

Contributions à l'amélioration de l'utilisation des ressources dans les réseaux de paquets sans fil

Résumé long

1 CONTEXTE DE LA RECHERCHE

Ces deux dernières décennies ont connu une évolution majeure de la régulation du secteur des télécommunications qui a conduit à la définition de nouveaux modèles économiques et à l'émergence de nouveaux acteurs tels que les opérateurs alternatifs, les fournisseurs de services, les fournisseurs de contenus, les opérateurs virtuels, et bien d'autres. Cette période a également vu l'ascension croissante des accès sans fil et mobile grâce notamment à l'immense succès qu'a connu la première génération de réseaux de téléphonie mobile GSM (*Global System for Mobile Communication*) et au déploiement massif de réseaux locaux sans fil (WLAN). Par conséquent, on assiste ces dernières années à une croissance perpétuelle du trafic de données Internet. De plus, les utilisateurs sont de plus en plus mobiles et nomades. Ainsi, l'accès à Internet via des ordinateurs portables et autres *smartphones* est devenu une réalité. Par exemple, en 2008 déjà, 22% des abonnés aux réseaux de téléphonie mobile aux États-Unis avait accès à l'Internet tout en étant mobiles ; et il est prévu que ce pourcentage double d'ici 2013. Grâce à la montée en popularité du *smartphone*, des tendances similaires sont également constatées en Europe et en Asie. Tous ces facteurs ont ainsi favorisé le développement intensif de nouveaux services de données et surtout de services multimédia.

La prolifération de ces nouveaux services de manière intensive a créé une demande croissante de robustesse, de capacité et de débits offerts en particulier dans la partie accès sans fil. De plus, les services multimédia imposent au réseau un certain nombre de contraintes afin de fonctionner correctement. Outre les besoins en bande passante, ces contraintes peuvent être exprimées en termes de délai, gigue, taux de perte de paquets ou encore consommation d'énergie au niveau des terminaux. Le développement de mécanismes permettant l'utilisation efficace des ressources, des réseaux sans fil et du terminal, est l'étape obligatoire pour être en mesure d'offrir des garanties aux contraintes mentionnées ci-dessus. Une utilisation efficace de ces ressources s'affiche donc comme étant un *must* pour que l'utilisateur puisse avoir une qualité d'expérience qui se rapproche de celle offerte par les réseaux câblés.

En parallèle, l'évolution des secteurs des télécommunications et de l'Internet a également favorisé l'émergence d'une multitude de nouvelles technologies sans fil permettant l'extension des frontières pour l'accès aux télécommunications et à l'Internet. De cette multitude de réseaux de paquets sans fil, on peut citer les réseaux locaux sans fils (WLANs), les réseaux d'accès sans fil large bande (BWANs), ainsi que les réseaux mobiles ad hoc (MANETs) et leurs utilisations variées. L'un des défis majeurs de ce nouvel ensemble de réseaux de paquets sans fil est de proposer des solutions robustes pour améliorer l'utilisation des ressources sans fil permettant ainsi de supporter efficacement les applications à fortes contraintes de qualité de service (QoS). L'utilisation efficace des ressources sans fil se traduit de deux manières dans ces réseaux :

1. *Au niveau paquet* : ou comment améliorer la qualité du service offerte aux flux de paquets générés par les nouveaux services de données et multimédia ?
2. *Au niveau connexion* : ou comment maintenir la qualité de service des applications lorsque les utilisateurs sont mobiles ?

Dans ce contexte général, nos travaux de recherche se sont centrés sur “*l’amélioration de l’utilisation des ressources dans les réseaux de paquets sans fil*”. Notre objectif est d’apporter des réponses innovantes aux deux questions ci-dessus. Ainsi nous nous intéresserons à : (i) l’amélioration de l’utilisation des ressources au niveau paquet pour divers contextes de réseaux de paquets sans fil, et à (ii) l’amélioration de l’utilisation des ressources au niveau connexion lorsque l’utilisateur souhaite se connecter de façon transparente et sans couture à divers réseaux de paquets sans fil hétérogènes.

