



HAL
open science

Une architecture intelligente pour l'amélioration de l'efficacité énergétique du réseau cellulaire 5G

Antonio de Domenico, Rémi Bonnefoi, Mouhcine Mendil, Catalin Gavriluta,
Jacques Palicot, Christophe Moy, Vincent Heiries, Raphaël Caire, Nouredine
Hadjsaïd

► **To cite this version:**

Antonio de Domenico, Rémi Bonnefoi, Mouhcine Mendil, Catalin Gavriluta, Jacques Palicot, et al..
Une architecture intelligente pour l'amélioration de l'efficacité énergétique du réseau cellulaire 5G. La
Revue de l'électricité et de l'électronique, 2016, 5, 10.23723/1301:2016-5/17790 . hal-01435400

HAL Id: hal-01435400

<https://hal.science/hal-01435400>

Submitted on 19 Oct 2017

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.

Une Architecture Intelligente pour l'Amélioration de l'Efficacité Énergétique du Réseau Cellulaire 5G

Antonio De Domenico¹, Rémi Bonnefoi², Mouhcine Mendil^{1,3}, Catalin Gavritula³, Jacques Palicot², Christophe Moy², Vincent Heiries¹, Raphael Caire³ et Nouredine Hadjsaid³

CEA/LETI¹, {prénom.nom}@cea.fr

Centrale Supélec/ IETR², {prénom.nom}@centralesupelec.fr

G2Elab-ENSE3³, {prénom.nom}@g2elab.grenoble-inp.fr

Abstract

Recently, mobile operators have started to pay attention to the energy consumption of the wireless networks in order to reduce their operational costs and limit carbon emissions. In the current context of energy transition, the usage of the renewable energies and the integration of the smart grid are key technologies to enable sustainable operations in the 5th generation of mobile networks. In this paper, we discuss these issues and propose a novel architecture able to optimize the energy efficiency of future mobile networks and take full advantage of decentralized energy production. We outline the advantages of the presented architecture, its functionalities, and provide a preliminary evaluation of the expected benefits.

Introduction

Depuis le second sommet de la terre en 1992, la prise de conscience mondiale des problèmes environnementaux, et en particulier celui du réchauffement climatique, se renforce. Cela s'est traduit lors de la dernière COP21, par un accord international adopté à l'unanimité, qui devra ensuite être ratifié par les différents pays.

Limiter le réchauffement climatique passe par la diminution des gaz à effets de serre et donc par la diminution de la consommation énergétique. Dans ce contexte, les Techniques de l'Information et de la Communication (TIC) représentent un pourcentage non négligeable, qui, contrairement à la plupart des autres domaines d'activité, continue à croître. En effet, le volume de données échangées dans les réseaux de communication a été multiplié par un facteur 10 tous les 5 ans. En conséquence de cette tendance, la consommation énergétique due aux TIC est passée de 3% en 2008 à 4.7% en 2012 [1], soit une augmentation de 56% en 4 ans, et les prévisions estiment une consommation de l'ordre de 30% vers 2030.

Malgré ce tableau pessimiste, il faut relativiser l'impact réel du réseau cellulaire ; en effet, la majeure partie de la consommation énergétique des TIC est due aux centres de calcul. Néanmoins, tous les acteurs du domaine, y compris les opérateurs qui verront leurs factures d'électricité diminuer, militent pour une nouvelle génération de réseaux moins gourmands en énergie. Dans ce contexte, les organismes de normalisation tels que le 3GPP et l'ITU, le consortium GreenTouch et plusieurs projets collaboratifs tels que TREND et EARTH ont proposé des solutions pour améliorer l'efficacité énergétique des réseaux de communication.

Dans ce papier, nous proposons une nouvelle architecture qui permet une intégration plus étroite entre le réseau de communication mobile et le smart grid. En particulier, nous analysons les futurs enjeux de ces deux systèmes et les avantages de l'architecture proposée. Ensuite, nous discutons de l'implémentation de notre architecture et des premiers résultats de nos recherches.

Enjeux et outils clés

Les Réseaux Numériques du Futur

L'explosion du trafic mobile (voir Figure 1 [2]), entraînée par le succès des smartphones, a montré les limites du réseau cellulaire classique basé sur le déploiement des stations de base caractérisées par une haute puissance rayonnée afin de garantir une couverture continue du service radio-mobile. Aujourd'hui, 50% du trafic est assuré par seulement 15% des stations de base et 45% du temps, la charge d'une station de base représente 10% de sa capacité **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

La densification du réseau à travers le déploiement massif des stations de base à bas coût (small cell en anglais) capable d'offrir des services très haut débit représente la solution clé pour atteindre les exigences de capacité de la 5G. Dans les villes du futur, des small cells utilisant un mix de technologies seront capables d'offrir des services hétérogènes tels que l'internet des objets, la réalité virtuelle et le contrôle du flux de véhicules.

