

Les réseaux à petites cellules économes en énergie

Jakob Hoydis, Romain Couillet, Merouane Debbah

▶ **To cite this version:**

Jakob Hoydis, Romain Couillet, Merouane Debbah. Les réseaux à petites cellules économes en énergie. La Revue de l'électricité et de l'électronique, 2010, 11, pp.51-55. hal-00560345

HAL Id: hal-00560345

https://centralesupelec.hal.science/hal-00560345

Submitted on 28 Jan 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les Réseaux à Petites Cellules Économes en Énergie

Mots clés

Communications mobiles,
Réseaux larges,
Petites cellules,
Technologies écologiques

Jakob HOYDIS[1], Romain COUILLET[2], Mérouane DEBBAH[1]
Chaire Alcatel Lucent en Radio Flexible, Supélec[1], Chaire Sciences des Systèmes et Défis Énergétiques, Supélec[2]

Les architectures cellulaires actuelles ne peuvent pas supporter la croissance exponentielle de la demande en transfert de données sur le long terme. Le concept radicalement nouveau des réseaux à petites cellules peut fournir une solution viable tant économiquement qu'écologiquement.

1. Introduction

La demande croissante en applications multimédia mobiles a engendré une très forte augmentation du flux de données échangées entre les systèmes de communication sans fil. L'usage des "*smartphones*" a notamment contribué au passage des communications traditionnelles vers des communications multimédia à haute vitesse, partout et à tout moment. Par conséquent, les attentes des utilisateurs évoluent également dans le sens d'une interconnexion continue, aussi bien à domicile qu'en déplacement. Cependant, du fait de cette pénétration croissante des "*smartphones*", les réseaux actuels (14,4 Mbit/s en voie descendante par cellule en HSPA ("*High Speed Packet Access*"), 100 Mbit/s en LTE ("*Long Term Evolution*") à court terme, soit des efficacités de 2,9 bit/s/Hz et 5 bit/s/Hz respectivement) atteignent déjà leurs limites de capacité lorsque la demande est forte. En effet, des problèmes de congestion apparaissent à la fois au niveau du lien sans fil et du réseau physique filaire.

L'intérêt porté aux technologies écologiques a récemment été suscité par l'étude "SMART 2020" [1], décrivant les effets potentiels des technologies de l'information et des communications (TIC) sur les émissions mondiales de dioxyde de carbone. Bien que les TIC ne semblent que modérément contribuer aux émissions mondiales, avec 1,25 % en 2002 et une prévision d'environ 2,5 % en 2020, cela représente tout de même une augmentation de 10 % par an. Ceci signifie qu'en dépit de progrès significatifs dans le domaine des technologies économes en énergie, notre capacité à réduire (ou du moins à maintenir) la consommation énergétique et les émissions associées, sera très vite contrariée par l'augmentation des flux de données. Ainsi l'augmentation de la capacité des réseaux d'une part et la réduction de la consommation en énergie d'autre part sont deux besoins futurs, a priori contradictoires. D'où la question : comment les opérateurs mobiles peuvent-ils satisfaire les futures demandes de transport de données d'un point de vue aussi bien économique qu'écologique ?

Les réseaux à petites cellules (ou "*small cell networks*", SCN), un concept nouveau et radicalement différent d'architecture de réseau, constitue une solution financièrement et énergétiquement efficace pour résoudre ce paradoxe. Pour simplifier, les SCN reposent sur un déploiement extrêmement dense de stations de base (SB) à faible coût et faible puissance d'émission, qui sont bien plus petites que les équipements des macro-cellules traditionnelles. Pour assurer une couverture complète du réseau, des macro-

L'ESSENTIEL

La demande exponentiellement croissante en services de communications sans fil appelle à une augmentation massive de la densité du réseau, une solution qui n'est ni économique ni écologique dans le cadre des réseaux de communication actuels. Le concept des réseaux à petites cellules (SCN), basé sur l'idée d'un déploiement très dense de petites stations de base peu coûteuses, est une alternative possible. Cet article discute des bénéfices financiers et écologiques potentiels ainsi que des défis technologiques entraînés par le déploiement à grande échelle de ces SCN. De plus, il présente une vue d'ensemble sur la recherche traitant ces problèmes et les outils nécessaires à leur étude.