2 TRAVAUX REALISES

L’émergence de nouvelles technologies sans fil à la fin des années 90, a permis l’apparition d’un ensemble de nouveaux modes d’utilisation ainsi que de nouvelles possibilités d’applications. En effet, ces nouvelles technologies sans fil peuvent être utilisées pour connecter de façon transparente un utilisateur mobile et ses applications habituelles dans Internet, ou encore être utilisées pour connecter directement des utilisateurs mobiles entre eux (c-à-d, en *ad hoc*), proposant ainsi une nouvelle gamme d’applications adaptées à ces environnements. Ces nouvelles technologies sans fil ainsi que leurs nouveaux modes d’utilisation engendrent une multitude de défis et exigent un important effort de recherche avant que ces réseaux ne soit “*déployables*”. C’est dans ce contexte que notre activité de recherche a été menée afin d’améliorer l’utilisation des ressources dans les réseaux de paquets sans fil. Différentes facettes de ce problème sont ainsi traitées. Ces facettes concernent :

1. Les mécanismes pour l’amélioration de l’utilisation des ressources sans fil au niveau connexion. Il s’agit de la gestion de la mobilité sans couture au travers de réseaux de paquets sans fil hétérogènes.
2. Les mécanismes pour l’amélioration de l’utilisation des ressources sans fil au niveau paquets. Nous nous sommes concentrés sur les études de cas suivantes: (i) l’amélioration du comportement du protocole de contrôle de transport TCP (*Transport Control Protocol*) dans les réseaux de paquets sans fil telles que les WLAN et les MANET, (ii) l’amélioration de la gestion des ressources au sein des réseaux de paquets sans fil tels que les WLANs 802.11e et BWANs assistés par des relais, et (iii) l’amélioration des communications unicast et de la diffusion dans les réseaux de véhicules.

Dans ce qui suit nous résumons chacun de ces aspects et études de cas.

2.1 La mobilité dans les réseaux de paquets sans fil hétérogènes

Les progrès dans les systèmes de communication sans fil et les appareils portables ont conduit à une évolution des usages vers une omniprésence des services de communications et leur utilisation transparente au travers de divers réseaux d’accès sans fil. Les utilisateurs mobiles seront connectés aux “meilleurs” réseaux (*Always Best Connected* ou *ABC*) n’importe où et à tout moment via différentes technologies sans fil. Les utilisateurs pourront utiliser cette diversité et profiter de l’interfonctionnement entre les systèmes d’accès sans fil afin de maximiser leur rentabilité ou améliorer la qualité de service (QoS) qu’ils perçoivent. De nouveaux mécanismes de sélection de réseaux et de gestion de la mobilité sont donc nécessaires pour gérer la complexité de la sélection du meilleur réseau d’accès sans fil et du transfert transparent des communications entre les réseaux d’accès sans fil disponibles. Cela doit être effectué avec le souci de toujours satisfaire aux exigences de QoS de l’utilisateur, en maîtrisant le coût ainsi que la consommation d’énergie de son terminal. Nos contributions dans ce contexte consistent à proposer et valider ces différents mécanismes qui permettront d’atteindre l’objectif ci-dessus.

Sélection du réseau d’accès sans fil fondée sur la théorie de l’utilité : La sélection du “meilleur” réseau est l’un des éléments les plus importants du processus de gestion de la mobilité lorsque l’utilisateur prévoit de se connecter au travers de réseaux de paquets sans fil hétérogènes. Cette sélection est l’élément principal de l’“*Always Best Connected*”. Cela est nécessaire, non seulement pour permettre aux utilisateurs finaux d’utiliser le réseau d’accès le plus approprié à leurs besoins à tout moment, mais aussi en permettant aux opérateurs d’obtenir une meilleure utilisation de leur réseau et des revenus plus élevés. Pour concevoir un tel mécanisme, nous analysons tout d’abord la théorie de l’utilité comme base

de définition d'une métrique de décision appropriée pour la sélection du "meilleur" réseau d'accès. Après avoir examiné les modèles d'utilité existants et avoir identifié leurs limites, nous proposons de nouvelles fonctions d'utilité mono-critère et multi-critères permettant de saisir au mieux la satisfaction des utilisateurs et la sensibilité aux variations des caractéristiques des réseaux d'accès. Nous démontrons ensuite que la sélection du réseau sur la base de ces nouvelles fonctions d'utilité possède les deux avantages suivants : (i) améliorer effectivement la capacité des terminaux des utilisateurs finaux en leur permettant de choisir le meilleur réseau d'accès, et (ii) aider les opérateurs à optimiser l'utilisation de leurs ressources sans fil.