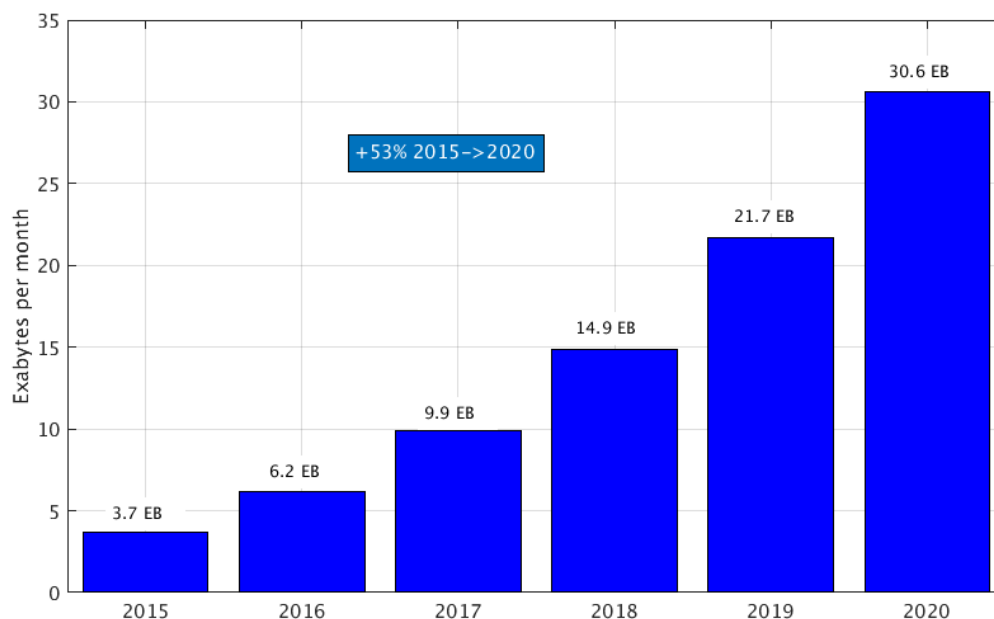


Figure 1. Prévisions de Cisco sur l'évolution du trafic mobile mondial de 2015 à 2020 [2].

Cependant, les coûts du réseau pourraient augmenter en raison du nombre de small cells supplémentaires requises ; pour cela, des mécanismes capables d'adapter la consommation d'énergie à la charge du réseau sont nécessaires : la technologie 5G a l'objectif d'être 100 fois plus économe en énergie que la 4G [4].

Un autre enjeu pour les opérateurs est le développement de solutions innovantes permettant d'offrir des services de communication mobile à faible coût dans les pays en développement. Cette révolution

Une Architecture Intelligente pour l'Amélioration de l'Efficacité Energétique du Réseau Cellulaire 5G

permettrait d'augmenter la pénétration du réseau et d'apporter ses services à 3 milliards de personnes qui n'ont pas encore accès à internet. L'utilisation des stations de base alimentées par des sources d'énergie locales et renouvelables permettrait d'éliminer la dépendance à l'infrastructure électrique et de réduire de façon importante les coûts pour les opérateurs.

Les Energies Renouvelables

La forte pression sociale liée au réchauffement climatique et la diminution des réserves mondiales font que la production d'électricité ne pourra bientôt plus se faire à partir de sources d'énergie fossiles. Au sein de l'Union européenne, 78% des sources d'énergie installées entre 2008 et 2015 ont été des sources d'énergies renouvelables [5]. En Allemagne, premier pays en nombre de panneaux solaires installés, la part d'énergies renouvelables non-hydraulique a atteint 24% en 2014 et en Ecosse quasiment la moitié de l'électricité produite provient de sources d'énergie renouvelable. A l'échelle européenne, la production des éoliennes couvre aujourd'hui 10,2% des besoins. Grâce à l'objectif des 20% d'énergie renouvelable dans l'union européenne d'ici 2020, on peut espérer que cette tendance va se confirmer dans les années à venir.

Le Smart Grid

L'Europe s'est donné pour l'horizon 2020 un triple objectif de réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre (par rapport au 1990), d'augmentation à 20 % la part des énergies renouvelables dans la production d'énergie et d'amélioration de l'efficacité énergétique de 20%. Ces objectifs ont permis de nombreuses recherches qui ont mené à l'intégration de nouvelles technologies comme les sources d'énergies renouvelables distribuées, le stockage d'énergie, les compteurs intelligents et la tarification dynamique. Toutes ces solutions transforment le réseau électrique en smart grid.

L'un des principaux défis du smart grid est de permettre l'intégration d'énergies renouvelables tout en garantissant la fiabilité du réseau classique. Les fonctions qui demandent une prédictibilité et une contrôlabilité du réseau ne sont pas utilisables lorsque la source principale d'énergie a un comportement stochastique. Par conséquent, une nouvelle organisation du réseau électrique est nécessaire.

Il est très probable que la direction choisit soit celle de la distribution et de la décentralisation des systèmes énergétiques car cette architecture pourra mieux s'adapter aux variations de consommation [5]. Des visions similaires sont présentées dans les feuilles de route de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie et de l'Agence Nationale pour la Coordination de la Recherche pour l'Energie.

Synergies entre le futur réseau de communication mobile et le smart grid

Pour faire face aux enjeux des futurs réseaux électriques et de communications, nous envisageons une architecture capable de développer et exploiter les synergies entre ces deux systèmes. Dans cette architecture (voir Figure 2), les small cells, alimentées par des sources d'énergie renouvelable et des batteries, sont connectées au smart grid et offrent les capacités de communication et de calcul qui permettent d'optimiser en temps réel la production, la distribution et la consommation d'énergie. De plus, grâce aux énergies renouvelables, le réseau mobile peut réduire les coûts liés à la consommation énergétique ainsi que ses émissions de CO₂. En particulier, ce système utilise l'apprentissage

automatique pour observer son environnement, prédire les états futurs et améliorer les performances des réseaux de communication et électrique.

