



HAL
open science

Vers des réseaux hétérogènes sans fil efficaces en consommation énergétique

Hocine Ameur

► **To cite this version:**

Hocine Ameur. Vers des réseaux hétérogènes sans fil efficaces en consommation énergétique. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Technologie de Troyes, 2016. Français. NNT : 2016TROY0034 . tel-03016967

HAL Id: tel-03016967

<https://theses.hal.science/tel-03016967>

Submitted on 20 Nov 2020

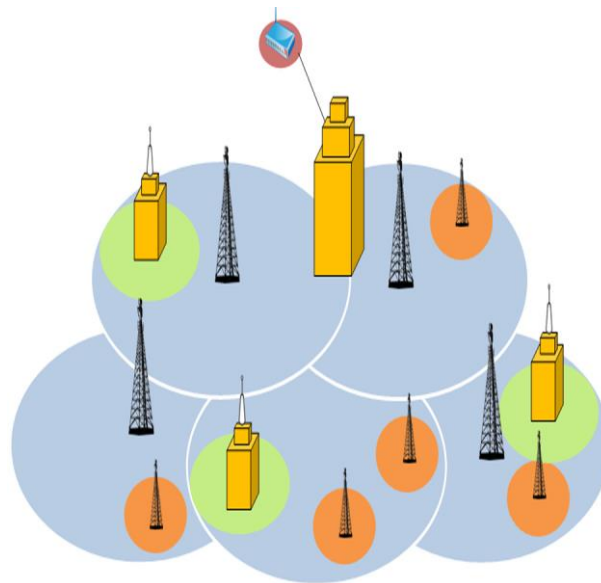
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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.

Thèse
de doctorat
de l'UTT

Hocine Abdelhakim AMEUR

Vers des réseaux hétérogènes sans fil efficaces en consommation énergétique



Spécialité :

**Ingénierie Sociotechnique des Connaissances, des Réseaux
et du Développement Durable**

2016TROY0034

Année 2016

THESE

pour l'obtention du grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES

**Spécialité : INGENIERIE SOCIOTECHNIQUE DES CONNAISSANCES,
DES RESEAUX ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE**

présentée et soutenue par

Hocine Abdelhakim AMEUR

le 25 novembre 2016

**Vers des réseaux hétérogènes sans fil
efficaces en consommation énergétique**

JURY

M. S.-M. SENOUCI	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Président
M. M. ESSEGHIR	MAITRE DE CONFERENCES	Directeur de thèse
M. H. FOUCHAL	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Rapporteur
M. L. KHOUKHI	PROFESSEUR ASSISTANT UTT	Directeur de thèse
M. R. LANGAR	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Examineur
M. S. MARTIN	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Rapporteur

DEDICACE

A mes parents...

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement mes directeurs de thèse Mr Lyes KHOUKHI et Mr Moez ESSEGHIR pour les orientations et les conseils qu'ils m'ont prodigués ainsi que pour le soutien et l'encouragement qu'ils m'ont apportés.

J'exprime mes remerciements à Mr Steven MARTIN et Mr Hacène FOUCHAL qui m'ont honoré d'accepter de rapporter cette thèse. Je tiens à remercier également Mr Sidi Mohammed SENOUCI et Mr Rami LANGAR qui m'ont fait l'honneur d'avoir accepté de juger ma thèse.

RESUME

L'environnement subit des dégradations importantes causées par l'utilisation des énergies non renouvelables. Plus particulièrement, le secteur des technologies de l'information et de la communication est responsable de l'émission de 2% du taux mondial de carbone. Les statistiques montrent que l'énergie consommée par les réseaux sans fil constitue 10% de l'énergie globale consommée annuellement.¹ Avec la prolifération des objets connectés, les réseaux cellulaires deviennent le moyen de communication le plus utilisé. De ce fait, ces réseaux commencent à adopter un déploiement hétérogène afin de faire face au manque de capacité dans les infrastructures actuelles.

Dans cette thèse, nous nous concentrons principalement sur l'étude de l'économie d'énergie dans les réseaux cellulaires et en particulier, l'énergie consommée par les réseaux cellulaires hétérogènes (*Heterogeneous Networks*, HetNet), connus pour leur rôle principal dans les futures architectures de communication, à savoir la 5G. Les HetNets se distinguent par l'utilisation de différents moyens et technologies d'accès. En plus des stations de base conventionnelles, ces réseaux introduisent le concept des «Small Cells» qui se caractérise par l'utilisation de Microcells, Picocells et/ou Femtocells. Cette diversité offre plusieurs avantages au niveau de l'efficacité spectrale, de la capacité et de la couverture réseau.

Nous modélisons dans un premier temps le fonctionnement d'un réseau hétérogène et proposons par la suite des solutions ayant pour but de réduire l'énergie consommée par ces infrastructures, avec la prise en compte de la contrainte de la capacité et de la couverture réseau. Les méthodes proposées se basent sur une démarche qui vise à réduire la densité des réseaux hétérogènes. Cependant, chacune de ces solutions suggérées traite un problème précis dans le cadre de l'économie d'énergie, à savoir la couverture réseau, l'adaptation des protocoles utilisés ainsi que l'étude de la possibilité de mettre en place un traitement distribué.

Mots clés : réseaux hétérogènes-HetNets, consommation d'énergie, réseaux cellulaires

¹ J.Wu, Green communications: theoretical fundamentals, algorithms and applications. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.

ABSTRACT

The environment is undergoing a significant damage caused by the use of non-renewable energy sources. The information and communications technology sector is responsible for 2% of the global carbon footprint. Statistics show also that the energy consumed by wireless networks represents around 10% of the annual energy consumption.¹ With the widespread of the Internet of Things, cellular networks are becoming the most used communication technology. Therefore, these networks start using heterogeneous infrastructures to address the lack of capacity.

In this thesis, we focus on studying the energy saving problem within cellular networks. In particular, the energy consumed by heterogeneous cellular networks, which are known by their main importance in the future communication architectures namely, 5G networks. Heterogeneous networks (HetNets) use different types of access technologies. In addition to the conventional base stations, these networks introduce the concept of small cells which is characterized by the use of Microcells, Picocells and Femtocells. This diversity offers several advantages in terms of spectral efficiency, network coverage and capacity.

We express initially the characteristics of heterogeneous networks and propose thereafter some approaches aiming to reduce the energy consumed by these infrastructures, by taking into account the delivered capacity and network coverage. The proposed methods aim to reduce heterogeneous networks density. However, each one addresses a specific problem in the energy saving process, namely network coverage, used protocols as well as the use of distributed approaches.

Keywords: heterogeneous networks-HetNets, energy consumption, cellular networks

¹ J.Wu, Green communications: theoretical fundamentals, algorithms and applications. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I: CONCEPTS ET TECHNIQUES D'ECONOMIE D'ENERGIE.....	7
1.1. INTRODUCTION.....	8
1.2. CONCEPT DU GREEN DANS LE SECTEUR DES TIC.....	8
1.3. CONCEPTS D'ECONOMIE D'ENERGIE DANS LES RESEAUX	9
1.3.1. Energie et réseaux filaires.....	10
1.3.2. Energie et réseaux sans fil	10
1.4. PARADIGMES ET TAXONOMIE DES CONCEPTS D'ECONOMIE D'ENERGIE.....	15
1.4.1. Consolidation des ressources	16
1.4.2. Connectivité sélective.....	18
1.4.3. Construction d'équipements efficaces en énergie.....	18
1.5. METHODES D'ECONOMIE D'ENERGIE ET COUCHES RESEAUX.....	20
1.5.1. Adaptation des débits et des puissances de transmission	20
1.5.2. Applications efficaces en énergie.....	23
1.5.3. Economie d'énergie par la radio cognitive	24
1.5.4. Infrastructures efficaces en énergie	25
1.6. QOS ET COMMUNICATIONS GREEN.....	25
1.7. METRIQUES D'ESTIMATION DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE	25
1.8. ANALYSE DES METHODES DE GREEN	26
1.8.1. Allumer/éteindre vs Adaptation des débits.....	28
1.8.2. Réseaux hétérogènes vs Réseaux homogènes.....	28
1.8.3. Méthodes «Incrémentales» vs « Clean Slate ».....	28
1.9. CONCLUSION.....	29
CHAPITRE II: PROBLEMATIQUE.....	31
2.1. INTRODUCTION.....	32
2.2. INFRASTRUCTURE DES RESEAUX HETEROGENES	33
2.3. PROCESSUS DE HANDOVER DANS LES RESEAUX HETEROGENES	33
2.4. ENERGIE ET RESEAUX HETEROGENES.....	35
2.5. PROPOSITION.....	36

CHAPITRE III: MODELISATION STOCHASTIQUE ET MODELE DYNAMIQUE.38

3.2. FORMULATION DU PROBLEME	39
3.2.1. Infrastructure du réseau utilisé	39
3.2.2. Formulation du problème d'optimisation	41
3.2.3. Modèle de files d'attentes	43
3.2.4. Calcul de l'efficacité énergétique d'une SB/PA	44
3.2.5. Estimation de la capacité restante	44
3.3. SIMULATION ET RESULTATS	46
3.4 CONCLUSION	50

CHAPITRE IV: MODELISATION GRAPHIQUE POUR UNE COUVERTURE

OPTIMALE.....51

4.1. INTRODUCTION	52
4.2. DESCRIPTION DU MODELE	52
4.2.1. Infrastructure du réseau	52
4.2.2. Modèle énergétique	52
4.2.3 Formulation du problème.....	53
4.2.4 Heuristique basée sur le couplage de graphe	54
4.3 EXPERIMENTATIONS	56
4.4 CONCLUSION	62

CHAPITRE V: MIH POUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE63

5.1. INTRODUCTION	64
5.2. INFRASTRUCTURE DU RESEAU	64
5.3. MIH POUR L'ECONOMIE DE L'ENERGIE	65
5.3.1. Collecte d'informations sur le réseau	65
5.3.2. Éteindre/allumer les SBs.....	70
5.4. RESULTATS DE LA SIMULATION	72
5.4.1. Scénario WiMax.....	73
5.4.2. Scénario WiFi.....	75
5.4.3. Utilisation du WiMax et du WiFi.....	76
5.5. CONCLUSION	79

CHAPITRE VI: PRISE DE DECISION DISTRIBUEE BASEE SUR

L'APPRENTISSAGE.....80

6.1. INTRODUCTION	81
6.2. INFRASTRUCTURE DU RESEAU	81
6.3. MODELISATION DU PROBLEME D'OPTIMISATION	82
6.4. APPROCHE BASEE SUR LE MAB.....	84
6.5. SIMULATIONS ET RESULTATS.....	87
6.6. CONCLUSION.....	91
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	93
LISTE DES PUBLICATIONS	98
REFERENCES	99

LISTE DES FIGURES

FIG.0.1 EXEMPLE D'UN RESEAU CELLULAIRE HETEROGENE.....	3
FIG.1.1 RESEAU CELLULAIRE HOMOGENE CONVENTIONNEL	12
FIG. 1.2 EXEMPLE D'ARCHITECTURE D'UN RESEAU DE CAPTEURS.....	13
FIG. 1.3 EXEMPLE D'ARCHITECTURE D'UN RESEAU OPPORTUNISTE.....	15
FIG. 1.4 TAUX DE NŒUDS ACTIFS PAR RAPPORT A LA CHARGE DE TRAFIC.....	16
FIG. 1.5 EFFICACITE DES EQUIPEMENTS PAR RAPPORT A LA CHARGE DE TRAFIC.....	16
FIG. 1.6 EFFICACITE DES NŒUDS AVEC L'UTILISATION DE LA VIRTUALISATION	17
FIG. 1.7 EXEMPLE DE L'UTILISATION DE LA CONNECTIVITE SELECTIVE	18
FIG. 1.8 CONSOMMATION ET EFFICACITE ENERGETIQUE D'UN EQUIPEMENT	19
FIG. 1.9 TECHNIQUES D'ECONOMIE D'ENERGIE SELON LES COUCHES RESEAUX.....	20
FIG. 1.10 EXTENSION DE LA COUVERTURE DES STATIONS DE BASE DANS LES RESEAUX CELLULAIRES	22
FIG. 1.11 ILLUSTRATION DES MODES DE FONCTIONNEMENT ET DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE (LES CARRES REPRESENTENT LA CHARGE DE TRAFIC ET LE FOND BLEU LA CONSOMMATION D'ENERGIE).....	22
FIG. 1.12 UTILISATION D'UN PROXY POUR L'ECHANGE DE DONNEES AU MOMENT OU LE CLIENT EST EN MODE VEILLE	23
FIG. 1.13 FONCTIONNEMENT DE LA RADIO COGNITIVE	24
FIG. 1.14 REPRESENTATION HIERARCHIQUE DES METHODES D'ECONOMIE D'ENERGIE	30
FIG. 2.1 MOTIVATION DERRIERE LES RESEAUX GREEN.....	32
FIG. 2.3 CAPACITE ET COUVERTURE DES DIFFERENTES CELLULES.....	33
FIG. 2.4 EXEMPLE D'UN HANDOVER VERTICAL DANS UN RESEAU HETEROGENE.....	34
FIG. 2.5 OPTIMISATION DU SPECTRE.....	35
FIG. 2.6 TECHNIQUES D'ECONOMIE D'ENERGIE.....	35
FIG. 3.1 ILLUSTRATION DE L'ARCHITECTURE UTILISEE.....	40
FIG. 3.2 MODELE DE CONSOMMATION D'ENERGIE D'UNE STATION DE BASE	41
FIG. 3.3 PROBLEME DE LA CAPACITE ET DE LA COUVERTURE.....	45
FIG. 3.4 ENERGIE CONSOMMEE EN FONCTION DE LA CHARGE DE TRAFIC	47
FIG. 3.5 GAIN EN ENERGIE EN FONCTION DE LA CHARGE DE TRAFIC	48
FIG. 3.6 TAUX DE HANDOVER EN FONCTION DE LA CHARGE DE TRAFIC	49
FIG. 3.7 NOMBRE DE SBS ETEINTES EN FONCTION DE LA CHARGE DE TRAFIC	49

