

IRAMUS : Interface RAdio pour les réseaux MULti-Sauts

Projets INRIA ARES, POPS
partenaire universitaire : IREENA Nantes
partenaire industriel : France Télécom R&D, Meylan

Porteur du projet : Jean-Marie Gorce

30 novembre 2004

Résumé

Les réseaux radio multi-sauts peuvent se définir comme des réseaux auto-organisés, sans architecture, dans lesquelles chaque terminal (ou nœud) est capable de router les données. Une communication entre 2 nœuds peut donc s'appuyer sur les nœuds intermédiaires. Les réseaux de capteurs constituent un cas particulier de ces réseaux multi-sauts et prennent une place de plus en plus importante.

La conception des protocoles adaptés à ces réseaux est complexe. D'une part parce que ces réseaux présentent des caractéristiques variées, et d'autre part parce qu'il est difficile de mener des expérimentations à grande échelle. Si les simulations et les modèles proposés dans la littérature sont nombreux, ils reposent en général sur une modélisation très (trop?) simpliste de la couche physique, le modèle à double seuil (seuil de réception, seuil de brouillage), étant le plus communément utilisé. Une modélisation plus fine est incontournable. Afin d'améliorer cette modélisation, il est nécessaire de connaître précisément les caractéristiques de la couche radio utilisée. La plate-forme radio mise en place cette année au sein du projet ARES permettra d'évaluer précisément l'implantation de la couche radio dans les systèmes que nous utiliserons (WiFi, réseaux de capteurs).

Le développement de réseaux multi-sauts se base en général sur un modem radio existant (par exemple IEEE802.11b) développé dans un contexte qui est souvent éloigné du contexte multi-sauts. Par conséquent, ce modem radio présente en général des propriétés mal adaptées à ces réseaux. Le développement du protocole réseau est alors effectué en tenant compte (ou pas) de ces imperfections. Il apparaît dès lors prometteur d'aborder le problème dans une démarche descendante, c'est-à-dire de définir le modem radio en fonction des contraintes applicatives. Cela pourra conduire à la définition de ce qu'est une bonne couche physique pour ces réseaux.

Ce projet se donne donc deux objectifs qui sont liés : une modélisation fine de la couche radio et une définition d'un modem radio adapté aux réseaux multi-sauts. Pour cela, il est nécessaire d'initier un partenariat autour de ces objectifs entre des chercheurs du monde réseau et du monde des communications numériques. Ce travail ne peut être mené uniquement en interne au sein des équipes POPS et ARES. Ce projet devrait permettre aux équipes INRIA impliquées d'améliorer leur compréhension de la couche physique des réseaux multi-sauts. Ce projet pourrait conduire au prototypage d'un modem radio dédié aux systèmes multi-sauts, et plus particulièrement aux réseaux de capteurs.

1 Membres du projet

- ARES, INRIA Rhône-Alpes, CITI, INSA-Lyon
coordinateur : Jean-Marie Gorce
Participants : Guillaume Chelius, Eric FLeury, Isabelle Guerin-Lassous, Fabrice Valois, Guillaume Villemaud.
- POPS, INRIA FUTUR, LIFL, Lille
coordinateur : David Simplot-Ryl
Participants : Jean Carle, Damien Deville, Antoine Gallais et François Ingelrest.
- IREENA, Equipe Communications Numériques et Radiofréquences, Polytech Nantes
coordinateur : Jean-François Diouris
Participants : Serge Toutain, Yide Wang.
- France Télécom R&D, Meylan
coordinateur : Dominique Barthel
Participants : Marylin Arndt, Denis Callonnec, Benoit Miscopein, Michel Pons, Philippe Mary.