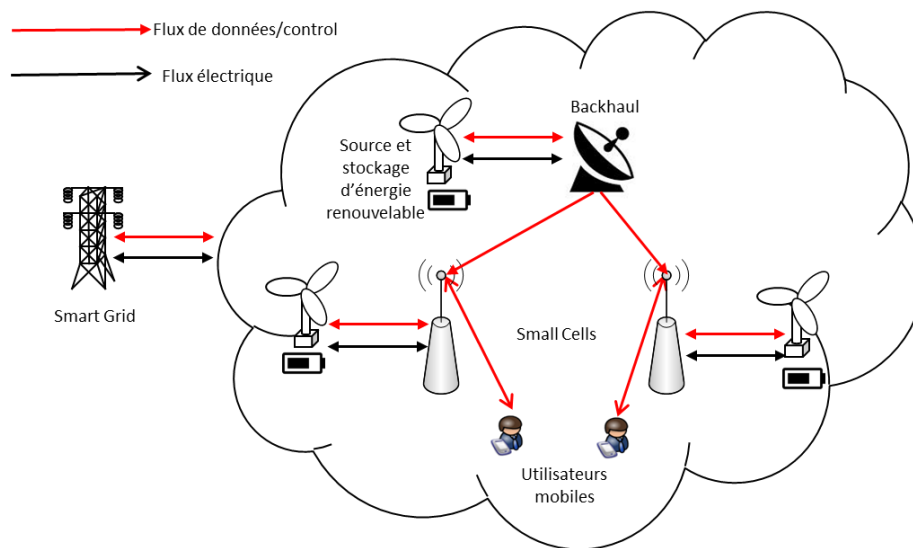


Figure 2. Optimisation conjointe entre réseau de communication mobile et smart grid.

Analyse, Surveillance et Communication dans le Smart Grid

L'intégration des TIC à tous les niveaux du réseau électrique est la caractéristique principale de son évolution vers le smart grid. L'acquisition, l'échange et le traitement d'information en temps réel grâce à un réseau de communication rapide, robuste et fiable permettront la supervision de la génération, du transport, de la distribution et de la consommation de l'énergie. Aujourd'hui les opérateurs du secteur de l'énergie déploient des systèmes de communication propriétaires basés principalement sur les courants porteurs en ligne ou des réseaux maillés en radiofréquence. Dans notre vision, la technologie 5G représentera une alternative importante à ces systèmes et, à travers le déploiement dense de small cells, offrira des services de communications plus stables, un traitement local et sécurisé de l'information et des bas coûts d'installation et de gestion. De plus, la capacité de calcul des small cells permettra une adaptation rapide à la demande et à la production locale d'énergie ainsi que la mise en place des services *edge cloud*, tels que l'analyse et le stockage de données, pour les opérateurs et l'utilisateur final.

Le Marché de l'Energie

Le smart grid permet d'établir, entre autre, un lien informationnel entre les producteurs et les consommateurs pour assurer l'équilibre production-consommation. Dans ce cadre, les technologies de comptage amènent avec elles de nouvelles offres et tarifications énergétiques, permettant un pilotage facilité de la demande et une valorisation de la production décentralisée. En effet, l'ouverture des marchés de l'énergie représente un levier pour l'intégration des productions décentralisées car le consommateur peut produire sa propre énergie et réinjecter le surplus sur le réseau. De plus, la mise en place de programmes de gestion de la demande, tel que la tarification dynamique [6], offre la possibilité d'orienter les modes de consommation pour des usages plus efficaces.

Gestion des défaillances dans le Smart Grid

L'approche classique pour garantir l'équilibre entre production et consommation dans le réseau électrique consiste à moduler la quantité d'énergie produite par un grand nombre d'unités de production en fonction de la demande énergétique. Cependant, comme mentionné précédemment,

Une Architecture Intelligente pour l'Amélioration de l'Efficacité Energétique du Réseau Cellulaire 5G

les générateurs distribués à énergie renouvelable sont en constante augmentation et ils remplacent progressivement les centrales de production conventionnelles. Dans ce contexte, il existe une nouvelle vision qui propose d'adapter la charge du système à la production, plutôt que l'inverse. Le challenge principal de cette solution est qu'elle nécessite la coordination d'un très grand nombre de charges réparties géographiquement. Avec le développement du smart grid et de son infrastructure de communication associée, cette approche s'avérerait possible.

Une communication rapide et fiable entre les différents éléments du réseau électrique pourra aussi se révéler bénéfique dans le cadre des applications relatives à la gestion des pannes et à l'*auto-cicatrisation*. Dans l'éventualité d'une défaillance électrique, l'opérateur du réseau doit identifier le plus rapidement possible les éléments défectueux et les isoler du reste du réseau. Ensuite, l'opérateur peut reconfigurer le réseau et réalimenter ses composants fonctionnels. Tout au long de cette procédure, l'inconfort de l'utilisateur final doit être limité autant que possible. Actuellement, une grande partie de ce processus nécessite une intervention humaine ; toutefois, avec une infrastructure TIC adaptée, il sera possible de concevoir un processus complètement autonome, fiable, rapide et à un coût maîtrisé.