FIG. 3.8 CAPACITE DEMANDEE ET LA CAPACITE DELIVREE EN FONCTION DE LA CHARGE DE TRAFIC.....	50
FIG. 4.1 EXEMPLE D'UNE ETAPE DE L'ALGORITHME PROPOSE.....	56
FIG. 4.2 ENERGIE CONSOMMEE PAR BIT EN FONCTION DE LA CHARGE DE TRAFIC.....	58
FIG. 4.3 ENERGIE CONSOMMEE SUIVANT LES HEURES JOURNALIERES AVEC L'UTILISATION DE L'HEURISTIQUE PROPOSEE.....	60
FIG. 4.4 TAUX DE HANDOVER EN FONCTION DU NOMBRE D'UTILISATEURS DANS LE RESEAU.....	60
FIG. 4.5 POURCENTAGE DE SBS ETEINTES EN FONCTION DE LA CHARGE DE TRAFIC.....	61
FIG. 5.1 PROTOCOLE DE HANDOVER COLLABORATIF.....	65
FIG. 5.2 ETAPES UTILISEES DANS UN HANDOVER VERTICAL.....	66
FIG. 5.3 MESSAGES ECHANGES LORS D'UN HANDOVER VERTICAL.....	66
FIG. 5.4 ESTIMATION DE LA CAPACITE UTILISEE.....	68
FIG. 5.5 MESSAGES MODIFIES AU NIVEAU DU PROTOCOLE MIH.....	70
FIG. 5.6 ALGORITHME DU PROTOCOLE MIH MODIFIE.....	71
FIG. 5.7 EFFICACITE ENERGETIQUE EN FONCTION DES DONNEES TRANSMISES.....	73
FIG. 5.8 TAUX DE PERTE EN FONCTION DE LA CAPACITE UTILISEE.....	74
FIG. 5.9 TAUX DE PERTE EN FONCTION DE LA DISTANCE ENTRE SITES.....	75
FIG. 5.10 EFFICACITE ENERGETIQUE EN FONCTION DE LA CAPACITE UTILISEE POUR LES DIFFERENTES SBS.....	76
FIG. 5.11 TAUX DE PERTE EN FONCTION DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE EN UTILISANT DES SBS WiMAX ET DES POINTS D'ACCES WiFi.....	77
FIG. 5.12 ENERGIE CONSOMMEE EN FONCTION DU TEMPS DE SIMULATION.....	77
FIG. 5.13 EFFICACITE ENERGETIQUE EN FONCTION DE LA CAPACITE EN UTILISANT UN RESEAU COMPOSE DE SBS WiMAX ET DE POINTS D'ACCES WiFi.....	78
FIG. 5.14 TAUX DE PERTE EN FONCTION DE LA CAPACITE ENERGETIQUE EN UTILISANT UN RESEAU COMPOSE DE SBS WiMAX ET DE POINTS D'ACCES WiFi.....	78
FIG. 6.1 AMELIORATION DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE EN UTILISANT LE « MULTI-ARMED BANDIT ».....	87
FIG. 6.2 ENERGIE CONSOMMEE PAR BIT EN FONCTION DE LA CAPACITE UTILISEE.....	89
FIG. 6.3 EFFICACITE ENERGETIQUE EN FONCTION DU NOMBRE D'ITERATIONS.....	89
FIG. 6.4 EFFICACITE ENERGETIQUE EN FONCTION DE LA CAPACITE POUR DIFFERENTES VALEURS DE VELOCITE.....	90
FIG. 6.5 COMPARAISON ENTRE L'EFFICACITE ENERGETIQUE DE NOTRE APPROCHE PAR RAPPORT A CELLE PROPOSEE PAR [66].....	91

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU. 1. CLASSIFICATION DES APPROCHES UTILISEES DANS LES COMMUNICATIONS GREEN	19
TABLEAU. 2. LES METRIQUES DE MESURE DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE	27
TABLEAU. 3. TAXONOMIE DES RECHERCHES SUR LES COMMUNICATION GREEN	27
TABLEAU. 4. ALGORITHME BASE SUR LE COUPLAGE	57
TABLEAU. 5. PARAMETRES DES SBS.....	57
TABLEAU. 6. COMPARAISON ENTRE LA SOLUTION OPTIMALE ET L'HEURISTIQUE PROPOSEE	59
TABLEAU. 7. LE DEBIT MOYEN PAR CELLULE DURANT LA NUIT.....	59
TABLEAU. 8. STRUCTURE DES INFORMATIONS DANS LE SERVEUR	67
TABLEAU. 9. LES ATTRIBUTS DU MESSAGE MIH MIH_MN_HO_COMMIT_REQUEST	68
TABLEAU. 10. LES ATTRIBUTS DU MESSAGE MIH_MN_CONDDATE_QUERY RESPONSE.....	69
TABLEAU. 11. CARACTERISTIQUES DU WiMAX	72
TABLEAU. 12. CARACTERISTIQUES DU WiFi.....	72
TABLEAU. 13. ALGORITHME BASE SUR L'APPRENTISSAGE.....	86
TABLEAU. 14. COMPARAISON ENTRE LES APPROCHES PROPOSEES	96

LISTE DES ABREVIATIONS

ATIS: Alliance for Telecommunications Industry Solutions).

CREB: Cell Range Expansion Bias

ECR: Energy Consumption Rating

MAB: Multi-Armed Bandit

MIH: Media Independent Handover

MIIS : Service d'information MIH

NIST: National Institute of Standards and Technology

PIrural: Indicateur de performance dans les zones rurales

PIurban: Indicateur de performance dans les zones urbaines

PA: Point d'Accès

QoS : Qualité de Service

SB: Station de Base

SDN: Software Defined Network

TIC : Technologies de l'Information et de la Communication

VoIP: Voix sur IP

INTRODUCTION GENERALE

L'environnement a connu, ces dernières années, des dégradations importantes causées par l'utilisation des énergies non-renouvelables qui engendrent l'émission d'un taux très élevé de CO₂. Le secteur des TIC (Technologies de l'Information et de la Communication) est considéré comme l'un des plus grands consommateurs d'énergie et est le responsable de l'émission d'environ 2% du taux mondial de carbone [1]. Ceci peut être comparé à l'industrie du transport aérien en termes de pollution. Des statistiques montrent que la consommation d'énergie dans les TIC a quadruplé au cours des 20 dernières années [2] et ne cesse d'augmenter. Cela est dû à l'utilisation massive des données numériques et à l'évolution des systèmes de communication qui deviennent de plus en plus gourmands. Suite à l'impact de l'industrie des TIC sur l'environnement et les dangers qui en découlent, les recherches s'orientent de plus en plus vers l'étude de nouvelles techniques permettant d'améliorer les performances énergétiques des systèmes. La majorité des travaux effectués dans ce cadre de recherche sont destinés à l'optimisation énergétique des centres de données, connus par leur grande consommation. Cependant, des statistiques, effectuées par [3], montrent que la consommation des technologies sans fil commence à dépasser celle des centres de données, étant donné la facilité d'accès aux technologies sans fil et aux exigences des utilisateurs en termes de performances (débit élevé, délai court, taux d'erreurs faible,...etc.) nécessitant un déploiement massif d'équipements de communication sans fil.

L'économie de l'énergie dans les systèmes de communication se faisant la plupart du temps au détriment de la performance ; le défi est donc de trouver des méthodes permettant de déterminer un compromis entre ces deux facteurs. Ceci, peut être réalisé en utilisant des méthodes de résolution assez complexes nécessitant un temps de calcul très important, d'où le besoin d'utiliser des modèles heuristiques et/ou stochastiques adaptés.

Au sein des réseaux sans fil, le problème de l'économie d'énergie concerne plusieurs infrastructures et peut faire l'objet d'études d'une multitude de technologies, à savoir les réseaux cellulaires (homogènes et hétérogènes), les réseaux opportunistes, les réseaux mesh ainsi que les réseaux de capteurs et Ad-Hoc.

Les infrastructures cellulaires figurent parmi les moyens de communication les plus utilisés dans les réseaux sans fil. Avec la prolifération des objets connectés, 20 milliard d'objets

INTRODUCTION GENERALE

pourraient être connectés vers l'année 2020 [4]. Les réseaux cellulaires conventionnels (homogènes) ne peuvent pas supporter une telle charge ; l'utilisation des réseaux hétérogènes devient alors nécessaire.

Les travaux effectués dans le contexte de l'économie d'énergie des réseaux cellulaires concernent les sujets suivants:

- Le déploiement des SBs (Stations de Bases) dans un réseau [5]: ces travaux consistent à trouver le déploiement optimal d'un réseau par l'étude du nombre de SBs à installer ainsi que le bon emplacement de celles-ci.
- L'adaptation dynamique des réseaux [6]: étant donné que la charge d'un réseau change d'une manière régulière selon les différentes périodes journalières, certaines recherches visent à adapter dynamiquement la densité des réseaux en fonction de la charge de trafic. Ceci peut être réalisé en éteignant ou en allumant les SBs les plus appropriées pour une consommation d'énergie optimale.
- L'utilisation intelligente du spectre [7]: l'optimisation du spectre a également fait l'objet de nombreuses recherches dans le cadre de l'économie de l'énergie. Le but principal de ces recherches est la gestion des interférences et la bonne répartition des ressources entraînant ainsi une réduction de l'énergie consommée.

Nous nous concentrons dans cette thèse sur l'étude de l'économie d'énergie dans les réseaux cellulaires et en particulier dans les réseaux hétérogènes HetNets connus pour leur rôle principal dans les futures architectures de communication, à savoir la 5G. Les réseaux hétérogènes se basent essentiellement sur l'utilisation de différents moyens et technologies d'accès. En plus des SBs conventionnelles, ces réseaux introduisent ce que nous appelons les «Small Cells» qui se présentent sous la forme de Microcells, Picocells et/ou Femtocells. Cette diversité offre plusieurs avantages au niveau de l'efficacité spectrale, de la couverture réseau et de la capacité.

La Fig. 0.1 montre l'exemple d'un réseau cellulaire hétérogène conventionnel. Différentes technologies sans fil coexistent dans ces réseaux, à savoir le WiFi, le WiMax et les technologies cellulaires conventionnelles. Au sein de ce type d'environnement, il est nécessaire d'intégrer et de faire coopérer les différents réseaux existants. Pour ce faire, des protocoles de handover adaptés (handover vertical) sont proposés dans la littérature et représentent un moyen intéressant pour l'économie d'énergie [8].