SYNOPSIS

The exponentially increasing demand for wireless data services requires a massive network densification which is neither economically nor ecologically viable with current cellular system architectures. A potential solution to this problem is the concept of small cell networks (SCNs) which are founded on the idea of a very dense deployment of self-organizing low-cost low-paper base stations. In this article, potential financial and ecological benefits as well as the technical challenges related to a large-scale deployment of SCNs are discussed. Moreover, an overview of related research problems and the necessary tools for their study is provided.

cellules additionnelles sont nécessaires dans cette architecture, tandis que la majorité des données est véhiculée par un grand nombre de petites cellules. L'action des SCN est rendue possible grâce au partage du lien filaire avec les réseaux sans fil et les points d'accès filaires existants (par exemple, FTTx ("*fiber to the x*") ou les points d'accès filaires VDSL ("*very-high-bitrate digital subscriber line*")), mais aussi grâce à l'installation des SB sur les équipements urbains (par exemple, lampadaires, abris bus, etc.). Par ailleurs, le fonctionnement des SCN repose sur les fonctionnalités d'auto-organisation des petites cellules. Ainsi les SCN peuvent éliminer les nécessités d'acquisition de sites d'installation, de planification détaillée du réseau et de maintenance continue. Les SCN permettent par conséquent de réduire les CAPEX (dépenses d'investissement de capital) et OPEX (dépenses d'exploitation) tout en assurant de hauts débits délivrés de manière uniforme à travers la zone de couverture du réseau.

La suite de cet article est structurée de la manière suivante. Nous introduirons d'abord les systèmes à petites cellules et décrirons leurs défis et opportunités économiques. Ensuite, nous décrirons plus en détails les défis technologiques associés et présenterons brièvement des outils théoriques nécessaires à leur étude.

2. Les Réseaux à Petites Cellules : Économes en Énergie, Flexibles et Peu Coûteux

A l'heure actuelle, les femto-cellules (petites cellules permettant une extension du réseau dans des zones sans couverture pour des utilisations privées) sont utilisées pour combler les excès de demande en débit dans le réseau et les couvertures en intérieur. Toutefois, leur réel potentiel, à savoir fournir de hauts débits en intérieur aussi bien qu'en extérieur de manière économiquement et énergétiquement efficace, n'est toujours pas adéquatement exploité. Aujourd'hui, les opérateurs qui fournissent à la fois réseaux fixes et mobiles possèdent un avantage majeur pour un déploiement rentable de réseaux denses de petites cellules. Afin de répondre à la nécessité de disposer de très haut-débit sur un territoire de plus en plus large, les opérateurs ont déjà mis en place une infrastructure filaire de haute capacité. Les boîtiers d'accès à ce réseau (dispersés dans les rues) pourront, quant à eux, servir d'emplacements pour de nouveaux points d'accès sans fil. Grâce à ces atouts, le coût total d'acquisition d'un réseau à petites cellules peut être réduit significativement en utilisant la structure filaire existante (VDSL, fibre, courant porteur en ligne). A la différence des femto-cellules (déployées par l'utilisateur), les SCN pourraient être déployés par l'opérateur afin de permettre un accès public et lutter contre les trous de couverture. De plus, une meilleure efficacité spectrale peut être atteinte en partageant des ressources avec les macro-cellules extérieures. Des économies d'énergie conséquentes peuvent aussi être réalisées grâce à des fonctionnalités avancées d'auto-organisation et d'auto-optimisation des SCN. Des cellules de petite taille permettent également l'exploitation de fréquences plus élevées où de larges bandes passantes sont accessibles et pour lesquelles les problèmes d'interférence entre réseaux intérieurs et extérieurs sont réduits, de par la faible pénétration des ondes propagées. A court terme, une adjonction systématique de petites cellules aux points d'accès du réseau filaire peut être considérée comme une couche supplémentaire de capacité de transport. A long terme, la motivation principale du déploiement de petites cellules est le besoin de satisfaire des demandes massives en débits de communication (de l'ordre du Gbit/s/km^2), qui ne sont réalisables, ni par l'extension de la couche macro-cellulaire, ni par le déploiement de femto-cellules.

