telestaff*. in « HP-OVUA Workshop 2002 », Paris, France, jun, 2002.
- [71] P. TADONKI. *La sécurité dans les applications de Télémedecine*. thèse de doctorat, Université de Yaoundé I, Cameroun, septembre, 2002.
- [72] P. TADONKI. *Telemedicine : Web Portal for Telestaff*. in « Eunice '2002 », Trondheim, Norvège, sep, 2002.
- [73] IETF AUDIO-VIDEO TRANSPORT WORKING GROUP. *RTP : A Transport Protocol for Real-Time Applications (RFC 1889)*. janvier, 1996.