



Equipe **At.net**

Advanced Technology in Networking

Laboratoire de recherche **Irisa**

Mots clefs:

Réseaux informatiques, Internet, réseaux de nouvelle génération, réseaux optiques, réseaux ad hoc, réseaux sans fil, réseaux à très haut débit, réseaux de très grande taille, réseaux d'infrastructure, réseau d'accès, gestion inter-domaine, IPv6, WLAN, MPLS, WDM, qualité de service, fiabilité, robustesse, multicast, protection des routes, auto-configuration, économie d'énergie, hétérogénéité, ingénierie de trafic, routage, protocole de contrôle des réseaux, algorithmes de calcul de chemins, gestion automatique, adaptation, outils de simulation

Plan du document

1	Membres de l'équipe.....	5
2	Contexte	7
2.1	Présentation du domaine de recherche	7
2.2	Objectifs majeurs de notre équipe dans ce contexte	8
2.3	Plan du document	9
3	Travaux récents de l'équipe.....	11
3.1	Réseaux d'infrastructure	11
3.1.1	Architecture IP/MPLS et ingénierie de trafic	11
3.1.2	Routage et protection avec IP/MPLS	12
3.1.3	Planification et protection multicouche	12
3.2	Multicast	13
3.2.1	Multicast pour les petits groupes, multicast explicite	13
3.2.2	Communication multicast dans les réseaux optiques WDM	14
3.2.3	Routage multicast avec QoS et tenant compte de l'incertitude	15
3.2.4	Routage multicast avec QoS multicritère	16
3.2.5	Agrégation des arbres multicast	16
3.2.6	Problème de Steiner dans les réseaux	17
3.3	Réseaux d'accès	17
3.3.1	Commutation de labels dans les réseaux Ethernet	18
3.3.2	Conservation d'énergie dans les réseaux sans fil	18
3.3.3	k-couverture dans les réseaux de capteurs	18
3.3.4	Routage stable dans les réseaux ad hoc	19
3.4	Conclusion	19
4	Défi scientifique	21
4.1	Présentation	21
4.2	Plan d'analyse des défis	21
4.3	Le routage multicast	22
4.3.1	Présentation	22
4.3.2	Protection multicast	22
4.3.3	Routage multicast dans les réseaux optiques	23
4.4	Le routage multi-domaine	24
4.4.1	Présentation	24
4.4.2	Composition d'éléments de services dans un réseau multi-domaine	24
4.4.3	Protection du routage multi-domaine	25
4.4.4	Monitoring du routage multi-domaine	26
4.5	Le routage multicritère	27
4.5.1	Présentation	27
4.5.2	Optimisation multicritère des routes multicast	27
4.5.3	Optimisation multi-objectif du multicast sous contrainte	28
4.6	Conclusion	28
5	Positionnement de l'équipe de recherche	29
5.1	Localement à l'Irisa	29
5.2	Régionalement	30

5.3	Nationalement	30
5.4	Internationalement	34
5.5	Conclusion	35
6	Activités contractuelles en cours	37
6.1	Contrats de recherche en cours	37
6.1.1	Projet de recherche Rapido	37
6.1.2	Projet de recherche NextTV4All	37
6.1.3	Projet de recherche sur l'optimisation du placement des protections (OP)	37
6.1.4	Projets de collaboration avec Orange Labs	37
6.1.5	Projet de collaboration avec Alcatel-Lucent	38
6.2	Participations à des organismes et animations de la recherche	38
6.2.1	Groupe d'animation de la recherche française GdR ASR	38
6.2.2	Association française G6	38
6.2.3	Organisme international de normalisation IETF	38
6.2.4	Pôle de compétitivité Images et Réseaux	39
6.3	Collaborations internationales	39
6.3.1	Relations internationales	39
6.3.2	Accueil de chercheurs étrangers	39
6.3.3	Programme scientifique franco-hongrois	39
6.3.4	Coopération franco-ivoirienne	39
6.3.5	Coopération franco-libanaise	40
6.3.6	Coopération franco-libano-tunisienne	40
6.3.7	Visites à l'étranger	40
6.4	Participation à des comités scientifiques ou d'organisation	40
7	Publications	43
7.1	HDR et Thèses soutenues dans l'équipe	43
7.2	Articles de revues scientifiques	43
7.3	Chapitres de livres	44
7.4	Conférences internationales	44
7.5	Conférences nationales	48
7.6	Rapports de recherche	48
8	Annexes	51
8.1	Activités de recherche antérieures	51
8.1.1	Projet franco-allemand NGDG	51
8.1.2	Projet français RNRT IDsA	51
8.1.3	Projet européen IST Asset	51
8.1.4	Projet européen ITEA Cascade	51
8.1.5	Projet français RNRT VTHD	51
8.1.6	NoE européen EuroNGI et EuroFGI	52
8.2	Coopérations et animations de la recherche	52
8.2.1	Projet franco-asiatique Nautilus 6	52
8.2.2	Projet franco-libanais Cedre	52
8.2.3	Coopération scientifique franco-libano-tunisienne	52
8.2.4	Projet Balaton	52
8.2.5	Projet STIC INRIA	52

1 Membres de l'équipe

Responsable d'équipe

Bernard Cousin, Professeur à l'université de Rennes 1

Assistantes administratives

Evelyne Livache

Maryse Fouché

Membres de l'université

Samer Lahour, Maître de Conférences à l'université de Rennes 1

Yazid Saidi, ATER à l'université de Rennes 1 (2008, -)

Membre de l'INSA de Rennes

Miklos Molnar, Maître de conférences à l'INSA de Rennes, HdR

Post-doctorant

Aymen Belghith, université de Rennes 1 (2009,-)

Doctorants

Alia Bellabas, INSA de Rennes (2008,-)

Hamza Drid, université de Rennes 1 (2007, -)

Nabil Djarallah, Alcatel Lucent Bell Labs (2008,-)

Thomas Legrand, Orange Labs, (2006,-)

Emna Salhi, université de Rennes 1 (2009, -)

Houssein Wehbe, Orange Labs (2008, -)

Fen Zhou, programme CSC/UT-INSA (2007, -)

2 Contexte

2.1 Présentation du domaine de recherche

Le développement de réseaux de communication à très hautes performances constitue à ce jour un des grands défis scientifiques.

L'Internet constitue le cadre d'étude privilégié pour le développement de services de communication à hautes performances. En effet l'Internet offre une infrastructure de communication globale qui propose potentiellement des services de communication universels. Cela fait d'Internet un support d'intégration de prédilection de toutes les nouvelles techniques de traitement de l'information et de la communication. De nombreux défis scientifiques et techniques doivent être cependant relevés afin de transformer l'Internet actuel en un Internet dit de Nouvelle Génération. La mise en œuvre de l'Internet de Nouvelle Génération permettra de déployer à très large échelle, de façon efficace, banalisée et économique, un vaste éventail d'applications. Parmi les applications qui bénéficieraient des services de l'Internet de Nouvelle Génération, et qui constituent par ailleurs un thème de recherche et développement à part entière, on peut citer à titre d'exemple le télé-enseignement, le télétravail, le télédiagnostic, la simulation distribuée, le travail coopératif, le calcul distribué, les jeux répartis, la domotique, etc. De même, les secteurs d'activités concernés sont très diversifiés : industriel, formation, médical, militaire, spatial, culturel, divertissement, etc. Plus particulièrement et fort logiquement, nous verrons que notre équipe entretient des liens de recherche étroits avec des acteurs majeurs du domaine des télécommunications

Ces applications ont un profil caractéristique commun et induisent des spécificités sur l'Internet de Nouvelle Génération. Ces spécificités peuvent être synthétisées par les points suivants : Multimédia, Multicast, Hauts débits, Qualité de service, Hétérogénéité et ubiquité, Mobilité, Adaptabilité.

Multimédia

Des sources de données produites par des modalités différentes seront transmises et exploitées au niveau applicatif. Le flux vidéo (à deux et bientôt à trois dimensions) sera une composante essentielle du trafic engendré. La communication d'objets multimédia et leur synchronisation apparaît comme un service indissociable des systèmes de communication de nouvelle génération.

Multicast

La communication repose sur le concept de coopération donc de gestion de groupes et d'interactions multipoints. La communication s'opère au sein d'un ensemble d'individus ou d'applications se transmettant de l'information afin de coordonner une activité réalisée en commun.

Hauts débits

Il est indispensable de concevoir des architectures et protocoles à très hauts débits (par exemple plusieurs Tbit/s pour le réseau d'infrastructure) en rapport avec les besoins de ces applications.

Qualité de service

Les services de communication doivent être capables de mettre en œuvre et de contrôler la qualité de service offerte aux applications. Ces services peuvent varier dans le temps en fonction de l'évolution de l'application.

Hétérogénéité et ubiquité

Les réseaux continuent à se diversifier et seront encore plus omniprésents (WLAN, réseaux de capteurs, réseaux terrestres, réseaux pour mobiles, réseaux satellitaires, etc.) Cette hétérogénéité sera multipliée par la grande variété des terminaux et des formes que prendront les applications pour s'adapter aux différents types d'utilisateurs. La coordination et l'intégration transparente de l'ensemble de ces technologies hétérogènes et largement dispersées deviennent primordiales.

Mobilité

Les utilisateurs (ou processus) de même que certaines composantes des réseaux sont mobiles et impliquent donc la prise en compte des propriétés inhérentes à la mobilité, à la dynamique des services et des environnements et au nomadisme. En particulier les réseaux mobiles sans fils introduisent dans l'Internet de nouvelle génération de nouvelles problématiques.

Adaptabilité

Les systèmes de communication doivent être capables d'évoluer et d'être configurés de façon souple en fonction de l'évolution des besoins applicatifs. Cette adaptabilité concerne en particulier les réseaux ad hoc et ambiants mais constitue une propriété fondamentale de l'Internet de nouvelle génération. Comme premier type d'exemple, on peut donner les mécanismes de protection de la communication qui permettent de limiter l'impact des interruptions des communications et peuvent être choisis en fonction de l'application (le réseau s'adapte aux pannes). Comme second type d'exemple, on peut citer le choix de bonnes routes qui va permettre d'offrir la qualité de communication demandée par les applications, ce choix pouvant être basé sur de multiples critères et devant respecter de multiples contraintes. Parmi ceux-ci on peut citer le délai, le débit, la gigue, le taux d'erreur ou de panne. Parmi celles-ci on peut citer l'obligation de passer par un domaine de routage d'un opérateur particulier ou bien encore, dans les réseaux optiques, assurer la continuité de la longueur d'onde. Il est donc indispensable de développer des protocoles et des services de communication réalisant une adaptation efficace entre les besoins applicatifs et les possibilités offertes par les réseaux de nouvelle génération. Et c'est à quoi s'attache notre équipe.

2.2 Objectifs majeurs de notre équipe dans ce contexte

L'objectif majeur de l'équipe est de proposer des architectures, des algorithmes et des protocoles capables d'assurer un service de communication efficace et robuste, ceci dans le cadre des réseaux informatiques de nouvelle génération. Ces services de communication devront permettre la distribution sans rupture notoire de toutes sortes de services multimédia interactifs en tous lieux et sur une multiplicité de terminaux. Nous avons choisi de proposer des solutions qui sont pour la plupart déployées au sein du réseau lui-même, en général au sein des équipements qui réalisent l'interconnexion (appelés communément routeurs ou commutateurs). Et c'est ce qui fait l'une des particularités de notre équipe de recherche.

Ce choix de s'intéresser principalement au comportement interne du réseau s'explique facilement par notre volonté d'obtenir les meilleures performances au meilleur coût. Ces équipements d'interconnexion sont en général bien placés pour mesurer précisément ou au moins permettre de déceler les comportements du réseau, pour échanger très rapidement les informations entre eux, pour agir très efficacement sur les comportements détectés. En effet ces équipements d'interconnexion sont très souvent, si ce n'est toujours, munis de fonctionnalités permettant d'effectuer ces mesures, ces diagnostics, ces échanges et ces actions. Grâce à cette localité, ces décisions peuvent être prises rapidement et les actions sont appliqués tout aussi rapidement, cela offre donc un très bon compromis efficacité/coût.

C'est pourquoi notre travail porte avant tout sur le plan de contrôle du réseau. Nous supposons généralement que les données des utilisateurs sont codées et transportées le plus efficacement possible en fonction des besoins énoncés par l'application et les capacités de son terminal. En un mot, le plan de données est efficace.

Toutefois notre domaine d'étude ne se réduit ni à ces hypothèses fonctionnelles ni à ces seuls équipements d'interconnexion. Il semble en effet très intéressant de pouvoir appréhender le comportement prévisible des applications qui utiliseront ces services. Ainsi le plan de contrôle n'est et ne doit pas être ignorant des spécificités des communications demandées par telles ou telles applications. Afin de ne pas multiplier les solutions techniques, la plupart des réseaux répartissent le trafic de données émis par les applications en plusieurs classes. A chaque classe est associé certaines caractéristiques. Des mécanismes spécifiques peuvent alors être mis en œuvre au sein des équipements d'interconnexion pour répondre aux besoins spécifiques des applications. Ainsi on tient compte du comportement des sources et des destinations, de leurs besoins, sans grandement augmenter la complexité du réseau. Ce qui est essentiel, notamment au sein des réseaux optiques qui de par leur grand débit sont à même de transporter un très grand nombre de flux de données aux caractéristiques extrêmement variées. Dans l'Internet, le protocole MPLS et ses variantes GMPLS et MPLS-TE offrent ces mécanismes spécifiques, c'est pourquoi notre équipe privilégie ce type de protocole dans plusieurs de ses études.

Dans ce cadre, il existe de nombreux domaines de recherche en développement et les membres de l'équipe ont déjà acquis une forte expérience dans certains de ses domaines. Les travaux de l'équipe peuvent être synthétisés en quelques mots : assurer le contrôle optimal d'un réseau informatique de nouvelle génération.

2.3 Plan du document

Dans le chapitre suivant, nous allons tout d'abord dresser le bilan des travaux en cours. Cela va nous permettre de dresser la liste des compétences des membres de l'équipe. Nous verrons que les thèmes récents sont l'ingénierie de trafic, le routage, la protection des communications, la protection et la planification multicouches, le routage multicast pour les petits groupes, les communications multicast pour les réseaux optiques, le routage multicast avec QoS, l'agrégation d'arbres, la commutation de labels dans les réseaux Ethernet, la conservation d'énergie dans les réseaux sans fil, la k-couverture dans les réseaux de capteurs, la stabilité du routage dans les réseaux ad hoc. Nous constaterons que tous ces thèmes partagent de nombreux points communs et qu'il y a une très bonne synergie entre eux.

Dans le chapitre quatre, nous allons décrire les défis scientifiques que nous voulons affronter dans le cadre du contrôle optimal des réseaux informatiques. Ils peuvent être caractérisés par quelques thèmes : *routage*, *multicast*, *multicritère* et *multi-domaine*. Nous verrons comment nous articulons ces thèmes entre eux pour produire nos axes de recherche.

Le cinquième chapitre dressera un bilan des travaux similaires qui peuvent être menés dans les principales équipes de recherche du domaine.

Dans le sixième chapitre, nous listerons nos activités scientifiques et contractuelles les plus récentes, pour mesurer l'activité et les coopérations de l'équipe.

Puis nous terminerons par la liste de nos publications récentes.

3 Travaux récents de l'équipe

Nous avons choisi de décrire dans ce chapitre les travaux de recherche menés dans notre équipe depuis les quatre dernières années. Cela va nous permettre de déterminer le domaine d'excellence des membres de l'équipe, de proposer des pistes nouvelles et ainsi de dessiner en creux les nouveaux axes de recherche que nous étudierons dans les prochaines années (et qui seront décrits dans le chapitre suivant).

Nous avons regroupé nos travaux en trois thèmes : réseaux d'infrastructure, multicast, réseau d'accès.

Même si ce regroupement est pour partie artificiel, il a pour avantage de mettre en évidence certaines caractéristiques de notre recherche récente. Premièrement notre activité de recherche récente s'est déployée aussi bien sur les réseaux d'accès (réseaux mobiles, réseaux sans-fil, réseaux adhoc, réseaux de senseurs, etc.) que sur les réseaux d'infrastructure (réseaux optiques, réseaux MPLS, réseaux IPv6, etc.). Deuxièmement un thème important de notre recherche est le routage multicast. Et nous verrons ce thème réapparaître lorsque nous envisagerons les défis à relever pour équipe dans les prochaines années.

3.1 Réseaux d'infrastructure

Avec l'évolution de l'Internet, le dimensionnement des réseaux d'infrastructure est devenu un enjeu essentiel pour les opérateurs. Ainsi de nouvelles stratégies sont mises en œuvre pour permettre l'évolution des réseaux, l'offre de nouveaux services, la gestion de QoS et la tolérance aux pannes, tout en garantissant un bon retour sur investissement. En particulier, les réseaux de nouvelle génération proposent souvent une architecture à deux couches: un réseau de transport utilisant les technologies optiques comme DWDM et un réseau de données utilisant la technologie IP/MPLS.

Nous allons voir que dans cette thématique nos travaux récents couvrent l'ingénierie de trafic, le routage et la protection, la planification et la protection multicouche.

3.1.1 Architecture IP/MPLS et ingénierie de trafic

L'ingénierie de trafic consiste en un ensemble de stratégies déployées par l'opérateur afin de supporter des opérations réseaux fiables et efficaces tout en optimisant l'utilisation des ressources et les performances du trafic [Lahoud et al., 2005a]. L'architecture MPLS fournit une solution de plus en plus adoptée pour mettre en œuvre le routage QoS et l'ingénierie de trafic dans les réseaux cœurs. MPLS permet la configuration des tunnels de donnée. Ces tunnels, appelés aussi LSP, sont placés selon des routes explicites calculées et modifiés en temps réel. Les routes explicites ne suivent pas forcément les plus courts chemins calculés par les protocoles de routage IP traditionnels ; elles sont calculées de façon à optimiser les objectifs de l'opérateur et satisfaire les contraintes de QoS du trafic.

Dans ce cadre, nous avons proposé une étude comparée entre plusieurs architectures fonctionnelles pour l'ingénierie de trafic IP/MPLS [Chaieb et al., 2006]. Nous avons proposé une architecture générale avec décomposition en blocs fonctionnels. Cette architecture comprend les principaux éléments des différentes techniques d'ingénierie de trafic dans les réseaux MPLS à savoir d'une part la matrice de trafic et la topologie du réseau, d'autre part le calcul, l'établissement et l'adaptation des chemins. Nous avons évalués différentes architectures fonctionnelles. Le calcul des chemins peut être online ou offline. Il peut être distribuée ou centralisée. Et enfin, il peut être coordonnée ou non. Nous avons comparés les différentes combinaisons de ces choix [Chaieb et al., 2006a].

Nous avons étudié un problème important qui est peu abordé dans la littérature celui de déterminer l'ordre d'établissement des chemins dans un réseau IP/MPLS. En effet, l'ordre d'établissement des chemins peut avoir une influence importante sur le nombre maximal de chemins qui peuvent être établis dans le réseau. Nous avons proposé des solutions efficaces et rapides qui permettent en particulier de réduire le taux de LSP rejetés, la charge maximale et la bande passante rejetée [Chaieb et al., 2007].