Gestion de la mobilité sans couture contrôlée par le terminal : Dans cette contribution, nous étudions les questions relatives à la gestion des passages entre réseaux ou *handover* des terminaux équipés de multiples interfaces de communications sans fil. Ainsi, une communication peut s'effectuer au travers de n'importe quel réseau disponible. La question qui se pose alors est de savoir, à chaque instant, quel est le meilleur réseau à utiliser et de s'y rattacher. Dans le cas où une communication est en cours, le passage d'un réseau à un autre doit être transparent à celle-ci. Les terminaux mobiles étant caractérisés par des capacités énergétiques limitées, il faut que la réponse à la question précédente prenne cela en considération également. Ainsi, en considérant cet état des lieux, nous avons proposé : (i) un nouvel algorithme de sélection du réseau utilisant nos fonctions d'utilités et basé sur les préférences utilisateurs, la situation dans laquelle le mobile se trouve ainsi que les caractéristiques de l'application en cours ; (ii) un mécanisme de gestion des interfaces radio qui tient compte de leur consommation en énergie ; et (iii) une solution pour l'initiation du *handover* adaptatif au contexte de mobilité et qui permet une continuité sans coupure du service. Dans son ensemble, en utilisant des simulations et des études analytiques, nous montrons que la solution que nous proposons pour la gestion de la mobilité sans couture contrôlée par le terminal est adéquate et efficace dans la réalisation de ses objectifs : c-à-d, maximiser la rentabilité des utilisateurs et améliorer la qualité de service qu'ils perçoivent.

Ces résultats ont été obtenus en collaboration avec Thanh Nguyen Vuong, doctorant de l'Université d'Evry val d'Essonne (Thèse soutenue le 2 Juillet 2008). Ce travail commun a été effectué dans le cadre du projet européen ITEA2 SUMO (de juin 2005 à décembre 2007) auquel nous avons tout deux participé.

2.2 Amélioration du comportement de TCP dans les réseaux de paquets sans fil (infrastructure et ad hoc)

Le protocole de contrôle de transport, TCP, vise à assurer une grande fiabilité en garantissant la réception de tous les paquets de données transmis. Aujourd'hui, il est le protocole de transport le plus couramment utilisé dans l'Internet. Il est supporté par la plupart des applications Internet. Celui-ci a été conçu principalement pour les réseaux filaires avec comme objectif d'éviter la congestion du réseau, qui est la principale cause de perte de paquets de données dans ces réseaux. Toutes les versions du protocole TCP ont un objectif commun : aboutir à un partage équitable de la bande passante disponible entre les différents flux parcourant le réseau. Pour atteindre cet objectif, chaque perte de paquet est considérée par TCP comme étant due à une congestion et par conséquent celui-ci diminuera son débit. Parallèlement à cela, les réseaux de paquets sans fil se caractérisent par un taux d'erreurs sur les canaux radio qui peut être important, erreurs dues aux caractéristiques intrinsèques de canaux sans fil (affaiblissement du signal, interférences, obstacles, effets de l'environnement, ...) et qui pourraient entraver la bonne réception des paquets de données à l'autre extrémité de la communication. Toutes ces nouvelles causes d'erreurs peuvent mener à une mauvaise utilisation de la bande passante disponible lorsque le protocole TCP est utilisé. En effet, celui-ci pourrait réduire son débit inutilement après une perte de paquet en pensant que celle-ci est due à une congestion. Il est alors nécessaire d'adapter le comportement de TCP afin d'éviter de telles réactions et d'améliorer l'utilisation des ressources sans fil. Le but de notre étude est donc de proposer des solutions innovantes pour améliorer le comportement TCP. L'objectif est de permettre à TCP de pallier efficacement les problèmes inhérents aux réseaux de paquets sans fil qu'ils soient basés sur une infrastructure ou non (c-à-d, *ad hoc*).

Amélioration du comportement de TCP dans les réseaux locaux sans fil : La plupart des variantes existantes de TCP ne peuvent distinguer entre les différentes causes de perte de paquets dans les réseaux de paquets sans fil. Dans cette contribution, nous nous intéressons à l'amélioration du comportement TCP lorsque celui-ci subit une courte rupture du signal 802.11 conduisant à des pertes de segments et au déclenchement de façon inappropriée des mécanismes de contrôle de congestion TCP. Nous avons réalisé un ensemble de mesures dans un environnement d'expérimentation sans fil dans lequel nous avons provoqué des ruptures de signal dues à la mobilité des nœuds ou à des interférences que nous avons provoquées. Ces mesures ont souligné le manque d'interactions entre les deux niveaux de recouvrement après pertes : celui au niveau MAC et celui au niveau TCP. Nous avons également montré l'intérêt de l'adaptation du paramètre *Retry Limit* de la couche MAC 802.11 dans le cas de pertes de signal dues à la distance ou à des obstacles (c-à-d, mobilité). Un algorithme de différenciation de causes de pertes (*LDA*), agissant au niveau de la couche MAC est proposé. Celui-ci a pour objectif d'améliorer les performances de TCP dans le cas de pertes de segments dues à la mobilité. Ainsi, pour une rupture du signal due à la mobilité, la couche MAC réagit en conséquence en adaptant dynamiquement le paramètre *Retry Limit*. Cette adaptation permet d'éviter le coût important d'une résolution de la perte par TCP. Les pertes de segment dues à des interférences sont quant à elles différenciées de celles dues aux congestions au travers de l'utilisation d'un second algorithme de différenciation de types de pertes. Ce dernier utilise une optimisation inter-couche. Ainsi, la différenciation est réalisée grâce à un paramètre spécifique à la couche MAC 802.11, le *AckFailureCount*. La résolution de la perte est quant à elle réalisée au niveau TCP. La solution intégrant à TCP les deux algorithmes de différenciation de cause de pertes que nous avons proposés s'est avérée efficace et complète pour différencier les pertes dues à la mobilité, aux interférences ou aux congestions et réagir de manière adéquate à ces pertes (c-à-d, en adaptant en conséquence les couches MAC et TCP). Cela a permis une amélioration significative de l'utilisation des ressources sans fil par le protocole TCP dans les réseaux locaux sans fil.