2 Description générale

2.1 Motivations

Les projets POPS et ARES de l'INRIA ont en commun de s'intéresser aux protocoles permettant le routage dans les réseaux multi-sauts. Les applications sont extrêmement variées et possèdent des propriétés foncièrement différentes. Pour les réseaux de capteurs, les débits sont faibles, mais les contraintes de consommation d'énergie et de fiabilité sont prioritaires. Au contraire, dans les réseaux multi-sauts hybrides, où le réseau ad-hoc peut être vu comme un prolongateur de la couverture d'un point d'accès, la contrainte d'énergie, bien qu'importante, passe au second plan derrière les contraintes d'équité et d'optimisation de la bande passante.

Aujourd'hui, les équipes POPS et ARES s'intéressent essentiellement aux protocoles pour les réseaux multi-sauts. Jusqu'à présent, ces équipes se sont assez peu intéressées aux aspects de la couche physique. En général, leurs études reposent sur un modem radio standard avec une modélisation très simpliste (canal radio parfait, seuil de couverture idéal, etc.). Deux axes de recherche fortement liés émergent de ces constatations et ont pour vocation de répondre aux 2 questions suivantes :

- La modélisation usuelle de la couche physique est-elle fiable ? Comment peut-on l'améliorer ?
- Le modem radio standard n'est probablement pas adapté à la problématique des réseaux multi-sauts. Comment peut-on définir un modem radio mieux adapté à ces réseaux ?

C'est à ces deux questions que cette ARC va tenter de répondre. Pour la première question, il conviendra de choisir une technologie existante et disponible au sein des équipes du projet, de chercher à modéliser convenablement son fonctionnement et

d'évaluer l'impact de la modélisation sur les simulations ainsi que sur l'évaluation de performances de ces réseaux. Pour répondre à la deuxième question, nous proposons de focaliser nos efforts sur le partage des ressources (au sens large).

2.2 Caractérisation du canal radio

On entend ici par canal radio la prise en compte aussi bien des phénomènes de propagation des ondes radio que du fonctionnement du modem radio (modulation, codage d'erreurs, etc.). La plupart des protocoles pour les réseaux multi-sauts sont validés aujourd'hui sur des simulateurs qui intègrent une couche physique très simpliste : chaque mobile est supposé équipé d'une interface sans fil omnidirectionnelle. Deux cercles concentriques sont alors définis autour d'un nœud émetteur : la zone de couverture et la zone de brouillage. Si le nœud récepteur est dans la zone de couverture, la connexion est supposée parfaite, et s'il n'y est pas, la transmission est impossible. La modélisation de brouillage est également très simple, avec un système similaire à seuil. En pratique, le comportement est très différent et ces zones ne sont ni concentriques ni statiques dans le temps. L'amélioration de la modélisation de brouillage est aussi capitale, car l'amélioration de ces systèmes passe probablement par une réduction significative des interférences (comme on le verra ci-après).

Disposer de simulateurs pertinents est fondamental pour l'évaluation des protocoles proposés. Ceci est d'autant plus important que l'expérimentation en environnement réel est très lourde à mener : mettre en place un réseau multi-sauts, connaître sa topologie dans le temps, lancer des expérimentations, récupérer et fusionner les traces demandent un investissement important en temps et en main d'œuvre. La simulation est donc une étape incontournable, notamment pour faire des évaluations sur des réseaux à large échelle, comme peuvent l'être certains réseaux de capteurs par exemple. Il est donc impératif d'améliorer la modélisation de la couche physique et cette amélioration passera par une caractérisation fine du canal radio multiple.

2.3 Partage des ressources

Nous avons montré qu'un certain nombre de problèmes et en particulier d'iniquité ou tout au moins d'inefficacité dans l'accès au medium pouvaient provenir des spécificités même de la couche radio. Prenons un exemple simple de chaîne multi-sauts, constituée de K nœuds A_1 à A_K . Pour communiquer avec le nœud A_K , le nœud A_1 va devoir communiquer avec A_2 qui lui-même va communiquer avec A_3 , etc. Ainsi chaque nœud doit retransmettre l'information qu'il reçoit. Actuellement, la plupart des technologies sans fil proposées (et aussi utilisées dans les réseaux radio multi-sauts) sont en accès partagé de type CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance), ce qui impose qu'un nœud ne puisse simultanément émettre et recevoir, ni recevoir lorsque ces voisins émettent. Il résulte de ce schéma, que le débit moyen pour la transmission d'un seul flux est divisé au moins par 4. Cette inefficacité ne peut être réduite car le modem radio travaille sur un seul canal.