De plus, nous avons étudié le problème de préemption des LSP. Ce problème devient important lorsque, dans un réseau fonctionnant 24h/24, l'opérateur doit déplacer ou redimensionner un ou plusieurs chemins. Nous avons analysé les techniques d'attribution de niveau de préemption pour les LSP. Nous avons proposé une approche qui permet de réduire l'impact de la préemption sur le plan de commande et de transfert MPLS-TE. Cette approche est originale : elle utilise un nombre réduit de paramètres et n'augmente pas la quantité d'information échangée entre les routeurs. Nous avons proposé une variante de cette approche qui ne nécessite aucune extension au protocole RSVP-TE, ce qui facilite son utilisation dans des réseaux réels [Chaieb et al. 2007a; 2007b].

Finalement, nous avons introduit une organisation du réseau dans laquelle les routeurs se coordonnent partiellement pour l'établissement des chemins. Il s'agit d'un compromis entre une solution centralisée et une solution complètement distribuée. L'impact de cette architecture a été très positivement évalué. [Chaieb 2007; Chaieb et al. 2006b]

L'ensemble de cette étude permet de proposer une architecture pour l'ingénierie de trafic dans les réseaux cœurs MPLS avec une répartition fonctionnelle efficace. Elle propose aussi des solutions algorithmiques qui permettent de minimiser les ressources consommées lors de l'établissement et du maintien des chemins.

3.1.2 Routage et protection avec IP/MPLS

Nous étudions la combinaison du *multicast* et de MPLS en tant qu'outil d'ingénierie de trafic dédié à économiser les ressources du réseau. Nous avons proposé le protocole MMT, protocole de routage *multicast* dans un réseau MPLS. Le protocole MMT utilise les chemins MPLS entre les nœuds de branchement de l'arbre *multicast* afin de rendre la communication en mode *multicast* simple, d'augmenter la résistance au facteur d'échelle et de réduire le nombre d'états de routage *multicast*. L'ensemble de nos résultats montre que l'ingénierie de trafic *multicast* passe par le développement de protocoles spécialisés.

Pour la protection des communications IP/MPLS, nous proposons différentes approches améliorant le calcul distribué des chemins de secours et la disponibilité des ressources. Nos approches traitent tous les risques de panne à savoir : lien, nœud et SRLG (Shared Risk Link Group) [Saidi et al., 2009a].

En particulier, nous proposons différents algorithmes et heuristiques distribués permettant le calcul en ligne des chemins de secours [Saidi et al., 2006]. Nos propositions ont l'avantage de réduire l'information requise pour le calcul des chemins de secours en agrégeant et/ou limitant la portée des messages transmettant cette information. Ainsi, l'algorithme TDRA cible les routeurs auxquels est envoyée l'information requise pour le calcul des chemins de secours alors que les heuristiques DBSH et PLRH agrègent et compressent cette information avant sa diffusion dans le réseau [Saidi et al., 2008a]. Pour améliorer les calculs des chemins de secours et pour optimiser la disponibilité des ressources, nous proposons aussi une nouvelle méthode de contrôle d'admission. Notre méthode exploite la structure des risques de panne afin de réduire les ressources allouées aux chemins de secours.

De plus, nous voulons montrer que les communications point-à-multipoints pourraient être protégées en utilisant des mécanismes très semblables à ceux employés dans l'unicast. Nous proposons des modifications pour appliquer l'algorithme TDRA et les heuristiques DSBH et PLRH à la protection des communications point-à-multipoints. Nous pourrions ensuite mesurer l'impact du choix de la stratégie de partage de bande passante employée sur les performances des mécanismes de placement des chemins de secours point-à-multipoint [Saidi, 2008].

3.1.3 Planification et protection multicouche

La planification optimisée des réseaux cœurs de nouvelle génération utilisant la technologie IP/MPLS sur réseau optique permet d'améliorer l'utilisation des ressources du réseau et de réduire son coût global. Dans nos études, la planification des transmissions MPLS/IP sur réseau optique est mise

en œuvre comme un problème d'optimisation en prenant en compte les aspects suivant: (i) la sécurisation du réseau contre les pannes, (ii) la gestion de la bande passante optique basée sur diverses méthodes de routage et (iii) l'agrégation du trafic des utilisateurs pour son transport de bout en bout dans la couche optique (*traffic grooming*). Ces aspects sont en rapport avec la conception des architectures de réseaux multicouches et influencent l'utilisation des ressources du réseau et le coût de sa configuration [Bigos, 2006].

Nous proposons des techniques de modélisation et des méthodes d'optimisation efficaces pour formuler et résoudre des problèmes d'optimisation applicables aux réseaux multicouches. Nous intégrons notamment dans ces formulations les diverses conditions de planification sous la forme de contraintes et de fonctions d'objectif, le coût des différents éléments, ainsi que l'impact des protocoles et de la technologie du réseau sur sa conception.

Nous étudions deux méthodes pour combiner la planification de la topologie logique avec le routage des canaux optiques dans le réseau physique. Une méthode séquentielle où les couches MPLS et optique ont été planifiées séparément, et une méthode intégrée où le réseau entier a été planifié en une seule fois. Ces deux méthodes s'apparentent aux modèles "overlay" et "peer" définis pour l'architecture du plan de contrôle des réseaux multicouches [Bigos et al., 2006].

La plupart des études antérieures sur la mise en œuvre des modèles "overlay" et "peer" analysent uniquement la probabilité de blocage obtenue avec le routage correspondant à chacun de ces modèles dans des conditions de trafic dynamique. Dans notre étude, nous faisons apparaître en plus l'influence de la planification du routage sur l'utilisation des ressources du réseau.

Dans le contexte de la sécurisation des réseaux multicouches, nous considérons trois cas différents pour l'allocation de la capacité de secours :

- 1) *Protection double*, dans laquelle la capacité de secours de la couche MPLS est de nouveau protégée dans la couche optique.
- 2) L'option « *LSP de secours non-protégés* », où la capacité de secours de la couche MPLS n'est pas protégée dans la couche optique.
- 3) L'option « *capacité de secours partagée* », où les couches MPLS et optique partagent la capacité de secours, c.-à-d. les canaux optiques nominaux ne sont pas protégés dans la couche optique et, en plus, ils se partagent les longueurs d'onde avec les canaux optiques de secours.

Nous avons utilisé un modèle socio-économique réaliste. Nous avons constaté que la différence dans la consommation des ressources du réseau et dans son coût total, entre la sécurisation monocouche et multicouche, était influencée par la bande passante des flux LSP relativement à la capacité des canaux optiques. En plus, nous avons trouvé que la sécurisation monocouche consomme plus de longueurs d'onde que la sécurisation multicouche pour acheminer un nombre comparable des canaux optiques dans le réseau physique [Bigos et al., 2007].

3.2 Multicast

La communication multicast repose sur le concept de coopération donc de gestion de groupes et d'interactions multipoints. Elle s'opère au sein d'un ensemble d'individus ou d'applications se transmettant de l'information afin de coordonner une activité réalisée en commun. La mise en œuvre de la communication multicast soulève plusieurs problèmes et fait l'objet d'une recherche intensive. Nous avons investi dans plusieurs problèmes architecturaux et algorithmiques autour de cette communication en groupe.

Dans les sous-chapitres suivants, nous allons présenter les principales activités de recherche récentes dans ce thème, à savoir : le multicast pour les petits groupes, les communications multicast dans les réseaux optiques, le routage multicast avec QoS en tenant compte de l'incertitude, le routage multicast avec QoS multicritère, l'agrégation d'arbres multicast, et le problème de Steiner dans les réseaux.

3.2.1 Multicast pour les petits groupes, multicast explicite

Quand le nombre de groupes multicast est important, la taille des tables de routage peut

rapidement augmenter jusqu'à dépasser les contraintes matérielles des routeurs. Pour résoudre ce problème bien connu de passage à l'échelle, des mécanismes différents ont été proposés. Parmi les propositions, le multicast explicite a pour but d'utiliser les informations du routage unicast (et de cette façon, éviter la création des entrées multicast dans les tables de routage). En contrepartie, les destinataires doivent être explicitement listés dans l'entête des paquets. Le protocole Xcast, dont la gestion des groupes est centralisée à la source, a été conçu pour cet objectif mais il soulève des problèmes quand la taille du groupe multicast est importante. Pour découper les messages trop longs, le protocole IP met en place un mécanisme appelé la fragmentation. Les protocoles Xcast et les autres protocoles multicast explicites sont conçus pour les petits groupes et ne supportent pas la fragmentation IP. Pour résoudre ce problème nous avons proposé le protocole Gxcast. Gxcast permet de gérer les sous-groupes des groupes de taille importante d'une façon optimale. Nos propositions ont été largement publiées et présentées à l'IETF [Ali Boudani, Bernard Cousin, *GXcast: Generalized Explicit Multicast Routing Protocol*. IETF draft, june 2003. Ali Boudani, Bernard Cousin, *Using Recursive Xcast Packets for Multicast Delivery*. IETF draft, mars 2003]¹.

De plus, nous avons proposé Simple Explicit Multicast (SEM), un protocole de routage multicast qui utilise une méthode efficace pour construire les arbres multicast et pour acheminer les paquets multicast. Afin de construire l'arbre multicast, la source encode la liste des adresses IP des destinataires dans un message "branch". Ce message utilise le principe du protocole Xcast et a pour rôle de découvrir les routeurs d'embranchement de l'arbre multicast. Seuls, les routeurs d'embranchement de l'arbre mémorisent les entrées de routage pour une session multicast. Pour acheminer les paquets multicast, SEM utilise le principe des arbres unicast récursifs, à l'origine proposé dans le protocole REUNITE. Les paquets sont acheminés d'un routeur d'embranchement à un autre suivant l'arbre construit par le message "branch". Le protocole SEM simplifie l'allocation d'une adresse multicast, il utilise la notion de canal source-spécifique $\langle S, G \rangle$ où S est l'adresse unicast de la source et G est une adresse multicast standard. SEM réduit aussi les entrées de routage dans les routeurs et construit un arbre des plus courts chemins, et évite la construction d'un arbre partagé comme la plupart des protocoles multicast conventionnels [Boudani and Cousin, 2005].

3.2.2 Communication multicast dans les réseaux optiques WDM

Dans les réseaux optiques WDM, la gestion des communications multicast possède des particularités intéressantes. Souvent, le routage est traité comme un problème de dimensionnement du réseau physique afin d'obtenir des chemins optiques favorables pour le trafic unicast et multicast [Molnar et al., 2009]. Il s'agit alors de la configuration directe des commutateurs optiques. Pour transmettre les messages, des chemins et des arbres optiques ("lightpaths" et "light-trees") utilisant des longueurs d'onde lumineuses doivent être configurés en tenant compte des limitations physiques du réseau. Les limitations concernent avant tout l'unicité de la longueur d'onde dans les fibres, sa continuité sur le chemin optique, la possibilité limitée de conversion de longueurs d'onde, la distance maximale sans amplification et/ou régénération entre émetteurs et récepteurs. D'autres phénomènes limitent le choix du support pour le multicast : beaucoup de commutateurs ne peuvent pas dupliquer la lumière.

La construction des arbres couvrants partiels doit tenir compte des capacités et des limitations des nœuds. Les nœuds de branchement doivent coïncider avec des commutateurs pouvant dupliquer la lumière entrante. S'il n'y a plus de possibilité de duplication dans les nœuds de branchement d'un arbre, d'autres arbres doivent être construits pour un même groupe à partir de la source. Souvent, par abus de langage, on parle de la construction d'une forêt optique.

Deux techniques importantes existent pour construire des forêts optiques : l'adaptation d'un arbre multicast donné aux contraintes imposées dans le réseau ou la construction directe de la forêt. Dans la première approche, un arbre couvrant du groupe est transformé en une forêt correspondant aux contraintes par un algorithme d'adaptation. Afin d'obtenir des forêts optiques avec moins d'arbres (ce

¹ Nous avons choisi de ne lister que nos publications récentes dans le chapitre correspondant de ce document (cf. §7). Les publications plus anciennes sont donc référencées in extenso dans le texte.

qui est intéressant pour diminuer le nombre de longueurs d'onde utilisé par lien), nous avons proposé un algorithme de post-traitement d'arbres multicast. Cet algorithme a été appliqué sur des arbres de plus courts chemin et sur des arbres de Steiner approchés par l'algorithme de Takahashi et Matsuyama².

Pour la construction directe de la forêt sous la contrainte mentionnée sur les nœuds de branchement, nous avons formulé plusieurs propositions. L'heuristique de Kruskal³ pour construire une 2-approximation de l'arbre de Steiner peut être modifiée pour connecter les arbres isolés uniquement par les nœuds ayant la capacité de duplication. Notre deuxième proposition concerne l'aménagement de l'heuristique de Takahashi et Matsuyama. Nous avons déjà proposé une amélioration de ces heuristiques qui consistent à utiliser des connexions à l'aide d'arbres de Steiner si besoin. Cette idée peut être affinée pour les réseaux WDM : les nœuds de branchement des connexions arbres doivent coïncider avec des commutateurs ayant la possibilité de duplication.

Les heuristiques que nous avons proposées pour la construction des arbres approchés des arbres minimaux de Steiner sont des bons candidats pour organiser le routage multicast dans les réseaux WDM en tenant compte des contraintes physiques. Nos résultats analysés dans la thèse d'Alexandre Guitton [Guitton, 2005] montrent que l'utilisation de l'heuristique de Kruskal et celle de Takahashi-Matsuyama, améliorées par nos concepts, augmentent significativement la performance des réseaux WDM multicast.

Dans nos travaux récents, des solutions heuristiques offrant des diamètres d'arbres et des charges de liens favorables ont été développées dans [Zhou et al., 2008]. Notre chapitre de livre [Molnar et al., 2009] étudie le routage multicast et la tolérance aux pannes dans les réseaux d'accès optiques.

Dans les réseaux WDM, la structure optimale de la communication multicast ne correspond pas forcément à un arbre (ni à une forêt). C'est un ensemble de structures hiérarchiques pouvant utiliser plusieurs fois un même commutateur et un lien dans les deux sens. Une première analyse du problème se trouve dans la thèse mentionnée ci-dessus. La recherche et la présentation des structures hiérarchiques optimales fait partie de notre travail futur. Une introduction au routage multicast sous contrainte en utilisant des hiérarchies se trouve dans [Molnar, 2008].

3.2.3 Routage multicast avec QoS et tenant compte de l'incertitude

Les applications utilisant des protocoles multicast sont souvent des applications multimédia (diffusion télévisuelle, vidéo, téléconférences, applications coopératives en temps réel, ...) qui nécessitent la satisfaction de différents critères de qualité (bande passante, délai, gigue, probabilité des pertes, ...). La construction d'arbres couvrants partiels correspondant à un critère additif ou concave dans un réseau modélisé statiquement ne peut pas toujours répondre aux attentes. Même dans les réseaux filaires, l'état du réseau change sans cesse et d'une façon imprévisible. La connaissance des valeurs des paramètres du réseau est souvent incomplète ; faute de réactualisation trop coûteuse des valeurs.

Ainsi, il est intéressant de modéliser par des variables aléatoires, les métriques de QoS permettant l'optimisation. Pour le routage unicast, des algorithmes de calculs de chemins offrant la meilleure qualité avec une probabilité maximale sont connus. Une bonne présentation du problème du routage unicast a été écrite par Guerin en 1997. Nous avons transformé le problème du routage multicast avec contrainte sur la bande passante lorsque l'information est incomplète en un problème de Steiner déterministe. Malgré cette transformation, le problème reste NP-difficile. Nous avons proposé l'utilisation des méta-heuristiques, notamment celle de la méthode tabou pour s'assurer de la bonne qualité des solutions sous optimales en un temps polynomial [Molnar et al., 2007]. L'algorithme de recherche tabou a été proposé également pour déterminer l'arbre quasi-optimal dans le cas du délai de bout en bout.

² H. Takahashi and A. Matsuyama, "An approximate solution for the Steiner problem in graphs", *Math. Japonica*, 24:537-577 (1980).

³ J. Kruskal, "On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem", *Proc. Amer. Math. Soc.*, vol. 16. pp. 48-50, 1956.

Dans le cas d'une application multicast s'appuyant sur une source donnée, l'objectif est la recherche de l'arbre qui assure un délai conforme sur le chemin critique de l'arbre avec une probabilité maximale. En supposant que les délais sont des variables aléatoires suivant des distributions conditionnelles sur des intervalles limités, nous avons proposé un algorithme qui approche la solution optimale. Nous avons proposé une solution pour calculer l'arbre couvrant quand la fonction objectif consiste à minimiser les coûts incertains. Les travaux ont été réalisés dans le cadre d'une coopération scientifique avec l'Université Technique de Budapest.

3.2.4 Routage multicast avec QoS multicritère

Souvent la QoS n'est pas basée sur une seule contrainte mais est donnée sous forme d'un ensemble de critères (coût de communication, délai, variation du délai, etc.). De cette façon, l'arbre multicast doit correspondre au mieux à toutes les contraintes imposées par l'application. Les critères sont souvent en contradiction : un chemin qui est favorable pour le délai peut être intolérable pour la gigue par exemple. Le routage multicritère unicast optimal est connu comme étant NP-difficile. C'est aussi vrai pour le routage multicast.

En général dans les travaux sur l'optimisation du routage multicritère, les métriques sont supposées additives. En effet, les métriques concaves peuvent être traitées par élagage de l'espace de recherche et les métriques multiplicatives peuvent être transformées en des métriques additives équivalentes. L'algorithme le plus efficace pour le routage multicritère multicast est l'algorithme MAMCRA, proposé par Kuipers en 2002. Cet algorithme calcule le plus court chemin optimal (en utilisant une longueur non linéaire) pour chaque destination. L'ensemble des chemins peut contenir des cycles. Dans MAMCRA, une partie des cycles est éliminée par un algorithme glouton, étant donné que le problème de l'élimination de la redondance maximale est aussi NP-difficile. Nous avons examiné ce deuxième problème de l'élimination des cycles et nous avons proposé une solution méta-heuristique performante. Une solution également gloutonne, l'algorithme ICRA, qui élimine plus de cycles que MAMCRA a été développée dans [Ben Ali et al., 2008a].

Dans la présentation de MAMCRA, le problème du multicast multicritère a été formulé comme la recherche des solutions faisables de la source aux destinations mais aussi comme la recherche de la solution optimale en terme de longueur non linéaire. Nous remettons en question cette deuxième formulation du problème qui se trouve peu réaliste. En effet, il ne s'agit pas de minimiser le coût non-linéaire total de l'arbre. Il s'agit plutôt de trouver un arbre faisable qui satisfait les contraintes entre la source et chaque destination avec un nombre minimal de sauts ou un coût minimal sur chaque branche. Nous avons proposé une solution pour ce problème d'optimisation sous la forme d'un sous-graphe de longueur minimale qui peut contenir des cycles mais qui correspond toujours à une hiérarchie [Ben Ali et al., 2006].

Nous avons analysé l'impact de la QoS multicritère sur la possibilité de l'agrégation d'arbres multicast. En supposant une décomposition en arbres simples, l'agrégation présente une solution efficace pour diminuer la taille des tables de routage [Ben Ali et al., 2007].

3.2.5 Agrégation des arbres multicast

Le multicast est relativement faiblement déployé dans l'Internet. Une des raisons est liée à la procédure d'acheminement et aux tables de routage IP dans les routeurs. Malgré le nombre très important d'adresses unicast à traiter par les routeurs, la table de routage des adresses unicast reste très limitée grâce à la possibilité du routage selon le préfixe des adresses (l'adresse unicast donne des informations sur l'appartenance à des réseaux physiques). Les adresses multicast du monde IP n'ont pas la même signification ; chaque groupe a une adresse unique arbitraire. Le routage agrégé et en conséquence une table de routage réduite ne sont pas possibles.