Réseaux Mobiles 'Green'

Le regain d'intérêt récent pour la recherche sur le rendement énergétique des réseaux mobile provient du fait de l'augmentation de leur consommation d'énergie et de la quantité croissante des émissions de CO₂ de l'industrie des TIC en général. Les TIC vertes regroupent les techniques permettant la mise en place de réseaux cellulaires efficaces en termes d'énergie et de puissance, générant moins d'émissions de gaz à effet de serre tout en maîtrisant le rayonnement radio [3]. Outre la réduction de l'empreinte carbone, les opérateurs des réseaux mobiles sont motivés par les technologies de réduction de consommation d'énergie qui leur permettent de réduire leur coût d'exploitation. Cet objectif est d'autant plus crucial que les opérateurs de réseaux cellulaires seront confrontés à une explosion du volume de trafic de données avec des revenus qui ne croissent pas dans les mêmes proportions, leur imposant de réduire à la fois les coûts de leurs réseaux et les coûts d'exploitation.

Architecture Hiérarchique Distribuée pour la Reconfiguration et la Prise de Décision

Pour gérer efficacement un système complexe tel qu'un réseau de communication connecté au smart grid, il est nécessaire de prendre des décisions pertinentes en temps réel. Pour cela on oppose généralement deux visions : la gestion centralisée et la gestion décentralisée.

Une gestion entièrement centralisée, où un seul gestionnaire prend l'ensemble des décisions, pose des problèmes de latence et ne permet pas une gestion en temps réel du réseau. Au contraire, une gestion entièrement décentralisée ne permet pas de prendre des décisions optimales. De plus, ces deux architectures génèrent un surcoût important dû aux communications nécessaires pour coordonner tous ses éléments. Pour une gestion efficace, il est donc préférable de répartir le contrôle en séparant les décisions en fonction des critères suivants : latence, complexité, communications et consommation.

Les décisions simples, ne concernant qu'un élément du réseau et qui peuvent avoir de fortes contraintes en termes de latence doivent être prises localement. Les décisions impliquant de nombreux éléments et n'ayant pas de contraintes de latence peuvent être prises au niveau d'un

gestionnaire central. Quand des objectifs sont difficiles à atteindre au moment de la prise de décision au niveau d'un gestionnaire local ou global, il est nécessaire de créer au moins un niveau intermédiaire de décision.

L'architecture « Hierarchical and Distributed Cognitive Radio Architecture Management » (HDCRAM) est une architecture hiérarchique et distribuée à trois niveaux qui permet de faire face à ces objectifs (voir Figure 3). Chaque élément du niveau 3 de l'architecture de gestion est relié à un élément ou opérateur du système. A ce niveau, les décisions simples et rapides sont prises. Le niveau 2 apporte un niveau d'abstraction supplémentaire et permet de prendre des décisions plus complexes impliquant plusieurs opérateurs. Le niveau 1 de l'architecture est composé d'un seul élément qui est le gestionnaire principal du système. Dans cette architecture, chaque élément ne transmet et ne reçoit que les informations nécessaires pour les prises de décision.

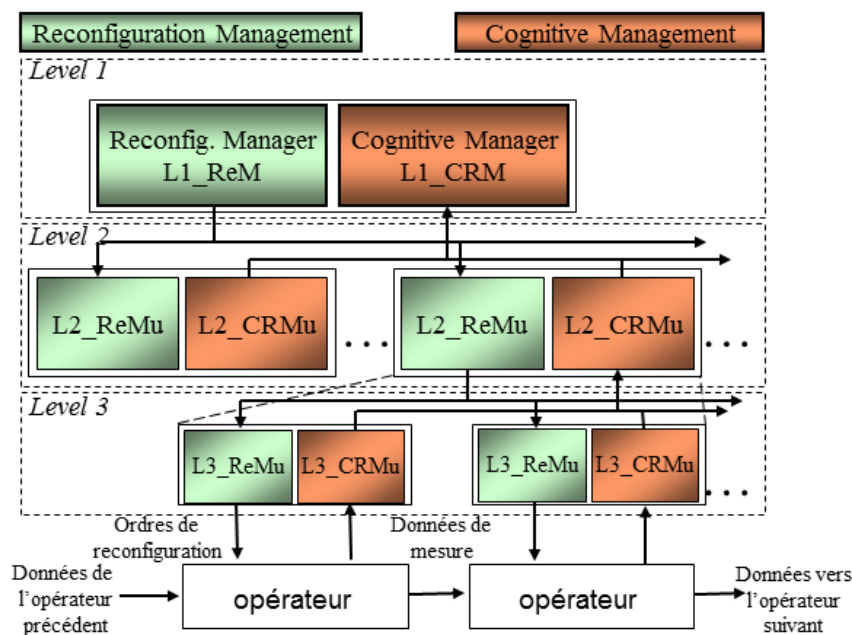


Figure 3. Architecture hiérarchique et distribuée proposée pour le control des réseaux de communication et électrique.