Il est légitime de penser qu'un système exploitant le multi-canal (duplex, multi-porteuses, CDMA, etc.) permettrait de réduire cette inefficacité.

2.4 Positionnement de l'ARC

Cette action devra permettre de prendre en compte la complexité du medium radio dans la modélisation et la simulation des réseaux multi-sauts, ainsi que de proposer la

mise en œuvre de techniques radio pour améliorer le comportement des réseaux multi-sauts. De ce fait cette proposition de recherche est cohérente avec un des 2 axes prioritaires fixés par l'appel à projets. « Coupler modèles et données pour simuler et contrôler les systèmes complexes. Parmi les systèmes complexes pour lesquels les caractéristiques sont hétérogènes (masses de données reçues par des capteurs multiples, modèles physiques couplés), on privilégiera en particulier les domaines de la modélisation du vivant, des télécommunications et de l'environnement. ». Dans les questions posées par cette ARC, la problématique de partage multi-canal est une problématique transversale et doit faire appel simultanément à des compétences en réseaux et en communications numériques. C'est l'objectif premier de cette ARC, ce qui est en phase avec l'appel à projet : « Ce programme veut favoriser l'émergence rapide de certains sujets, encourager les initiatives de jeunes chercheurs et soutenir des coopérations scientifiques nouvelles, impliquant notamment des équipes qui ont des compétences différentes ». D'autre part, l'équipe ARES possède quelques compétences sur les communications numériques et traitement du signal, mais il est souhaitable de les renforcer en allant chercher des compétences à l'extérieur de l'INRIA. Ce qui est également compatible avec le 2e objectif de l'appel d'offres : « Ces actions permettent aussi à l'INRIA de s'ouvrir vers de nouveaux partenariats de recherche : la participation de chercheurs ou de groupes de recherche extérieurs (Universités, CNRS, EPST spécialistes, Grandes Ecoles, laboratoires de recherche industriels) en liaison avec les projets de l'INRIA est tout à fait bienvenue ».

3 Description des activités scientifiques envisagées

3.1 Modélisation du canal radio

Dans ce premier axe de recherche, il s'agit plus particulièrement d'affiner la modélisation et la simulation du comportement des réseaux multi-saut exploitant des technologies existantes. Cette phase de modélisation est fondamentale pour la validation de la deuxième partie. La modélisation du canal radio dans un réseau multi-sauts ne peut pas être considérée uniquement dans une approche point à point où un lien seul et isolé entre deux entités communicantes est pris en compte. Le canal radio est et doit être modélisé comme un canal multidimensionnel, capable de représenter les liaisons de tous les nœuds interférants, 2 à 2. D'autre part, la modélisation du canal radio impose la connaissance et la modélisation fine de toute l'interface radio (modulation, codage d'erreur, etc.).

Nous proposons d'évaluer la qualité d'un modèle en comparant les performances réelles d'un réseau multi-saut et les performances simulées via un simulateur qui intègre le modèle proposé. Pour cela nous bénéficierons de plusieurs réseaux réels de référence : un réseau WiFi et un réseau de capteurs Uplog au sein du projet ARES et un réseau de capteurs au sein du projet POPS. De plus, l'évaluation précise de la couche radio de ces équipements pourra être réalisée grâce à la plate-forme radio mise en œuvre au sein du projet ARES en collaboration avec l'INSA de Lyon. Nous chercherons à reproduire le comportement observé de ces réseaux en simulation, sous NS ou Opnet. Il sera possible de coupler éventuellement le logiciel de simulation de propagation Indoor développé par le projet ARES.