L'agrégation des arbres multicast similaires pour effectuer le routage selon une même adresse ou un même label peut largement aider dans le déploiement du multicast. L'union des arbres similaires a été discutée dans deux thèses menées dans l'équipe. Nous avons étudié le nombre d'arbres communs en utilisant l'agrégation dans [Mouliercac and al., 2006a]. Ce nombre reste maîtrisable dans les petits domaines.

La performance de l'agrégation dans les grands réseaux est très faible. Pour augmenter le nombre des structures unifiées, nous avons proposé le découpage des domaines.

La qualité de service des arbres doit être respectée quand il s'agit de faire des agrégations. Une base de données supplémentaire sur les paramètres de la QoS permet non seulement l'agrégation des groupes avec des contrats similaires mais aussi la recherche rapide des arbres candidats dans la base [Moulierac 2006].

3.2.6 Problème de Steiner dans les réseaux

Depuis le modèle de Deering sur le multicast, le support envisagé pour les communications multicast correspond à un arbre couvrant partiel. Souvent, les protocoles construisent ou utilisent des arbres des plus courts chemins. Quand l'objectif est de réduire le coût des communications, les arbres couvrants partiels minimaux (appelés également arbres minimaux de Steiner) deviennent plus intéressants. La construction d'un tel arbre étant NP-difficile, plusieurs algorithmes heuristiques fournissant un arbre approché en un temps polynomial ont été formulés.

Nous nous sommes intéressés à trouver de bons compromis qui peuvent diminuer la longueur de l'arbre construit en utilisant un temps de calcul raisonnable (toujours polynomial). L'étude des heuristiques connues et les propositions améliorantes de Zelikowsky en 1993 nous ont conduit à des algorithmes de construction de l'arbre approché qui établissent les connexions entre les sous-arbres existants de l'arbre couvrant partiel à l'aide des arbres minimaux de Steiner simples (les plus courts chemins sont aussi des arbres de Steiner couvrant deux sommets). Notre première proposition concerne la modification de l'heuristique bien connue de Kruskal. Dans cette nouvelle heuristique, nous avons proposé la connexion des sous-arbres à l'aide des arbres de Steiner. L'avantage de cette heuristique est qu'elle peut être parallélisée d'une façon efficace. L'idée des connexions avec des arbres peut être également appliquée sur l'heuristique de Takahashi et Matsuyama, notre proposition algorithmique se trouve dans [Molnar 2008]. Les algorithmes proposés donnent une nouvelle famille d'heuristiques pour le problème de Steiner dans les réseaux. Les connexions formées des arbres permettent d'introduire des distances particulières entre deux arbres : en supposant k nœuds de branchement au maximum dans la connexion, on peut parler des k -distances des arbres réalisées par des arbres de Steiner. Nous travaillons également sur le problème des bornes du ratio d'approximation des heuristiques proposées.

Nos heuristiques soulèvent la question suivante : quand on ajoute ou on connecte un arbre à un arbre couvrant partiel, la connexion risque de provoquer des boucles qui doivent être éliminées pour obtenir un nouvel arbre. Mais quelle partie de l'arbre original peut être supprimée afin d'éliminer les boucles ainsi formées ? En général, la structure pouvant être éliminée est une forêt. Trivialement, la forêt de longueur maximale doit être supprimée pour obtenir un nouvel arbre de longueur minimale. Dans nos études, nous donnons des méthodes de réduction efficaces du problème posé ainsi qu'une solution algorithmique pour trouver la forêt déductible de longueur maximale.

La gestion des groupes multicast implique et suppose des solutions efficaces au niveau du routage. Dans les réseaux fortement dynamiques, il faut souvent recalculer les routes. C'est encore plus vrai pour les arbres multicast. La dynamique des groupes ne vient pas simplement des changements topologiques mais aussi des changements des membres du groupe. Dans un environnement dynamique le routage a besoin de solutions algorithmiques pour réorganiser l'arbre le plus rapidement et le plus efficacement possible. Nous avons proposé une destruction en profondeur limitée et une reconstruction efficace des arbres multicast touchés par des changements fréquents. Cette proposition est basée également sur la reconnexion des sous-arbres séparés par des arbres minimaux de Steiner simples.

3.3 Réseaux d'accès

Au cours des quatre dernières années, nous avons étudié les réseaux d'accès sous plusieurs angles. Nous avons proposé d'utiliser les labels dans un réseau d'accès de type Ethernet commuté, nous nous sommes intéressés à une gestion économique de l'énergie lors du routage dans les réseaux sans fil, nous avons démontré la possibilité de construire une couverture multiple au sein d'un réseau de capteurs, enfin nous avons étudié la stabilité du routage dans les réseaux ad hoc.

Ces quatre travaux sont présentés dans les quatre sous-chapitres suivants.

3.3.1 Commutation de labels dans les réseaux Ethernet

Les évolutions récentes des réseaux locaux et de leurs applications ont imposé de nouvelles contraintes sur les commutateurs Ethernet. Ces contraintes ont mis en évidence les limites de la commutation Ethernet, notamment en ce qui concerne le passage à l'échelle, les services et le contrôle du réseau. Dans ce travail, nous avons repris comme dans ATM LAN Emulation ou Ethernet over MPLS, l'idée d'introduire la commutation de labels dans les réseaux Ethernet. Mais au lieu de remplacer les commutateurs Ethernet, nous avons proposé la modification de leur fonction d'acheminement [Feuzeu and Cousin, 2005]. De plus, nous avons déplacé les fonctions de contrôle du réseau des commutateurs vers une plate forme séparée. Nous avons démontré comment l'architecture obtenue améliore le contrôle, les services et les performances des réseaux locaux, tout en simplifiant les fonctions, et donc la complexité, des commutateurs Ethernet [Feuzeu, 2007].

Dans le cadre d'un projet industriel avec Alcatel-Stuttgart, nous avons développé une maquette de démonstration : elle propose une nouvelle architecture pour la gestion des réseaux d'accès multimédias. L'architecture est basée sur un réseau maillé dont les nœuds ont une fonction de commutation. Ces nœuds pouvant être interconnectés avec les liens optiques à très haut débit ou des liens sans fils. Cela permet de proposer un réseau d'accès flexible et à large bande qui peut s'adapter à la topologie voulue par l'opérateur. Un contrôleur est chargé d'effectuer la configuration du réseau et de ses nœuds. Il permet d'assurer des fonctions de contrôle d'accès, de contrôle de la qualité de service par réservation de ressources et de protection, le tout en tenant compte des besoins exprimés par les applications. Notre démonstrateur propose des algorithmes pour l'auto-configuration, le routage, et le reroutage rapide en cas de pannes de nœuds ou de liens.

3.3.2 Conservation d'énergie dans les réseaux sans fil

Un des problèmes majeurs des réseaux sans fil est la gestion de l'énergie des stations mobiles qui sont dotées d'une batterie à durée de vie limitée. Cette question de l'utilisation de l'énergie est encore plus lourde dans les réseaux ad hoc où les stations mobiles sont utilisées en tant que routeurs. Différentes politiques de contrôle de topologie et de conservation d'énergie ont été proposées pendant des stages Master menés à l'IRISA et dans le cadre d'une thèse [Idoudi, 2008].

Un mécanisme, appelé PSM, est défini dans la norme 802.11 pour permettre d'éteindre les stations qui n'ont pas d'activité de communication. Ce mécanisme permet alors de mettre un ensemble de routeurs en mode d'économie d'énergie, si le trafic est faible ou sporadique. L'état d'économie d'énergie des ensembles de routeurs introduit une latence importante au moment du démarrage des communications. Dans [Idoudi et al., 2006] [Belghith et al. 2006], nous avons proposé un mécanisme PAA (Power Aware Alternation) pour la conservation d'énergie qui dépasse cette limitation. La proposition est basée sur l'alternance des stations actives partout dans les réseaux ad hoc.

3.3.3 k-couverture dans les réseaux de capteurs

Les réseaux de capteurs sont des réseaux ad hoc basés sur des appareils communicants très simples. Les capteurs fournissent des informations mesurées sur leur environnement et les acteurs peuvent agir sur cet environnement. Dans certains cas, l'observation de l'environnement doit être redondante : chaque point de l'espace doit être mesuré par k capteurs indépendants. On parle alors de la k -couverture de l'espace. En général, les capteurs sont dotés de batteries de capacité très limitée. Pour assurer les observations dans un espace limité, les capteurs sont placés avec beaucoup de redondances. Ce qui permet de remplacer les capteurs qui ont épuisé leur énergie par d'autres. La durée de vie du réseau correspond au temps où le service (la k -couverture) est assuré par des sous-ensembles quelconques de capteurs. Une technique habituelle pour prolonger la durée de vie est l'alternance de capteurs actifs. L'alternance aléatoire n'assure pas nécessairement la k -couverture, une négociation synchronisée peut être très coûteuse et peu performante.

Pour trouver un bon compromis, nous avons proposé un algorithme d'ordonnement des capteurs dans [Simon et al., 2008]]. Cette proposition repose sur les informations réunies dans le voisinage direct des capteurs. La priorité pour éteindre un capteur est basée sur le niveau de l'énergie de l'appareil ainsi que sur la redondance des régions qu'il surveille. Cet algorithme distribué présente des performances remarquables, proche de l'optimum. Sa capacité d'adaptation et ses performances ont

été démontrées dans une topologie de type anneau, facile à calculer [Pocquet et al., 2008]. Les aspects de sécurité de la solution sont discutés dans [Pocquet et al., 2007].

3.3.4 Routage stable dans les réseaux ad hoc

Dans les réseaux MANET fortement dynamiques, le routage est aussi très instable. Cette instabilité vient majoritairement de la mobilité des routeurs mais aussi de la disparition et la réapparition soudaines de certains nœuds. Trouver des algorithmes favorisant les routes avec une espérance de vie importante est la cible de notre recherche. Pour ce faire, la modélisation pertinente des réseaux dynamiques et l'analyse des algorithmes de routage qui sont capables de palier au problème des incertitudes et de la forte dynamique sont nécessaires. L'article [Idoudi et al., 2007] démontre l'impact des incertitudes dans les cas des protocoles de routage proactifs. L'optimalité et la validité des routes calculées par les algorithmes de routage probabilistes proposés sont discutées dans [Idoudi et al., 2008] et [Idoudi et al., 2008a]. Pour palier à ce problème, un modèle markovien efficace et simple a été proposé dans [Marie and Molnar, 2007] [Marie et al., 2007] pour pouvoir calculer les routes avec les aléas dans les réseaux MANET. Dans ce modèle, les éléments du réseau sont modélisés par des automates à deux états (on et off). Différents cas de la fonction de distribution des transitions ont été analysés. Les premiers résultats d'un protocole probabiliste sont illustrés dans [Idoudi, 2008].

3.4 Conclusion

Dans le cadre de ses travaux de recherche, notre équipe (de trois membres permanents), lors des quatre dernières années, comptabilise douze publications dans des revues et cinquante-six publications dans des conférences internationales avec comité de sélection. Par ailleurs neuf thèses ont été soutenues et un des membres de l'équipe a obtenu son Habilitation à Diriger les Recherches en 2008.

On a vu que l'un des thèmes majeurs de recherche de notre équipe est le routage multicast, toutefois la présentation précédente souligne clairement que ce thème a été abordé sous bien des aspects, par exemple nous l'avons étudié dans le cadre des réseaux d'accès (au sein des réseaux Ethernet commutés et utilisant des labels), mais nous l'avons étudié dans le cadre des réseaux d'infrastructure (pour IPv6 ou bien encore au sein de MPLS ou des réseaux optiques). Nous allons voir que nous allons conserver et étendre cette thématique centrale dans les années prochaines.

4 Défi scientifique

4.1 Présentation

L'objectif ultime des travaux de recherche de l'équipe est d'assurer un service de communications efficace et robuste pour les applications futures. L'efficacité requiert une bonne architecture fonctionnelle qui propose une bonne répartition des rôles et minimise l'échange des données nécessaires au contrôle. Elle doit être complétée par une bonne algorithmique qui permet d'obtenir une bonne solution dans un temps minime. Nous nous plaçons délibérément dans le cadre du contrôle optimal des réseaux informatiques

On désire proposer des techniques qui suppriment ou minimisent les nombreuses contraintes qui interviennent au niveau des communications, et plus spécifiquement au niveau du routage de ces communications. Parmi les très nombreuses contraintes possibles, on peut citer les ressources du réseau dont la disponibilité est limitée, ou bien encore celle qui impose l'utilisation d'une même longueur d'onde sur les liens formant un chemin dans un réseau optique. On veut minimiser ces contraintes, en tenant compte pour choisir les meilleures routes à travers le réseau. En effet, on anticipe que les nouvelles applications multimédia réparties demanderont de plus en plus une garantie au niveau du maintien de la qualité de leurs communications. On se placera délibérément dans un cadre prospectif où les applications de type "Triple Play" seront largement déployées, et où les réseaux d'accès et d'infrastructure offriront un maillage et des performances extrêmement élevées, notamment grâce à l'utilisation de réseaux de nouvelle génération. Notre étude présente un certain nombre d'originalités, premièrement la très grande taille des réseaux considérés, leur hétérogénéité, l'alliance intime des réseaux d'infrastructure et d'accès, des réseaux à très grand débit (notamment optiques) et des réseaux sans fil, deuxièmement on se place dans un futur où des millions de connexions devront être gérées (chaque usager pouvant établir plusieurs dizaines de connexions simultanément).

Dans ce contexte de réseaux offrant des communications efficaces et robustes, on proposera des solutions qui gèreront la multitude, solutions qui devront s'intégrer au sein des équipements et parmi les protocoles utilisés réellement par le réseau. Cette intégration permettra d'obtenir les meilleures performances. Nos architectures, nos méthodes, nos algorithmes aborderont cette multitude dans tous ces aspects, à savoir :

1. Multitude des connexions à gérer
2. Multitude de types de connexions de différentes qualités : gestion de la QoS
3. Contraintes multiples issues des éléments du réseau
4. Multitude de couches protocolaires en jeu
5. Pannes multiples : pannes apparaissant simultanément
6. Adaptation multiple dans le temps ou dans l'espace
7. Distribution : coordination des points de calcul multiples
8. Multitude de destinataires : multicast
9. Forme multiple d'un groupe : variation rapide des membres constituant un groupe
10. Calcul de routes en respectant de multiples contraintes

Par la suite, dans ce chapitre, nous allons montrer que les défis que notre équipe veut relever se situent dans différentes dimensions. Puis nous présenterons les trois principaux défis à savoir : le routage multicast, le routage multi-domaine et le routage multicritère.

4.2 Plan d'analyse des défis

On peut analyser les défis, que l'on veut relever dans le cadre de réseaux de nouvelle génération, suivant trois plans d'analyse: les thèmes de recherche, les types de réseaux, les types de solutions.

Le premier plan d'analyse des défis que nous voulons relever dépend fort logiquement des thèmes de recherche que nous voulons étudier. Ces thèmes sont au nombre de cinq : le multicast, la

protection, le multi-domaine, le multicritère multi-contrainte, et la surveillance. Ce sont ces thèmes qui guideront notre exposé par la suite. Nous avons choisi de les présenter dans trois grands sous-chapitres (routage multicast, routage multi-domaine et routage multicritère) pour minimiser leur combinatoire. De plus nous verrons que les travaux que nous nous proposons d'entreprendre sont toujours à la convergence de plusieurs thèmes. Cela est fort compréhensible, et cela constitue pour une grande part l'originalité et la richesse de nos travaux.

Le deuxième plan d'analyse est le type de réseaux (et donc le type de pile protocolaire) sur lequel nos thèmes de recherche s'applique. Parmi ceux-ci, on trouve le futur Internet (notamment IPv6), MPLS (notamment MPLS-TE), les réseaux optiques (notamment WDM). On pourrait s'étonner que notre recherche ne s'applique pas à n'importe quel réseau. Bien entendu, c'est ce que nous essayons de faire autant que possible. Toutefois il ne faut pas ignorer la spécificité de chacun de ces réseaux, et donc la raison même de leur existence. S'ils étaient équivalents, il en suffirait d'un seul.

Finalement le troisième plan d'analyse opère suivant le type de solutions produites : algorithmes, architectures et protocoles, outils. La plupart de nos travaux a pour but de concevoir plusieurs, si ce n'est la totalité, de ces types de produits.

Nous allons montrer l'intérêt de chacun de nos défis et la synergie obtenue sur chacun de ces thèmes.

4.3 Le routage multicast

4.3.1 Présentation

Ce thème est probablement l'un des plus anciens partagés par les membres de l'équipe. Nous l'avons déjà abordé sur bien des points de vue, par exemple le multicast explicite sur IPv6 [Boudani and Cousin, 2005], l'agrégation d'arbres multicast [Moulierac et al., 2006], l'ordonnancement des paquets multicast dans les commutateurs ATM avec Mudassir Tufail en 1998, la proposition de protocole multicast (cf. les drafts IETF de A. Boudani et B. Cousin en 2003 et 2004) ou la conception de simulateur pour le multicast avec C. Jawhar en 2003.

Nous voudrions l'aborder suivant des axes nouveaux et complémentaires : la protection multicast et le routage optique multicast. Comme démonstration de cette complémentarité, on notera que la protection multi-domaine sera traitée dans un des sous-sous-chapitres (le §4.4.3) du sous-chapitre 4.4 traitant des réseaux multi-domaines et que le routage optique multicast se nourrira directement ou indirectement des résultats produits par le sous-chapitre 4.5 traitant du routage multicritère.

4.3.2 Protection multicast

La robustesse des communications (c'est-à-dire des communications ne présentant aucune interruption ou bien présentant des interruptions de durées très limitées) va devenir un point d'autant plus sensible dans les réseaux de nouvelle génération que le débit offert par ces réseaux va être important et que les applications multimédias qui les utilisent sont plus sensibles aux délais, pertes et interruptions. Assurer une certaine robustesse des communications requière l'utilisation d'équipements d'interconnexions redondants. Ce qui a comme conséquence de produire un réseau à topologie maillée. On désire s'appuyer sur la possibilité qu'offre ce type de topologie de produire plusieurs routes entre deux points du réseau, pour protéger nos communications : chaque route principale sera accompagnée d'une ou plusieurs routes de secours.

Dans le cadre de la protection, nous voulons plus spécifiquement étudier la constitution d'arbres de diffusion multicast pour les réseaux MPLS. Il y a très peu de travaux dans ce domaine, en effet la plupart des travaux de recherche se focalise sur les communications point-à-point. Habituellement les types de risques de pannes simples sont gérés et pris en compte : panne d'un nœud ou panne d'un lien. Nous allons nous intéresser aux pannes de type SRLG (Shared Risk Link Group). Ce qui est très innovant car cela nous permet de tenir compte de pannes multiples. Un SRLG est formé d'un ensemble

de liens partageant une ressource physique et donc, pouvant tomber en panne simultanément. Un exemple de SRLG est produit par un commutateur optique produisant deux chemins optiques entre deux couples de nœuds. Si le commutateur tombe en panne les deux chemins optiques tombent simultanément en panne alors que rien ne lie les nœuds à leur extrémité.

Le temps de réaction aux pannes doit être minimal (par exemple pour une application interactive, il est généralement estimé à moins de 100 ms, c'est-à-dire en-dessous du seuil de perception humaine). Ceci a pour conséquence de favoriser les protections dites locales. Contrairement à la protection globale où l'activation d'un seul chemin de secours de bout en bout suffit pour récupérer d'une panne affectant un chemin primaire (à la seule condition que ces chemins soient disjoints), la protection locale peut nécessiter l'activation simultanée de plusieurs chemins de secours pour restaurer une seule communication. Nous avons là l'opportunité de réaliser une économie des ressources allouées à la protection.