INTRODUCTION GENERALE

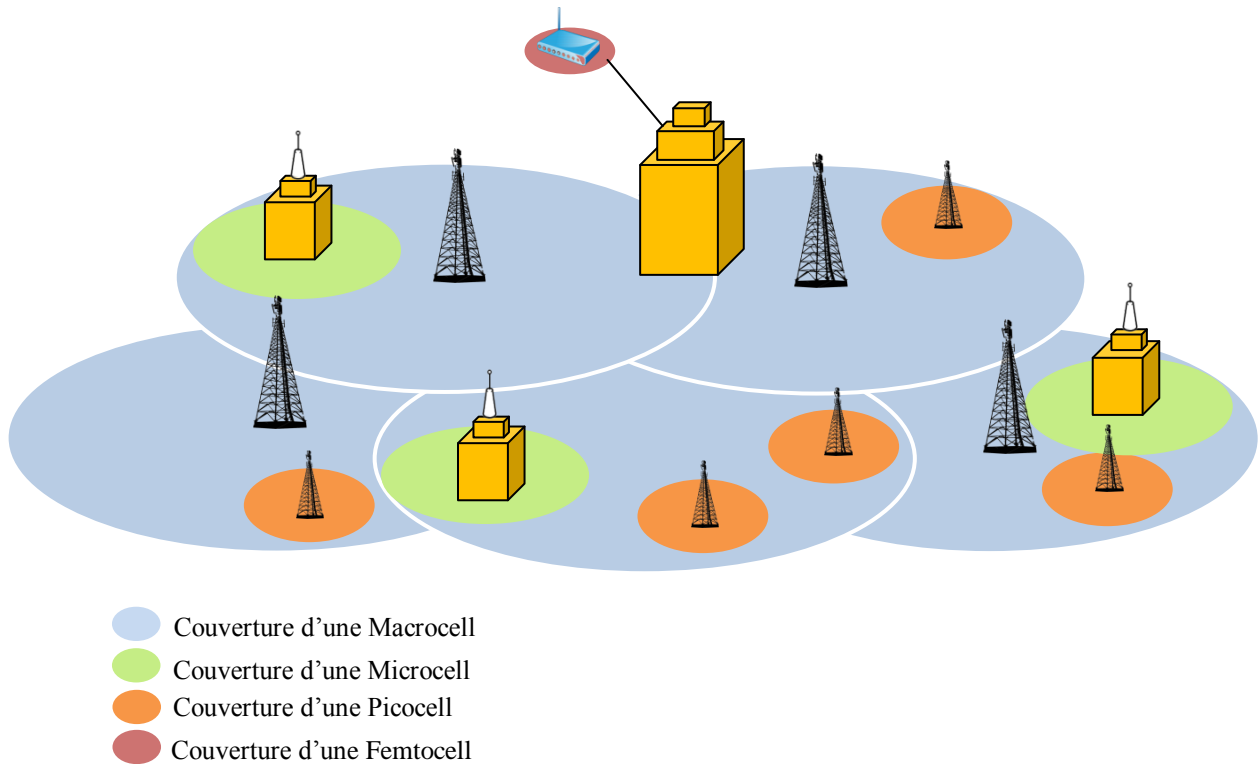


Fig.0.1 Exemple d'un réseau cellulaire hétérogène

Une des méthodes les plus prometteuses pour la réduction d'une grande partie d'énergie consommée dans les réseaux hétérogènes est l'adaptation de leur densité en éteignant ou en allumant certains réseaux d'accès. Cette méthode représente le moyen le plus efficace pour faire face à l'énergie gaspillée dans les périodes à faible charge de trafic. Contrairement aux autres approches, celle-ci permet d'éteindre les réseaux d'accès redondants entraînant la réduction de l'énergie statique consommée. Cependant, l'utilisation de cette approche nécessite l'étude de la couverture réseau, de l'affectation des utilisateurs et de la capacité exigées pour une qualité de service (QoS) optimale. Par conséquent, nous traitons dans notre travail les problématiques suivantes:

- Economie de l'énergie par l'adaptation dynamique des réseaux hétérogènes,
- Etude de la couverture réseau des utilisateurs se trouvant dans la zone géographique considérée,
- Satisfaire les demandes en capacité des utilisateurs,
- Affectation des utilisateurs aux réseaux d'accès les plus appropriés pour une efficacité énergétique optimale,

INTRODUCTION GENERALE

Pour apporter une contribution à l'étude des problématiques ci-dessus, nous proposons ici de nouvelles approches que nous décrivons dans ce qui suit :

- 1) Modélisation stochastique et dynamique pour l'économie de l'énergie dans les réseaux hétérogènes sans fil. Nous y traitons les points suivants:
 - Formulation du gain en énergie en fonction de la charge de trafic et de l'état de fonctionnement des réseaux d'accès (allumés, éteints).
 - Proposition d'un modèle stochastique pour l'estimation de l'état des réseaux à un moment précis en utilisant les réseaux de files d'attentes.
 - L'adaptation dynamique de la densité (nombre de réseaux d'accès actifs) des réseaux hétérogènes en fonction de la charge de trafic.
 - Assurer une couverture optimale des utilisateurs par l'application d'un modèle probabiliste.
- 2) Modélisation graphique d'un réseau hétérogène et proposition d'une heuristique garantissant une couverture optimale avec économie d'énergie. Dans cette approche, les points suivants sont abordés:
 - Représentation des réseaux hétérogènes sous la forme d'un graphe de dépendance pour garantir une couverture immédiate des utilisateurs.
 - Proposition d'une heuristique basée sur le couplage pondéré pour la gestion de la densité du réseau et l'affectation des utilisateurs.
- 3) Gestion distribuée d'un réseau hétérogène basée sur l'apprentissage pour l'économie d'énergie

Cette approche consiste à mettre en place un processus de décision distribué au sein d'un réseau hétérogène et traite des points suivants:

- Proposition d'une approche basée sur la théorie des jeux pour la gestion du « Cell Range Expansion ».
 - Permettre aux réseaux d'accès d'effectuer un apprentissage à travers plusieurs itérations pour la découverte de l'état du réseau et la prise de décision.
 - Affectation des utilisateurs de telle sorte que l'efficacité énergétique de chaque réseau d'accès soit optimale.
- 4) Proposition d'un protocole de handover vertical efficace en énergie

INTRODUCTION GENERALE

Cette approche cherche à tirer profit du protocole utilisé pour le handover dans les réseaux hétérogènes et s'intéresse à :

- Adapter le protocole de handover IEEE 802.21 et faire en sorte que celui-ci adopte un traitement collaboratif avec les utilisateurs.
- Collecter des informations sur l'état du réseau et s'en servir comme statistiques pour l'adaptation de sa densité.

Organisation du rapport

Le présent document est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous introduisons d'une manière générale le concept des réseaux *Green* en effectuant une étude sur l'état des travaux relatifs à l'économie d'énergie dans le domaine des TIC. Nous y évaluons les avantages et les inconvénients des techniques utilisées afin de proposer d'autres voies pouvant améliorer leurs performances. Une taxonomie est effectuée par la suite pour décrire les moyens possibles les plus efficaces pour l'application des concepts de bases de l'économie d'énergie. Nous y abordons également les métriques utilisées pour mesurer l'efficacité énergétique des systèmes informatiques selon différents critères.

Au cours du deuxième chapitre nous expliquons les limitations des solutions existantes et accordons un intérêt particulier aux réseaux hétérogènes en abordant les points suivants :

- Les exigences et spécificités de ces réseaux par rapport aux infrastructures conventionnelles,
- Les critères de sélection des réseaux d'accès,
- Les protocoles de handover utilisés au sein de ceux-ci tout en précisant les manières possibles de s'en servir à des fins d'économie d'énergie.

Nous donnons par la suite une description détaillée de la problématique étudiée et nous mettons en évidence les particularités de notre contribution.

Les chapitres qui suivent comportent la description de méthodes que nous proposons et visent à décrire respectivement les approches suivantes:

- Chapitre 3 : Modélisation stochastique et modèles dynamique pour l'économie de l'énergie dans les réseaux hétérogènes sans fil.

INTRODUCTION GENERALE

- Chapitre 4 : Modélisation graphique d'un réseau hétérogène et proposition d'une heuristique garantissant une couverture optimale avec économie d'énergie.
- Chapitre 5 : MIH et économie d'énergie.
- Chapitre 6 : Gestion distribuée d'un réseau hétérogène basée sur l'apprentissage pour l'économie d'énergie.

Nous résumons dans la conclusion l'essentiel de nos contributions et donnons un aperçu sur de nouvelles perspectives de recherche.

CHAPITRE I: CONCEPTS ET TECHNIQUES D'ECONOMIE D'ENERGIE

1.1 Introduction

Le présent chapitre est composé de deux parties majeures. Dans la première partie, nous présentons les concepts et les techniques qui forment le paradigme des réseaux *Green*. Pour ce faire, nous commençons d'abord par définir le concept du *Green* dans le secteur des TIC en montrant les principales préoccupations de ce domaine. Nous étudions par la suite les méthodes clés qui permettent d'économiser de l'énergie dans les réseaux informatiques tout en précisant les avantages et les inconvénients de chacune d'elles. Nous nous focalisons ensuite sur les approches les plus courantes tout en faisant référence aux couches réseaux impliquées. Le problème de la qualité de service sous la contrainte de l'économie de l'énergie est également abordé, en mentionnant les principaux critères à prendre en considération dans le but de trouver un compromis entre ces deux facteurs. Enfin, nous effectuons une catégorisation des principales métriques de mesure de l'efficacité énergétique dans différents environnements. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée aux réseaux hétérogènes, nous présentons dans un premier temps l'infrastructure de ces réseaux. Nous expliquons par la suite les objectifs et les contraintes de ces infrastructures. A la fin de ce chapitre, nous mettons en évidence les problèmes liés à la consommation d'énergie dans les réseaux cellulaires et leur impact sur les futurs réseaux de communication.

1.2 Concept du Green dans le secteur des TIC

L'environnement a eu des effets néfastes ces dernières années, causés par les ressources non renouvelables et les émissions de CO₂. Le secteur des TIC est l'un des principaux consommateurs d'énergie et polluants de l'environnement. Les statistiques montrent que ce secteur a une consommation énergétique comparable à celle de l'industrie du transport aérien [1]. Bien que les dispositifs de communication soient de plus en plus économes en énergie, l'ensemble de ces systèmes de communication nécessite encore plus d'optimisation pour faire face au sur-approvisionnement au niveau de ceux-ci. Plusieurs travaux ont abordé le problème de la consommation d'énergie dans les TIC. Cependant, la préoccupation majeure a été accordée aux centres de données. Les centres de données sont responsables d'une grande partie de l'énergie consommée dans le secteur des TIC. Par ailleurs, l'émergence des technologies sans fil et l'augmentation des exigences en termes de qualité des communications, provoquent une hausse considérable dans l'énergie consommée par ceux-ci au point de dépasser les centres de données. Un nombre important de fabricants de composants de communication et d'opérateurs réseaux visent à développer de nouvelles

approches pour réduire la consommation d'énergie, Vodafone et Orange en présentent un exemple [1].

Les énergies renouvelables se présentent sous la forme d'énergie solaire, éolienne, géothermique, biomasse et hydroélectrique. L'utilisation de ces énergies est d'une extrême utilité et suscite l'intérêt de plusieurs grandes entreprises. Google à titre d'exemple a lancé un projet intitulé Loon visant à utiliser des ballons alimentés par l'énergie solaire en tant que réseaux d'accès [9].

Une évaluation du coût énergétique de plusieurs réseaux utilisant des sources d'énergie renouvelables montre que ce type d'énergie présente beaucoup de variations et son stockage peut être très limité. Les recherches s'orientent alors vers des solutions d'alimentation hybrides [10].

Les recherches effectuées dans le domaine des communications réseaux et ayant pour but l'amélioration de l'efficacité des systèmes en énergie sont souvent connues sous le nom de *Green Networking*. La problématique de l'économie de l'énergie dans le domaine des TIC revient aux travaux de recherche menés par Gupta [1] et Christensen [2], mais l'intérêt à cette problématique a considérablement évolué ces dernières années.

Les travaux de recherche dans le contexte du *Green Networking* visent à minimiser la consommation d'énergie tout en préservant autant que possible la performance des communications. Différents projets traitant la problématique des réseaux Green ont vu le jour nous citons parmi ceux-ci : EARTH [11], OPERA-Net [12], ECONET [13] et TREND [14].

L'économie de l'énergie est effectuée souvent au détriment de la QoS. De nombreuses applications telles que la VoIP (Voix sur IP) et la vidéo interactive montrent une sensibilité significative à la performance et à la qualité des communications, ce qui crée des réels défis. Pour trouver un compromis entre la performance des communications et la consommation d'énergie, la résolution de problèmes d'optimisation d'une grande complexité est exigée. Par conséquent, la nécessité d'utiliser des heuristiques ainsi que des modèles stochastiques appropriés est cruciale afin de trouver des solutions acceptables dans des délais raisonnables.

1.3 Concepts d'économie d'énergie dans les réseaux

Dans cette partie, nous étudions les techniques de base de l'économie d'énergie dans les réseaux à savoir les réseaux filaires et sans fil. En prenant en considération les dernières recherches effectuées dans ce domaine, nous étudions les avantages et les inconvénients des méthodes proposées tout en citant quelques directions pouvant apporter des améliorations au

niveau de celles-ci. Nous effectuons par la suite une classification de ces travaux en fonction du type des réseaux étudiés et discutons les manières possibles d'exploiter les concepts existants.

1.3.1 Energie et réseaux filaires

L'énergie consommée par les centres de données présentait la principale préoccupation des recherches. Plusieurs travaux ont été menés pour réduire le coût énergétique des serveurs et leur systèmes de refroidissement [10][15]. Une des solutions les plus utilisées dans ce secteur est l'élimination des éléments redondants résultants du sur-approvisionnement.

Certains travaux à l'exemple de [16] s'intéressent aux architectures utilisées dans les centres de données telles que l'architecture Fat-Tree [17] et se servent du concept des voies multiples pour équilibrer le trafic et optimiser l'efficacité énergétique. Ces architectures livrent une vision globale sur les centres de données, ce qui simplifie la gestion du niveau de redondance. D'autre part, les travaux de [18] consistent à examiner les différents facteurs ayant un impact sur la consommation d'énergie tels que la température pour les intégrer dans un protocole de routage basé sur l'ajustement dynamique de la tension et des débits de transmission.