Optimisation de consommation énergétiques du réseau de communication

La transmission discontinue est un moyen efficace d'augmenter l'efficacité énergétique des réseaux de communication [7]. Avec cette solution, la small cell est mise en veille pendant quelques millisecondes au sein de chaque trame, s'il n'y a pas de données à transmettre. Le contrôle du temps de veille peut se faire à l'échelle locale, au niveau 3 de l'architecture HDCRAM, de façon à ce que la consommation de la station de base soit minimisée pour une qualité de service donnée [8].

Pendant leur veille, les stations de base n'émettent pas et ne génèrent donc pas d'interférences. Au contraire, lorsque des small cells voisines sont activées au même temps, l'interférence peut réduire le débit perçu par les utilisateurs. L'activation coordonnée des small cells voisines permet de réduire davantage la consommation énergétique sans réduire la qualité du service de communication. Cette coordination ne peut pas se faire à l'échelle locale : elle doit être réalisée au niveau deux ou trois de l'architecture HDCRAM. Une solution pour implémenter cette coordination dans les réseaux mobiles est présentée dans la Figure 4 **Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

Une Architecture Intelligente pour l'Amélioration de l'Efficacité Energétique du Réseau Cellulaire 5G

D'une part, un nœud est responsable du stockage des données ; d'autre part, le contrôleur des small cells maintient une estimation du niveau d'interférence que pourraient percevoir les utilisateurs d'une small cell si elle est activée. Lorsqu'on veut réaliser une transmission, le contrôleur vérifie le niveau d'interférence et active la small cell seulement si ce niveau est faible. A contrario, l'activation de la small cell est reportée, jusqu'au moment où l'interférence change ou la transmission est nécessaire (à cause des contraintes du service de communication).

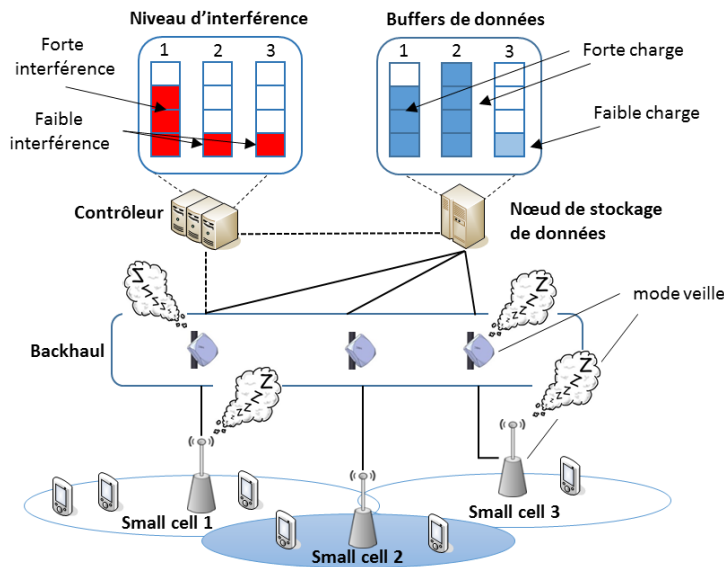


Figure 4. Coordination de la mise en veille des small cells **Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

Gestion locale de l'énergie

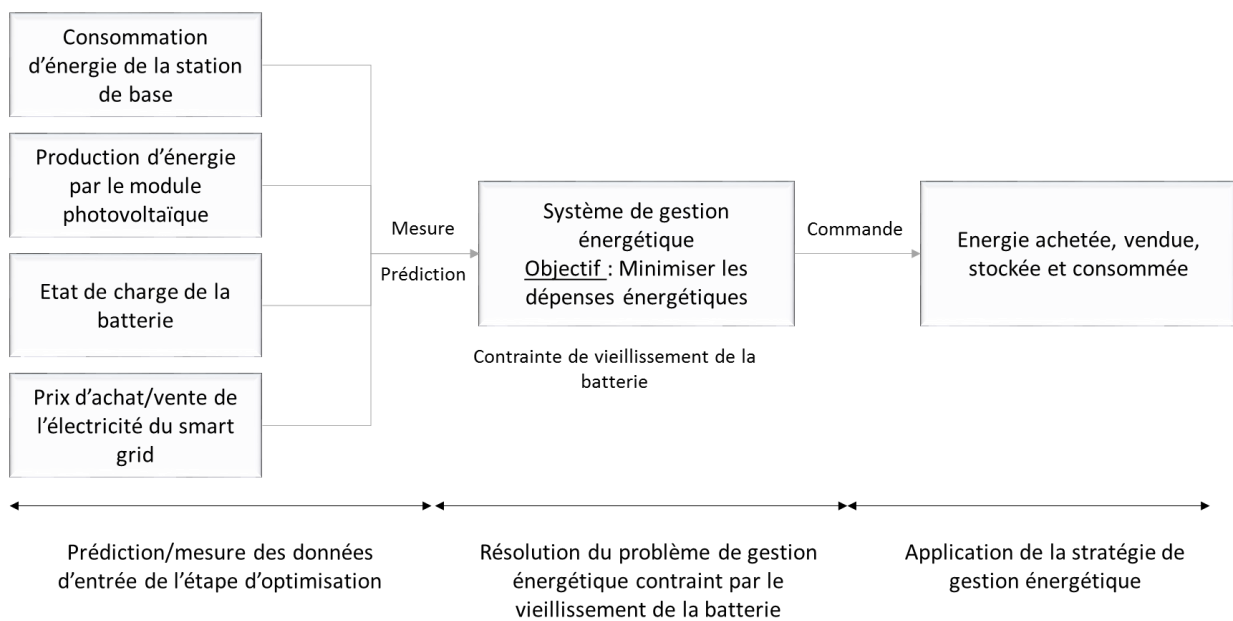


Figure 5 Contrôleur de gestion énergétique pour une small cell green.