En effet, lors d'une panne d'un SRLG affectant plusieurs liens d'un même chemin primaire, tous les chemins de secours protégeant contre la panne d'un lien appartenant au SRLG affecté sont activés par leur routeur de tête (PLR) pour faire face à la panne. En constatant que certains chemins de secours activés, après une panne d'un SRLG, ne participent pas réellement au processus de récupération (car ils ne reçoivent aucun flux de données), nous augmentons la disponibilité de la bande passante en restreignant la concurrence pour les allocations de la bande passante (de secours) aux chemins de secours recevant effectivement du trafic après la panne du SRLG (c'est-à-dire, seuls les chemins de secours recevant du trafic après une panne d'un SRLG réservent la bande passante). Par ailleurs, nous obtiendrons plus de flexibilité pour le choix des chemins de secours protégeant contre les liens appartenant à des SRLG en réduisant le nombre de chemins de secours dédiés à la protection d'un SRLG. Ainsi, il ne sera plus nécessaire de contourner systématiquement tous les liens partageant un même SRLG avec le lien protégé lors du placement d'un nouveau LSP de secours.

Il est probable que cette technique sera d'autant plus intéressante que nous voulons protéger des arbres multicast où le nombre de chemins pouvant être activés lors d'une panne est grand.

Ce travail s'applique naturellement aux réseaux de nouvelle génération pour lesquels ce service de protection est primordial pour un certain nombre d'applications critiques. Cela est vrai d'autant plus que le réseau offre un très haut débit et qu'un très grand nombre de communications est susceptible de passer par un même lien et donc de subir une perturbation simultanément. C'est pourquoi nous nous intéressons tout particulièrement au réseau MPLS, qui est une technologie essentielle pour l'internet du futur. En effet, la notion de labels permet gérer élégamment à la fois la QoS, la protection des routes et les arbres multicast.

4.3.3 Routage multicast dans les réseaux optiques

Grâce à leur débit important et à leur robustesse, les réseaux tout optiques sont de bons candidats pour réaliser le cœur des réseaux de future génération. Les fibres optiques assurent des capacités de plusieurs Tbit/s, sur plusieurs dizaines de km avec une atténuation faible. De plus la lumière n'est pas sensible aux perturbations électromagnétiques. Pour assurer les communications de bout en bout, des commutateurs optiques (pour les réseaux optiques transparents) ou électroniques (pour les réseaux optiques opaques) de capacité importante doivent être employés. En fonction de la technologie utilisée (et du surcoût tolérable), les commutateurs optiques introduisent des contraintes physiques différentes. Par exemple on peut citer l'absence ou la présence de convertisseurs de longueur d'onde, la rareté des dispositifs pouvant dupliquer la lumière, la localisation des amplificateurs optiques implantés à des endroits spécifiques.

Le dimensionnement de la topologie logique produite par les chemins optiques et la conception de ces chemins et de ces arbres optiques nécessitent des algorithmes spécifiques qui tiennent compte des contraintes. C'est d'autant plus vrai pour le routage multicast. Les différents problèmes (capacité et emplacement de convertisseurs d'onde, des splitters et des amplificateurs) sont largement étudiés dans la littérature, mais la superposition des problèmes, la recherche des méthodes applicables dans les réseaux contenant des commutateurs hétérogènes et des contraintes de toute sorte est un défi majeur. C'est pourquoi nous voulons proposer des algorithmes de routage multicast en cas d'un réseau optique ayant de multiples contraintes hétérogènes.

Récemment, nous avons prouvé que les routes optimales (par exemple de coût minimal)

multicast sous contraintes ne sont pas toujours des arbres. Les contraintes déforment l'arbre. La structure qui correspond à la solution optimale est une *hiérarchie*. Les hiérarchies sont des généralisations du concept d'*arbre* : dans une hiérarchie, une occurrence d'un élément a un seul prédécesseur (comme c'est le cas dans les arbres) mais un même élément (un commutateur ou un lien optique) peut être présent plusieurs fois dans la route hiérarchique. Pour la conception future des réseaux optiques multicast, nous comptons concevoir des algorithmes qui construisent des hiérarchies optiques et sous différentes contraintes. Une multitude de fonctions d'objectif représentent l'ensemble des cas pouvant être intéressants pour le dimensionnement de la topologie optique : multicast de coût minimal, multicast qui minimise la charge des liens, multicast qui maximise l'énergie des signaux, etc. Nos algorithmes tiendront compte de l'emplacement des convertisseurs, des splitters et des amplificateurs ainsi que des capacités des liens et de la disponibilité des longueurs d'ondes.

Les résultats doivent être examinés pour des éventuelles applications orientées connexion et aussi dans les réseaux qui fonctionnent par commutation des rafales (par bursts optiques). Dans ce dernier type de réseaux optiques, la validité de la configuration de la topologie logique est limitée dans le temps (durée des rafales) et dans l'espace (routes configurées pour les rafales). La difficulté accrue du dimensionnement logique des rafales vient du fait que les rafales doivent être coordonnées et les contraintes du réseau doivent être toujours respectées.

4.4 Le routage multi-domaine

4.4.1 Présentation

L'Internet est aujourd'hui un ensemble composite de réseaux physiques de collecte et de transport de données. Cette multiplicité (et la complexité associée) va s'accroître grandement avec l'offre de nouveaux services. En effet, de nombreux services émergents dans l'Internet font ou feront intervenir des acteurs divers tels que les opérateurs de réseaux de données, les opérateurs de réseaux de transport, mais aussi et surtout les fournisseurs d'accès, les fournisseurs de contenu, les fournisseurs de recherche de contenu, ... Il s'avère que l'interaction entre ses différents acteurs est nécessaire pour effectuer la mise en œuvre des services et surtout garantir leur performance. Actuellement, les solutions déployées ne permettent qu'une interaction statique (essentiellement au niveau du routage entre domaines) et constituent un frein au déploiement de nouveaux services à la demande. D'autant plus que le nombre d'acteurs dans la chaîne de fourniture de services est en pleine croissance et les modèles économiques utilisés par ces acteurs sont généralement différents, ce qui rend l'interaction encore plus difficile et motive la recherche de solutions efficaces.

Notre étude va se focaliser sur les solutions de fourniture de services utilisant les ressources de plusieurs opérateurs de réseaux. Nous introduirons notamment le concept d'alliance d'opérateurs. Les travaux menés dans le cadre de notre étude ont pour but d'identifier les limitations du modèle actuel, d'étudier l'adéquation de solutions existantes et de proposer des solutions innovantes qui permettent de dépasser les limitations.

Nous envisageons trois pistes intéressantes dans ce cadre inter-domaine : la composition d'éléments de services dans un réseau multi-domaine, la protection des communications traversant plusieurs domaines, et la surveillance du respect des contrats liant les différents acteurs pour assurer un service de bout en bout.

4.4.2 Composition d'éléments de services dans un réseau multi-domaine

Les services inter-domaines bénéficient actuellement du surdimensionnement des ressources dans les réseaux. Ce surdimensionnement est couplé avec un service de transmission de type "best effort" sans réelle garantie de performances. Cependant l'émergence des applications de type télévision sur IP ou téléphonie sur IP nécessite l'amélioration du modèle de service. Le nouveau défi des réseaux multi-domaines consiste à étendre les architectures actuelles de façon à assurer le support

de la qualité de service de bout en bout. Cette évolution doit respecter les contraintes techniques et économiques des opérateurs afin de faciliter son adoption. En particulier, les contraintes techniques résultent de l'hétérogénéité des infrastructures de réseaux multi-domaines. Cette hétérogénéité nécessite la définition de nouveaux concepts de haut niveau pour la fourniture de la qualité de service de bout en bout. De plus, les opérateurs considèrent que les informations sur les ressources de leurs réseaux sont confidentielles. Cependant, la fourniture de services inter-domaines à garantie de performances requiert une collaboration entre les domaines. Cette collaboration ajoute de nouvelles contraintes économiques sur le modèle d'interaction entre opérateurs. En effet, cela est exacerbé, si on envisage un service de transmission différencié. Par exemple, on pourrait observer certains opérateurs proposer des services différenciés à leurs clients (et donc engranger des revenus supplémentaires); mais pour fournir ses services, ces opérateurs achèteraient de la bande passante sans qualité à d'autres opérateurs en comptant sur le surdimensionnement pour assurer la qualité de service de bout à bout. On constate alors que les opérateurs de cœur ne reçoivent aucun dividende des surplus dégagés aux extrémités. Ainsi, de nouveaux modèles économiques sont nécessaires pour gérer la qualité de service de bout en bout.

Les architectures émergentes, qui proposent des solutions pour la fourniture de services à garantie de performances, nécessitent des extensions au plan de contrôle et de gestion et proposent un plan de service inter-opérateur. Afin de respecter les contraintes de confidentialité des domaines, les ressources sont représentées dans le plan de service par des éléments de services. Chaque élément de service dénote les attributs de qualité de service et le coût des ressources dans un domaine. Ces éléments de service sont combinés pour constituer le service de bout en bout.

Dans nos travaux, nous proposons d'étudier la spécification des éléments de service par domaine. Cette spécification impose un compromis entre la multiplication des offres pour s'adapter à la demande et la minimisation de la gestion et du contrôle du réseau. Nous étudions aussi la combinaison des éléments de service en provenance de plusieurs opérateurs. Ceci inclut la négociation et l'optimisation des critères de qualité de service.

4.4.3 Protection du routage multi-domaine

La survivabilité des réseaux multi-domaine est la capacité qu'un chemin traversant plusieurs domaines survive à la panne d'un ou plusieurs composants du réseau. Pour parvenir à offrir cette propriété dans un réseau quelconque il faut réaliser les deux tâches suivantes. La première est de collecter l'état des éléments du réseau et de maintenir cette connaissance à jour. La deuxième est de trouver et de réserver les ressources pour les chemins primaires et les chemins de secours pour les communications à établir au sein du réseau. Les chemins sont déterminés en utilisant les informations collectées lors de la première tâche. L'état du réseau est généralement obtenu en diffusant l'état des éléments du réseau entre les nœuds du réseau. Plus la taille du réseau croît, plus il devient difficile de diffuser les informations nécessaires à une connaissance parfaite de l'état du réseau : la quantité d'information s'accroît et leur fraîcheur potentiellement diminue.

Ce dilemme est résolu facilement pour le routage normal, en s'appuyant sur le partitionnement naturel produit par les domaines de routage des différents entités (parmi ceux-ci les opérateurs de réseau) qui participent à la constitution du réseau. Chaque domaine dans le réseau multi-domaine est sous la responsabilité d'une seule et unique entité. Une route est formée par la séquence des domaines de routage qu'elle doit traverser pour atteindre son destinataire, et, au sein de chaque domaine, par la séquence de routeurs qu'elle doit traverser pour atteindre le prochain domaine. On obtient donc un routage hiérarchique à deux niveaux : l'un interne à chaque domaine, l'autre inter-domaine.

Pour des raisons de sécurité ainsi que de passage à l'échelle, une entité d'un domaine ne peut pas avoir une vision complète de tout le réseau auquel elle appartient. En effet, la topologie détaillée de chaque domaine (caractéristiques des liens, nœuds et sous-réseaux) souvent n'est pas communiquée à l'extérieur du domaine. Par conséquent, le calcul des chemins primaires et de leurs chemins de protection devient difficile.

Les solutions de protection des réseaux multi-domaines proposées dans la littérature peuvent être classées en deux classes : celle des solutions indépendantes et celle des solutions spécifiques. Dans la première classe des solutions, la protection multi-domaine est réalisée à l'aide de la protection individuelle de chaque domaine. C'est-à-dire chaque autorité protège de manière indépendante la

partie du chemin primaire qui traverse son domaine. L'avantage de cette technique est qu'elle est relativement simple, et elle est adaptée à l'environnement multi-domaine où la vision globale du réseau est absente. L'inconvénient majeur de cette solution est lié à la difficulté de protéger les liens inter-domaines, et une certaine sous-optimalité.

Dans le cas des solutions spécifiques, les domaines coopèrent entre eux afin d'offrir une protection de bout en bout. Les informations liées à la topologie (les capacités des liens, nœuds) de chaque domaine doivent être échangées périodiquement entre les domaines. Ceci permet aux nœuds concernés par le calcul d'avoir une vision suffisante (souvent partielle) du réseau, qui va leur permettre de construire les chemins primaires ainsi que les chemins de secours. L'avantage de cette technique est qu'elle assure une bonne gestion de ressources entre les domaines du réseau. Mais l'échange d'informations entre domaines rend cette approche moins attrayante pour le passage à l'échelle.

Nous nous proposons d'étudier les solutions spécifiques pour protéger un réseau multi-domaine. Notre solution pourra être basée sur la protection par p-cycles car cette technique présente un taux de redondance faible. Nous voulons considérer aussi les techniques d'agrégation car elles permettront de représenter la topologie interne d'un domaine de manière compacte et, on l'espère, appropriée.

4.4.4 Monitoring du routage multi-domaine

Les fonctionnalités à mettre en place au niveau plan de service inter-opérateur ont été identifiées : la publication d'éléments de service, la négociation et la composition de ses éléments de service, la surveillance du contrat du service.

Grace à la publication d'éléments de service, chacun des partenaires appartenant à une alliance publie au sein d'un annuaire (qui peut être centralisé par l'entité tierce ou distribué) les éléments de service qu'il veut mettre à la disposition de l'alliance. Lors de leur publication d'un élément de service, le fournisseur offre des garanties sur différents paramètres de qualité de service qu'il s'engage à respecter et donc à provisionner si l'élément est sélectionné. Il est à noter que le fournisseur de services peut vouloir délibérément ne pas publier certaines informations car elles sont considérées comme faisant partie de sa stratégie technico-commerciale. Cela peut être le cas du coût financier réel d'un élément de service ou la capacité de l'opérateur à le fournir à certain instant (par ex. : la bande passante disponible à un point précis du réseau lors d'une surcharge peut vouloir être cachée).

Lors de la négociation d'éléments de service pour la composition d'un service multi-domaine, un contrat de bout-en-bout doit être construit entre les différents acteurs. Chaque acteur est éventuellement interrogé afin de vérifier la disponibilité de l'élément et d'obtenir ses caractéristiques techniques et son prix. Une proposition est alors faite au client qui, s'il l'accepte, débouche sur la réservation (instanciation et activation) effective du service.

La surveillance des contrats de services (appelé aussi monitoring) a pour objectif d'observer le service rendu et le fonctionnement des éléments de service sélectionnés. Elle peut permettre de connaître de façon macroscopique l'état du domaine de chaque opérateur. Cette fonctionnalité est essentielle dans la mesure où, en cas de rupture d'un service, un acteur encoure des pénalités. Enfin et surtout déterminer ces actions correctrices est un enjeu central quant à la mise en œuvre des services multi-domaines.

De manière assez originale, nous n'allons pas nous intéresser aux mécanismes de détection des services qui ne respectent pas leur contrat (ni aux mécanismes de diagnostic des éléments de service qui ne respectent pas le leur). En effet, il existe de nombreux travaux dans ce domaine, et même si ce thème de recherche est très intéressant et les approches très nombreuses, nous ne nous y attacherons pas car la plupart d'entre eux ne s'intéresse pas spécifiquement aux services offerts dans un cadre multi-domaine. Nous allons plutôt nous intéresser aux mécanismes de rétrocontrôle qui devraient permettre soit d'inciter un acteur à collaborer plus efficacement, soit de l'écarter plus radicalement. Nous étudierons donc le post-traitement suite à une détection de rupture de contrat, car à notre connaissance ce sujet n'a jamais été abordé dans ce contexte multi-domaine.

Ce travail sera appliqué principalement au réseau Internet, et nous nous proposons d'effectuer une étude architecturale, notamment pour déterminer les fonctionnalités de la ou les entités chargées

d'appliquer la politique de rétroaction, ceci afin de concevoir leur protocole d'échange et pour développer les algorithmes chargés d'appliquer ces politiques.

4.5 Le routage multicritère

4.5.1 Présentation

Les problèmes d'optimisation les plus difficiles sont souvent des problèmes qui peuvent être formulés de plusieurs façons différentes et en utilisant des critères d'optimalité multiples. Les critères peuvent être plus ou moins indépendants (ou pire en contradiction entre eux). Dans les réseaux informatiques, ces problèmes d'optimisation multicritère sont fréquents et interviennent à tous les niveaux.

Dans les réseaux de future génération, la dynamique du réseau ou la mobilité des utilisateurs soulèvent des problèmes d'optimisation avec plusieurs critères dont on doit tenir compte simultanément. La technique de l'optimisation multicritère est donc incontournable pour résoudre ces problèmes. Dans le routage, on retrouve très fréquemment ces problèmes. L'entrée en jeu de la QoS dans le routage est un bon exemple de la présence de l'aspect multicritère des problèmes à résoudre. L'optimisation du routage multicast et la présence de plusieurs contraintes et critères est un défi qui s'inscrit dans la continuité de nos activités. La recherche des solutions faisables dans l'Internet du futur qui devra assurer un grand nombre de communications avec des critères très variés et en utilisant des services traversant plusieurs domaines de routage autonomes s'inscrit sur la liste de nos sujets de recherche. Comme application des techniques d'optimisation multicritère, on peut également citer la question de la performance des protections des communications. Le temps de récupération des communications interrompues par une panne, le coût total du système de protection, l'impact de la solution sur la capacité utile du réseau sont des critères qui ne peuvent pas être satisfaits ensemble et au même niveau.

Dans ce cadre, nous allons proposer deux axes de travail : l'optimisation multicritère des routes multicast et l'optimisation multi-objectif du routage multicast sous contrainte. Nous tenons toutefois à souligner que l'étude, le développement et l'application des méthodes d'optimisation multicritère est applicable et très utile dans pratiquement dans toutes les axes de notre recherche.

4.5.2 Optimisation multicritère des routes multicast

Le routage (les calculs des routes) devient plus complexe dès qu'il y a plusieurs objectifs à suivre lors de la construction des routes. Par exemple la route doit simultanément assurer une capacité de transmission B et garantir un délai de bout en bout inférieur à une valeur D avec un taux de perte inférieur à P . Le problème du routage unicast multicritère est déjà un problème connu comme étant NP-difficile. Pour le multicast multicritère, des algorithmes, qui sont capables de calculer des solutions si elles existent, ont été proposés (par ex. l'algorithme MAMCRA). Ces algorithmes calculent des chemins multicritères avec des algorithmes de complexité élevée. Un de nos objectifs est la recherche de compromis entre garantie de la solution et temps de calcul.

Dans la recherche des solutions, on distingue des solutions faisables (celles qui satisfont les critères) et des solutions optimales (celles qui optimisent un critère particulier, souvent combiné à partir des critères primaires imposés). La complexité théorique de la recherche des solutions faisables correspond à celle du problème optimal. Ce qui n'empêche pas de trouver, dans des cas particuliers, des solutions faisables obtenues avec des algorithmes de faible complexité. Notre parfaite connaissance du domaine des réseaux devrait nous permettre de faire apparaître ces cas particuliers, lorsqu'ils existent.

Une possibilité de l'élargissement des méthodes moins coûteuses est d'analyser l'impact des fonctions d'objectif et de la dominance utilisée pour la comparaison des solutions (c'est-à-dire des routes).

Nous avons analysé récemment la structure optimale du routage multicast multicritère. Notre analyse montre que cette structure ne correspond pas à un ensemble d'arbres mais à une hiérarchie. La recherche intensive des hiérarchies couvrantes partielles dans le cas de l'optimisation multicritère est nécessaire et figure parmi nos axes de recherche.