Les dernières recherches dans ce domaine se basent principalement sur les machines virtuelles et l'utilisation optimale de celles-ci. [19] tente de réduire la consommation d'énergie des centres de données en fonction du positionnement optimal des machines virtuelles appropriées. Le but de ce travail est de maximiser l'utilité (taux d'utilisation) des serveurs physiques, tout en réduisant les transmissions de données au sein du réseau.

1.3.2 Energie et réseaux sans fil

Avec la prolifération des technologies sans fil, ces réseaux sont considérés de nos jours comme les principaux consommateurs d'énergie. Les auteurs de [3] estiment la consommation annuelle d'énergie de différents types de réseaux et montrent que les réseaux mobiles représentent le taux de consommation le plus élevé.

Dans cette section, nous présentons les nouvelles approches utilisées pour réduire l'énergie consommée par différents types de réseaux sans fil. Nous étudions les approches utilisées pour en tirer les avantages et les inconvénients et effectuons par la suite une taxonomie ainsi qu'une étude comparative.

1.3.2.1 Energie et réseaux cellulaires

Les réseaux mobiles conventionnels sont homogènes et se basent sur le concept de cellules. Comme illustré sur la Fig. 1.1, une cellule présente une zone géographique desservie par un ou plusieurs opérateurs et gérée par une SB souvent une Macrocell.

Les travaux étudiant la consommation d'énergie dans les réseaux cellulaires peuvent être divisés en quatre catégories principales:

- Ajustement de la densité des réseaux en fonction de la charge de trafic.
- Amélioration de l'efficacité du spectre et de la répartition des puissances.
- Utilisation des énergies renouvelables et des systèmes hybrides.
- Gestion de l'énergie des nœuds mobiles pour prolonger la durée de vie des batteries.

Nous citons ci-dessous quelques travaux effectués dans le cadre de l'économie de l'énergie dans les réseaux cellulaire homogènes.

La contribution, présentée dans [20], considère l'utilisation des énergies renouvelables au niveau des stations de bases et propose de réguler la densité des réseaux en allumant ou en éteignant quelques cellules d'une manière aléatoire pour réduire l'énergie consommée. D'autre part, [21] propose une méthode permettant de déterminer l'efficacité énergétique de l'ensemble des SBs et utilise le concept de l'ajustement de la taille des cellules pour éteindre par la suite les moins efficaces. Les auteurs de [22] étudient le taux de SBs actives optimal qui conduit à maximiser le gain en termes d'énergie, tout en considérant la probabilité de panne et en déterminant un seuil pour les puissances de transmission afin d'éviter l'impact des fréquences radio sur la santé. D'autres approches visent à changer l'architecture des réseaux cellulaire afin de fournir plus d'économie d'énergie. [23] aborde le sujet de la division des réseaux cellulaires en deux entités séparées: une entité pour l'échange de données et une autre pour la signalisation. Les auteurs pensent que cette architecture est l'une des plus prometteuses pour les futurs réseaux cellulaires.

L'utilisation homogène des SBs classiques s'avère moins efficaces en termes de débit car les réseaux conventionnels sont conçus pour une large couverture radio mais pas pour une grande charge de trafic. Pour satisfaire les demandes en matière de débit, de nouveaux types de SBs ont été mis en place telles que les Femtocells, Picocells et les Microcell pour créer une sorte de réseaux hétérogènes. Ceci réduit la distance entre les utilisateurs et les SBs ce qui aide à

améliorer les débits. D'autre part, la puissance des transmissions diminue et permet d'économiser plus d'énergie.

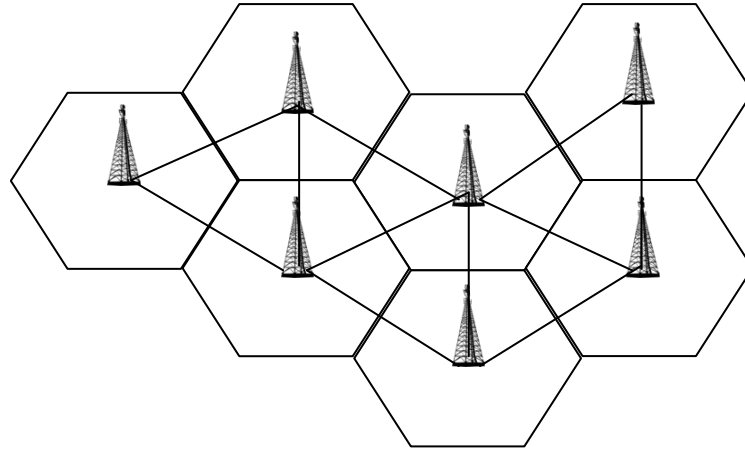


Fig.1.1 Réseau cellulaire homogène conventionnel

Les réseaux hétérogènes font référence à une infrastructure constituée de plusieurs réseaux d'accès utilisant des technologies différentes afin d'offrir un meilleur service aux clients. Dans un environnement hétérogène, les utilisateurs sont amenés à se déplacer et ainsi à changer éventuellement de réseau. Une description d'un réseau hétérogène typique est présentée sur Fig. 0.1.

En commençant par la couche physique, le travail de [24] est considéré comme l'un des premiers à étudier le problème de l'énergie dans les réseaux hétérogènes. Les auteurs proposent une approche basée sur la théorie des jeux pour gérer à la fois l'allocation des ressources et la réduction des interférences afin de réduire la consommation de ces réseaux.

Une approche visant à contrôler le fonctionnement des SBs au niveau des réseaux hétérogènes est proposée par [25]. Les auteurs considèrent un réseau hétérogène comme un réseau composé d'une Macrocell et d'une multitude de Femtocell. L'approche proposée est basée sur les processus de décision de Markov pour déterminer les Femtocell à éteindre.

En ce qui concerne le positionnement des SBs, les auteurs de [26] montrent que dans des réseaux hétérogènes, le respect d'une certaine distance entre les différents sites, lors du déploiement des Picocell, peut améliorer l'efficacité spectrale qui se traduit par moins d'énergie consommée.

Le déploiement des SBs est souvent redondant avec la présence de plus d'un opérateur dans une zone géographique. La nécessité de la coopération des opérateurs pour économiser l'énergie devient primordiale. Plusieurs travaux ont été réalisés dans ce contexte ([27] à titre d'exemple); cependant, ceux-ci ne traitent que le côté financier sans tenir compte de l'énergie consommée. Les auteurs de [28] traitent le problème de l'énergie en présence de deux opérateurs différents et proposent une approche basée sur la théorie des jeux pour partager l'utilisation des SBs et faire en sorte que l'énergie consommée soit réduite. La croissance du marché cellulaire et l'augmentation du nombre d'opérateurs mobiles exigent l'étude d'architectures pouvant gérer plusieurs opérateurs.

1.3.2.2 Energie dans les réseaux de capteurs et les réseaux opportunistes

Les réseaux de capteurs sont de plus en plus utilisés dans plusieurs secteurs tels que le domaine de l'environnement et de l'industrie. Les capteurs sont habituellement dispersés dans une zone géographique. Chacun de ces capteurs a la possibilité de collecter les données et de les router vers un ou plusieurs réseaux d'accès. Les données collectées sont communiquées à l'utilisateur final par le biais d'un réseau de communication (Internet à titre d'exemple).

La Fig. 1.2 montre un exemple d'une architecture de réseaux de capteurs.

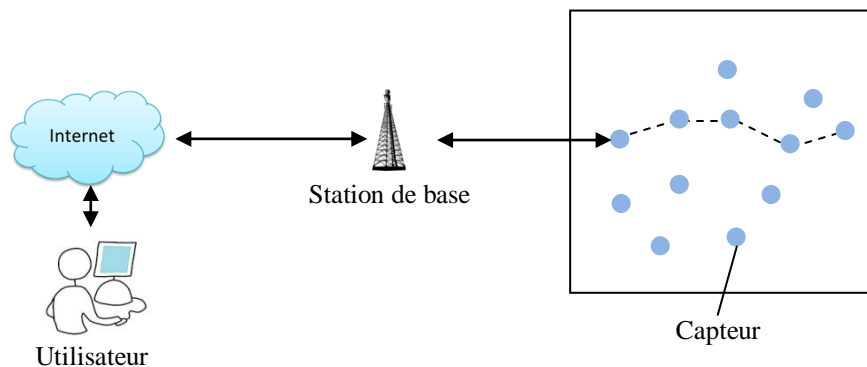


Fig. 1.2 Exemple d'architecture d'un réseau de capteurs

Les travaux liés à l'énergie dans les réseaux de capteurs cherchent à prolonger la durée de vie des nœuds opérant au sein du réseau par la répartition de la charge de travail sur ceux-là. Les nœuds les plus actifs perdent rapidement leur énergie et peuvent être la cause d'une déstabilisation du fonctionnement du réseau. Nous trouvons dans la littérature deux classes d'approches permettant la répartition des tâches sur ce genre de topologies pour économiser l'énergie et prolonger la vie du réseau [29]:

CHAPITRE I: CONCEPTS ET TECHNIQUES D'ECONOMIE D'ENERGIE

- Les approches qui visent à minimiser les puissances de transmission avec la gestion de l'état de fonctionnement des nœuds [30].
- Les algorithmes de routage cherchant les moyens d'acheminement de données les moins coûteux [31].

Dans les réseaux de capteurs, le moyen le plus efficace pour économiser de l'énergie est de mettre en veille certains nœuds du réseau. Cependant, la commutation des modes de fonctionnements peut être la conséquence d'un coût supplémentaire en énergie [32].

Deux options sont envisageables en utilisant la commutation de mode :

- Le nœud émetteur se réveille en même temps que le récepteur et passe à plusieurs reprises en mode veille jusqu'à ce qu'il arrive à livrer les paquets à tous les récepteurs [33] [34].
- Le nœud émetteur reste éveillé jusqu'à ce que tous les paquets soient livrés aux récepteurs et se met en mode veille par la suite [35]; cette option montre de meilleurs résultats en économie d'énergie dans les réseaux où le taux d'activité moyen des nœuds est élevé.

Les auteurs de [32] ont travaillé sur la réduction du temps d'activité des nœuds en essayant de trouver un arbre de transmission où l'énergie consommée soit minimale. Bien que cette approche réduise la moyenne du taux d'activité des nœuds, elle augmente significativement les délais de transmission. Certaines recherches cherchent à gérer les déplacements des nœuds pour assurer la couverture réseau. La réduction des déplacements des nœuds lors de l'utilisation de ces approches conduit à une économie d'énergie significative [36].

Contrairement aux réseaux de capteurs conventionnels, les réseaux opportunistes ad-hoc se composent d'un ensemble de terminaux communiquant entre eux sans aucune infrastructure. A titre d'exemple, nous citons les communications directes entre téléphones mobiles proches géographiquement Fig. 1.3.

Dans ces réseaux, la mobilité des terminaux induit de nombreuses déconnexions et modifications au sein de la topologie du réseau. L'une des principales préoccupations dans ce cas est la découverte du réseau qui exige autant d'énergie que des tâches gourmandes comme les appels téléphoniques dans les réseaux mobiles.

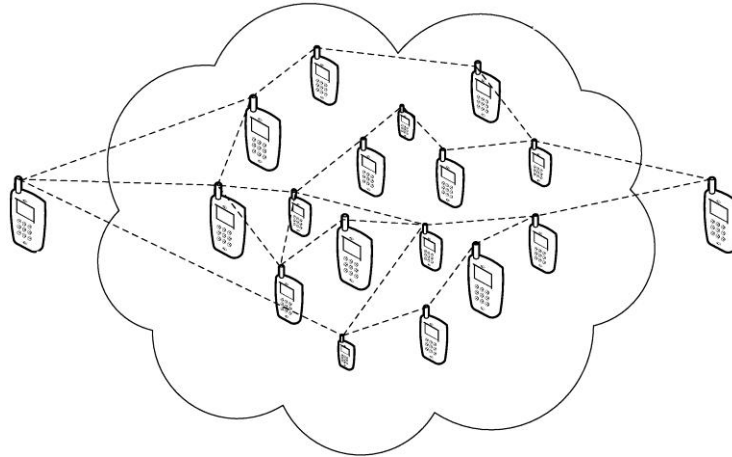


Fig. 1.3 Exemple d'architecture d'un réseau opportuniste

Quelques solutions sont proposées pour réduire la consommation de ces réseaux. Nous citons parmi celles-ci, le travail de [37] qui cherche à réveiller les nœuds uniquement durant des intervalles préprogrammés, autrement, ils restent endormis. Les auteurs de [38] proposent une approche probabiliste pour prédire les moments de communication entre les nœuds afin de trouver un compromis entre l'énergie consommée par les nœuds et la performance des communications. Cependant, les réseaux opportunistes sont connus par leur comportement aléatoire et dans les réseaux à forte densité où les intervalles de communication sont trop courts, ces approches ne garantissent pas une réelle économie.