Une small cell *green* nécessite un contrôleur, qui se trouve au niveau 3 de l'architecture HDCRAM, permettant d'arbitrer entre autoconsommation, stockage et vente de l'électricité. Ce contrôleur, décrit dans la Figure 5, est capable de faire face aux variations du trafic, de production d'énergie

renouvelable et du prix de l'électricité. De plus, il supervise les échanges d'énergie de manière à ce que la durée de vie de la batterie soit préservée.

D'abord, les données d'entrée correspondant à la production, la consommation, le prix et le stockage d'énergie sont prédites. Ensuite, l'étape d'optimisation consiste à minimiser les dépenses énergétiques sur une durée précise tout en respectant des contraintes relatives au vieillissement de la batterie et au service de communication. Naturellement, plus le modèle est précis, meilleur sera le résultat de l'optimisation.

L'apprentissage automatique peut être particulièrement efficace pour améliorer les étapes de prédiction et de prise de décision. En effet, nous avons proposé un contrôleur, basé sur l'apprentissage par renforcement et un système d'inférence floue **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, qui permet de réduire considérablement le coût énergétique tout en améliorant les conditions de fonctionnement de la batterie. Ce système est capable d'apprendre et par la suite d'anticiper les tendances de production, de consommation et de prix d'énergie afin d'optimiser les flux énergétiques entre les unités de consommation et de production. La Figure 6 représente le résultat de la gestion optimale d'une small cell équipée d'un module photovoltaïque de 0.25 m² et d'une batterie de 12Ah.

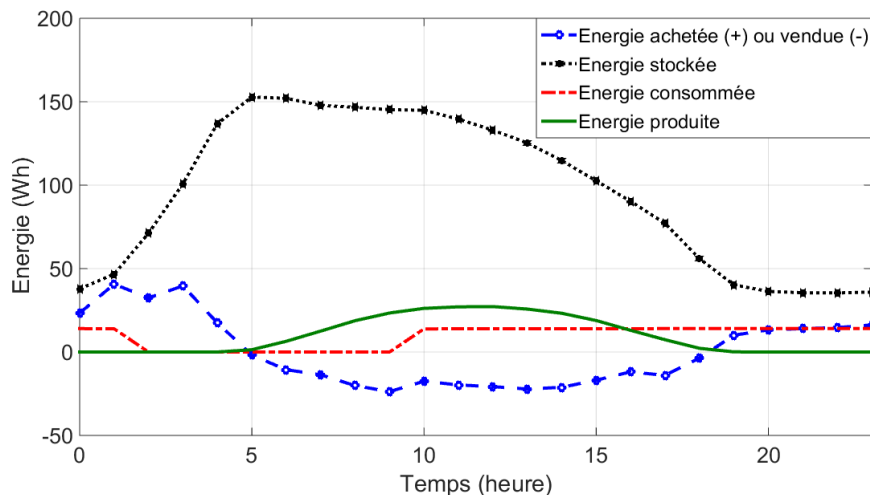


Figure 6. Flux énergétique au sein d'une small cell 'green'.

Reconfiguration distribuée du réseau intelligent via le réseau mobile

Comme indiqué précédemment, le réseau électrique est dans la nécessité de migrer d'une organisation centralisée vers une structure distribuée et décentralisée. Aujourd'hui, les grands générateurs raccordés au réseau de transport se voient progressivement remplacés par une multitude de petits générateurs introduits au niveau du réseau de distribution. En considérant cette tendance, la structure classique du réseau transport-distribution-consommation ne sera plus valable. Une nouvelle architecture devra alors être définie pour coordonner efficacement et de manière fiable divers dispositifs distribués tels que les compteurs intelligents, les batteries, les véhicules électriques, et les bâtiments intelligents.

On considère qu'un système distribué à grande échelle ne peut pas être géré de façon efficace en utilisant une approche centralisée. En effet, cette solution nécessite des ressources calculatoires faramineuses et est potentiellement vulnérable. De plus, sa mise en œuvre est impossible lorsque les différents acteurs du système refusent de partager des données confidentielles entre eux.