4.5.3 Optimisation multi-objectif du multicast sous contrainte

Le multicast sous contrainte (par exemple dans les réseaux optiques) est un axe important de notre programme de recherche. Notre expérience montre que l'optimisation des routes (des hiérarchies) multicast optiques peut être envisagée selon des critères différents et souvent contradictoires. La plupart des algorithmes qui peuvent calculer les routes sont performants pour un critère donné. Par exemple, l'algorithme de routage multicast optique Reroute2Source garantit un délai minimal mais le coût de la solution et la charge des liens peuvent être élevés. De plus, l'algorithme Member-Only donne des arbres à coût limité mais sans garantie sur le délai. Ces algorithmes produisent pour l'instant des arbres mais nous avons comme perspective de les adapter pour qu'ils produisent des hiérarchies. L'analyse de performance des algorithmes peut être envisagée dans l'espace de dimension k , selon k critères différents. Cette analyse multicritère augmentée par des méthodes multicritères de sélection de solutions donne des perspectives intéressantes pour comparer et construire des algorithmes de routage. Nous envisageons ce genre d'analyse dans le domaine du routage multicast sous contraintes optiques.

Cette méthode d'analyse peut naturellement améliorer nos investigations dans d'autres domaines. La recherche de structures de protection peut être citée comme deuxième domaine d'application. Une protection peut être caractérisée et analysée selon des critères différents et souvent indépendants ou encore en contradiction : garantie de la capacité de transmission, taux de redondance, temps de réaction, coût, garantie de la QoS, etc. La formulation en problème multi-objectif permettra de rendre la recherche de structures de protection plus efficace.

4.6 Conclusion

Notre domaine de recherche est déterminé par les différents défis cités ci-dessus que nous voulons aborder lors des prochaines années. Nous voulons concevoir des architectures, des algorithmes et des protocoles qui doivent permettre aux réseaux de mieux fonctionner, c'est-à-dire d'offrir de meilleurs services de transmission aux futures applications multimédias.

Nous nous proposons de nous focaliser sur le routage multicast, le routage multi-domaine et le routage multicritère. Le choix de ces trois points s'explique aisément. Le premier point de focalisation est le domaine où les membres de notre équipe a le plus d'expérience et d'expertise. Le deuxième point apparaît naturellement si on désire aborder les réseaux de très grande taille, ils compteront forcément plusieurs domaines et cette structuration (loin d'être un inconvénient) peut favoriser l'apparition de solutions efficaces. Le troisième point appréhende le problème du routage dans une composante complémentaire vis-à-vis des deux points précédents. En effet il l'aborde dans sa composante algorithmique. Finalement nous attendions une très bonne synergie par la combinaison naturelle des trois points focaux choisis.

Les principaux résultats attendus sont des architectures, des méthodes, des protocoles assurant des communications efficaces et robustes dans le cadre des types de réseaux traités; des solutions algorithmiques aux problèmes mentionnés; l'étude des performances des propositions; leur développement dans le cadre de simulateurs ou autres outils d'évaluation de performance, puis leur intégration dans une plateforme expérimentale.

5 Positionnement de l'équipe de recherche

Nous allons positionner nos travaux de recherche vis-à-vis des autres équipes de l'Irisa, bretonnes, nationales puis internationales.

5.1 Localement à l'Irisa

Il existe à l'Irisa trois équipes qui s'intéressent à des domaines de recherche proches des nôtres : Dionysos, ASAP et Distribcom.

L'équipe Distribcom développe des techniques et des algorithmes répartis pour la gestion de services et de réseaux de télécommunications. Dans la gestion de réseaux, habituellement les efforts portent principalement sur les questions d'architecture logicielle et de déploiement, sans étudier suffisamment les fonctions et algorithmes associés. Pourtant, le traitement des alarmes, l'optimisation des ressources, ainsi que les processus de négociation répartie pour la QoS sont des problèmes d'algorithmique. Distribcom propose d'étudier leurs algorithmes, en recherchant leur fondement et en s'appuyant sur la théorie de la concurrence. Parmi les différents axes de recherche étudiés au sein de Distribcom on trouve : le concept de gestion autonome d'un réseau (la surveillance, la configuration, le provisionnement, la gestion des alarmes et de la performance), le codage conjoint, les systèmes d'automates concurrents asynchrones, génération automatique du comportement d'un système. Nous partageons avec Distribcom, notre intérêt pour le contrôle et la gestion des réseaux. Notre approche est plus protocolaire et moins fondamentale. Par exemple notre équipe s'intéresse à l'insertion concrète des messages de contrôle dans un protocole spécifique, dans le but d'obtenir un modèle capable d'intégrer les contraintes techniques des réseaux actuels.

L'objectif annoncé de la recherche menée dans l'équipe ASAP est de fournir un ensemble d'abstractions et d'algorithmes dans le but de construire des applications distribuées. Ces applications peuvent utiliser un très grand nombre d'entités de calcul géographiquement réparties ayant des ressources limitées et potentiellement mobiles. Plus précisément la recherche dans l'équipe ASAP étudie les trois thèmes suivants : les modèles et les abstractions pour le calcul distribué, les algorithmes pair-à-pair dans les réseaux de senseurs, la gestion de ressources dans les réseaux de grande taille. Nos deux équipes partagent cette volonté affichée de proposer des solutions parfaitement adaptées aux systèmes de très grande taille. L'internet actuel est déjà un système offrant des millions d'entités qui collaborent. Nous avons une approche plus proche de la technologie, puisque nous voulons tenir compte des contraintes particulières provenant des choix technologiques fait par nos prédécesseurs. Par exemple, l'Internet actuel est structuré en domaines de routage. Nous désirons introduire nos propositions dans les équipements du réseau, donc ils doivent être adaptés ou raisonnablement adaptables aux protocoles dans les réseaux actuels. Notre application principale est l'Internet de demain et il sera construit à partir de l'Internet d'aujourd'hui.

L'équipe Dionysos travaille sur l'analyse des propriétés des systèmes de communications. Cet objectif est abordé sous deux angles complémentaires : les aspects qualitatifs des systèmes (architectures, protocoles, procédures de contrôle et 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). Les principaux thèmes de recherche sont la simulation, les modèles permettant l'évaluation numérique ou leur étude analytique, le test d'interopérabilité, la tarification, les réseaux optiques, les réseaux sans fil et les réseaux pair à pair. Une spécificité de l'équipe Dionysos et qui nous distingue est le développement d'outils mathématiques, s'appuyant notamment sur la technique de Monte Carlo, les chaînes de Markov ou leurs extensions. On note que les travaux de Dionysos portent de nombreux types de réseaux : les réseaux pair à pair, les réseaux sans fil, les réseaux optiques. La recherche sur les réseaux optiques dans l'équipe Dionysos recoupe un certain nombre de nos thématiques. En effet, afin d'utiliser les très grandes capacités inhérentes aux réseaux optiques, un chercheur de l'équipe Dionysos propose des mécanismes intelligents d'agrégation du trafic et des algorithmes de routage efficaces. Il a étudié aussi les mécanismes qui tiennent compte de la QoS pour de la protection des réseaux. Ce sont des points

que nous partageons. Toutefois les communications multicast ou bien multi-domaines dans un réseau optique n'ont pas été couvertes par les études de ce chercheur. Ce sont ces points qui nous intéressent tout particulièrement.

En conclusion, on remarque qu'aucune équipe à l'Irisa n'étudie les protocoles de routage pour un meilleur contrôle des réseaux informatiques en utilisant nos approches protocolaires, multicast, multi-domaine ou multicritère.

5.2 Régionalement

En Bretagne, dans notre domaine de recherche, on peut trouver des équipes travaillant sur quelques uns de nos thèmes, très partiellement à Nantes ou à Brest, et plus certainement à Rennes.

Au sein du laboratoire d'informatique de Nantes Atlantique une équipe de recherche (ROOM) propose des travaux en recherche opérationnelle et l'optimisation multi-objectif. Elle s'intéresse donc à l'étude, la modélisation et la résolution de problèmes d'optimisation essentiellement discrets, multi-objectif et de grande taille. Elle l'applique au traitement de problèmes socio-économiques tels que le transport ferroviaire (capacité d'infrastructures ferroviaires), le transport aérien (composition d'équipages à affecter à des vols), les réseaux de communication (politiques de distribution de l'information, déploiement de nouvelles infrastructures) et la santé (radiothérapie pour le traitement des cancers). Notre spécialisation dans notre domaine d'application les réseaux informatiques font notre spécificité vis-à-vis des travaux de cette équipe : nous proposons de nouveaux protocoles, elle propose de nouvelles techniques de résolution de certains problèmes d'optimisation.

Dans le périmètre de notre domaine de recherche, on peut trouver au sein de Télécom Bretagne une équipe de recherche (RSM) avec laquelle nous partageons beaucoup de nos centres d'intérêt. Et c'est la seule équipe de la région Bretagne avec laquelle nous avons une intersection réelle. Il existe toutefois une enseignante-chercheuse à Brest (S. Vatou) qui travaille dans le département Informatique sur la surveillance du trafic. Comme cela est un sujet de recherche commun, depuis un an, nous avons formé un petit groupe de travail.

Le département Réseaux, Sécurité et Multimédia de l'antenne de Rennes propose trois axes de recherche : gestion de ressources et de mobilité pour les réseaux radios, sécurité des systèmes d'information, protocoles et architectures des réseaux IP. Nous partageons avec eux le troisième et dernier axe et la volonté de développer des réseaux performants, fiables et simples d'emploi pouvant transporter tout type d'information, et donc la nécessité d'étudier les architectures, les protocoles et le contrôle du réseau. Certains chercheurs participant à cet axe ont une très bonne expertise dans l'IPv6. Par cette proximité géographique et thématique nous entretenons depuis de nombreuses années des coopérations soutenues. Cela s'est traduit par l'intégration dans une équipe de recherche commune (ex-Armor), des cours (par exemple de master recherche) en commun, des coopérations inter-universitaires à l'étranger, des co-encadrements de doctorants, et des publications scientifiques cosignées. Actuellement, nous partageons un projet de recherche (NextTV4All), nous explorons un axe de recherche dans le domaine du calcul de routes sous contrainte, notamment dans un réseau multi-domaine, et nous publions en commun

5.3 Nationalement

Par la suite, nous nous positionnons par rapport aux équipes de recherche en France qui sont proches de notre périmètre de recherche.

Une des équipes proches est l'équipe MASCOTTE (projet commun CNRS/INRIA/Université de Nice-Sophia Antipolis). Les thèmes de recherche du projet MASCOTTE sont l'algorithmique, les mathématiques discrètes, l'optimisation combinatoire et la simulation. Le projet propose des outils utilisés en particulier dans le cadre d'applications industrielles : conception de réseaux embarqués, systèmes tolérants aux pannes, dimensionnement de réseaux optiques, réseaux satellitaires, simulation

orientée objet répartie pour les télécommunications ou le trafic routier. L'équipe mélange les aspects théoriques et les applications pratiques. Dans les réseaux optiques, ils développent des algorithmes de routage et de méthodes pour minimiser le nombre de longueurs d'onde pour des instances particulières de demandes telles que multicast, ce qui donne lieu à des problèmes de coloration. Ils étudient la protection de ces réseaux par des cycles. Dans ce profil, on trouve plusieurs sujets qui intéressent notre équipe (routage optique, protection). Cependant, notre équipe se focalise fortement sur le multicast et sur les problèmes de l'inter-domaine.

Les travaux de l'équipe PLANETE de l'INRIA sont centrés sur la conception, la mise en œuvre et l'évaluation des protocoles et des applications Internet. Actuellement cette équipe met l'accent sur de nouvelles architectures, services et protocoles pour un Internet dans lequel les mobiles seront supportés de façon transparente, un certain niveau de qualité de service sera disponible et les communications de groupe deviendront une réalité. Leurs travaux de recherche s'articulent autour de plusieurs axes dont la sécurité dans les réseaux sans infrastructure et avec contraintes, la communication de groupe qui passe à l'échelle, l'impact de l'hétérogénéité des réseaux sur les performances des protocoles, la métrologie et la localisation des ressources, et l'analyse de la dynamique des réseaux pair-à-pair. Ainsi, on peut détecter des similitudes (communications de groupes, architectures et protocoles) et des différences claires vis-à-vis de notre domaine de recherche : PLANETE s'intéresse aux réseaux mobiles, aux réseaux pair-à-pair, alors que nous nous intéressons aux réseaux d'infrastructure ou aux réseaux optiques.

L'équipe NPA ("Network Performance Analysis") du département Réseaux et Systèmes Distribués du laboratoire LIP6 vise à développer une vision pour l'Internet du futur. Les chercheurs de cette équipe conçoivent des solutions pour représenter et faciliter le contrôle de l'internet nouvelle génération. La cible de l'équipe est le contrôle des réseaux mobiles et souples dans des environnements privés et professionnels. Le cœur du travail de NPA concerne des problèmes liés aux multimédia et aux réseaux mobiles, à la gestion de ressources, à l'extensibilité, aux réseaux ambiants, et à la gestion de réseau de contenu. Un travail significatif est produit autour de la mesure de l'Internet, de la modélisation et de l'ingénierie du trafic. Le profil de cette équipe est plus éloigné de nos thèmes de recherche, mais des coopérations scientifiques intéressantes peuvent être envisagées sur la base de nos complémentarités.

Dans le laboratoire LABRI à Bordeaux, plusieurs axes de recherche coïncident partiellement avec notre profil. Parmi les six équipes du laboratoire, deux affichent des recherches proches de nos activités (récentes et futures) : l'équipe *Combinatorics and Algorithmics* et l'équipe *Languages, Systems and Networks*. La première équipe mentionnée conduit une recherche fondamentale dans la théorie de graphe et ses applications ainsi que dans la combinatoire. Leur approche est plus abstraite et formelle (on y retrouve la construction d'algèbres). La recherche d'algorithmes performants (pour le routage entre autres) et leurs preuves est la partie commune entre nos deux profils. La seconde équipe étudie la sécurité et la QoS des réseaux de nouvelle génération mais aussi la modélisation et les tests des systèmes et des objets distribués. Là aussi, on retrouve des thèmes communs tout en notant l'originalité de notre approche appliquée aux réseaux d'infrastructure, au multicast et aux réseaux multi-domaines.

Dans le laboratoire LIRMM à Montpellier, l'équipe APR (*Algorithmique et Performances des Réseaux*) se consacre à la modélisation, l'analyse et l'optimisation du fonctionnement des réseaux de communication. Pour résoudre ces problèmes, ils utilisent les outils de l'algorithmique, la théorie des graphes, et les files d'attente. L'équipe APR s'intéresse à des problèmes d'optimisation dans les réseaux au sens large. Les thèmes de l'équipe s'articulent autour de trois axes : solutions algorithmiques pour des problèmes issus des réseaux (réseaux ad-hoc, réseaux de capteurs, ...), modélisation stochastique et évaluation de performances, solutions algorithmiques de problèmes d'ordonnancement. La plus grande intersection entre nos activités se manifeste sur le premier axe, mais les orientations (pour eux, réseaux sans fil et, pour nous, réseaux d'interconnexion) sont différentes. Ils ont par ailleurs une approche moins protocolaire que la notre.

Au sein du laboratoire PRISM (Parallélisme, Réseaux, Systèmes, et Modélisation) de Versailles deux équipes de recherche affichent des activités similaires aux nôtres : l'équipe AOC (Algorithmique, Optimisation Combinatoire) et l'équipe ASR (Architecture et Services des Réseaux). Les domaines de recherche d'AOC montrent bien quelques similitudes et de nombreuses divergences (dont certaines sont assez radicales) : algorithmique et théorie des graphes, analyse d'algorithmes et combinatoire, fonctions booléennes (représentations, probabilités et complexité), complexité de problèmes géométriques, informatique pour la biologie, algorithmique pour les réseaux biologiques. L'objectif de l'équipe ASR est de proposer de nouvelles architectures, de nouveaux modèles et solutions dans le cadre spécifique des réseaux de communication. Ils caractérisent les réseaux par deux points de vue. Le premier concerne la multitude d'architectures réseaux interconnectés (fixe et mobile), le second par la convergence des flux transitant à l'intérieur (synchrone et asynchrone). On y retrouve alors plusieurs de nos activités. Ils n'envisagent toutefois ni le multicast ni le routage multi-domaine.

L'approche de l'équipe RESO du laboratoire LIP à Lyon vise avant tout à explorer les limites des modèles et protocoles classiques dans le contexte des réseaux haute-performance de type LAN ou WAN. Les chercheurs de l'équipe développent des solutions pour limiter les mouvements et les copies de données et pour distribuer la charge. Ils expérimentent les réseaux à large échelle et confrontent les résultats théoriques, les simulations et la réalité. Les thèmes de recherche développés par l'équipe sont les suivants : architectures logicielles optimisées, optimisation de piles protocolaires (hôte, serveur, grappes), environnements de réseaux actifs, équipements distribués intelligents, transport efficace de bout en bout, environnement d'évaluation de protocoles, solutions basées sur services différenciés, solutions basées sur approche active. Le domaine d'application visé est la communication dans les grappes et les grilles de calcul. C'est en quoi leur approche est différente de la nôtre, puisque nous visons les infrastructures du réseau.

Au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture de Systèmes (LAAS) à Toulouse, nous trouvons également des thèmes de recherche qui sont particulièrement intéressants pour nous, notamment dans les groupes de recherche suivants : le groupe Modélisation et contrôle des Réseaux et Signaux (MSR), le groupe Tolérance aux fautes et Sécurité de Fonctionnement informatique (TSF) et surtout l'équipe Architecture et protocoles de communication du groupe Outils Logiciels pour la Communication (LOC). Ces groupes développent de nouvelles approches méthodologiques et algorithmiques pour l'analyse, la conception et l'évaluation de performances de réseaux et systèmes de télécommunications. Un point original de la recherche au LAAS réside dans l'analyse des systèmes de communication critiques à fortes contraintes temporelles et exigences de qualité de service et de sécurité. Dans la modélisation, l'optimisation et la gestion intégrée des systèmes d'activité ils définissent des modèles, des méthodes et des outils permettant d'aider à analyser, à évaluer, à concevoir et à conduire ces systèmes d'activités, dans un environnement incertain et perturbé. Cela passe par l'utilisation de techniques de Recherche Opérationnelle et de modèles de représentation et de traitement des contraintes issus de l'Intelligence Artificielle. La tolérance aux fautes et la sûreté de fonctionnement informatique sont aussi dans le cœur de la recherche des groupes du LAAS. Malgré le fait que les sujets traités coïncident souvent avec nos propres investigations, les méthodes utilisées et les accents sont différents : au LAAS, la recherche est centrée sur des modèles mathématiques pour l'analyse de performance, pour la mesure et pour assurer la tolérance aux pannes des systèmes en général alors que nous nous envisageons celle des réseaux de données.

Parmi les thèmes du Laboratoire Lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications figure l'analyse des systèmes parallèles, distribués et communicants. Les compétences de l'équipe réseau du LORIA portent sur la supervision, la coopération, et la distribution des programmes et des services, mais aussi sur l'étude de protocoles, la sûreté de fonctionnement, et l'évaluation de performances. Ainsi l'équipe MADYNES vise la conception, la validation et la mise en œuvre de nouveaux paradigmes et architectures de supervision et de contrôle capables de maîtriser la dynamique croissante des services et de résister au facteur d'échelle induit par l'Internet ubiquitaire. Les points importants de notre équipe (le multicast, les réseaux inter-domaines et la QoS basée sur des critères multiples) ne sont pas explicités dans le programme du LORIA.