1.4 Paradigmes et taxonomie des concepts d'économie d'énergie

Afin de réduire la consommation d'énergie dans les réseaux, certains concepts de base ont été définis. Ces concepts, découlant du fait que l'énergie consommée par les équipements réseaux n'est pas proportionnelle à leur taux d'utilisation, cherchent à adapter le fonctionnement des réseaux par rapport à leur taux d'utilisation. Nous exprimons ces concepts comme suit :

- La consolidation des ressources dans laquelle nous trouvons les approches liées à la virtualisation et l'adaptation dynamique des infrastructures.
- La connectivité sélective qui cherche à solliciter les équipements les moins couteux en énergie.
- La construction d'équipements efficaces en économie d'énergie par l'amélioration des composants électroniques.

Ces paradigmes représentent une manière générale d'aborder la problématique de l'énergie dans différents types de réseaux : réseaux cellulaires, réseaux de capteurs, réseaux ad-hoc mobiles ...etc. Nous détaillons dans ce qui suit chaque modèle.

1.4.1 Consolidation des ressources

a) Infrastructures dynamiques

La consommation en énergie des équipements actuels n'est pas proportionnelle à leur charge de travail. A titre d'exemple, les serveurs de données présentent une grande consommation même dans les périodes les plus faibles en charge. Les infrastructures dynamiques visent à estimer les besoins en ressources pour adapter dynamiquement la taille des réseaux [39] [40]. Fig. 1.4 montre le fonctionnement d'une telle infrastructure où le nombre des nœuds actifs au sein des réseaux augmente proportionnellement à la charge du trafic.

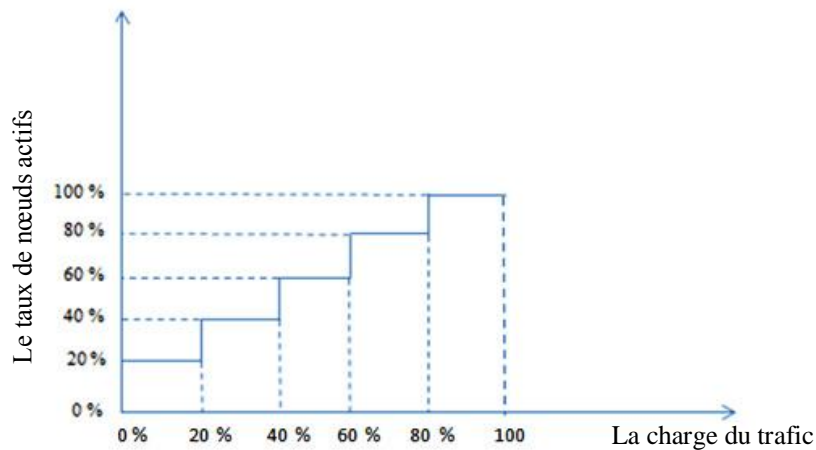


Fig. 1.4 Taux de nœuds actifs par rapport à la charge de

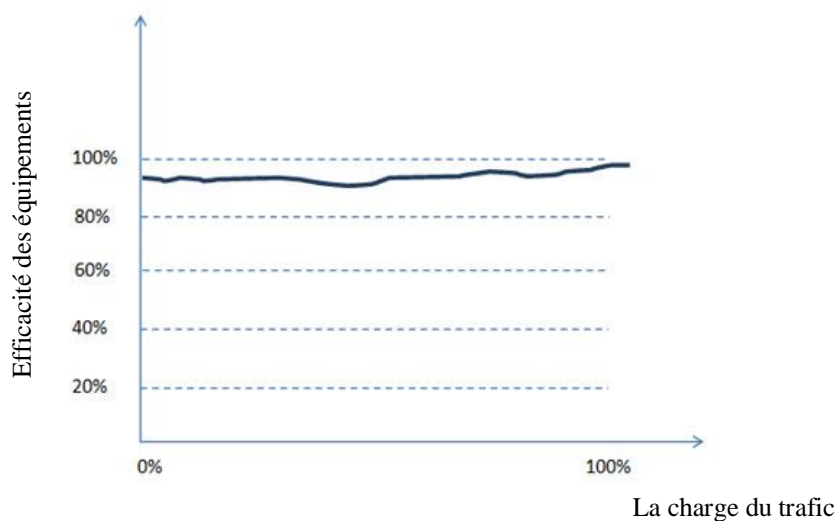


Fig. 1.5 Efficacité des équipements par rapport à la charge de trafic

b) Virtualisation

La virtualisation consiste à utiliser certaines ressources physiques pour l'exécution de différentes applications et/ou services. Grâce à la virtualisation, le nombre de périphériques physiques peut être réduit tout en maximisant leur utilisation (Fig.1.5). Nous précisons que l'efficacité énergétique d'un équipement augmente avec l'augmentation de son taux d'utilisation [1]. La virtualisation est largement utilisée dans les centres de données. Les serveurs utilisés dans les centres de données sont dotés de processeurs multi-cœur. Un nombre important d'applications ne nécessite pas de telles performances. La virtualisation permet de consolider plusieurs machines virtuelles par l'exécution de différentes applications sur le même serveur physique, pour tirer pleinement profit de celui-ci. Les auteurs de [1] montrent que, même si le taux d'utilisation du processeur au niveau d'un serveur est de 10%, l'énergie consommée s'élève à environ 60%.

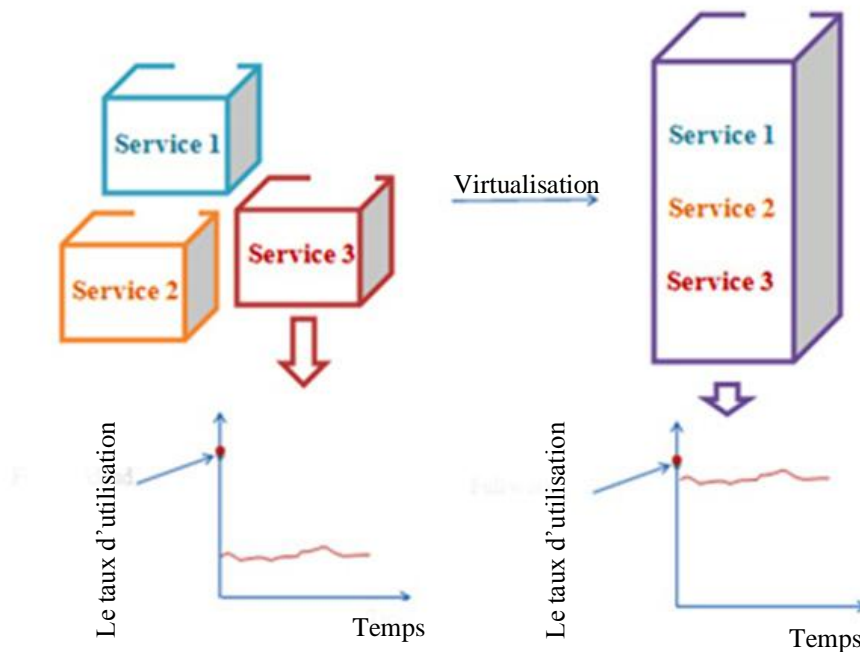


Fig. 1.6 Efficacité des nœuds avec l'utilisation de la virtualisation

Comme le montre Fig. 1.6, en utilisant la virtualisation le taux d'utilisation des équipements augmente ce qui se traduit par une meilleure efficacité énergétique (énergie consommée par rapport au taux d'utilisation). La consommation globale d'énergie diminue du moment que la densité des réseaux peut être réduite.

1.4.2 Connectivité sélective

La connectivité sélective vise à économiser l'énergie en réduisant la charge de travail des ressources gourmandes en énergie. Ces derniers seront mis en état de repos (veille) pendant une période définie ou bien elles seront sollicitées uniquement en cas de nécessité pour une tâche particulière. Pendant les périodes d'inactivité, les nœuds inactifs sont remplacés par d'autres dispositifs moins couteux en énergie. Fig. 1.7 montre un exemple de la connectivité sélective où un nœud à grande consommation énergétique est mis en veille après son remplacement par un autre nœud moins gourmand (l'exemple d'un proxy) [41].

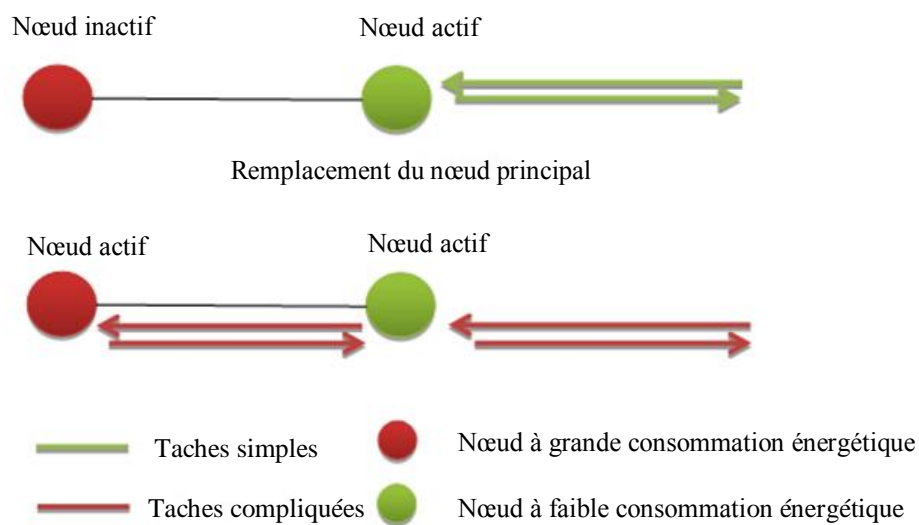


Fig. 1.7 Exemple de l'utilisation de la connectivité sélective

1.4.3 Construction d'équipements efficaces en énergie

Le but de cet aspect est l'amélioration des composants électroniques afin de construire des équipements avec une consommation d'énergie proportionnelle à leur utilisation. Dans un système idéal, l'énergie consommée est nulle pour un taux d'utilisation nul et croît linéairement par rapport au taux d'utilisation. De tels systèmes n'existent pas actuellement.

Nous illustrons dans Fig. 1.8, un exemple de la consommation énergétique d'un équipement conventionnel. L'équipement consomme de l'énergie même pour un taux d'utilisation nul, ceci est dû à la puissance nécessaire pour faire fonctionner l'équipement et aux éventuels messages de signalisation dans le cas d'un réseau.

CHAPITRE I: CONCEPTS ET TECHNIQUES D'ECONOMIE D'ENERGIE

Les équipements sont moins efficaces en énergie durant les périodes à faible charge et s'avèrent plus efficaces quand celle-ci augmente (le ratio de l'énergie par rapport à la charge diminue).

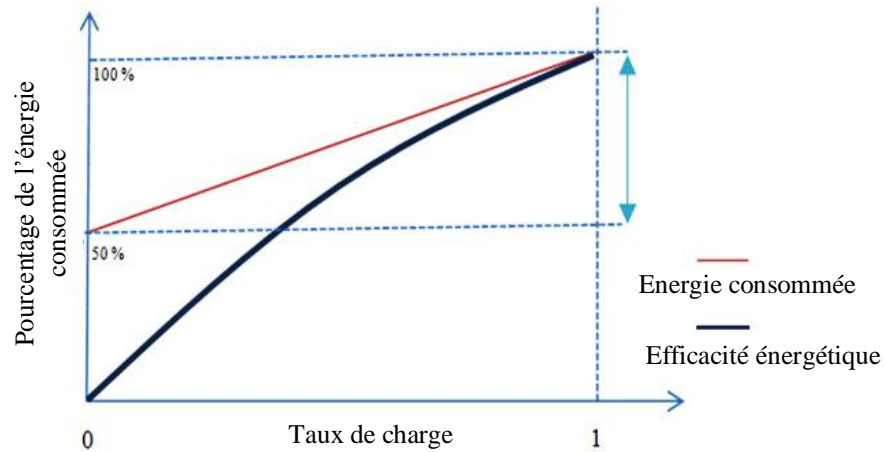


Fig. 1.8 Consommation et efficacité énergétique d'un équipement

Les différents paradigmes cités ci-dessus peuvent être combinés au sein de la même infrastructure pour offrir plus d'efficacité énergétique. Pour résumer ces paradigmes nous effectuons la classification illustrée par le Tableau. 1.1.

Tableau. 1.1 Classification des approches utilisées dans les communications Green

		Consolidation des ressources		Connectivité sélective	Construction d'équipements efficaces en énergie
		Infrastructures dynamiques	Virtualisation		
Consolidation des ressources	Infrastructures dynamiques	Eteindre les équipements à faible charge de trafic		Permettre à certains équipements de se mettre en mode veille pour une certaine durée	Adapter l'énergie consommée par rapport à la charge de trafic
	Virtualisation		Plusieurs services fonctionnent sur le même équipement	Remplacement de l'identité des équipements	
Connectivité sélective				Utilisation des proxys pour éteindre les nœuds gourmands en énergie	
Construction d'équipements efficaces en énergie					Equipment à consommation énergétique proportionnelle à l'utilisation

1.5 Méthodes d'économie d'énergie et couches réseaux

Dans cette section, nous abordons d'une manière détaillée les techniques utilisées pour l'économie d'énergie dans les réseaux en les classifiant par rapport aux couches réseaux dans lesquelles elles interviennent. Chacune des méthodes citées dans ce qui suit fait partie d'un des principaux paradigmes définis dans la section précédente. Fig. 1.9, illustre la classification de ces techniques.