Amélioration du comportement de TCP dans les réseaux mobiles ad hoc: Après avoir finement analysé les performances de TCP dans les réseaux ad hoc par simulation et expérimentations, nous avons proposé une nouvelle variante de TCP adaptée aux réseaux mobiles ad hoc (MANETs). Le problème principal de TCP et de ses variantes existantes dans les réseaux mobiles ad hoc est qu'ils ne permettent pas de distinguer les différentes causes de pertes de paquets. Ainsi, TCP agit le plus souvent comme si la perte était due à une congestion. Cette réaction n'est pas optimale dans toutes les situations rencontrées, ce qui cause une dégradation des performances de TCP et un gaspillage des ressources réseau. Plusieurs algorithmes de différenciation de pertes TCP ont été proposés pour les réseaux où seul le dernier lien est sans fil. Ces algorithmes permettent d'identifier deux types de pertes : les pertes dues aux congestions et les pertes dues à l'environnement sans fil. Dans nos travaux nous démontrons que dans les réseaux mobiles ad hoc une troisième cause doit être prise en compte, la perte temporaire de la connexion (perte d'un lien sur la route). Nous avons donc proposé TCP WELCOME (*Wireless Environment, Link losses, and COngestion packet loss ModELs*), une variante de TCP qui agit en deux temps : (i) d'abord, elle permet d'identifier la cause de la perte de paquets et de la classer suivant l'une des trois causes précédemment citées ; et (ii) ensuite, elle déclenche la technique de recouvrement la plus adéquate pour optimiser l'utilisation des ressources et maintenir les performances de TCP. L'évaluation des performances de TCP montre que TCP WELCOME optimise à la fois l'énergie consommée par les nœuds du réseau et le débit des connexions.

Ces résultats ont été obtenus en collaboration avec Stéphane Lohier, qui a effectué sa thèse de doctorat à l'Université Pierre et Marie Curie – Paris 6 (Thèse soutenue le 19 juin 2006), et Alaa Seddik-Ghaleb, qui a effectué sa thèse de doctorat à l'Université d'Evry val d'Essonne (Thèse soutenue le 30 mars 2009), thèses dont j'ai été l'encadrant principal. Une partie de ce travail a également été effectuée dans le cadre d'un contrat de recherche externe (CRE) avec France Telecom R&D (de juin 2005 à mai 2008). Ce contrat de recherche a permis notamment de financer la thèse de doctorat d'Alaa Seddik-Ghaleb et a donné lieu à une collaboration avec Sidi-Mohammed Senouci, chercheur à France Telecom R&D Lannion.

2.3 Maîtrise de la QoS dans les réseaux de paquets sans fil : Cas des WLANs et BWANs

La prochaine génération de réseaux de paquets sans fil est censée supporter une multitude d'applications gourmandes en bande passante, y compris des services multimédias tels que les jeux en réseau, la vidéo à la demande, la télévision en sans fil, ainsi que des services d'audio et de vidéoconférence. Cependant, d'une part ces applications nécessitent un certain niveau de QoS pour fonctionner correctement. D'autre part, les caractéristiques des liens sans fil font qu'il est difficile d'offrir cette QoS nécessaire aujourd'hui. En effet, les ressources de transmission disponibles pour supporter cette multitude d'applications restent limitées. Ainsi, une gestion adéquate des ressources sans fil est nécessaire afin d'assurer le niveau de qualité de service requis. Ce problème se pose dans tous les types de réseaux de paquets sans fil, allant des réseaux locaux sans fil (*WLANs*) aux réseaux de mobiles d'après la 3G en passant par les réseaux d'accès sans fil large bande (*BWANs*). Dans ce contexte, la proposition de solutions permettant la maîtrise de la QoS dans les réseaux de paquets sans fil constitue une part importante de notre travail. Plus précisément, nos contributions explorent comment des solutions de gestion efficace des ressources peuvent être conçues dans les cas spécifiques des réseaux locaux sans fil 802.11e ainsi que des réseaux d'accès sans fil large bande utilisant des relais.