L'équipe Théorie des Graphes et Optimisation Combinatoire (GraphComb) du LRI à Orsay a pour objectif le développement de recherches en théorie des graphes et en optimisation combinatoire déterministe et stochastique, et l'application d'une partie de ces recherches à la résolution de problèmes pratiques (réseaux, planification, allocation de ressources). Cette recherche est plus théorique et plus générale que nos projets: les réseaux sont des éventuelles illustrations des résultats.

Le département Informatique et Réseaux de Telecom Paristech héberge deux équipes dont certains thèmes de recherche sont proches des nôtres : l'équipe Réseau Mobilité et Sécurité (NMS) et l'équipe Mathématiques de l'Information, des Communications et du Calcul (MIC²). Les travaux de l'équipe NMS portent principalement sur l'étude des réseaux radio mobiles, sur leur sécurité, et sur l'accès dans les réseaux à haut débit. Ces travaux concernent essentiellement les couches basses des piles protocolaires (couches réseau, liaison et physique). L'activité principale de l'équipe consiste à proposer des méthodes et protocoles d'accès aux réseaux, à définir ou à analyser les algorithmes de partage et de gestion des ressources d'accès (médium et équipement de transmission). Les études réalisées concernent, par exemple, les méthodes et protocoles d'accès multiples distribués pour des réseaux locaux à haut débit, le contexte des communications radio mobiles en mode paquet, la capacité et la planification des systèmes cellulaires. Toutefois, dans l'équipe NMS on trouve des travaux sur l'ingénierie de trafic, GMPLS, l'inter-domaine qui sont proches de nos thématiques. Les travaux de recherche de la deuxième équipe MIC² couvrent la complexité théorique des problèmes, l'algorithmique, les codes correcteurs, le traitement statistique des variables qualitatives et textuelles, la théorie des automates, les probabilités et leurs applications aux télécommunications. Tout cela est un peu loin de notre périmètre, toutefois un des chercheurs étudie des thèmes proches notamment l'ingénierie de trafic dans les réseaux, la gestion des ressources pour les réseaux optiques, la gestion de la bande passante et des politiques de services pour la QoS dans les réseaux locaux à très haut débit. On constate donc qu'il n'y a pas d'équipe structurée sur un thème proche du nôtre dans l'école Telecom Paristech à Paris et que les chercheurs sur ce thème se sont répartis dans deux équipes dont le thème principal affiché est éloigné de notre périmètre.

L'équipe Armor du laboratoire Samovar de TELECOM & Management SudParis propose trois axes majeurs : les méthodes de modélisation et d'analyse de performances, l'ingénierie du trafic, l'architectures de réseaux (fixes et mobiles). Nous partageons les deux derniers axes avec l'équipe Armor. Les méthodes et outils mis en œuvre par Armor sont ceux issus de la théorie des files d'attente, appliqués aux questions de l'ingénierie du trafic sur les réseaux existants (IP, ATM, etc.) ou sur les réseaux de technologies émergentes (UMTS, MPLS, tout optique, etc.), pour lesquels les études d'architectures (de réseaux, de machines) sont nécessaires. L'équipe Armor présente donc un très large spectre de recherche. Nous avons choisi de concentrer nos travaux sur le multicast, le multi-domaine, et sur l'algorithmique multicritère.

L'équipe Réseaux et Protocoles du LSIIT à Strasbourg regroupe les recherches dans le domaine de l'ingénierie des réseaux et des protocoles. Cette équipe s'intéresse à tous les maillons de la communication dans un réseau de type internet nouvelle génération, depuis les réseaux d'extrémités sans fil, jusqu'aux problèmes de routage dans le cœur de réseau. Les chercheurs de cette équipe étudient et conçoivent des algorithmes, protocoles et architectures de communication. Leur préoccupation constante est le passage à l'échelle. La validation de leurs propositions se fait par simulation ou par expérimentation. Ceci les amène à étudier des modèles pertinents pour la simulation ou l'émulation (modèles de topologies, modèles de mobilité). On identifie des thèmes de recherche communs avec notre équipe, par exemple, le routage multicast, ou la répartition de trafic par routage multi-chemin. Les approches sont similaires au niveau des aspects algorithmiques (distribuée ou non) et protocolaires. Les travaux de notre équipe se distinguent par notre volonté affichée d'aborder le problème par une approche multi-domaine.

Fort naturellement, nous entretenons de nombreux rapports formels ou informels avec la plupart de, si ce n'est toutes, ces équipes françaises. Notamment à l'occasion des activités menées au sein des groupes d'animation de la recherche française (GDR ASR), souvent à l'occasion des conférences

francophones (CFIP, ResCom, Algotel) ou plus pragmatiquement lors de participation à des jurys de thèse, à des comités scientifiques, et surtout par l'échange de doctorants, post-doctorants, etc., le montage de projets et le travail en commun.

5.4 Internationalement

A l'échelle internationale, plusieurs groupes de travail étudient des thématiques proches de celles proposées par notre équipe. Sur la thématique des réseaux optiques, on peut citer l'université d'Iowa, de Buffalo, de Californie et d'Alberta. Sur la thématique du routage multi-domaine, on s'intéressera au laboratoire Networks and Services Research de l'UCL, au laboratoire IP Networking de l'université de Louvain, au laboratoire d'informatique de l'université de Princeton. Sur la thématique du routage multicritère, on présentera le groupe de recherche Network Architectures and Services de l'université de Delft, le laboratoire Broadband Networking de l'université d'Arizona et les travaux du Technion en Israël.

Le laboratoire d'informatique de l'université de l'Iowa aux Etats-Unis travaille sur la thématique des réseaux optiques utilisant la technologie WDM, les réseaux ad hoc et les réseaux de capteurs. Les travaux sur les réseaux optiques ont plusieurs points communs avec ceux de notre équipe, notamment dans l'étude du problème d'agrégation de trafic, la prise en compte des communications multicast et de la qualité de service. De plus, les solutions proposées consistent en des algorithmes distribués qui satisfont les contraintes technologiques des réseaux optiques.

Le laboratoire LANDER de l'université de Buffalo étudie les architectures de réseaux, les protocoles, les problématiques de contrôle et de gestion des réseaux ainsi que leur évaluation de performance. Le laboratoire se focalise notamment sur la convergence des réseaux de télécommunications et de données sur des infrastructures optiques WDM, les réseaux sans-fil et mobiles et l'internet. Les projets actuels du laboratoire s'intéressent à la technologie Optical Burst Switching pour les réseaux IP sur WDM, la protection et la restauration dans la couche WDM, le multicast dans WDM. Dans cette perspective, ces projets correspondent aux principaux défis et à certains travaux réalisés dans notre équipe.

Le laboratoire réseaux de l'université de Californie à Davis travaille sur la thématique des réseaux optiques. L'objectif de l'équipe est de concevoir, développer et analyser des architectures innovantes pour les réseaux optiques qui peuvent être déployées dans les réseaux d'accès, métropolitains ou les réseaux d'opérateur. Ce laboratoire est connu mondialement pour avoir des travaux et des ouvrages de référence sur l'architecture des réseaux optiques, les mécanismes de protection et de restauration ou le multicast. Ce même laboratoire étudie la fourniture de la qualité de service dans la couche Réseau pour les communications de type unicast ou multicast. Les travaux concernent les techniques de marquage, la négociation et la réservation de ressources. Le laboratoire étudie aussi la fourniture de la qualité de service au niveau applicatif dans des réseaux de type overlay.

Le groupe de travail sur les réseaux et les systèmes de l'université d'Alberta au Canada développe des études sur la planification, la conception et l'analyse de performances des réseaux de transport. L'approche utilisée consiste essentiellement à développer des modèles d'optimisation combinatoire et les heuristiques efficaces associées. Particulièrement, le groupe a introduit la notion de protection par p-cycles pour la protection des réseaux optiques. Dans cette mesure, les études que nous menons continuent sur la même voie pour étendre le concept des p-cycles pour les réseaux multi-domaines.

Sur la thématique du routage multi-domaine, le laboratoire Networks and Services Research de l'University College London étudie les solutions qui permettent de fournir rapidement et automatiquement des services dans les réseaux. Les études se focalisent sur le contrôle et la gestion des réseaux intra- et inter-domaines, la qualité de service, l'ingénierie de trafic et le monitoring et les mesures dans les réseaux. En particulier, le laboratoire a contribué à plusieurs projets européens de référence qui proposent des architectures pour l'automatisation des services multi-domaines.

Le laboratoire IP Networking de l'université de Louvain-La-Neuve travaille sur l'évolution des protocoles de routage de l'Internet notamment sur le protocole BGP. Ce laboratoire propose aussi des architectures pour l'internet du futur qui prennent en compte l'évolution de l'adressage et du routage.

Le laboratoire informatique de l'université de Princeton aux Etats-Unis propose quand à lui une approche incrémentale. Cette approche ajoute des fonctionnalités de contrôle sur les réseaux actuels et un support de la qualité de service tout en minimisant les changements et les extensions nécessaires. En particulier, le laboratoire a mené des études fondamentales et appliquées sur les limitations du routage BGP dans l'Internet. Ces études ont servi à proposer des extensions pour améliorer la sécurité, la disponibilité et la garantie de performances pour les services multi-domaines.

Dans notre équipe, nous menons des études qui se basent sur ces travaux tout en ajoutant un plan de monitoring et de gestion de pannes. L'originalité de notre approche consiste en l'introduction de nouveaux modèles d'interaction entre les différents acteurs regroupés dans des alliances selon des schémas collaboratifs ou non collaboratifs.

Sur la thématique du routage multi-critère, le groupe Network Architectures and Services de l'université de Delft étudie les thématiques liées au routage avec qualité de service dans les réseaux. Notamment le groupe a introduit des approches optimales et heuristiques pour le routage unicast et multicast avec plusieurs contraintes additives. Ces approches constituent une thématique de recherche très prometteuse et font l'objet de travaux similaires dans le laboratoire Broadband Networking de l'université d'Arizona aux Etats-Unis et le laboratoire de l'université de Technion en Israël. Nos travaux se basent sur les avancées de ces laboratoires dans le domaine du routage pour la qualité de service. Cependant, nous allons plus loin et proposons des améliorations pour ces approches dans de nouveaux contextes comme les réseaux multi-domaines. Plus fondamentalement, nous remettons en cause la pertinence du choix de structure d'arbres pour le routage des communications multicast avec des contraintes de qualité de service et introduisons de nouvelles structures de graphes adaptées à la solution optimale du problème.

La diversité et la richesse des thématiques étudiées dans ces laboratoires étrangers et qui se rapprochent des thématiques de notre équipe font que les perspectives de recherche sont très prometteuses. L'originalité de notre approche réside essentiellement dans la trinité multi-domaine, multi-critère et multicast et de l'influence mutuelle entre ces trois axes.

5.5 Conclusion

Nous étudions le routage dans les réseaux de nouvelle génération, nos principaux défis sont le multicast, le multi-domaine et le multicritère. Nous voulons aborder ces défis de manière architecturale, protocolaire et algorithmique. Aucune des équipes citées ne travaillent sur l'ensemble de ces défis simultanément et de manière cohérente. Nous collaborons (ou avons collaboré) avec certaines d'entre elles, et nous envisageons de développer ces coopérations.

6 Activités contractuelles en cours

Nous participons ou avons participé au cours des dernières années aux projets et groupes de recherche internationaux (IETF, Nautilus6, Cedre), européens (Cascade, Asset, NGDG, EuroNGI) et français (NextTV4All, IDsA, VTHD puis VTHD+, GdR ARP puis GdR ARS, G6, pôle de compétitivité Images et Réseaux). Nous avons des relations fructueuses et suivis avec plusieurs laboratoires à l'étranger. Pour la localisation des plus récentes, on peut nommer Budapest, Tunis, et Beyrouth. De plus, nous avons, depuis plusieurs années, un certain nombre de collaborations bi-partites avec de grands laboratoires de recherche d'industriels leaders dont notre domaine de recherche (Orange, Alcatel Lucent, Thomson). Ces actions de recherche sont décrites ci-dessous pour celles qui sont encore en cours. Vous trouverez en annexe les actions de recherche terminées (cf. §8). Nous indiquerons par la suite la liste de nos participations à des groupes ou organismes de recherche, puis une liste de nos collaborations internationales et pour finir la liste des comités scientifiques récents auxquels des membres de l'équipe ont participé.

6.1 Contrats de recherche en cours

6.1.1 Projet de recherche Rapido

Cette année, nous venons de lancer une action de recherche conjointe entre une équipe du centre de recherche d'Alcatel-Lucent Bell Labs à Nozay et notre équipe à l'Irisa. Cette action est programmée sur trois ans. Nous voulons étudier les solutions de fourniture de services multi-domaines utilisant les ressources de plusieurs opérateurs de réseaux. Les travaux menés dans le cadre de la collaboration auront pour but d'identifier les limitations du modèle actuel, d'étudier l'adéquation des solutions existantes et de proposer des solutions innovantes qui permettent de dépasser les limitations. L'étude est structurée en deux axes de recherche : l'architecture et les protocoles pour les services inter-opérateurs; les algorithmes pour le support des services multi-opérateurs. Nous nous intéresserons d'une part à l'automatisation et l'optimisation de la composition des services et des alliances, d'autre part aux mécanismes de surveillance du trafic généré par les services intra et inter opérateurs.

6.1.2 Projet de recherche NextTV4All

Démarré mi-2008, ce projet de deux ans et demi se propose de transmettre des contenus audiovisuels en temps réel et à la demande, combinée à des services conversationnels et de les restituer à la fois sur des terminaux fixes et mobiles. Le projet vise à la définition et le développement d'un système de distribution de contenus audiovisuels enrichis s'appuyant sur l'IMS ("IP Multimedia System") en assurant la convergence entre terminaux fixes et mobile, à la fois au niveau du réseau et des services, suivant le concept *Anywhere - Anytime*. Plus spécifiquement notre équipe s'intéresse à la gestion de l'environnement multi opérateurs / multi terminaux / multi fournisseurs et à la gestion de la qualité de service de transmission. Nos partenaires majeurs sont Alcatel-Lucent, France Télécom, GET/ENST Bretagne, Thomson GV, Thomson R&D, Thomson Telecom.

6.1.3 Projet de recherche sur l'optimisation du placement des protections (OP)

Depuis 2006, nous travaillons dans le domaine de l'optimisation du placement des ressources à réserver pour protéger les communications dans un réseau à très haut débit. Nous nous sommes appuyés principalement sur l'infrastructure MPLS. Nous avons des échanges étroits avec le département CORE du laboratoire de recherche de France Telecom à Lannion. Nos nouveaux algorithmes de partage de la bande passante de protection ont été très récemment publiés [Saidi et al., 2009]. Cette action vient de se terminer fin 2008.

6.1.4 Projets de collaboration avec Orange Labs

L'équipe a un bon partenariat scientifique avec Orange Labs (ex-France Telecom R&D), notamment grâce à notre proximité thématique et géographique. Nous avons des collaborations avec

France Telecom depuis 1993.

Par exemple, nous avons lancé une collaboration en décembre 2004 dans notre domaine d'expertise : l'ingénierie de trafic des réseaux informatiques. Nous avons étudié de nouvelles techniques propices à l'optimisation *online* des routes pour une infrastructure de type MPLS. Cela a donné lieu à quelques publications [Chaieb et al. 2006; 2007].

En 2005, nous avons démarré une deuxième collaboration avec Oranges Labs à Lannion, pour un projet de recherche sur 3 ans. Nous voulons étudier les méthodes qui permettent d'éviter ou de minimiser les contentions au sein d'un réseau tout-optique fonctionnant par rafales [Legrand et al. 2008].

En 2008, nous avons lancé une nouvelle collaboration pour trois ans avec Orange Labs à Rennes sur les méthodes qui permettraient d'améliorer la transmission des flux vidéo dans des réseaux de type pair à pair. Nous voulons comparer les techniques d'amélioration de la qualité de la transmission par retransmission, code auto-correcteur et par codage en couches. Nous faisons l'hypothèse qu'il est possible de bénéficier de la structure pair à pair pour optimiser cette qualité.

6.1.5 Projet de collaboration avec Alcatel-Lucent

En 2008, nous avons établi une coopération sur 3 ans avec Alcatel. L'étude s'intéresse aux évolutions de l'Internet. La prochaine mouture de l'Internet devrait offrir des services de haute performance qui traverse ou couvre potentiellement plusieurs domaines de routage. L'ouverture de ces services oblige les administrateurs de ces domaines à garantir une bonne qualité de service au sein de leur domaine. Toutefois cela n'est pas suffisant, l'administration totalement indépendante de chaque domaine ne permet de garantir la fourniture du service demandé. En effet la plupart des solutions naïves posent des problèmes de respect de la confidentialité ou de passage à l'échelle. On s'intéressera précisément au problème suivant : étant donné la demande d'un service multi-domaine et une collection d'offres de services par domaine, on veut déterminer la liste des domaines et leur paramètres de services qui permettront d'offrir au moindre coût et de garantir le service de bout-en-bout demandé. Ce projet de collaboration complète le projet de recherche Rapido.

6.2 Participations à des organismes et animations de la recherche

6.2.1 Groupe d'animation de la recherche française GdR ASR

Nous participons au Groupement de Recherche (GdR) Architecture, Système & Réseau (ASR) du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). Avant 2006, nous travaillions dans le groupe de travail "Internet nouvelle génération". Depuis, après une restructuration de ce GdR, nous participons au pôle d'animation *Réseaux et communication* (ResCom). Nous sommes intervenus dans de nombreux séminaires ou colloques organisés ou soutenus par ce GdR. On peut citer les écoles d'été RHD, ING, les workshops ResCom, Algotel et les réunions Tarot. Au moins un membre de l'équipe assiste à ce groupe de travail et, nous y présentons très régulièrement nos plus récents travaux.

6.2.2 Association française G6

Depuis plusieurs années, nous participons à l'association du G6 qui a pour but de favoriser le déploiement de la nouvelle version de l'Internet. Nous sommes particulièrement attentif à l'activité autour du multicast, et de celle autour du DNS (cf. <http://groupe.g6.asso.fr>). C'est dans ce cadre que nous avons participé à l'écriture du livre "IPv6 théorie et pratique".

6.2.3 Organisme international de normalisation IETF

Nous participons autant que possible aux activités de l'IETF : l'organisme international de normalisation de l'Internet. Nous assistons aux conférences biannuelles, et nous suivons les groupes de travail dans nos domaines d'activité. Nous avons déjà soumis de nombreux documents de normalisation pour tenter de promouvoir nos solutions, soit autour de la sécurité, soit pour le multicasting.

6.2.4 Pôle de compétitivité Images et Réseaux

En 2006, nous avons proposé un nouvel axe de recherche. Ce projet de recherche a été labélisé dans le cadre du pôle de compétitivité à vocation internationale *Images et Réseaux*. Dans le cadre de ce projet sont rassemblés l'ENST Bretagne, l'université de Rennes 1 et France Telecom R&D. Ce projet traite des communications robustes pour les réseaux de nouvelle génération, dans le but d'améliorer la disponibilité des futurs services de l'Internet. Nous voulons offrir des solutions qui gèrent la multitude, fortement prévisible dans le futur : multitude des communications à gérer, multiples types de connexions de différentes qualités, contraintes multiples produites par l'hétérogénéité des technologies employées au sein du réseau, multiples couches protocolaires, adaptation dans le temps aux variations de charge et de topologie et de besoins, distribution des points de contrôle et de gestion du réseau (architecture redondante et répartie), multitude des destinataires (multicast), répartition variée des membres des groupes (dans le temps et l'espace). Nos résultats dans ce domaine de recherche ont été publiés [Saidi et al. 2006; 2006a].