D'un point de vue écologique tout d'abord, il n'est pas certain qu'un déploiement dense de plusieurs milliers de points d'accès sera plus efficace qu'une architecture traditionnelle macro-cellulaire (nous rappelons que le nombre de petites cellules requises pour couvrir une surface géographique donnée croît à l'inverse du carré de la taille des cellules). Utiliser des technologies similaires aux SB existantes pour les petites SB des SCN pourrait entraîner une forte augmentation de la consommation d'électricité. Tandis que les améliorations énergétiques des équipements électroniques actuels (meilleurs amplificateurs, climatiseurs et dispositifs électroniques dont les composants peuvent être successivement allumés ou éteints) sont indispensables pour réduire l'empreinte carbone des TIC, des économies supplémentaires peuvent être effectuées par la mise en place d'une topologie de réseau écologique s'adaptant à la demande [2]. Les systèmes cellulaires actuels sont optimisés pour maximiser le débit et la couverture en cas de demande intensive (pire cas). Cependant, à l'exception de quelques points denses dans certaines métropoles, les réseaux cellulaires n'opèrent pas sous ces conditions. Au contraire, les architectures de réseaux écologiques et flexibles permettent de s'adapter dynamiquement à la demande selon le principe de « l'énergie suit la demande », c'est-à-dire qu'en période de faible demande le réseau adopte une configuration à faible consommation d'énergie. Ceci peut être réalisé en désactivant des secteurs cellulaires, par exemple. Ces stratégies sont moins efficaces spectralement, mais assurent une réduction de la puissance nécessaire à l'émission. Ainsi, dans une zone fortement peuplée, plusieurs SB peuvent être désactivées durant la nuit, pendant que la couverture peut être assurée par un réseau macro-cellulaire.

Alimenter les SB par des sources d'énergie renouvelable est une autre approche qui permet des gains considérables en énergie et une optimisation des coûts. Evidemment, les SB auto-alimentées peuvent être déployées partout, sans nécessité d'un réseau électrique sous-jacent fiable et coûteux. Cet aspect devient particulièrement important dans les pays émergents, où la disponibilité d'un réseau électrique fiable dans les zones rurales est un problème

très répandu. Le programme "Green Power for Mobile" [3], une initiative qui promeut l'utilisation de technologies écologiques dans le domaine de la téléphonie mobile, estime que 75.000 nouveaux sites déconnectés du réseau électrique seront construits chaque année dans les pays émergents. Dans ces pays, les SB pourront être alimentées par des panneaux solaires ou des petites turbines éoliennes au lieu de générateurs diesel émettant du dioxyde de carbone et nécessitant une maintenance importante.

3. Défis

Le déploiement à grande échelle des petites cellules s'accompagne de nombreux défis. Ceux-ci sont liés au fait que les SCN agissent tel un pont entre les réseaux totalement centralisés (cellulaires) et les réseaux totalement décentralisés (dits "*ad-hoc*"), impliquant une rupture importante entre les systèmes gérés et administrés d'une part, et les systèmes auto-organisés (ou "*self-organizing networks*", SON), dans lesquels les nœuds apprennent leur environnement et prennent des décisions intelligentes, d'autre part. Il est par exemple largement admis qu'une augmentation massive de la densité d'un réseau à petites cellules, ne serait financièrement viable que si les besoins en main d'œuvre pour contrôler ces réseaux étaient réduits de manière significative. D'autres défis sont posés par la gestion de l'interférence et de la mobilité, la prédiction de performance, la couverture réseau et les problèmes de sécurité, détaillés ci-après.