Maîtrise de la QoS dans les réseaux locaux sans fil 802.11e : 802.11e est la norme permettant le support de flux multimédia dans les réseaux 802.11 (*WiFi*). L'arrivée massive de services multimédia tels ceux offerts par le triple play (accès Internet, téléphonie sur IP et télévision haute définition) est une réalité. Or, l'utilisation du sans fil pour accéder à ce type de services n'importe où à la maison ne constitue pas aujourd'hui la solution optimale. En effet, le standard 802.11e EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) n'offre pas de garanties en termes de débit ou de délai pour les services multimédias et temps réel. Avant que le réseau ne soit saturé, il n'y a pas de problèmes de qualité de service. Le problème se pose une fois que le réseau commence à arriver à saturation et qu'un nombre élevé de flux occupe les ressources limitées du canal. Toutes les solutions qui ont pour seul but d'améliorer les performances du mécanisme EDCA ne permettent pas de résoudre le problème de la dégradation des performances une fois le canal saturé. Ainsi, un algorithme efficace de contrôle d'admission dans EDCA est le maillon manquant pour garantir la qualité de service requise par les services multimédias et temps réel dans les réseaux locaux sans fil. Toutefois, une étude approfondie de la littérature dans ce domaine montre clairement que le contrôle de la QoS et la gestion des ressources dans les réseaux locaux sans fil 802.11e reste un problème ouvert. Ainsi, notre contribution consiste à combler cette lacune en proposant un algorithme de contrôle d'admission fondé sur un modèle analytique du mécanisme EDCA. Ainsi, nous avons tout d'abord modélisé analytiquement (chaîne de Markov) le fonctionnement de 802.11e EDCA en prenant en compte diverses situations de charge. Ce modèle analytique précis permet de prédire les paramètres de QoS que peut atteindre le système après l'introduction d'un nouveau flux dans le réseau. Sur la base de cette prédiction et des contraintes de QoS des flux déjà acceptés (c-à-d, déjà actifs dans le réseau) ainsi que du nouveau flux, le point d'accès sans fil prend alors sa décision d'admettre ou de rejeter le nouveau flux. Notre algorithme de contrôle d'admission est entièrement compatible avec le mécanisme EDCA et la norme 802.11e et nous avons pu démontrer son efficacité. Il constitue la brique manquante qui permet la maîtrise de l'utilisation des ressources sans fil dans les réseaux locaux sans fil 802.11e.

Maîtrise de la QoS dans les réseaux d'accès sans fil large bande utilisant des relais : Les réseaux d'accès sans fil large bande utilisant des relais constituent l'une des solutions les plus prometteuses pour l'extension de l'accès à l'Internet dans les zones rurales et isolées. L'utilisation de relais apporte en effet des améliorations substantielles de la capacité du système et de la zone de couverture offerte. Cependant, certaines caractéristiques spécifiques introduites par le relaiage, notamment le problème de l'asymétrie des liaisons, station de base-relais d'une part et relais-station mobile d'autre part, peut diminuer les effets positifs cités ci-dessus. Afin de profiter pleinement du gain potentiel de capacité et de couverture, nous soutenons qu'un mécanisme d'ordonnancement efficace est nécessaire au niveau des relais. En effet, un tel mécanisme permettrait d'utiliser efficacement les ressources des réseaux d'accès sans fil large bande. Le problème de l'asymétrie des liens a des effets différents sur l'efficacité de l'utilisation des ressources sans fil suivant que l'on utilise un seul relais par cellule ou plusieurs relais par cellule. Ainsi, lorsqu'un seul relais est utilisé et que le problème de l'asymétrie des liens est constaté, il est nécessaire de stocker