En 2008, le projet NextTV4All a été labélisé dans le cadre de ce pôle de compétitivité. Ce projet a été décrit au §6.1.2.

6.3 Collaborations internationales

6.3.1 Relations internationales

Nous avons des contacts étroits avec les membres de universités et des centres de recherche étrangers cités dans le cadre des projets de recherche décrits notamment dans le chapitre précédent : institut hollandais NLnetLabs, université de Dresde, université de Stuttgart, institut de recherche portugais INESC, université de Budapest, université de la Manouba, et les départements de la recherche d'Alcatel SEL à Stuttgart, Hewlett Packard, etc.

6.3.2 Accueil de chercheurs étrangers

Nous avons accueilli au sein de notre groupe de recherche, pour des séjours de plusieurs semaines à quelques mois, au cours des dernières années, les chercheurs suivants :

Miek Gieben (Alcatel- NL) en 2003, Jean-christophe Wojié (université de Cocody - CI) en 2002, Adje Assouhoum (université de Cocody - CI) en 2002 et 2004, Elaj Ahlem (ENSI - TU) en 2004, Zoulika Mekakia (Université d'Oran - DZ) en 2003 et 2004, Aniko Zsigri en 2002 (université de Copenhague - DK), Jing FENG en 2001 et en 2002 (Southeast University de Nanjing - CH), Abdelfatah Belghith (ENSI - TU) en 2004, 2005 et 2006, 2007 et 2008, Naouel Ben Ali en 2008, Laszlo Gonczy en 2007 et 2008, Simon Gyula en 2008, Omar Smail en 2009.

6.3.3 Programme scientifique franco-hongrois

En 2006 et 2007 nous avons bénéficié du programme intergouvernemental d'échange scientifique franco-hongrois (programme Balaton). Récemment, pour 2009, ce projet a été renouvelé. Ce projet entre l'Irisa et l'université technique et d'économie de Budapest (BUTE) a permis de très fructueux échanges entre nos chercheurs. Notamment cela a abouti aux deux publications suivantes [Simon et al., 2008] et [Simon et al., 2007] sur la k-couverture des réseaux de senseurs.

6.3.4 Coopération franco-ivoirienne

Depuis 2002, nous avons eu la responsabilité de la coopération franco-ivoirienne (dans le cadre du projet SUP 2000) liant l'université de Cocody (la plus grande université de Côte d'Ivoire) et l'université de Rennes-1. Nous avons mené le montage financier, administratif et pédagogique de ce dossier. Cette coopération se fait dans le domaine des Nouvelles Technologies l'Informatique et le Multimedia. Nous avons effectué de nombreuses interventions pédagogiques. Nous avons aussi organisé les enseignements effectués par des collègues extérieurs à l'équipe. De nombreux collègues ivoiriens sont accueillis régulièrement au sein du laboratoire.

En 2007, nous avons aidé au montage de la première école doctorale en informatique de Côte d'Ivoire (EDIA). L'appui de l'université de Rennes 1 est proposé. Notre partenaire principal est

Souleymane Oumtanaga de l'Institut National Polytechnique Houphouet Boigny. Nous avons participé à l'encadrement de plusieurs doctorants de cette école doctorale : notamment en 2008, Tanon Lambert a fait un séjour prolongé au sein de notre équipe.

6.3.5 Coopération franco-libanaise

Depuis 2001 et jusqu'à aujourd'hui, avec nos partenaires libanais, nous développons notre recherche dans le domaine de la transmission multicast. Cette collaboration a été soutenue dans le cadre d'un accord franco-libanais interuniversitaire et d'un contrat Cedre, elle a donné lieu à publications. Il y eu régulièrement des échanges de chercheurs ou de thésards, libanais en France (5) et français au Liban (3). A l'occasion de séjours, nous avons eu l'occasion de donner des conférences soit sur nos travaux en cours, soit sur l'état de l'art des protocoles de routage multicast.

6.3.6 Coopération franco-libano-tunisienne

Nous avons réalisé un projet de coopération de deux ans dans le cadre de l'Agence Universitaire Francophone. Ce projet concerne l'Université de Rennes 1, l'Université de la Manouba (à Tunis en Tunisie) et l'Université Libanaise (à Beyrouth au Liban). Cette coopération s'est concrétisée par de très nombreux échanges d'enseignants, de doctorants et de stagiaire de master recherche et au moins une douzaine de publications communes. Le sujet de cette coopération a été l'optimisation du routage des réseaux. Sur ce sujet, une étudiante encadrée par les membres de l'équipe et inscrite à Rennes et à Tunis en co-tutelle à obtenu sa thèse très récemment.

6.3.7 Visites à l'étranger

Dans le cadre de nos accords de coopérations internationales, nous avons au cours des quatre dernières années été invité dans plusieurs pays étrangers pour y présenter nos travaux lors de séjours d'au moins une semaine : l'Egypte (l'ITI : institut égyptien sur les technologies de l'information), Côte d'Ivoire (université de Cocody), le Liban (université libanaise), l'Allemagne (Alcatel-SEL), la Roumanie (Université de Bucarest, Eugen Borcoci), Hongrie (Université Technique de Budapest), Tunisie (université de la Manouba), Maroc (université Mohammed Premier d'Oujda)

6.4 Participation à des comités scientifiques ou d'organisation

Lors de ces dernières années (depuis 2006), les membres de l'équipe ont eu l'occasion de participer aux comités scientifiques suivants :

- Organisateur (Miklos Molnar) et membre (Bernard Cousin) du comité du First International Workshop on Dynamic Networking (workshop IWDYN'07) qui s'est tenu à Rennes, les 4-5 September 2007.
- Membre (Bernard Cousin) du comité scientifique du congrès International Conference on Information and Communication Technology (ICICT), qui s'est déroulé au Caire en Egypte en décembre 2003. Membres du comité pour 2007 (Bernard Cousin et Miklos Molnar).
- En 2003 et à nouveau en 2006, membre du comité de programme de la conférence annuelle Sécurité des Applications et des Réseaux (Bernard Cousin).
- Membre du comité scientifique du congrès De nouvelles Architectures pour les Communications (DNAC). En 2001, en 2006, puis en 2008, toujours à Paris (Bernard Cousin).
- Membre du comité de programme de la conférence International Symposium on Biometrics & Security Technologies (ISBAST 2007) qui s'est tenue en Décembre 2007, à Bahria University à Karachi (Bernard Cousin).
- Membre du comité de programme du Colloque Africain sur la Recherche en Informatique et en Mathématiques Appliquées, notamment en 2008 à Rabat au Maroc et en 2006 à Cotonou au Bénin (Miklos Molnar).
- Membre du comité de programme de JDIR. Il s'est tenu en janvier 2007 à Marne la Vallée. Nous avons été à nouveau membre du comité pour 2008 (Villeneuve d'Ascq) et pour 2009 (il aura lieu à Belfort) (Bernard Cousin).
- Membre du comité de programme du First Workshop on Future Trends on Design and

Analysis for Dynamic Networks, qui s'est déroulé à Hong Kong en Juin 2008 (Bernard Cousin et Miklos Molnar).

- Membre du comité de programme du workshop on Security and High Performance Computing Systems. Il a eu lieu à Nicosie à Chypre en juin 2008 (Bernard Cousin).
- Membre du comité de programme scientifique du High Performance Switching and Routing Workshop qui se tiendra à Paris en juin 2009 (Bernard Cousin).
- Membre du comité de programmes de la 4^{ème} conférence sur la Sécurité des Architectures Réseaux et des Systèmes d'Information (SARSSI) qui est programmée à Luchon en Juin 2009 (Bernard Cousin).
- Membre du comité de programme du 8th European Dependable Computing Conference qui se tiendra à Valence en Espagne en Avril 2010 (Bernard Cousin).
- Membre du comité éditorial de la revue International Journal of Latest Trends in Computing and Information Technology (Bernard Cousin).
- Membre du comité éditorial de la nouvelle revue International Journal of Network Protocols and Algorithms (Bernard Cousin)
- Rapporteur auprès de la commission européenne pour le FP7 ICT en 2009 (Bernard Cousin).

7 Publications

Nous listons, ici, les publications des membres de l'équipe lors des 4 dernières années. Neuf thèses ont été soutenues, et un des membres de l'équipe a obtenu son Habilitation à Diriger les Recherches en 2008. On dénombre douze publications dans des revues (dont onze internationales), et cinquante-six publications dans des conférences internationales avec comité de sélection et actes.

7.1 HDR et Thèses soutenues dans l'équipe

[Bigos, 2006] W. Bigos, "Optimized Modeling and Design of Multilayer IP over Optical Transport Network Architectures". Ph.D. Thesis, Université de Rennes I, March 2006.

[Chaieb, 2007] I. Chaieb, "Optimisation du placement de tunnels MPLS TE online". Ph.D. Thesis, Université de Rennes I, December 2007.

[Feuzeu Kwenkeu, 2007] T. Feuzeu Kwenkeu, "Extension de réseaux locaux Ethernet avec la commutation de label". Ph.D. Thesis, Université de Rennes I, Mars, 2007.

[Guitton, 2005] A. Guitton, "Communications multicast: contributions aux réseaux optiques et au passage à l'échelle". Ph.D. Thesis, Université de Rennes I, October 2005.

[Idoudi, 2008] H. Idoudi, "Optimisation de routage orienté qualité de service dans les réseaux ad hoc". Ph.D. Thesis, Université de Rennes I (France), Université de la Manouba, ENSI (Tunis), December 2008.

[Lahoud, 2006] S. Lahoud, "Survivable Routing and Flow Allocation in Next Generation Internet Networks". Ph.D. Thesis, ENST Bretagne.

[Mabrouki, 2008] I. Mabrouki, "Marches aléatoires dans les réseaux de capteurs sans fils". Ph.D. Thesis, Université de Rennes I, December 2008.

[Molnar, 2008] Miklos Molnar. "Optimisation des communications multicast sous contraintes". Habilitation à Diriger les Recherches de l'Université de Rennes I, Novembre 2008.

[Moulierac, 2006] J. Moulierac, "Agrégation des communications multicast". Ph.D. Thesis, Université de Rennes I, October 2006.

[Saidi, 2008] M.Y. Saidi, "Méthodes de contrôle distribué du placement de LSP de secours pour la protection des communications unicast et multicast dans un réseau MPLS". Ph.D. Thesis, Université de Rennes I, November 2008.

7.2 Articles de revues scientifiques

[Belghith et al., 2006] A. Belghith, A. Belghith & M. Molnár, "Enhancing PSM Efficiencies in Infrastructure 802.11 Networks", International Journal of Computing & Information Sciences (IJCIS), October 2006. Vol. 4(1), pp. 13-23.

[Ben Ali et al., 2008] N. Ben Ali, J. Moulierac, A. Belghith & M. Molnár, "QoS Multicast Aggregation under Multiple Additive Constraints", Computer Communications, August 2008. Vol. 31(15), pp. 3564-3578.

[Bigos et al., 2007] W. Bigos, B. Cousin, S. Gosselin, M. Le Foll & H. Nakajima, "Survivable MPLS Over Optical Transport Networks: Cost and Resource Usage Analysis", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, June 2007. Vol. 25(5), pp. 949-962.

[Bigos et al., 2006] W. Bigos, S. Gosselin, M. Le Foll, H. Nakajima & B. Cousin, "Optimized Design of Survivable MPLS over Optical Transport Networks", Optical Switching and Networking. Vol. 3(3-4), pp. 202-218.

- [Boudani and Cousin, 2005] A. Boudani & B. Cousin, "An hybrid explicit multicast/recursive unicast approach for multicast routing", *Computer Communications*, October 2005. Vol. 28(16), pp. 1814-1834.
- [Drid et al., 2009] H. Drid, B. Cousin, S. Lahoud & M. Molnár, "Protection par p-cycles dans les réseaux WDM", *Technique et Science Informatiques*, April, 2009. Vol. 28.
- [Idoudi et al., 2009] H. Idoudi, A. Belghith & M. Molnár, "Efficiency of probabilistic routing in dynamic multi-hop ad-hoc networks", *Journal of Networks*.
- [Moulierac et al., 2006] J. Moulierac, A. Guitton & M. Molnár, "Hierarchical Aggregation of Multicast Trees in Large Domains", *Journal of Communications (JCM)*, September 2006. Vol. 6(1), pp. 33-44.
- [Saidi et al., 2009] M.Y. Saidi, B. Cousin & J. Le Roux, "PLR-based Heuristic for Backup Path Computation in MPLS Networks", *Computer Networks*, 2009.
- [Saidi et al., 2009a] M.Y. Saidi, B. Cousin & J. Le Roux, "Using Shared Risk Link Groups to Enhance Backup Path Computation", *Computer Networks*, 2009.
- [Simon et al., 2008] G. Simon, M. Molnár, L. Gönczy & B. Cousin, "Robust k-coverage algorithms for sensor networks", *Special Issue of the IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, August, 2008. Vol. 57(8), pp. 1741-1748.
- [Zhou et al., 2009] F. Zhou, M. Molnár & B. Cousin, "Avoidance of Multicast Incapable Branching Nodes for Multicast Routing in WDM Networks", *Photonic Network Communications*, 2009.

7.3 Chapitres de livres

- [Cousin, 2005] B. Cousin, "Multicast chapter in IPv6, théorie et pratique". Gisèle Cizault (ed.), O'Reilly, 2005.
- [Molnár et al., 2009] M. Molnár, F. Zhou & B. Cousin, "Multicast Routing in Optical Access Networks chapter in *Optical Access Networks and Advanced Photonics: Technologies and Deployment Strategies*". Ioannis Chochliouros (ed.), IGI Publishing, 2009.

7.4 Conférences internationales

- [Belghith et al., 2008] A. Belghith, H. Idoudi & M. Molnár, "Proactive Probabilistic Routing in Mobile Ad Hoc Networks", In *International Conference on Wireless Networks ICWN 2008*. Las Vegas, NV, USA. July 2008.
- [Belghith et al., 2008a] A. Belghith, A. Mnaouer & H. Idoudi, "Polymorphic Routing using Proactive and Probabilistic Approaches for MANETs", In *First International Workshop on Future Trends on Design and Analysis of Dynamic Networks FTDA-DN*. Hong Kong, China. July 2008.
- [Ben Ali et al., 2008] N. Ben Ali, A. Belghith, A. Ben Mnaouer & M. Molnár, "A Taboo-based search algorithm improving Mamcra for multicast routing", In *33rd IEEE Conference on Local Computer Networks*. Montreal, Canada. October 2008.
- [Ben Ali et al., 2008a] N. Ben Ali, M. Molnár & A. Belghith, "ICRA: Incremental Cycle Reduction Algorithm for optimizing multi-constrained multicast routing", In *2nd International Workshop on Verification and Evaluation of Computer and Communication Systems*. Leeds, UK. July 2008.
- [Ben Ali et al., 2007] N. Ben Ali, J. Moulierac, A. Belghith & M. Molnár, "mQMA: Multi-constrained QoS Multicast Aggregation", In *IEEE Globecom*. Washington. December 2007.
- [Ben Ali et al., 2006] N. Ben Ali, M. Molnár & A. Belghith, "Résolution approximative du problème de routage multicast multicritère", In *META 06*. Hammamet, Tunisia. October 2006.
- [Bertrand et al., 2009] G. Bertrand, S. Lahoud, G. Texier & M. Molnár, "Computation of Multi-Constrained Paths in Multi-Domain MPLS-TE Networks ", In *5th Euro-NGI Conference on Next Generation Internet Networks*. Aveiro, Portugal. July 2009.

- [Boudani and Cousin, 2005] A. Boudani & B. Cousin, "Multicast Tree in MPLS Network", In IEEE Global Telecommunications Conference. St Louis, USA. December 2005.
- [Chaieb et al., 2007] I. Chaieb, J. Le Roux & B. Cousin, "LSP Setup Arrival Reordering Approach for MPLS-TE Routing", In IEEE Globecom. Washington. November 2007.
- [Chaieb et al., 2007a] I. Chaieb, J. Le Roux & B. Cousin, "Improved MPLS TE LSP Path Computation using Preemption", In IEEE Global Information Infrastructure Symposium - GIIS. Marocco. July 2007.
- [Chaieb et al., 2007b] I. Chaieb, J. Le Roux & B. Cousin, "A New Pre-emption Policy for MPLS-TE Networks", In 15th IEEE International Conference on Networks (ICON2007). Adelaide, South Australia. December 2007.
- [Chaieb et al., 2006] I. Chaieb, J. Le Roux & B. Cousin, "MPLS-TE Routing: Adopting a Generic Architecture and Evaluating Various Implementation Approaches", In Australian Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC 2006). Melbourne, Australie. December 2006.
- [Chaieb et al., 2006a] I. Chaieb, J. Le Roux & B. Cousin, "A General Architecture for MPLS-TE Routing", In Fourth IASTED International Conference on Communications, Internet, and Information Technology (CIIT 2006). St Thomas, USA. November 2006.
- [Chaieb et al., 2006b] I. Chaieb, J. Le Roux & B. Cousin, "A Generic Architecture for MPLS-TE Routing", In Fourth International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NET 2006). Iikley, UK. September 2006.
- [Cousin and Body, 2005] B. Cousin & M. Body, "Media Asset Transfer in a Unified Framework Managing Broadcasting Systems", In First IEEE International Conference on Distributed Frameworks for Multimedia Applications (DFMA'05). Besancon, France. 2005.
- [Cousin and Molnár, 2007] B. Cousin & M. Molnár, "Fast Reconfiguration of Dynamic Networks", In International Workshop on Dynamic Networks at INSA (invited). Rennes. September 2007.
- [Drid et al., 2008] H. Drid, B. Cousin, M. Molnár & S. Lahoud, "Multi-Criteria p-Cycle Network Design", In 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks. Montreal, Canada. October 2008.
- [Drid et al., 2007] H. Drid, B. Cousin & M. Molnár, "A Heuristic Solution to Protect Communications in WDM Optical Networks using P-cycles", In Workshop on Traffic Engineering, Protection and Restoration for Futur Generation Internet, Euro FGI. Oslo, Norway. September 2007.
- [Drid and Kheddouci, 2007] H. Drid & H. Kheddouci, "Algorithme d'Exclusion Mutuelle Distribué pour les Réseaux Ad Hoc", In Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT2007). Mars 2007.
- [Feuzeu and Cousin, 2005] T. Feuzeu & B. Cousin, "A New Scheme for Interconnecting LANs with Label Switching Bridges", In 30th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. Sydney, Australia. November 2005.
- [Guette et al., 2005] G. Guette, B. Cousin & D. Fort, "GDS Resource Record: Generalization of the Delegation Signer Model", In 4th IEEE International Conference on Networking (ICN), Springer-Verlag, LNCS. 2005.
- [Guette et al., 2005a] G. Guette, B. Cousin & D. Fort, "Algorithm for DNSSEC Trusted Key Rollover", In International Conference on Information Networking (ICOIN). Jeju, Korea. 2005.
- [Idoudi et al., 2008] H. Idoudi, A. Belghith & M. Molnár, "Probabilistic Consideration to Improve Routing in Mobile Ad Hoc Networks", In International Conference of TIGERA on Computing and e-Systems. Hammamet, Tunisia. 2008.
- [Idoudi et al., 2008a] H. Idoudi, A. Belghith & M. Molnár, "Trade-offs between Optimality and Validity in Probabilistic Routing for Mobile Multi-Hop Networks", In International Conference on Communications In Computing CIC 2008. Las Vegas, NV, USA. July 2008.