Auto-organisation : La procédure d'auto-organisation peut être divisée en trois phases distinctes. Les SB nouvellement déployées s'initialisent par une procédure d'auto-configuration durant laquelle les paramètres du système sont établis et la couche logicielle mise à jour par téléchargement et installation automatique. Une fois qu'une SB est configurée, elle entre dans la phase opérationnelle qui est gouvernée par des mécanismes d'auto-optimisation. Ces mécanismes incluent l'allocation de ressources et l'optimisation jointe de la couverture des réseaux. Les fonctionnalités d'auto-organisation doivent permettre de réaliser des économies d'énergie à court terme, à l'aide de modes de micro-sommeil, ainsi qu'une reconfiguration globale du réseau pour des économies à long terme, comme par exemple l'extinction sélective de cellules ou de secteurs de cellules. Les réseaux auto-organisés doivent être également équipés de procédures d'auto-guérison en cas de défaillance. Enfin, pour assurer l'extensibilité de SCN, les échanges de messages entre les nœuds du réseau doivent être minimisés et des solutions décentralisées doivent être développées.

Couverture et prédiction de performance : Le déploiement dense et non planifié des SCN génère des interférences imprévisibles dans une couverture géographique irrégulière. Pour cette raison, il est inévitable d'installer de sites macro-cellulaires additionnels afin d'assurer une couverture complète de la zone. Les performances de ces réseaux n'étant pas connues à ce jour, des campagnes de mesures intensives et de nouvelles études théoriques sont ainsi nécessaires.

Gestion de 1'interférence : Du fait du déploiement de petites cellules de plus en plus dense, l'interférence intercellulaire croît et doit être gérée. Un contrôle de puissance intelligent, une limitation de la bande passante par utilisateur et des accès dynamiques aux ressources sont des solutions envisageables. A long terme, d'autres techniques prometteuses mais plus sophistiquées, telles que les méthodes d'alignement d'interférence [4] ou de coopération multicellulaire [5], pourraient être utilisées dans le même objectif. Comme ces techniques nécessitent des estimations fiables des canaux de communication ou de nombreux échanges de messages entre SB, leurs gains pratiques en termes de performance ne sont pas explicitement définis.

Mobilité : Il est évident que la mobilité des utilisateurs devient difficile à gérer dans un contexte de SCN. Avec un diamètre de cellule de 10 à 100 mètres et une vitesse de 30 km/h, il ne faut que quelques secondes pour passer d'une cellule à une autre. Dans de telles situations, les mécanismes de "*handover*" traditionnels causeraient l'échange d'un grand nombre de données de contrôle entre les petites cellules. Des procédures plus efficaces sont ainsi requises. Une solution possible consiste à regrouper les utilisateurs statiques sur les SCN, tandis que les utilisateurs mobiles sont servis par les macro-cellules [6]. Une autre approche est la formation de « cellules virtuelles », à savoir des groupes de petites cellules coopératives qui apparaissent pour l'utilisateur comme une SB distribuée. Ainsi, les "*handovers*" ne sont déclenchés qu'en bordure de ces cellules virtuelles.

Sécurité : Les SCN pourraient présenter des points faibles, alors inconnus à ce jour des réseaux traditionnels. L'intimité d'un utilisateur peut par exemple être mise en péril étant donné que la plupart des flux de données sont susceptibles de parcourir un réseau qui peut ne pas être sous le contrôle exclusif de l'opérateur.

4. Outils

Plusieurs nouveaux problèmes doivent être résolus afin que les SCN deviennent une réalité. Le but premier est de fournir davantage de bande passante à un coût plus faible et de manière économe en énergie. Deux tendances ont récemment vu le jour pour traiter ce problème : d'une part, des techniques sophistiquées de communication sans fil, telles que les technologies multi-antennes, d'alignement d'interférence et de détection multi-utilisateurs, et d'autre part, des mécanismes avancés, tels que le relais

d'information, l'auto-organisation, la coopération entre SB (dite "*network MIMO*") et la radio flexible. Ces développements demandent des recherches interdisciplinaires regroupant des outils que nous introduisons ci-après.

Limites théoriques de la performance : L'étude des SCN par la théorie de l'information permet de découvrir les limites fondamentales de ces réseaux en termes de débit, délai et fiabilité. Du point de vue de la couche physique, les canaux de communication peuvent être représentés théoriquement par des matrices aléatoires possédant des propriétés statistiques déterminées par l'environnement de propagation. Les théories des matrices aléatoires [7] et de champ moyen permettent de fournir des expressions manipulables des performances des systèmes de communication, incluant les paramètres dynamiques du système. Plus importante encore est la prise en compte précise des données de contrôle devant être échangées dans le réseau, pour assurer que les algorithmes mis en place soient efficaces.