Enfin, nous étudierons l'impact de différents paramètres sur le fonctionnement des réseaux, et nous chercherons à développer une modélisation générique des réseaux multi-sauts, permettant l'évaluation de performances analytique de ces réseaux. Cette

approche analytique pourra exploiter les algèbres de processus, et devrait permettre de prédire le comportement de ces réseaux lors du passage à grande échelle.

3.2 Modem radio adapté

Dans le contexte des réseaux multi-sauts, on peut définir un modem radio adapté autour de 3 axes :

- L'approche la plus conventionnelle pour faire du multi-canal consiste à partager les ressources radio, comme par exemple un partage en temps (slots), en fréquence (multi-porteuses) ou en codes (CDMA). Cependant, le développement d'un système de partage des ressources dans les réseaux multi-sauts pose le problème de l'affectation des ressources, quel que soit le mode de partage (slots, multi-porteuses ou codes). En effet, le réseau multi-sauts est un réseau non hiérarchique à la base, et l'affectation des ressources ne peut se faire de façon centralisée comme c'est le cas pour les réseaux cellulaires. La gestion de l'affectation dynamique des ressources et des interférences entre ressources doit être repensée dans un contexte multi-sauts. Bien évidemment, les contraintes et les modèles ne seront pas les mêmes suivant qu'il s'agira d'un réseau de capteurs (mobilité réduite, débit faible) ou d'un réseau de type WLAN (mobilité forte, débit élevé). Le partage des ressources de type CDMA devra absolument être envisagé. C'est une thématique très actuelle et plusieurs articles ont été publiés très récemment. Cependant peu de travaux proposent une mise en œuvre réaliste et on retrouve très vite le clivage entre les deux communautés que cette ARC tente d'atténuer : soit les études s'intéressent essentiellement au traitement du signal et très peu aux protocoles réseau et omettent dans le cas du CDMA la problématique de l'affectation des codes en contexte multi-sauts, soit les protocoles proposés se placent dans un contexte radio idéal et dans le cas du CDMA négligent les interférences entre codes. Nous pourrions définir les propriétés souhaitées sur les codes afin de nous orienter vers une famille de codes qui respecte ces contraintes.
- La mise en œuvre de systèmes multi-antennes semble intéressante pour la réduction des interférences et l'augmentation du facteur de réutilisation des ressources dans ces réseaux. Il faudra néanmoins tenir compte de contraintes de consommation, de coût et d'encombrement. D'un point de vue théorique, la mise en œuvre de réseaux d'antennes devrait également permettre de réduire la consommation de puissance à l'émission. Reste qu'une politique fine de gestion des ressources sera plus délicate à réaliser. Encore une fois, l'idée d'utiliser les antennes adaptatives dans les réseaux multi-sauts n'est pas nouvelle. Cependant, sa mise en œuvre, associant à la fois le traitement d'antennes proprement dit et le protocole d'affectation de ressources reste un problème complexe et non réalisé à ce jour.
- Une autre façon d'accroître la fiabilité de ces systèmes pourrait être la mise en place d'une approche multi-chemins, en tenant compte des chemins multiples de l'information au sein d'un réseau multi-sauts. En effet, aujourd'hui, dans un réseau multi-saut, la plupart des protocoles sélectionnent le chemin le plus direct. Cependant, à chaque fois qu'un nœud réemet une trame, plusieurs nœuds (tous ceux qui sont dans le voisinage) reçoivent le message. Cette redondance n'est absolument pas exploitée actuellement. On pourrait envisager

des approches de type codage distribué avec correction ou contrôle d'erreur en chaque nœud. L'idée d'une vision multi-chemins semble très prometteuse, dès lors que l'on saura éviter la surcharge du réseau, et que l'on trouvera un moyen de corriger progressivement les données transmises, sans ralentir le flux. Peu de choses n'ont été encore proposées en ce sens. Dans un réseau multi-sauts, un flux de données est la plupart du temps imaginé comme un flux à chemin unique multi-sauts. Les techniques de routage multi-chemins élaborés actuellement dans ces réseaux n'ont pour seuls buts que d'augmenter la probabilité de succès de recevoir un paquet ou de répartir la charge dans le réseau et les objectifs sont très différents de ceux que nous proposons ici.