et retarder l'envoi des paquets transitant par le relais et à destination des stations mobiles. Ainsi, aussi bien le relais que la station de base doivent implanter un mécanisme d'ordonnancement des paquets pour permettre de servir efficacement ces paquets en attente. Cet ordonnancement est aujourd'hui proposé et optimisé pour les stations de bases mais pas pour les relais. Lors de l'utilisation de plusieurs relais par cellules, en plus de devoir servir efficacement les paquets stockés au niveau des relais et des points d'accès, le mécanisme d'ordonnancement doit également permettre une distribution efficace des paquets entre les différents relais. Cela doit aussi être effectué tout en tenant compte des asymétries de liens éventuelles afin de minimiser leurs effets. L'efficacité dans les deux cas consiste en la réduction du gaspillage potentiel des ressources sans fil causée par l'asymétrie des liens. Afin de parvenir à une telle efficacité, nous proposons deux mécanismes d'ordonnements qui ciblent le cas des systèmes mono-relais et des systèmes multi-relais, respectivement. Nous démontrons que grâce à ces mécanismes, nous atteignons notre objectif d'améliorer l'utilisation des ressources dans les réseaux d'accès sans fil large bande utilisant des relais.

Ces résultats ont été obtenus en collaboration avec Li Yan, qui a effectué un post-doc à l'ENSIIE (d'octobre 2009 à septembre 2010), et Nada Chendeb-Taher, qui a effectué sa thèse de doctorat à l'Université d'Evry val d'Essonne (Thèse soutenue le 31 mars 2009), travaux dont j'ai été l'encadrant principal. Une partie de ce travail a également été effectué dans le cadre du projet HDTVNext, projet européen du programme ITEA2 (d'avril 2008 à octobre 2010).

2.4 Communications géo-localisées dans les réseaux de véhicules en environnements urbains

Les communications inter-véhicules focalisent une attention considérable de la communauté de recherche ainsi que de l'industrie automobile. Ce type de communication constitue l'élément de base pour permettre de fournir des systèmes de transport intelligents (*ITS*) et des services d'assistance aux conducteurs et aux passagers. Dans ce paysage, les réseaux de véhicules forment une nouvelle catégorie de réseaux de paquets sans fil. Ils se forment spontanément et sont composés des véhicules en mouvement équipés d'interfaces sans fil. Ce nouveau type de réseaux de paquet sans fil peut être vu comme un cas particulier des réseaux mobiles ad hoc. Ils possèdent cependant un certain nombre de caractéristiques spécifiques telles que le spectre important des vitesses pour les nœuds, un déploiement potentiellement large échelle du réseau ; les partitionnements du réseau peuvent également être fréquents. Ces caractéristiques spécifiques introduisent plusieurs problèmes qui peuvent influencer grandement sur les performances des réseaux véhicules s'ils ne sont pas traités de manière adéquate. Dans ce contexte, notre objectif principal est de proposer de nouveaux protocoles de routage et de diffusion, qui s'adaptent efficacement aux caractéristiques des réseaux de véhicules et de leurs applications. Plus précisément, nous nous concentrons sur les communications inter-véhicules en milieu urbain. L'objectif ultime est de proposer un ensemble de nouvelles solutions qui visent à améliorer l'utilisation des ressources sans fil dans de tels environnements.

Routage géographique dans les réseaux de véhicules : Les communications multi-sauts dans les réseaux de véhicules sont cruciales pour permettre le déploiement d'applications à valeurs ajoutées dans ces réseaux. Bien que la diffusion des données et le routage aient été abordés sous différents point de vues dans la littérature, les nombreuses caractéristiques typiques des réseaux de véhicules ainsi que la diversité et les spécificités de leurs applications font que les solutions existantes ne sont pas applicables directement. Afin de faire face aux nouveaux défis engendrés par les réseaux de véhicules, nous proposons GyTAR (*improved Greedy Traffic Aware Routing protocol*), un protocole de routage géographique basé sur les intersections. Notre objectif est d'offrir, grâce à GyTAR, le moyen de trouver des routes robustes et optimales dans des environnements urbains. Le principe de base de GyTAR est la sélection dynamique et en séquence des intersections à travers lesquelles les paquets de données sont transmis en vue d'atteindre leur destination finale. Les intersections sont choisies en fonction de deux paramètres : (i) la distance restante jusqu'à la destination, et (ii) la variation de la densité des véhicules équipés de capacités de communications. Ce dernier paramètre est obtenu grâce à IFTIS (*Infrastructure Free Traffic Information System*), un autre protocole que nous avons proposé et qui permet l'estimation de cette densité tout en évitant tout besoin d'infrastructure préinstallée. En outre, le transfert de données

entre deux intersections adjacentes avec GyTAR s'appuie sur une méthode gloutonne améliorée. Cette méthode s'appuie sur la prédiction des positions des véhicules voisins. De cette façon, un paquet est toujours transféré au véhicule voisin le plus proche de l'intersection à atteindre. L'évaluation de GyTAR nous a permis de montrer une amélioration significative des performances par rapport aux autres protocoles de routage existants. Ainsi, GyTAR permet une utilisation plus efficace des ressources du réseau de véhicules.