- [Idoudi et al., 2007] H. Idoudi, M. Molnár, A. Belghith & B. Cousin, "Modeling Uncertainties in Proactive Routing Protocols for Ad Hoc Networks ", In 5th International Conference on Information and Communications Technology (ICICT). Cairo, Egypt. December 2007.
- [Idoudi et al., 2006] H. Idoudi, W. Akari, A. Belghith & M. Molnár, "Power-Aware Alternation : Alternance synchrone pour la conservation d'énergie dans les réseaux ad hoc", In Colloque International Sur l'Informatique et ses Applications. Oujda, Morocco. October 2006.
- [Idoudi et al., 2005] H. Idoudi, M. Molnár & A. Belghith, "Power Aware Alternation Protocol: a Novel Power Saving Mechanism for Ad Hoc Networks", In Third International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (Het-Net). Iikley, U.K. July 2005.
- [Lahoud, 2005] S. Lahoud, "Fully Polynomial Approximation for Survivable Flow Allocation with Max-Min Fairness", In Co-NEXT, Student Workshop. Toulouse, France. 2005.
- [Lahoud et al., 2006] S. Lahoud, G. Texier & L. Toutain, "Flow Allocation with Varied Survivability for Traffic Engineering in NGI Networks", In 2nd Conference on Next Generation Internet Design and Engineering, NGI. Valencia, Spain. 2006.
- [Lahoud et al., 2006a] S. Lahoud, G. Texier & L. Toutain, "Flow Allocation with Path Protection in Next Generation Internet Networks", In IEEE International Conference on Communications, ICC. Istanbul, Turkey. 2006.
- [Lahoud et al., 2005] S. Lahoud, G. Texier & L. Toutain, "FATE: A Polynomial Time Framework for Flow Allocation in MPLS-TE Networks", In 14th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks, LANMAN. Crete, Greece. 2005.
- [Lahoud et al., 2005a] S. Lahoud, G. Texier & L. Toutain, "Off-line Flow Allocation for Traffic Engineering in MPLS Networks", In Third International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks, HET-NETs. West Yorkshire, U.K. 2005.
- [Legrand et al., 2008] T. Legrand, H. Nakajima, P. Gavignet & B. Cousin, "Labelled OBS Test Bed for Contention Resolution Study", In 5th International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems (Broadnets 2008) - International Workshop on Optical Burst/Packet Switching (WOBS). London, UK. September 2008.
- [Mabrouki and Lagrange, 2007] I. Mabrouki & X. Lagrange, "Marche aléatoire dans les réseaux de capteurs sans fils", In Workshop of Spontaneous Networks. October 2007.
- [Mabrouki et al., 2007] I. Mabrouki, X. Lagrange & G. Froc, "Random Walk Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks", In Workshop on interdisciplinary systems approach in performance evaluation and design of computer & communication systems. October 2007.
- [Marie and Molnár, 2007] R. Marie & M. Molnár, "A Markovian Model for Element State Evaluation in Dynamic Networks", In International Workshop on Dynamic Networks at INSA (invited). Rennes. September 2007.
- [Marie et al., 2007] R. Marie, M. Molnár & H. Idoudi, "A simple automata based model for stable routing in dynamic ad hoc networks", In PM2HW2N '07: Proceedings of the 2nd ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks. New York, NY, USA. October 2007.
- [Molnár, 2009] M. Molnár, "On the Optimal Tree-Based Explicit Multicast Routing ", In Second International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service CTRQ, IARIA. Colmar, France. July 2009.
- [Molnár et al., 2005] M. Molnár, A. Guitton, B. Cousin & R. Marie, "Efficient protection of many-to-one communications", In 5th European Dependable Computing Conference (EDCC 2005), Springer-Verlag, LNCS . Budapest, Hungary. 2005.

- [Molnár et al., 2007] M. Molnár, J. Levendovszky, P. Leguesdron & C. Végső, "QoS multicast routing with uncertain link state information", In International Network Optimization Conference. Spa, Belgium. April 2007.
- [Molnár et al., 2008] M. Molnár, G. Simon & L. Gönczy, "Robustness and Performance Analysis of a Dynamic Sensor Network Scheduling Algorithm", In First International Workshop on Future Trends on Design and Analysis of Dynamic Networks FTDA-DN. Hong Kong, China. July 2008.
- [Moulierac et al., 2006] J. Moulierac, A. Guitton & M. Molnár, "Multicast Tree Aggregation in Large Domains", In IFIP Networking, LNCS. 2006.
- [Moulierac et al., 2006a] J. Moulierac, A. Guitton & M. Molnár, "On the number of MPLS LSP using Multicast Tree Aggregation", In IEEE Globecom. November 2006.
- [Moulierac and Molnár, 2006] J. Moulierac & M. Molnár, "On the number of multicast aggregated trees in a domain", In 2nd Student Workshop of IEEE Infocom. April 2006.
- [Moulierac and Molnár, 2006a] J. Moulierac & M. Molnár, "Active Monitoring of Link Delays in Case of Asymmetric Routes", In IEEE International Conference on Networking (ICN). April 2006.
- [Pocquet et al., 2008] A. Pocquet, B. Cousin, M. Molnár & P. Parraud, "Performance Analysis of CGS, a k-Coverage Algorithm Based on One-Hop Neighboring Knowledge ", In Second International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM 2008). Cap Esterel, France. August 2008.
- [Pocquet et al., 2007] A. Pocquet, B. Cousin, M. Molnár & P. Parraud, "Security Study of the Controlled Greedy Sleep (CGS) Algorithm", In International Workshop on Dynamic Networks at INSA (invited). Rennes. September 2007.
- [Saidi et al., 2009] M.Y. Saidi, B. Cousin & J. Le Roux, "Backup Path Classification based on Failure Risks for Efficient Backup Path Computation ", In 8th International Conference on Networking (Networking 2009). Aachen, Germany. May 2009.
- [Saidi et al., 2008] M.Y. Saidi, B. Cousin & J. Le Roux, "Distributed PLR-based Backup Path Computation in MPLS Network", In IFIP/TC6 Networking. May 2008.
- [Saidi et al., 2008a] M.Y. Saidi, B. Cousin & J. Le Roux, "Targeted Distribution of Resource Allocation for Backup LSP Computation", In Seventh European Dependable Computing Conference (EDCC-7). May 2008.
- [Saidi et al., 2008b] M.Y. Saidi, B. Cousin & J.L. Roux, "Distributed PLR-Based Backup Path Computation in MPLS Networks", In Networking. 2008.
- [Saidi et al., 2007] M.Y. Saidi, B. Cousin & J. Le Roux, "A Distributed Bandwidth Sharing Heuristic for Backup LSP Computation", In IEEE Globecom. Washington. December 2007.
- [Saidi et al., 2006] M.Y. Saidi, B. Cousin & M. Molnár, "An Improved Dual-Forest for Multicast Protection", In 2nd Conference on Next Generation Internet Design and Engineering Conference. Valencia, Spain. April 2006.
- [Simon et al., 2007] G. Simon, M. Molnár, L. Gönczy & B. Cousin, "Dependable k-coverage algorithms for sensor networks", In IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Warsaw, Poland. May 2007.
- [Zhou et al., 2008] F. Zhou, M. Molnár & B. Cousin, "Avoidance of Multicast Incapable Branching Nodes for Multicast Routing in WDM Networks", In 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks. Montreal, Canada. October 2008.
- [Zhou et al., 2008a] F. Zhou, M. Molnár & B. Cousin, "Distance Priority Based Multicast Routing in WDM Networks Considering Sparse Light Splitting", In 11th IEEE Conference on Communication Systems. Guangzhou, China. 2008.

7.5 Conférences nationales

[Akari et al., 2006] W. Akari, A. Belghith & H. Idoudi, "Evaluation de l'implémentation de PSM (Power Saving Mode) sous le simulateur J-Sim", In Journées Scientifiques Des Jeunes Chercheurs En Génie Electrique et Informatique, GEI'2006. Hammamet, Tunisia. March 2006.

[Boudani and Cousin, 2005b] A. Boudani & B. Cousin, "Arbres multicast dans un réseau MPLS", In Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles (CFIP). Bordeaux, France. March 2005.

[Drid et al., 2008] H. Drid, B. Cousin & M. Molnár, "Une heuristique pour calculer l'ensemble des p-cycles protégeant les communications dans les réseaux optiques WDM", In 9ème journées doctorales en Informatique et Réseaux (JDIR'08). January 2008.

[Guette et al., 2005] G. Guette, B. Cousin & D. Fort, "Le roulement automatique des clés de confiance dans les résolveurs DNSSEC", In 4ème rencontre francophone sur la Sécurité et Architecture Réseaux (SAR). Batz-sur-mer, France. 2005.

[Idoudi et al., 2007] H. Idoudi, M. Molnár & A. Belghith, "MarkovNet : Modélisation de la dynamique des réseaux ad hoc", In Journées Scientifiques Des Jeunes Chercheurs En Génie Electrique et Informatique, GEI'2007. Monastir, Tunisia. March 2007.

[Idoudi et al., 2005] H. Idoudi, M. Molnár & A. Belghith, "Coopération synchronisée pour la conservation d'énergie dans les réseaux ad hoc", In Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles (CFIP). Bordeaux, France. March 2005.

[Legrand et al., 2008] T. Legrand, H. Nakajima, P. Gavignet, B. Charbonnier & B. Cousin, "Etude numérique de la résolution spectro-temporelle de contention de burst et réalisation d'un noeud OBS (Poster)", In 27ème Journées Nationales d'Optique Guidée. Lannion, France. October 2008.

[Legrand et al., 2008a] T. Legrand, H. Nakajima, P. Gavignet & B. Cousin, "Comparaison de l'OBS conventionnel et de l'OBS à labels", In 27ème Journées Nationales d'Optique Guidée. Lannion, France. October 2008.

[Mabrouki et al., 2007] I. Mabrouki, G. Froc & X. Lagrange, "Biased Random Walk Model to estimate Routing Performance in Wireless Sensor Networks", In Rencontres francophones sur les aspects algorithmiques des télécommunications, Algotel. May 2007.

[Mabrouki and Lagrange, 2007] I. Mabrouki & X. Lagrange, "Marche aléatoire dans les réseaux de capteurs sans fils", In Proc. of JDIR'07. January 2007.

[Saidi et al., 2006] M.Y. Saidi, B. Cousin & M. Molnár, "Protection remontante des communications multicast", In Conférence MajecSTIC 2006. Lorient, France. November 2006.

7.6 Rapports de recherche

[Ben Ali et al., 2008] N. Ben Ali, M. Molnár & A. Belghith, "Multi-constrained QoS Multicast Routing Optimization". IRISA, Technical Report 1882, February 2008.

[Ben Ali et al., 2008a] N. Ben Ali, J. Moulierac, A. Belghith & M. Molnár, "mQMA: multi-constrained QoS Multicast Aggregation". IRISA, Technical Report 1881, February 2008.

[Bertrand et al., 2008] G. Bertrand, S. Lahoud, M. Molnár & G. Texier, "Inter-Domain Path Computation with Multiple Constraints". IRISA, Technical Report 1902, July 2008.

[Boudani and Cousin, 2005b] A. Boudani & B. Cousin, "An hybrid explicit multicast/recursive unicast approach for multicast routing". IRISA, Technical Report 1687, February 2005.

[Boudani and Cousin, 2005c] A. Boudani & B. Cousin, "Multicast Tree in MPLS Network using MMT and MMT2 Protocols". IRISA, Technical Report 1681, January 2005.

[Idoudi et al., 2006] H. Idoudi, W. Akari, A. Belghith & M. Molnár, "Alternance synchrone pour la conservation d'énergie dans les réseaux ad hoc". INRIA, Technical Report 6045, December, 2006.

[Lahoud et al., 2005] S. Lahoud, G. Texier & L. Toutain, "Flow Allocation with Path Protection in Next Generation Internet Networks". ENST Bretagne, Technical Report RR-2005004-RSM, 2005.

[Molnár, 2008] M. Molnár, "Hierarchical Structures for Partial Spanning Problems with Constraints". IRISA, Technical Report 1900, July 2008.

[Moulierac and Molnár, 2005] J. Moulierac & M. Molnár, "Active monitoring of delays with asymmetric routes". INRIA, Technical Report 5635, May, 2005.

[Saidi et al., 2006a] M.Y. Saidi, B. Cousin & M. Molnár, "An Efficient Multicast Protection Scheme based on a Dual-Forest". IRISA, Technical Report 1786, March, 2006.

8 Annexes

8.1 Activités de recherche antérieures

8.1.1 Projet franco-allemand NGDG

Ce projet a pour but de permettre la création à faible coût d'un réseau d'accès à très haut débit, mais d'étendue limitée (quelques kilomètres). Ce réseau d'accès a pour vocation d'alimenter l'ensemble de la population. S'appuyant sur les liens Ethernet à haut débit, une architecture redondante et assez fortement arborescente, nous développons des techniques de contrôle qui permettent à la fois de gérer efficacement les ressources du réseaux et de prendre en compte rapidement toute panne de nœud ou rupture de lien. Les résultats de ces travaux font l'objet de closes restrictives. Toutefois ce sujet de recherche a été prolongé et étendu au sein d'autres actions qui sont publiés à partir de 2006. Ce projet est développé en coopération avec le centre de recherche d'Alcatel à Stuttgart, les universités de Stuttgart et de Dresde. Le projet a été clôturé en 2006.

8.1.2 Projet français RNRT IDsA

Ce projet a eu pour premier objectif de permettre le déploiement du DNSsec dans le domaine ".fr". Ce projet est basé sur IPv6. Les partenaires de ce projet étaient France Telecom R&D, l'AFNIC, l'ENST-Bretagne, et l'IRISA. Nous collaborons très étroitement avec les quelques équipes qui mènent une recherche similaire aux Etats-unis, en Europe ou en Asie, dans le double but de partager nos expériences mais surtout de développer le DNSsec au niveau mondial. Nous développons un certain nombre d'outils, par exemple un résolveur capable d'exploiter efficacement DNSsec. Nous avons étudié les conséquences de disposer d'une l'infrastructure mondiale permettant de sécuriser d'autres applications. Ce contrat s'est terminé en 2005.

8.1.3 Projet européen IST Asset

Le but essentiel de ce projet européen était de permettre à différents constructeurs proposant des équipements rentrant dans la constitution de studios de production pour la télévision numérique d'être interopérables entre eux. Notre rôle est de définir un service de transfert de données et de commandes adaptées à la gamme d'applications envisagées et de l'intégrer dans l'architecture proposée. Cette architecture est décrite dans l'article que nous avons publié au NAB 2003, à l'IBC 2003 et a été amélioré en 2005 [Cousin and Body, 2005], puis dans la revue SMPTE Motion Imaging Journal en 2004. Nous proposons plus particulièrement l'utilisation de techniques d'ingénierie de réseau pour contrôler la charge et nous pensons déployer quelques protocoles particulièrement performants dans le cadre de la transmission multicast. Ce projet a pour partenaire Thomson Multimedia IT Broadcasting, HP, ANN systems GmbH, INESC Porto, Manage Storage, SHS multimedia. Ce projet s'est terminé en 2004.

8.1.4 Projet européen ITEA Cascade

J'ai participé au projet européen pour le développement d'une régie audiovisuelle virtuelle et répartie. Nous avons travaillé en coopération avec Thomson Broadcast Systems, Compaq, Nexus, StorageTek. Nous proposons une étude de l'infrastructure de communication qui devait permettre l'interconnexion des différents équipements tout en garantissant un service de transmission de niveau élevé. Nous y avons proposé notre expertise dans les domaines de l'ingénierie des réseaux : nos techniques de régulation de la commutation pour ATM. Nous étions responsable pour l'IRISA de ce projet qui s'est terminé en juin 2001.

8.1.5 Projet français RNRT VTHD

Ce projet consiste à mettre en œuvre et à expérimenter un réseau IP à très haut débit. C'est un réseau IP sur WDM mis en place pour étudier les impacts du très haut débit dans les réseaux. Ce réseau relie, entre autres, les centres de recherche de FT R&D, de l'INRIA et du GET. En effet vu les

débits offerts, complexifier le traitement des paquets dans les routeurs peut avoir des conséquences sur les performances du réseau. Nous avons participé à la définition des classes de service et défini des outils de mesure 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. L'équipe Armor a eu en outre la responsabilité du sous-projet concernant les aspects sécurité. Ce projet a été renouvelé dans le même cadre sous le nom VTHD++. Ils sont tous les deux terminés.

8.1.6 NoE européen EuroNGI et EuroFGI

Depuis sa création en 2004, nous sommes membre du réseau d'excellence européen EuroNGI ("New Generation Internet"). Notamment nous avons participé au groupe travail sur "Traffic engineering, traffic management, congestion control and end to end QoS". Dans ce cadre, B. Cousin y a donné deux cours (de niveau PhD) dans le cadre d'un enseignement européen sur deux domaines de notre expertise scientifique : "Security in IP networking" et "Multicasting". On a participé au renouvellement de ce NOE dans le cadre du nouveau projet EuroFGI pour 2006-2008.

8.2 Coopérations et animations de la recherche

8.2.1 Projet franco-asiatique Nautilus 6

Depuis 2004, dans le cadre d'un accord franco-asiatique, nous collaborons avec des équipes scientifiques au Japon et en Corée, notamment avec le consortium japonais Wide. Nous proposons dans le cadre des réseaux mobiles (NEMO) d'utiliser notre solution de routage explicite pour la transmission multicast [Boudani and Cousin, 2005; 2005a].

8.2.2 Projet franco-libanais Cedre

Cette collaboration scientifique entre l'Irisa à Rennes et l'université libanaise à Beyrouth dans le cadre du programme de collaboration franco-libanais Cèdre (Coopération pour l'Évaluation et le Développement de la Recherche), sur le thème de l'ingénierie de trafic de type multicast au sein des réseaux à haut débit. Ce projet a donné lieu à plusieurs publications scientifiques avec nos collègues libanais S. Jawhar, M. Doughan, A. Boudani. Il y eu plusieurs échanges de chercheurs ou de thésards, libanais en France et français au Liban. Ce projet s'est déroulé sur 2 ans 2002 et 2003.

8.2.3 Coopération scientifique franco-libano-tunisienne

Entre 2004 et 2008, nous avons bénéficié d'une aide de l'agence francophone et d'une aide annuelle de l'INRIA pour renforcer la coopération existantes avec nos partenaires libanais et tunisiens, et ce, dans notre domaine commun de recherche. Cette coopération internationale rassemble l'université libanaise de Beyrouth, l'Ecole Nationale des Sciences de l'Information (ENSI), et l'université de Rennes 1. Cela donne lieu à de nombreux échanges autour de la méditerranée, de jeunes thésards ou de chercheurs plus confirmés. Il a eu au cours des 4 dernières années plus d'une douzaine de publications communes entre les membres de nos équipes.

8.2.4 Projet Balaton

En 2005, puis en 2007 et enfin en 2009, nous avons monté et participé à trois coopérations scientifiques entre l'Université Technique de Budapest et l'IRISA dans le cadre d'un projet Balaton. Ce projet porte sur le domaine de la sûreté de fonctionnement des services basés sur les réseaux de capteurs.

8.2.5 Projet STIC INRIA

En 2005, en 2006 et en 2007, nous avons bénéficié d'une aide STIC INRIA, pour notre projet de collaboration avec le laboratoire CRISTAL de l'ENSI (Tunisie). Nous avons étudié le routage dans les réseaux dynamiques. La synergie produite par cette collaboration a été extrêmement fructueuse puisqu'elle a généré de nouveaux projets, de nombreuses publications, une thèse en co-tutelle, chaque

partenaire étant complémentaire.