Une Architecture Intelligente pour l'Amélioration de l'Efficacité Energétique du Réseau Cellulaire 5G

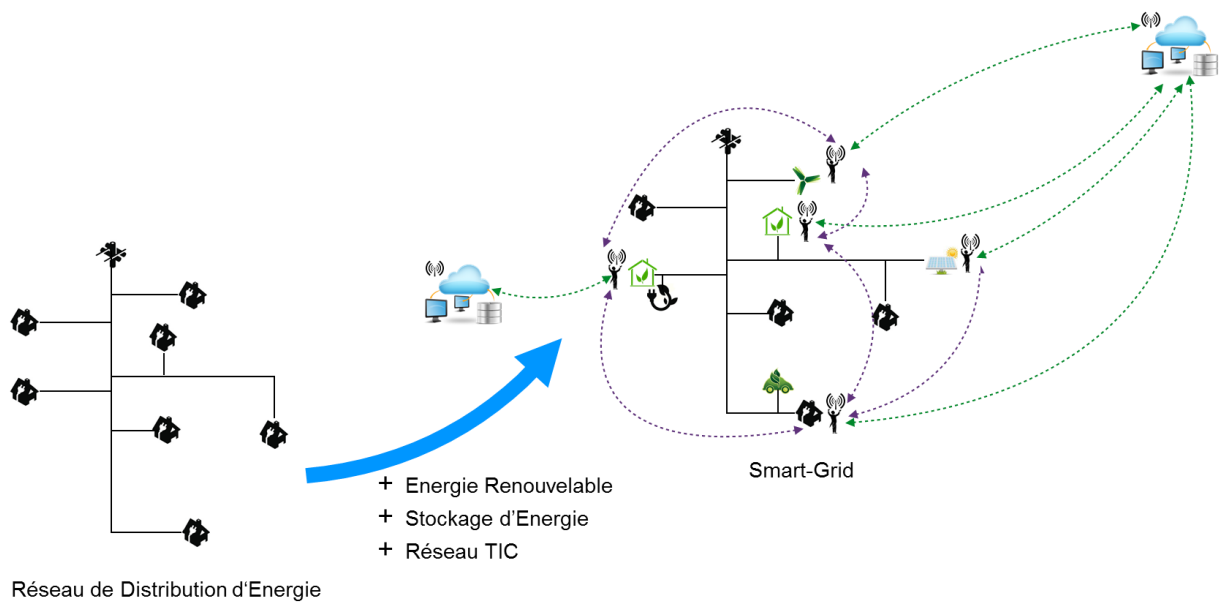


Figure 7. Migration d'un système de distribution classique vers le smart grid.

On envisage donc un modèle de système distribué, comme illustré dans la Figure 7, qui grâce à l'infrastructure TIC adéquate, est en mesure d'auto-coordonner et d'apprendre afin de s'adapter aux différents modes de fonctionnement du réseau. Dans ce scénario, l'ensemble des dispositifs intelligents connectés aux réseaux électriques sont capables de communiquer entre eux, ainsi qu'avec un ou plusieurs *superviseurs*.

Il est important de faire la distinction entre la figure classique du contrôleur central et celle du superviseur. D'un côté, pour accomplir une tâche, le contrôleur central rassemble toutes les données à partir des agents locaux, effectue les calculs, et renvoie des instructions aux agents. D'un autre côté, le problème est résolu localement par les agents qui échangent des courts messages pour se coordonner et parvenir à un consensus. Le superviseur coordonne ou initie certaines actions, mais ne réalise pas de tâche d'optimisation.

Actuellement, différentes infrastructures de communication filaires et sans fil sont utilisées dans le réseau électrique en fonction de l'application visée. Cependant, dans le cadre de l'approche distribuée de contrôle et de gestion, la communication sans fil est beaucoup plus intéressante car elle permet une communication rapide entre les différents éléments du réseau, quelle que soit leur position dans le réseau électrique. Par exemple, en considérant les normes actuelles des systèmes de communications dans le smart grid, des problèmes très complexes tels que la gestion de l'énergie dans un grand réseau (100000 nœuds) pourraient être résolus en approche distribuée en moins de deux minutes [11]. Par ailleurs, le standard pour les futurs réseaux 5G promet une latence de 1 ms à l'horizon 2020. Dans l'hypothèse des réseaux de communication ultra-rapide, le problème décrit plus haut serait résolu en moins de 0.5 seconde, ouvrant la voie à la reconfiguration optimale en temps réel des ressources énergétiques.

Conclusion

Le développement d'une économie à faible bilan carbone est un objectif majeur de l'Europe à l'horizon 2020. Ce papier propose un système intelligent basé sur une intégration étroite entre réseau cellulaire

et smart grid, afin d'obtenir une amélioration considérable de l'efficacité éco énergétique de ces deux réseaux. Cette solution utilise une architecture distribuée et hiérarchique où des mécanismes d'optimisation par apprentissage sont implémentés afin d'adapter la production, la distribution et la consommation d'énergie. Les avantages de cette approche et les premiers résultats obtenus sont notables et nous permettent de l'identifier comme une des technologies clés pour atteindre les objectifs d'efficacité énergétique de la 5G.