Algorithmes d'optimisation stochastiques distribués : Etant donné qu'une coordination centralisée des SCN est irréaliste tout autant qu'indésirable, des algorithmes totalement distribués sont nécessaires : chaque nœud du réseau doit être capable d'optimiser ses performances à partir d'informations essentiellement locales. Des algorithmes d'apprentissage stochastiques sont importants pour la mise en place de réseaux sans fil qui s'adaptent aux changements aléatoires des demandes des utilisateurs et des conditions de propagation, en se basant sur une information disponible très restreinte. La théorie des jeux et plus particulièrement celle de jeux de coalition [8] fournit des options intéressantes, en termes d'allocation de ressources distribuée et d'évaluation de la couverture optimale.

Algorithmes d'auto-organisation et d'auto-optimisation : Pour s'auto-organiser, il est important que le réseau connaisse son environnement et son propre état à partir de données de capteurs et sans intervention humaine. Comme de nombreuses décisions doivent être prises dans un court laps de temps, le nombre d'observations distinctes peut être du même ordre de grandeur que les paramètres à estimer. Ainsi, les techniques de détection et d'estimation classiques, supposant que le nombre d'observations est très grand, ne sont pas adaptées. De récents résultats en matière de probabilités libres [9] ainsi que des méthodes avancées en théorie des matrices aléatoires [10] sont capables de fournir des estimateurs plus adéquats de nombreuses mesures de performance (puissances d'émission des acteurs du réseau, débits accessibles, etc.).

Protocoles efficaces en énergie : Les SCN sont connectés via une interface de capacité limitée et ont une quantité d'énergie potentiellement limitée, avec des possibilités de recharge de batterie restreintes. Le but des protocoles efficaces en énergie est d'optimiser la métrique bits/s/Hz/J tout en garantissant la qualité de service requise. Le routage énergétiquement efficace des paquets à travers le réseau peut par exemple prendre en compte l'état de la batterie des utilisateurs et des SB dans les SCN et considérer le coût énergétique de l'allocation de ressources et de charges dans le réseau. D'un point de vue algorithmique, les problèmes de flux dits "*multi-commodity*" sont au cœur de la conception des protocoles de routage économes en énergie et des infrastructures énergétiquement efficaces. Des progrès supplémentaires sont envisageables si des architectures ouvertes et collaboratrices sont utilisées pour permettre un partage de l'infrastructure par différents opérateurs.

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté un nouveau type d'architecture de réseaux sans fil, appelés réseaux SCN, permettant de répondre aux demandes futures de communications multimédia sans fil. Nous avons analysé les moyens utilisés par ces SCN pour assurer une couverture à haut débit, tout en réduisant les dépenses budgétaires et énergétiques. Bien que les SCN soient un concept prometteur, de nombreux défis techniques doivent être résolus avant qu'ils ne puissent voir le jour. Nous espérons que cet article servira de moteur à l'exploration de nouvelles pistes de recherche dans ce domaine.

Références

[1] The Climate Group and Global e-Sustainability Initiative (GeSI), "*SMART 2020: Enabling the Low Carbon Economy in the Information Age*", 2008. [En ligne] Accessible: http://www.smart2020.org.

[2] O. BLUME & al., "*Energy Savings in Mobile Networks Based on Adaptation to Traffic Statistics*", Bell Labs Tech. J., vol. 15, no. 2, pp. 77-94, Sep. 2010.

[3] GSMA Development Fund, "*Green Power for Mobile: Top Ten Findings*", 2009. [En ligne] Accessible: http://www.gsmworld.com/documents/green_power_top10.pdf.

[4] V.R. CADAMBE, S.A. JAFAR, "*Interference Alignment and Degrees of Freedom of the K-User Interference Channel*", IEEE Trans. Inf. Theory, vol.54, no.8, pp. 3425-3441, Aug. 2008.

[5] D. GESBERT & al., "*Multi-cell MIMO Cooperative Networks: A New Look at Interference*", IEEE J. Sel. Areas Commun., 2010, vol. 28, no. 9, Dec. 2010.