Application	La radio cognitive	Applications efficaces en énergie	Utilisation de proxys
Présentation			
Session			
Transport			
Network		Infrastructures efficaces en énergie	
Liaison de données			
Physique		Adaptation des débits et des puissances de transmission	

Fig. 1.9 Techniques d'économie d'énergie selon les couches réseaux

1.5.1 Adaptation des débits et des puissances de transmission

L'efficacité énergétique peut être réalisée par des approches d'ingénierie qui consistent à mettre en place des équipements utilisant de nouvelles technologies permettant de consommer moins d'énergie. L'efficacité énergétique peut être également réalisée par des solutions permettant une adaptation dynamique du fonctionnement des composants, telles que l'adaptation de la vitesse et/ou la puissance des transmissions. Ceci peut être effectué en utilisant des techniques d'adaptation des débits des liaisons et/ou en gérant dynamiquement la puissance des transmissions.

1.5.1.1 Adaptation des débits de transmission

Cette méthode est utilisée majoritairement dans les réseaux Ethernet car les périodes à faible charge de trafic sont très fréquentes, en particulier dans les réseaux locaux. Plusieurs travaux montrent que la consommation d'énergie des réseaux locaux présente une grande indépendance par rapport à leur utilisation en raison des protocoles utilisés pour le maintien de la connectivité et la synchronisation nécessitant des échanges périodiques de trafic [41].

L'adaptation des débits des liaisons permet de modifier dynamiquement en fonction du trafic les débits des liens pour le transport des données. Les approches utilisant ce genre de techniques, exigent certaines améliorations comme la mise en place de mécanismes permettant un changement rapide des débits (mécanismes de négociation) et l'utilisation de protocoles de commande pour la modification des débits tels que le SDN (Software Defined Network) [42].

1.5.1.2 Gestion des puissances des transmissions

Un bon exemple d'utilisation de ces méthodes est la régulation des puissances de transmission au niveau de la couche MAC [29] ou bien le «Cell-Zooming» dans les réseaux cellulaires [40](Fig. 1.10). Réduire les puissances de transmission permet non seulement d'économiser de l'énergie en diminuant les tensions des appareils, mais aussi de minimiser les interférences dans les réseaux sans fil. Par conséquent, il se produit moins d'erreurs et moins de retransmissions.

Pour certains types d'équipements, tels que les réseaux cellulaires, l'adaptation de la puissance de transmission ne conduit pas à une grande économie en énergie en raison de certains composants fonctionnant indépendamment de cette puissance [37]. Pour cela, le changement du mode de fonctionnement des équipements (éteindre/allumer) peut être utilisé pour plus d'économies.

Le changement d'état des appareils dans certains réseaux conduit à la perte de connectivité nécessitant un processus de reconnexion au moment du réveil. Par conséquent, une quantité considérable d'énergie est gaspillée durant ce processus, comme par exemple dans le cas des réseaux de capteurs. Des approches prenant en compte ces différents facteurs doivent être mises en place pour trouver les meilleurs compromis et choisir les moments les plus appropriés pour changer le mode de fonctionnement des équipements. A titre d'exemple, [43] aborde ce problème en mettant en place un processus de remplacement. L'approche proposée consiste à utiliser un proxy qui prend en charge les tâches des équipements éteints.

Il est évident qu'avec la commutation du mode de fonctionnement et/ou l'adaptation des puissances de transmission, le temps de réponse sera plus important. Ainsi, un compromis entre la performance et l'économie d'énergie doit être étudié par l'évaluation des demandes et des besoins des utilisateurs.

Fig. 1.11 montre un exemple de la consommation d'énergie avec la gestion de la charge de trafic par l'utilisation de différents modes de fonctionnement.

Le choix entre éteindre/allumer les équipements et l'adaptation des débits dépend de l'infrastructure du réseau et des technologies utilisés.

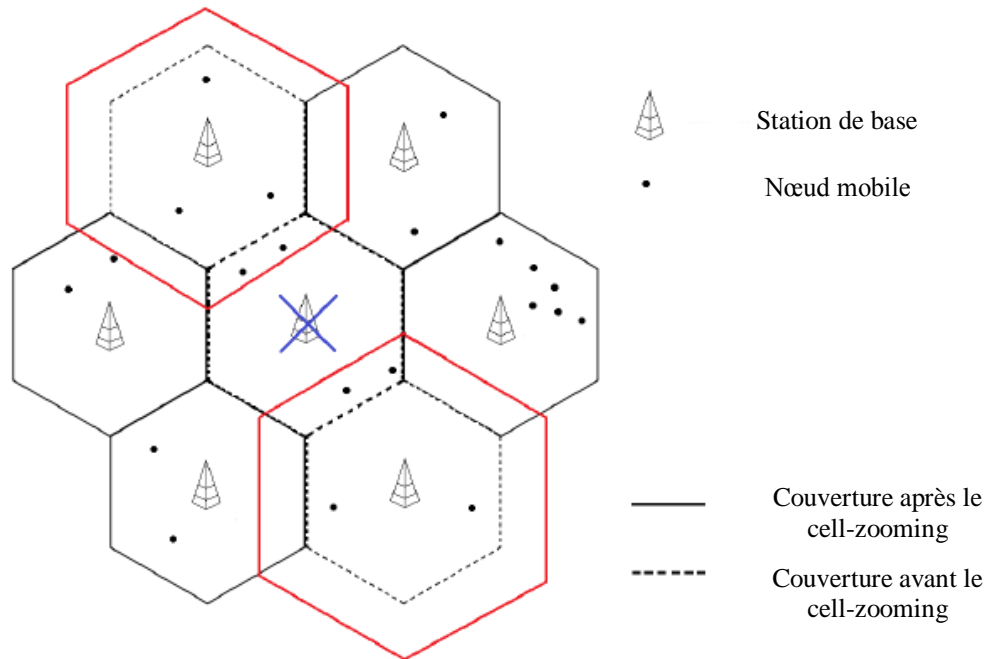


Fig. 1.10 Extension de la couverture des stations de base dans les réseaux cellulaires

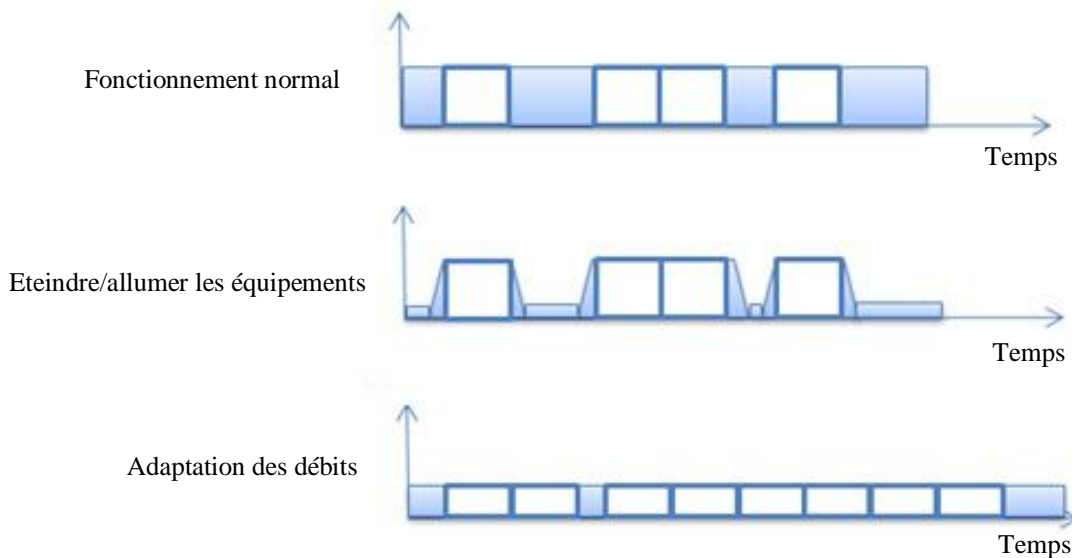


Fig. 1.11 Illustration des modes de fonctionnement et de la consommation d'énergie (les carrés représentent la charge de trafic et le fond bleu la consommation d'énergie)

1.5.2 Applications efficaces en énergie

Ces approches fonctionnent au niveau des couches réseau supérieures et se concentrent sur la conception de logiciels. L'optimisation de la consommation d'énergie dans ce cas est effectuée par des logiciels de haut niveau (niveau utilisateur) ou des logiciels de bas niveau. L'optimisation logicielle de bas niveau concerne les aspects généraux de l'architecture informatique telle que l'optimisation du noyau des systèmes d'exploitation.

Nous mentionnons parmi ces applications, la version verte de TelNet [44]. Il existe également d'autres travaux pour les protocoles réseaux. Les auteurs de [45] proposent à titre d'exemple un algorithme de contrôle dynamique de congestion pour le protocole TCP afin de limiter les pertes et les retransmissions, et ainsi d'économiser plus d'énergie. Ils démontrent également que la gestion active des fenêtres, qui vise à contrôler la taille des files d'attente, aide à réduire les pertes tout en maximisant l'utilisation du réseau.

Fig. 1.12 montre un exemple d'adaptation du protocole TCP par l'introduction d'un proxy pour l'économie de l'énergie.

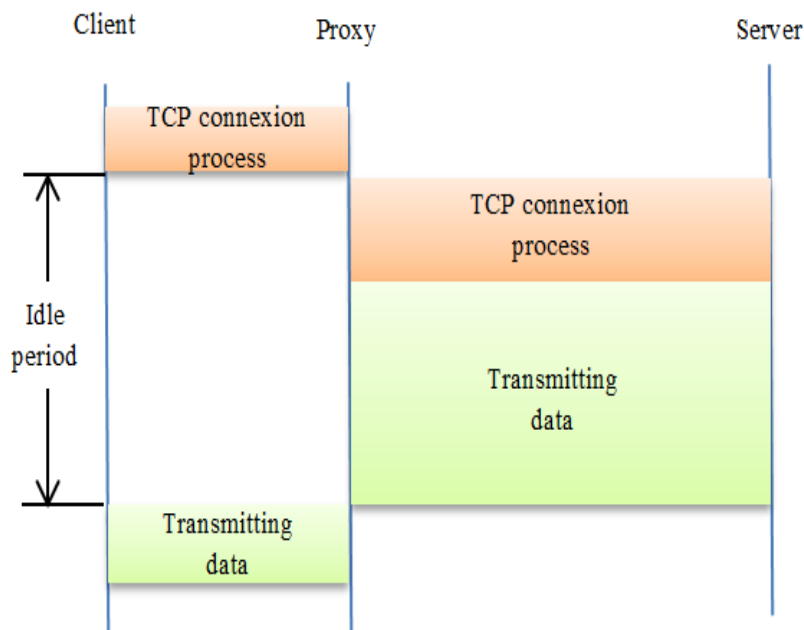


Fig. 1.12 Utilisation d'un proxy pour l'échange de données au moment où le client est en mode veille

1.5.3 Economie d'énergie par la radio cognitive

D'après la théorie de l'information de Shannon, il existe une relation directe entre la capacité et la puissance du signal [46] ; la capacité augmente d'une manière linéaire par rapport à la bande passante mais d'une façon logarithmique par rapport à la puissance du signal. Nous pouvons donc avoir plus de capacité avec moins de puissance si l'utilisation du spectre est efficace.

Le but de la radio cognitive est de garantir une utilisation efficace du spectre avec une gestion intelligente. La radio cognitive conduit à la réduction des interférences, tout en améliorant l'utilisation de la bande passante ; elle joue un rôle majeur dans les communications sans fil (Fig. 1.13). Un nombre important de travaux ont été réalisés récemment dans le cadre de la radio cognitive. A titre d'exemple, le travail de [47] vise à réduire les délais de détection et de commutation des canaux dans les SBs cognitives. Les auteurs ont proposé un schéma de planification pour déterminer le groupe des utilisateurs secondaires pour chaque fréquence. Ils ont présenté également un algorithme optimal de détection des canaux, de manière à réduire au maximum les coûts de commutation des canaux.

La radio cognitive pourrait réaliser des économies considérables d'énergie. Cependant, les techniques utilisées se servent des différentes couches réseau pour recueillir le plus de paramètres possibles et prédire l'état du spectre ce qui rend ces algorithmes de plus en plus complexes.