Infrastructure virtuelle géo-localisée pour le support de la dissémination des données dans les réseaux de véhicules : Un des principaux freins au déploiement des applications relatives aux systèmes de transport intelligents (ITS) est l'inefficacité de la diffusion des données dans les réseaux de véhicules. Plusieurs applications ITS, telles que les alertes de danger et les annonces de places de stationnement, sont fondées sur les communications multi-sauts utilisant ce mode : la diffusion. Par conséquent, pour faciliter le déploiement futur à grande échelle des réseaux de véhicules, il est proposé de combiner une infrastructure de communication fixe au niveau des routes (*Road Side Units, RSU*) et les véhicules en mouvement équipés de moyens de communications sans fil (*On-Board Units, OBU*). Cependant, la nécessité d'installer une infrastructure fixe diminue considérablement la taille des zones de déploiement des applications ITS. Dans ce contexte, nous proposons un mécanisme d'auto-organisation permettant d'émuler une infrastructure virtuelle géo-localisée (*Geo-localized Virtual Infrastructure, GVI*). Cette infrastructure virtuelle est émulée par un sous-ensemble limité de véhicules occupant temporairement la région géographique où l'infrastructure virtuelle doit être déployée. GVI est conçue afin de servir de support efficace aux applications qui nécessitent une diffusion des paquets dans les réseaux de véhicules sans recourir à l'utilisation ou à l'installation d'une infrastructure coûteuse. Les résultats analytiques et de simulation que nous avons obtenus montrent que le mécanisme proposé (GVI) peut : (i) diffuser périodiquement les données au sein d'une zone géographique donnée (une intersection, par exemple), (ii) utiliser efficacement la bande passante limitée, et (iii) assurer un taux élevé de délivrance de l'information par les véhicules.

Ces résultats ont été obtenus en collaboration avec Moez Jerbi, dans le cadre de sa thèse de doctorat, et Sidi-Mohammed Senouci, chercheur à France Telecom R&D Lannion. Moez Jerbi a effectué sa thèse de doctorat en convention CIFRE entre France Telecom R&D et l'Université d'Evry val d'Essonne (Thèse soutenue le 6 novembre 2008), thèse de doctorat dont j'ai été l'encadrant secondaire. Une partie des résultats analytiques obtenus dans le cadre de ce travail l'on été en collaboration avec André-Luc Beylot, Professeur à l'IRIT / ENSEEIHT, Toulouse.

3 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Relier les nouveaux modes de communication sans fil aux paradigmes définis pour les réseaux Internet et les réseaux de téléphonie n'est pas trivial. Cela a nécessité, et nécessite toujours, un important effort de recherche. C'est dans ce cadre que s'est inscrite mon activité de recherche durant la période 2004 - 2010. Je me suis intéressé plus précisément à l'« amélioration de l'utilisation des ressources dans les réseaux de paquets sans fil ». Différentes facettes de cette problématique ont ainsi été abordées et résolues. Ces facettes concernent aussi bien l'amélioration de l'utilisation des ressources au niveau paquet qu'au niveau connexion. Celles-ci se résument par :

- *Au niveau connexion* :
 - La gestion de la mobilité inter-technologies ou comment tirer partie de la diversité des connectivités (réseaux d'accès hétérogènes) sans fil disponibles.
- *Au niveau paquets* :
 - L'optimisation de l'utilisation des ressources par le protocole de contrôle de transport de l'Internet (TCP) lorsque utilisé dans des réseaux de paquet sans fil basés sur une infrastructure ou pas.
 - La gestion des ressources offertes par les réseaux locaux sans fil 802.11e ou par les réseaux d'accès sans fil large bande utilisant des relais.

- La maîtrise des communications unicast et de la diffusion entre véhicules en mouvement dans les environnements urbains.

Ces résultats ont été développés en collaboration avec une post-doctorante et cinq doctorants : trois en tant qu'encadrant principal, un en encadrement secondaire et une collaboration sur une partie de la thèse. Une partie de ces travaux a également été conduite dans des projets de recherche Européens (ITEA2 SUMO et ITEA2 HDTVnext) et une collaboration soutenue avec France Telecom R&D. Cette dernière a bénéficié d'un financement CIFRE et d'un Contrat de Recherche Externe (CRE).