[6] H. CLAUSSEN, "*The Future of Small Cell Networks*", IEEE CommSoc MMTC E-Letter, vol.5, no. 5, pp. 32-36, Sep. 2010. [En ligne] Accessible: http://committees.comsoc.org/mmc/e-news/E-Letter-September10.pdf.

[7] R. COUILLET, M. DEBBAH, "*Random Matrix Theory Methods for Wireless Communications*", Cambridge University Press, à paraître.

[8] W. SAAD & al., "*Coalitional Game Theory for Communication Networks: A Tutorial*", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 26, no. 5, pp. 77-97, Sep. 2009.

[9] Ø. RYAN, M. DEBBAH, "*Channel Capacity Estimation Using Free Probability Theory*", IEEE Trans. Signal Processing, vol. 56, no. 11, Nov. 2008.

[10] R. COUILLET & al., "*Eigen-Inference for Energy Estimation of Multiple Sources*", IEEE Trans. Inf. Theor., 2010, à paraître.

Les auteurs

Jakob Hoydis est né à Berlin, en Allemagne. Il a reçu son diplôme d'ingénieur, spécialité Electrotechnique et Technologies de l'Information, à l'université RWTH Aachen (Aix-la-Chapelle, Allemagne) en 2008. Pendant ses études supérieures, il a effectué un programme d'échange à Imperial College (Londres, Royaume-Uni), un stage d'été à Infineon Technologies AG (Munich, Allemagne) et un stage de fin d'études à Siemens Corporate Research (Princeton, NJ, Etats-Unis). Avant de rejoindre Supélec en 2009, il a occupé la fonction d'assistant chercheur dans le Département Wireless Networks à l'université RWTH Aachen. Il effectue actuellement un doctorat dans le domaine des communications coopératives et des réseaux MIMO à Supélec, sous la direction de Mari Kobayashi et Mérouane Debbah.

Romain Couillet est né à Abbeville, France. Il a reçu son diplôme d'ingénieur (spécialité en Télécommunications Mobiles) à l'Institut Eurecom, France en 2007. Il a reçu son Master of Science (spécialisation en Systèmes de Communication) à Telecom ParisTech en 2007. De 2007 à 2010, il rejoint NXP Semiconductors qui devient ST-Ericsson en 2009 en tant qu'ingénieur développeur sur le projet Long Term Evolution Advanced (LTE-A). En parallèle de sa position chez ST-Ericsson, il poursuit son doctorat avec Supélec qu'il obtient en novembre 2010. Il a aujourd'hui une position d'enseignant-chercheur dans la chaire Centrale-Supélec-EDF « Sciences des Systèmes et Défis Energétiques ». Ses sujets de recherche incluent communications mobiles, détection multi-utilisateurs multi-antennes, radio cognitive, systèmes complexes et théorie des matrices aléatoires. Il a reçu le Valuetools 2008 best student paper award.

Mérouane Debbah est né à Madrid, en Espagne. Ancien Élève de l'École Normale Supérieure de Cachan, il a reçu son doctorat en 2002. De 1999 à 2002, il a travaillé pour Motorola Labs sur les réseaux locaux sans fils. En 2002, il a rejoint le centre de recherche en Télécommunications de Vienne (FTW à Vienne en Autriche) pour travailler sur la modélisation de canaux multi-antennes. De 2003 à 2007, il a été membre du département de communications mobiles de l'institut Eurecom, Sophia-Antipolis (France) en tant que maître de conférence. Il est à présent Professeur à Supélec, titulaire de la chaire Alcatel-Lucent en radio flexible. Ses thèmes de recherche concernent la théorie de l'information, le traitement du signal et les télécommunications sans fils. Mérouane Debbah a reçu le "Mario Boella" prize award en 2005, le 2007 General Symposium IEEE Globecom best paper award, le Wi-Opt 2009 best paper award, le Newcom++ best paper award en 2010 ainsi que le Valuetools 2007, Valuetools 2008 et CrownCom 2009 best student paper award. Il a été nommé Fellow du WWRF en 2009.