Ces 3 possibilités ne sont pas incompatibles et pourront probablement être combinées. Cela devra être envisagé. D'autre part, l'impact de toutes ces techniques devra être évalué au regard des simulations et de la modélisation telles que définies dans la section précédente.

3.3 Plan de travail

Le travail à effectuer au cours de cette ARC peut se résumer de la façon suivante :

- Axe 1 : modélisation
 - choix des applications cibles : nombre de nœuds visé, environnement, technologie radio.
 - mesures et évaluation de performance : définition de scénarios cibles, et mesure des caractéristiques de l'interface radio et du canal à l'aide de la plateforme radio.
 - mise au point des modèles, simulations et raffinement des modèles en fonction des résultats de simulations et d'expérimentations.
- Axe 2 : radio adaptée
 - impact et mise en œuvre du CDMA dans les réseaux multi-sauts. Evaluation de performances.
 - impact du SDMA (Special Division Multiple Access) et caractérisation du nombre d'antennes optimal. Evaluation de performances.
 - définition d'une approche codage multi-voies distribuée. Evaluation de performances.

4 Savoir-faire des équipes concernées

4.1 ARES, INRIA Rhône-Alpes. CITI, INSA-Lyon

membres participants : Guillaume Chelius, Eric Fleury, Jean-Marie Gorce, Isabelle Guerin-Lassous, Fabrice Valois, Guillaume Villemaud.

Le projet ARES possède une expertise forte dans la modélisation et la définition des protocoles pour les réseaux multi-sauts. L'équipe a déjà beaucoup travaillé sur l'évaluation de performances des réseaux ad-hoc basés sur le standard IEEE 802.11, et sur l'adaptation de cette norme au contexte multi-sauts. Le projet ARES s'est doté en 2004 d'une plateforme radio en partenariat avec l'INSA de Lyon. Cette plateforme est

composée d'un générateur de signaux et d'un récepteur RF fonctionnant tous deux de 0 à 6GHz, sur une bande passante de 36MHz. Ces équipements de Agilent Technology sont interfacés avec la plate-forme de simulation ADS (Ptolemy simulator). Cette plate-forme permettra de mesurer et d'évaluer le comportement des modems radio comme celui des cartes 802.11b par exemple. D'autre part, le projet ARES apportera également une plate-forme de capteurs par sa participation au projet de plate-forme du CNRS. Le projet ARES a également développé un moteur de simulation de la propagation radio, qui pourra améliorer la simulation des réseaux multi-sauts.

4.2 POPS, INRIA FUTUR, LIFL, Lille

membres participants : Jean Carle, Damien Deville, Antoine Gallais, François Ingelrest, David Simplot-Ryl .

Le projet POPS possède une expertise sur le développement de systèmes logiciels (système d'exploitation dont la couche réseau) pour petits objets tels que des étiquettes électroniques, des cartes à microprocesseur ou des capteurs ainsi que sur l'interface hard-soft de par sa collaboration avec des chercheurs en électronique au sein de l'IR-CICA¹. Ceci a été l'occasion de développer des compétences sur le développement de composants systèmes idoines en fonction de la couche physique utilisée pour la communication. La spécialisation de ces composants systèmes s'appuie sur des modèles de la couche physique. Les modèles développés pour la couche physique, fournis par l'électronique, sont généralement issues de simplifications intensives de la réalité et correspondent la plupart du temps au cas idéal du point à point. C'est pourquoi nous nous intéressons à l'adaptation de nos protocoles de communication à de nouveaux modèles physiques comme ceux apparus récemment [Stojmenovic à MASS 2004].