Références

- [1] P. Jauhainen, "European R&D for (5G) sustainable communications", European Commission, Next-GWiN, Rennes, France, Oct. 2014.
- [2] Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020," February 3, 2016.
- [3] A. De Domenico, E. Calvanese Strinati et A. Capone, "Enabling Green cellular networks: A survey and outlook," Elsevier Computer Communications, Volume 37, 1 January 2014, pp. 5-24.
- [4] ITU-R, Recommendation M.2083-0, "IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," Sep. 2015.
- [5] Ren21, "Renewables 2015 Global Status Report," Paris, France, 2015.
- [6] P. Siano, "Demand response and smart grids—A survey, " Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, vol. 30, pp. 461-478
- [7] P. Frenger, P. Moberg, J. Malmudin, Y. Jading et I. Godor, "Reducing Energy Consumption in LTE with Cell DTX," *IEEE 73rd VTC Spring*, Yokohama, Japan, 2011.
- [8] R. Bonnefoi, C. Moy et J. Palicot, "Dynamic Sleep Mode for Minimizing a Femtocell Power Consumption," CROWNCOM, Grenoble, France, Jun. 2016.
- [9] A. De Domenico et D. Kténas, "Inter-cell Interference Coordination for Backhaul-aware Small Cell DTX," Journées Scientifiques URSI France Energie et radiosciences, Rennes, France, Mar. 2016.
- [10] M. Mendil, A. De Domenico, V. Heiries, R. Caire et H. Hadjsaid, "Fuzzy Q-Learning based Energy Management of Small Cells Powered by the Smart Grid," IEEE 27th PIMRC, Valencia, Spain, Sep. 2016.
- [11] M. Kraning, E. Chu, J. Lavaei, et S. Boyd, "Dynamic Network Energy Management via Proximal Message Passing", *Foundations and Trends in Optimization* 1, Jan. 2014, pp. 70-122.

Biographie

A. De Domenico a obtenu un diplôme d'ingénieur en télécommunications de l'Université de Rome en 2008 et son doctorat de l'Université de Grenoble en 2012. Depuis 2009, il est ingénieur de recherche au CEA-LETI. Ses domaines d'activités portent sur l'optimisation et la modélisation des réseaux mobiles de nouvelle génération. Il est auteur et co-auteur des 8 brevets.

R. Bonnefoi a obtenu un diplôme d'ingénieur en électronique et télécommunication à Supélec et un master de l'Université de Rennes 1 en 2015. Il est actuellement en première année de doctorat à CentraleSupélec au sein de l'IETR. Pendant sa thèse il s'intéresse à l'éco-radio et à l'utilisation de la radio intelligente pour le réseau électrique intelligent.

M. Mendil a obtenu un diplôme en télécommunications à l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INP) en 2014. Il prépare actuellement une thèse sur l'optimisation énergétique des réseaux

Une Architecture Intelligente pour l'Amélioration de l'Efficacité Energétique du Réseau Cellulaire 5G

cellulaires hétérogènes au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et au Grenoble Electrical Engineering laboratory (G2Elab).

C. Gavriluta a obtenu un diplôme d'ingénieur en système d'énergie éolienne à l'Université de Aalborg en 2011. En 2015, il a reçu son doctorat de l'Université polytechnique de Catalogne à Barcelone. Depuis, il a intégré l'Institut National Polytechnique à Grenoble en tant que chercheur postdoctoral. Ses recherches portent sur le control distribué du réseau et les interactions entre les TIC vertes et le smart grid.

J. Palicot a obtenu son doctorat de l'Université de Rennes I en 1983. Il a ensuite travaillé, comme Ingénieur d'études au CCETT (devenu Orange-Labs Rennes). De 2001 à 2003, il a été détaché à l'IRISA/INRIA comme spécialiste industriel. Il a intégré CentraleSupélec en 2003 et est responsable de l'équipe de recherche Signal Communications et Electronique Embarquée. Ses domaines d'activités portent sur le traitement du signal pour les communications numériques, la radio intelligente et l'écoradio.

C. Moy a obtenu les diplômes d'ingénieur, de Master et de doctorat de l'INSA de Rennes en 1995 et 1999 dans la spécialité électronique. Il a ensuite travaillé 6 ans dans le laboratoire de recherche européen de Mitsubishi Electric. Depuis 2005, il est enseignant/chercheur à Supélec, CentraleSupélec depuis 2015, et effectue ses recherches dans l'équipe SCEE, dont il est responsable du département communications. Ses recherches portent sur la radio logicielle et la radio intelligente.

V. Heiries a obtenu un diplôme d'ingénieur de l'ENAC et un doctorat en traitement du signal et communications numérique de l'ENSAE. Il a travaillé plusieurs années au sein de THALES dans le domaine des systèmes de navigation par satellite (GPS, GALILEO). Après avoir intégré le CEA-LETI, ses travaux ont porté sur la localisation radio UWB. Ses activités de recherches sont maintenant centrées autour du traitement du signal appliqué aux systèmes de gestion de l'énergie pour les batteries Li-Ion.

R. Caire a réalisé son M2R à Virginia Tech, USA puis sa thèse au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble sur la Gestion de la Production d'Energie Décentralisée. Il a ensuite travaillé pour Electricité de France. Il a intégré l'Institut National Polytechnique à Grenoble en septembre 2006 en tant que Maître de Conférence. Ses thèmes de recherche sont la sécurisation des infrastructures critiques, l'automatisation des réseaux de distribution et les nouvelles architectures des réseaux électriques.

N. Hadjsaïd a obtenu son doctorat et l'Habilitation à Diriger des Recherches de l'Institut National Polytechnique de Grenoble en 1992 and 1998. De 1992 à 2000, il a été Maître de Conférence à l'Ecole d'ingénieurs en énergie eau et environnement. Depuis 2000, il est Professeur au sein du même institut. Il est actuellement Directeur Adjoint du laboratoire G2ELAB, responsable de la chaire industrielle d'excellence ERDF sur les smartgrids et président du Conseil Scientifique de SmartGrid France.