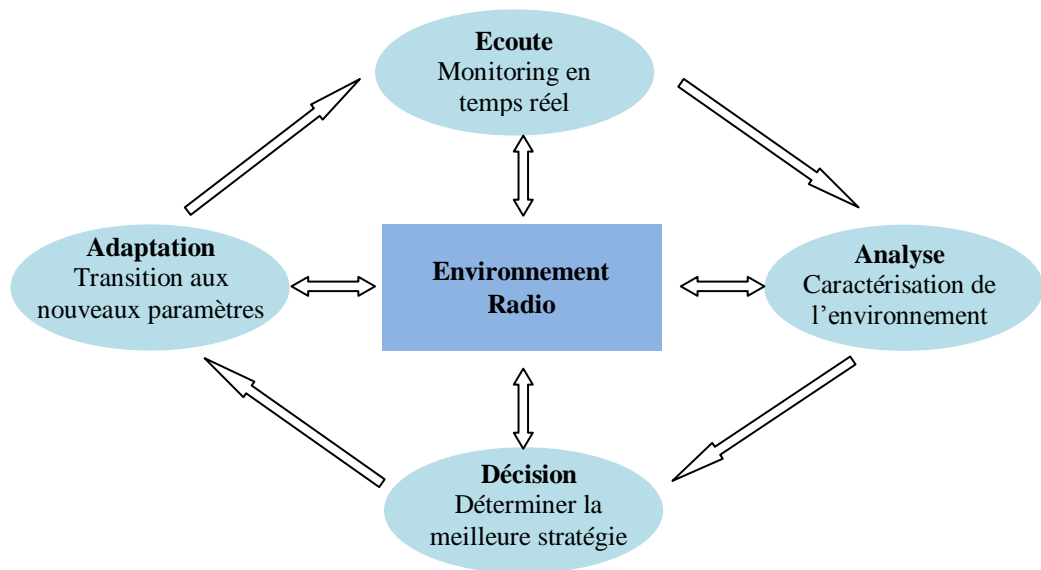


Fig. 1.13 Fonctionnement de la radio cognitive

1.5.4 Infrastructures efficaces en énergie

Les réseaux actuels sont connus par leur sur-apvisionnement. Un grand pourcentage d'énergie est consommé par ces réseaux aussi bien dans les périodes à grande charge de trafic que dans les périodes à faible charge. Pour faire face à la quantité d'énergie consommée inutilement, les chercheurs suggèrent des algorithmes de routage efficace en énergie par l'adaptation de la densité.

L'étude de l'architecture réseaux pour un fonctionnement intelligent suscite un grand intérêt. Quelques recherches suggèrent à titre d'exemple une sélection des nœuds les plus appropriés pour l'exécution de certaines tâches et/ou pour les éteindre et réduire la densité des réseaux. Les auteurs de [48] catégorisent les approches liées à l'infrastructure des réseaux selon deux principaux axes de recherche. Le premier, appelé «incrémental», consiste à l'adaptation des architectures existantes, tandis que le deuxième dit «Clean Slate» vise à reconsidérer complètement les architectures existantes.

1.6 QoS et communications Green

L'économie de l'énergie est toujours effectuée en dépit de la performance des systèmes. Le challenge est d'avoir plus d'économie avec le moins de dégradation possible au niveau de la performance. Malgré les efforts effectués pour la construction de systèmes économes en énergie avec la prise en compte de la QoS, le compromis entre ces deux facteurs reste toujours critique et exige encore plus de recherches. Ceci est encore plus compliqué dans les infrastructures hétérogènes où les paramètres varient d'un équipement à un autre. Les applications à temps réel tels que la VOIP et les vidéos interactives présentent une très grande sensibilité à la performance des réseaux ce qui présente un réel challenge pour les techniques de réduction de la consommation énergétique. Trouver un compromis entre la qualité de service et l'économie de l'énergie conduit à résoudre des problèmes d'optimisation d'une grande complexité. Les recherches dans ce domaine proposent des méthodes stochastiques et des heuristiques dans le but de simplifier ces problèmes et de trouver des solutions dans un temps optimal.

1.7 Métriques d'estimation de l'efficacité énergétique

Afin de comparer d'une manière objective le niveau d'efficacité énergétique des différents types d'équipements, certaines normes ont été définies. Nous mentionnons à titre d'exemple la norme ECR (Energy Consumption Rating) [49] et les standards définis par ATIS (Alliance for

Telecommunications Industry Solutions). La norme ECR introduit des tests pour déterminer l'efficacité énergétique des réseaux basés sur l'échange de paquets ainsi que les différents équipements de télécommunication, tandis qu'ATIS présente une méthode de calcul de l'efficacité énergétique pour les entreprises et les fournisseurs de services. Nous notons que chacune des deux normes mentionnées considère un trafic à débit binaire constant.

Les métriques définies peuvent être catégorisées selon 3 niveaux: mesures au niveau des équipements, au niveau des établissements et au niveau des réseaux.

- Les mesures au niveau des équipements sont définies pour exprimer l'efficacité énergétique des équipements individuels ; ainsi, ils reflètent la performance de la conception des équipements.
- Les mesures au niveau des établissements servent à estimer l'efficacité énergétique des systèmes de haut niveau comme les centres de données. Ces mesures prennent en compte les besoins énergétiques supplémentaires comme l'énergie consommée par les systèmes de refroidissement.
- Les mesures au niveau des réseaux évaluent l'efficacité énergétique au niveau des réseaux. Un bon exemple de ces mesures est PIrural (indicateur de performance dans les zones rurales) et PIurban (indicateur de performance dans les zones urbaines).

Nous résumons dans le Tableau. 1.2, une partie des métriques vertes, ainsi que leurs méthodes de calcul.

1.8 Analyse des méthodes de Green

Nous avons présenté dans ce chapitre un survey sur les méthodes et les techniques utilisées dans les communications Green. Nous avons abordé au cours de notre étude, différents types de réseaux, réseaux filaire et sans fil. Nous pouvons constater que les techniques citées, à savoir l'adaptation des débits et de la puissance de transmission, l'utilisation de proxys ainsi que l'adaptation des infrastructures présentent un moyen performant pour faire face à la grande consommation énergétique des infrastructures actuelles. Chacune de ces techniques a son propre impact sur la consommation. Des approches hybrides peuvent être envisagées pour une meilleure exploitation des ressources avec le moindre coût. Nous présentons dans ce qui suit une comparaison entre les différents aspects étudiés en mettant en évidence notre point de vue.

Tableau. 1.2 Les métriques de mesure de l'efficacité énergétique

Metriques	Nom	utilisation	Formule	Niveau	Commentaire
PuE	Power Usage Effectiveness	Centres de données	$PuE = \frac{TotalFacilityPower}{ITEquipementPower}$	Etablissement	
DCiE	Data Center infrastructure Efficiency	Centres de données	$DCiE = \frac{1}{PuE}$	Etablissement	
ECR	Energy Consumption Rating	Entreprises des TIC	$ECR = \frac{E_{100}}{T_f}$	Equipement	E_{100} Consommation à 100% T_f : débit
ECRW	ECR-Weighted	Entreprises des TIC	$ECRW = \frac{0.35.E_f + 0.35.E_h + 0.35.E_i}{T_f}$	Equipement	E_f, E_h et E_i consommation à 100%, 50% et 0% respectivement. T_f : débit
TEER	Telecommunications Energy Efficiency Ratio	Serveur	$TEER = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{\sum_{j=1}^m (\frac{P_{0j} + P_{50j} + P_{100j}}{3})}$	Equipement	D_i : débit de l'interface i ; P_{0j}, P_{50j} , et P_{100j} représentent l'énergie avec une utilisation à 0%, 50% et 100% respectivement
PI_{rural}	Performance Indicator in rural areas	Réseaux cellulaires	$PI_{rural} = \frac{A_{coverage}}{P_{site}}$	Réseau	$A_{coverage}$ zone de couverture (Km^2) P_{site} énergie consommée sur le site
PI_{urban}	Performance Indicator in urban areas	Réseaux cellulaires	$PI_{urban} = \frac{N_{busy_hour}}{P_{site}}$	Réseau	N_{busy_hour} nombre d'utilisateur P_{site} énergie consommée sur le site

Tableau. 1.3 Taxonomie des recherches sur les communications Green

		Adaptation des débits et des puissances de transmission	Utilisation de proxys	Infrastructure efficaces en énergie	Applications efficaces en énergie	Utilisation de la radio cognitive
Réseaux filaires		[20], [50], [10], [15]	[43]	[18], [19]	[45]	
Réseaux sans fils	Réseaux cellulaires	[21], [40], [39], [24], [44]		[27] [7]		[7], [47], [68]
	Réseaux de capteurs	[31], [32], [33], [34]		[29], [31], [36], [67]		

1.8.1 Allumer/éteindre vs Adaptation des débits

Chacune de ces méthodes, l'adaptation des débits et le changement du mode de fonctionnement (allumer/éteindre), a ses propres avantages et inconvénients ; le choix entre les deux varie selon les infrastructures des réseaux, le type des équipements utilisés ainsi que le taux d'utilisation des réseaux. [1] précise que dans les réseaux optiques, l'utilisation du mode «allumer/éteindre» présente des résultats plus prometteurs comparativement à l'adaptation des débits qui montre peu de gain en énergie. Ces deux méthodes sont fortement dépendantes de l'utilisation du réseau. Les auteurs dans [50] ont montré que dans le cas d'une charge de trafic élevée, les techniques d'adaptation de débits sont plus appropriées. Sur cette base, les opérateurs des réseaux pourraient trouver un compromis entre ces deux possibilités; par exemple, en utilisant l'adaptation des débits durant les heures de pointe et le mode «allumer/éteindre» durant les périodes à faibles charge de trafic (durant la nuit par exemple).

1.8.2 Réseaux hétérogènes vs Réseaux homogènes

Les réseaux hétérogènes offrent une grande capacité aux utilisateurs car la distance entre ceux-ci et les SBs diminue, de plus la capacité des réseaux est améliorée par la coexistence de plusieurs types de SBs. Cependant, les différentes SBs doivent être déployées soigneusement, par la prise en compte des distances entre celles-ci, ce qui n'est pas toujours possible dans ce type de réseaux. Le choix entre les infrastructures hétérogènes et homogènes dépend de la zone ciblée et des débits exigés. Le déploiement de Macrocell est plus intéressant dans les zones à faible charge de trafic [1], comme dans les zones rurales, tandis que l'utilisation des réseaux cellulaires hétérogènes est plus efficace dans les zones urbaines.

1.8.3 Méthodes «Incrémentales» vs « Clean Slate »

Le choix entre ces deux approches suscite beaucoup de débats et les points de vue changent entre ceux qui soutiennent l'adaptation des architectures existantes pour une meilleure efficacité énergétique [41] [50], et ceux qui préfèrent la reconstruction de nouvelles architectures utilisant les nouvelles technologies conçues pour une faible consommation d'énergie [51]. Avec le succès du réseau Internet et des infrastructures réseaux utilisées actuellement, opter pour une construction de nouvelles architectures reste superflu.

1.9 Conclusion

Malgré les efforts qui ont été effectués pour économiser l'énergie dans les réseaux de communication, certains problèmes persistent encore.

Le bon choix de l'approche d'économie d'énergie doit être étudié selon les infrastructures et les dispositifs utilisés. Dans les réseaux cellulaires plusieurs points exigent plus d'études et d'investigations. Certaines recherches, proposant la division de ces infrastructures en deux parties, font apparaître deux types de réseaux, un réseau pour la signalisation et un autre pour l'échange de données. Il est également intéressant de noter que la coopération des opérateurs est primordiale, étant donné que les réseaux actuels deviennent de plus en plus redondants.

En plus des techniques utilisées dans les réseaux de communication pour l'économie d'énergie, les énergies renouvelables s'avèrent être d'une très grande importance. Un intérêt majeur doit être consacré aux techniques de récolte d'énergie par l'amélioration de l'efficacité des panneaux solaires et par la mise en place d'infrastructures hybrides alimentées par plusieurs types d'énergie.

Nous résumons ci-après, dans la Fig. 1.14, les différents aspects et méthodes d'économie d'énergie en effectuant une classification de ceux-ci relativement aux catégories présentées dans ce chapitre.