De nombreux autres défis de recherche dans ce domaine doivent encore être résolus afin de permettre de continuer à améliorer la qualité et la robustesse des réseaux de paquets sans fil. Comme perspectives aux travaux que nous avons déjà réalisés, nous pensons à étudier de nouvelles pistes pour aboutir à des améliorations encore plus importantes de l'utilisation des ressources sans fil.

Parmi ces pistes, nous pouvons citer l'utilisation de deux concepts nouveaux et novateurs pour l'amélioration de l'utilisation des ressources au niveau paquets : le *relayage coopératif* et le *codage réseau*. Le *relayage coopératif* a pour objectif d'exploiter la diversité spatiale qui caractérise les réseaux sans fil afin d'améliorer le canal de communication entre deux stations. Le *codage réseau*, pour sa part, est un nouveau concept qui tente de profiter de la nature partagée (c-à-d, à diffusion) des liaisons sans fil afin d'atteindre une optimalité de l'utilisation de la bande passante. Nous pensons que des solutions basées sur ces deux concepts, appliqués séparément ou de façons combinées, peuvent permettre des améliorations substantielles aussi bien au niveau de la fiabilité des transmissions des données que de l'utilisation de la bande passante dans les réseaux multi-sauts sans fil.

Les améliorations attendues peuvent être encore plus remarquables dans des environnements de réseaux complexes tels que les réseaux de véhicules ou les réseaux de capteurs sans fil (WSN). Ces deux environnements offrent un énorme potentiel de recherche en raison de leurs caractéristiques. Ainsi, les réseaux de véhicules sont caractérisés par la large gamme de vitesses des véhicules, les trajectoires prévisibles de mobilité, les partitionnements fréquents du réseau, et le contexte difficile de communication, pour ne citer que quelques-uns. Pour leur part, les réseaux de capteurs sans fil sont caractérisés par leurs ressources limitées (énergie, mémoire, processeur) et la qualité aléatoire des liens de communication. Ces deux environnements subissent des conditions extrêmes de communication en raison de leurs caractéristiques. Nous pensons donc que les concepts de *relayage coopératif* et de *codage réseau* offrent un immense potentiel d'amélioration de l'utilisation des ressources sans fil dans ce type de réseaux. C'est pour cette raison que nous nous proposons, à court et à moyen terme, de travailler à la conception et à l'étude de l'apport de solutions basées sur ces deux concepts dans les réseaux de véhicules et les réseaux de capteurs sans fil.

Outre les pistes mentionnées ci-dessus pour l'amélioration de l'utilisation des ressources au niveau paquets, les réseaux véhiculaires engendrent également de multiples challenges au niveau connexion. En effet, afin d'offrir aux utilisateurs véhiculaires le meilleur service en terme de qualité et de rentabilité, nous devons tenir compte de la coexistence de diverses technologies de réseaux sans fil (certaines déjà déployées et d'autres devraient atteindre leur phase de déploiement dans un avenir proche). Arriver à un interfonctionnement complet entre toutes les technologies qui cohabitent (*LTE-Advanced*, *802.16*, *802.11p/WAVE* ...) nécessite la résolution de plusieurs verrous technologiques. Cela devient encore plus difficile si on doit tenir compte de l'interfonctionnement avec des réseaux de véhicules multi-sauts sans fil. En effet, ces derniers combinent des communications véhicule-à-véhicule (V2V) et véhicule-à-infrastructure (V2I) dans le but de permettre l'accès au réseau de l'opérateur ou à l'Internet. La possibilité d'utiliser toutes les technologies sans fil disponibles (*LTE-Advanced*, *802.16*, *802.11p/WAVE* ...) ainsi que la combinaison de communications V2V et V2I dans un contexte multi-saut sans fil donne naissance à ce que nous appelons un « *réseau de véhicule auto-organisé multi-technologies* ». La mise en place d'un tel réseau nécessite de repenser complètement les mécanismes de sélection du meilleur réseau, de gestion de la mobilité mais aussi le routage dans un environnement hétérogène. Ces éléments représentent quelques-uns des défis majeurs que nous nous proposons de résoudre, à court et à moyen terme, afin de permettre d'aller plus loin dans la gestion de la mobilité sans couture. Cela mènerait à

terme à l'amélioration de l'utilisation des ressources au niveau connexion pour un cas d'utilisation extrême mais réaliste : les systèmes de transport intelligents. En effet, dans de tels systèmes il y a une nécessité évidente d'utiliser tous les moyens de communication en présence afin de construire des services avancés et de les rendre disponibles à tout moment, n'importe où, avec la meilleure qualité possible et au plus petit coût réalisable.