4.3 IREENA, Polytech Nantes

membres participants : Jean-François Diouris, Serge Toutain, Yide Wang.

L'équipe Communications Numériques et Radiofréquences de l'Institut de Recherches en Electronique et Electrotechnique de Nantes Atlantique s'intéresse à l'optimisation des performances des couches physiques associées aux systèmes de communication avec les mobiles. Les compétences de ce groupe vont des communications numériques et du traitement du signal pour les télécommunications à la conception de sous-systèmes radio-fréquences.

Dans le cadre du projet IRAMUS, l'équipe apportera ses compétences dans les domaines suivants :

- Le traitement d'antenne pour les communications : l'équipe travaille depuis plusieurs années sur les antennes adaptatives, la diversité d'émission et de réception et la formation de voies appliquées aux systèmes de communications radiomobiles notamment dans le cadre de l'UMTS. Elle a également acquis une compétence sur les systèmes MIMO avec notamment la réalisation d'un démonstrateur.
- Le CDMA : l'équipe a travaillé sur des techniques de diversité spatio-temporelle et de réjection d'interférences multi-utilisateurs dans un contexte CDMA.
- Les communications numériques : modulation, codage, égalisation, modélisation du canal radiomobile.

1. Institut de Recherche sur les Composants logiciels et matériels pour l'Information et la Communication Avancée

- Elle pourra également intervenir sur l'évaluation de la complexité/coût des solutions radio proposées.

4.4 France Télécom R&D, Meylan

membres participants : Marilyn Arndt, Dominique Barthel, Denis Callonnec, Benoît Miscopein, Michel Pons, Philippe Mary.

La compétence couche physique radio et protocoles pour réseaux de capteurs de FTRD étudie les concepts et développe des plates-formes matérielles et logicielles permettant de tester et d'évaluer :

- des front-end radio avancés (par exemple UWB impulsif et front end reconfigurables UMTS),
- l'algorithmique de traitement canal numérique, en particulier les algorithmes avancés utilisés dans les réseaux haut-débit cellulaires ou non. (par exemple traitement multicapteurs),
- divers mécanismes (par exemple reconfiguration de la couche phy) ainsi que leur implantation sur des plates-formes embarquées,
- l'adaptation et l'optimisation des protocoles Mac et algorithmes de routage dans les réseaux ad-hoc de capteurs, visant l'économie d'énergie consommée et la maximisation de la durée de vie du réseau.

Nous avons un laboratoire d'électronique et de développement in-situ et du matériel avancé large bande, ainsi que des outils permettant de mesurer la consommation d'énergie de systèmes. Nous participons actuellement au groupe de travail 802.15.4.a (option UWB pour réseaux bas débit basse conso) avec une proposition de couche physique qui pourrait bientôt s'enrichir par la suite de propositions d'amendements sur la couche protocolaire.

5 Moyens financiers demandés

Le financement demandé pour le projet est réparti en 4 points :

- Fonctionnement du projet : organisation de réunions thématiques (2 réunion plénière /an), organisation d'un petit colloque. (10ke /an).
- Rayonnement : présentation à des conférences internationales des membres du projet (15ke /an).
- Moyens techniques : il s'agit de participer à la maintenance de la plate-forme radio et à son évolution vers du multi-canal (10ke/an).
- Moyens humains : financement de 2 postdocs (de 1 an chacun) : 50ke /an. le rôle des postdocs serait de favoriser les échanges entre les domaines de compétence réseau et communications numériques. On pourrait envisager un profil 'communication numérique', hébergé chez ARES et co-dirigé par l'IREENA.

6 Budget des équipes INRIA concernées

- ARES : dotation : 23 keuros + 90 keuros (investissement de la plate-forme radio),
contrats : 80 keuros
- POPS : fonds propres : 60 keuros (missions + doctorants), contrats : 158 keuros