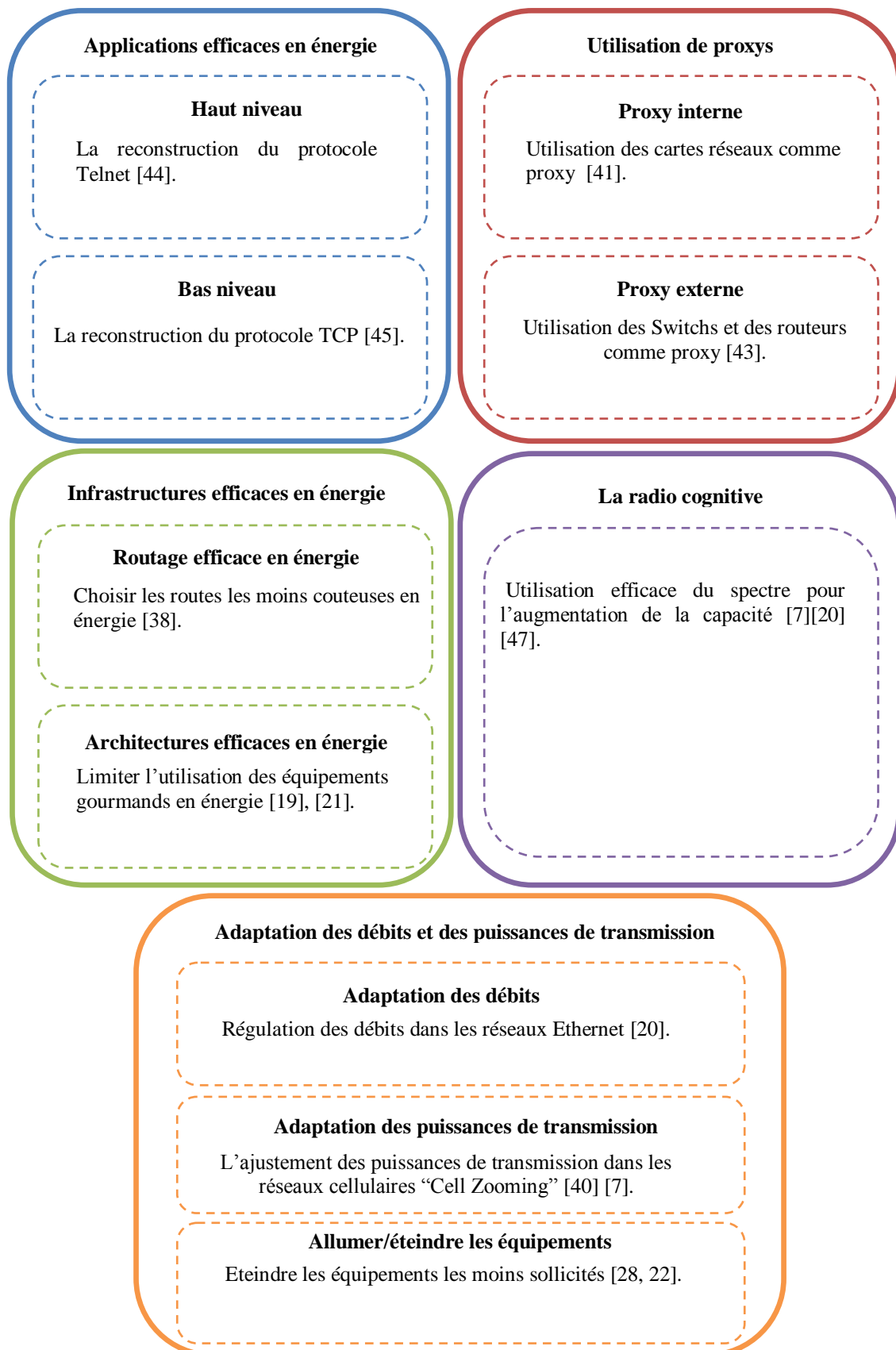


Fig. 1.14 Représentation hiérarchique des méthodes d'économie d'énergie

CHAPITRE II: PROBLEMATIQUE

2.1 Introduction

Le besoin d'accès aux données électroniques a augmenté considérablement ces dernières années. Les réseaux cellulaires représentent une des infrastructures les plus touchées. Pour faire face à cette demande, les opérateurs de télécommunication tendent à multiplier le nombre de SBs.

Les réseaux LTE actuels sont considérés comme les plus répandus dans l'histoire des communications mobiles. Les études pronostiques estiment qu'environ 50 milliards d'appareils mobiles seront connectés vers l'année 2020 [4]. Cependant, le taux de croissance des données générées, dépasse de loin la vitesse du déploiement de ces réseaux. L'industrie mobile nécessite alors de nouvelles techniques permettant d'accroître la capacité des réseaux d'une manière efficace et à moindre coût (Fig. 2.1).

Le concept des réseaux hétérogènes a été proposé comme une alternative aux réseaux cellulaires conventionnels dans le but de fournir plus de capacité et de couverture. Peu de travaux traitent la problématique de l'énergie dans ces réseaux. Dans ce chapitre, nous commençons d'abord par décrire le fonctionnement des réseaux hétérogènes. Nous rappelons par la suite, les limites des solutions existantes, puis nous décrivons le problème principal qui motive notre travail sur l'économie d'énergie dans les réseaux hétérogènes.

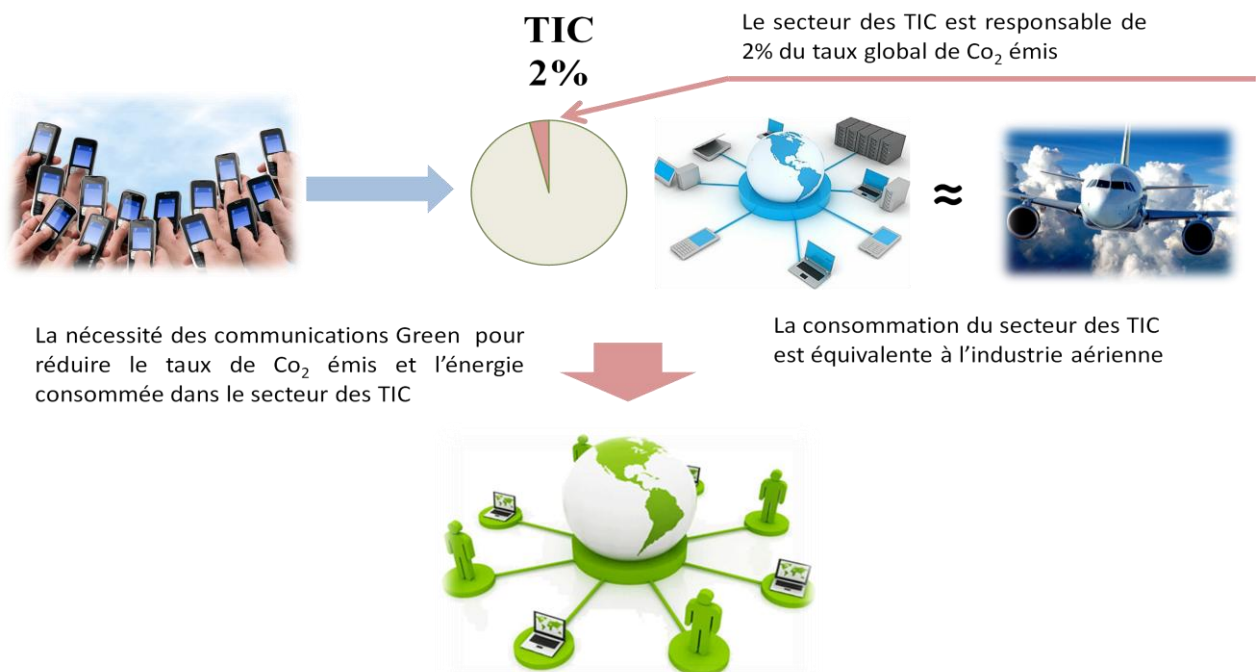


Fig. 2.1 Motivation derrière les réseaux Green

2.2 Infrastructure des réseaux hétérogènes

L'évolution des terminaux mobiles et les différents services de communication a conduit à une très grande augmentation au niveau du trafic dans les réseaux cellulaires. Pour faire face à cette charge de trafic, le concept des réseaux hétérogènes a été introduit.

Un réseau hétérogène est composé de différents types de réseaux d'accès pouvant avoir des technologies de communication différentes. En plus des SBs conventionnelles, nous trouvons dans ces réseaux des «Small Cells» qui se présentent sous la forme de Microcells, Picocells et/ou Femtocells (Fig. 2.3). Cette diversité offre plusieurs avantages au niveau de l'efficacité spectrale, de la couverture réseau et de la capacité.

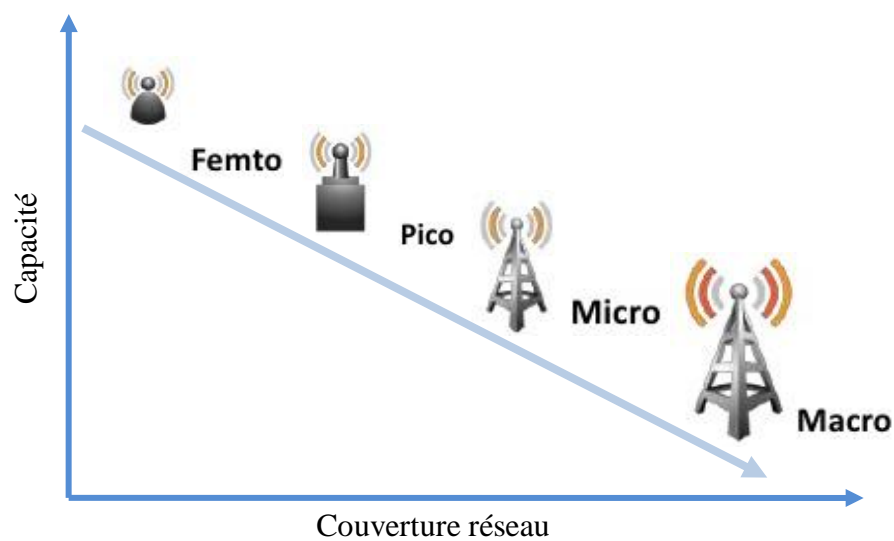


Fig. 2.3 Capacité et couverture des différentes cellules

2.3 Processus de handover dans les réseaux hétérogènes

Il existe deux types de handover dans les réseaux cellulaires: le handover horizontal et le handover vertical. Le handover horizontal se produit lorsque les réseaux d'accès utilisent la même technologie de communication. Le processus du handover horizontal se déclenche uniquement au moment où le service délivré par un réseau d'accès n'est plus disponible en raison de la mobilité des utilisateurs. Le handover vertical peut être déclenché suite à des besoins d'amélioration de la QoS ou pour la prolongation de la durée de vie de la batterie des utilisateurs [52].

Dans les réseaux cellulaires conventionnels, le changement de SBs se fait par le biais d'un handover horizontal indépendamment du point de vue des utilisateurs. Dans un réseau hétérogène, l'utilisation du handover horizontal reste toujours possible entre des SBs utilisant

CHAPITRE II: PROBLEMATIQUE

les mêmes technologies. Cependant, en présence de plusieurs technologies, l'utilisation d'un handover vertical est nécessaire.

Un handover vertical comporte trois étapes principales : l'initiation, la décision et l'exécution (Fig. 2.4). Durant la phase d'initiation, l'utilisateur lance la procédure du handover en fonction des conditions de réseau. La deuxième phase consiste à choisir un réseau d'accès selon des métriques bien déterminées, telles que la puissance du signal reçu, la bande passante et la consommation d'énergie. Durant la phase finale, les opérations de signalisation nécessaires sont effectuées et la connexion est établie.

Plusieurs standards ont été proposés pour effectuer un handover vertical. Le protocole MIH (Media Independent Handover) est le standard qui a été définie par l'organisme IEEE sous le nom de IEEE 802.21 [8]. Ce protocole opère au niveau de la couche 2.5 entre la couche liaison et la couche réseau.

Le protocole MIH permet d'effectuer un handover aussi bien pour des réseaux différents (WiMax, WiFi, ZigBee, 3GPP, etc.) que pour des réseaux de même type. Celui-ci est basé sur les étapes suivantes : La découverte du réseau, la vérification de la disponibilité des ressources, le choix du réseau et la connexion. L'utilisation du protocole MIH pour des fins d'économie d'énergie n'a été abordée que dans le but de prolonger la durée de vie de la batterie des utilisateurs.



Fig. 2.4 Exemple d'un handover vertical dans un réseau hétérogène

2.4 Energie et réseaux hétérogènes

Dans un réseau hétérogène où les SBs sont positionnées d'une manière aléatoire, plusieurs zones de couverture se chevauchent, ce qui génère plus d'interférences par rapport à un réseau cellulaire classique. La coexistence de plusieurs réseaux d'accès conduit également à un gaspillage au niveau de la consommation d'énergie dans les périodes à faible charge de trafic. Ceci revient au fait que la consommation d'énergie dans les SBs n'est pas proportionnelle à leur taux d'utilisation. Les SBs consomment une quantité importante d'énergie même en l'absence d'utilisateurs. L'économie d'énergie dans les réseaux hétérogènes peut être donc effectuée par une utilisation efficace du spectre du signal (Fig. 2.5) ou en faisant en sorte que la consommation totale d'un réseau soit proportionnelle à son utilisation (Fig.2.6).

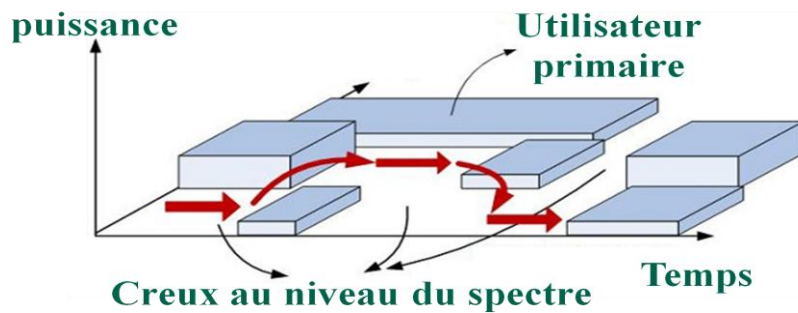


Fig. 2.5 Optimisation du spectre

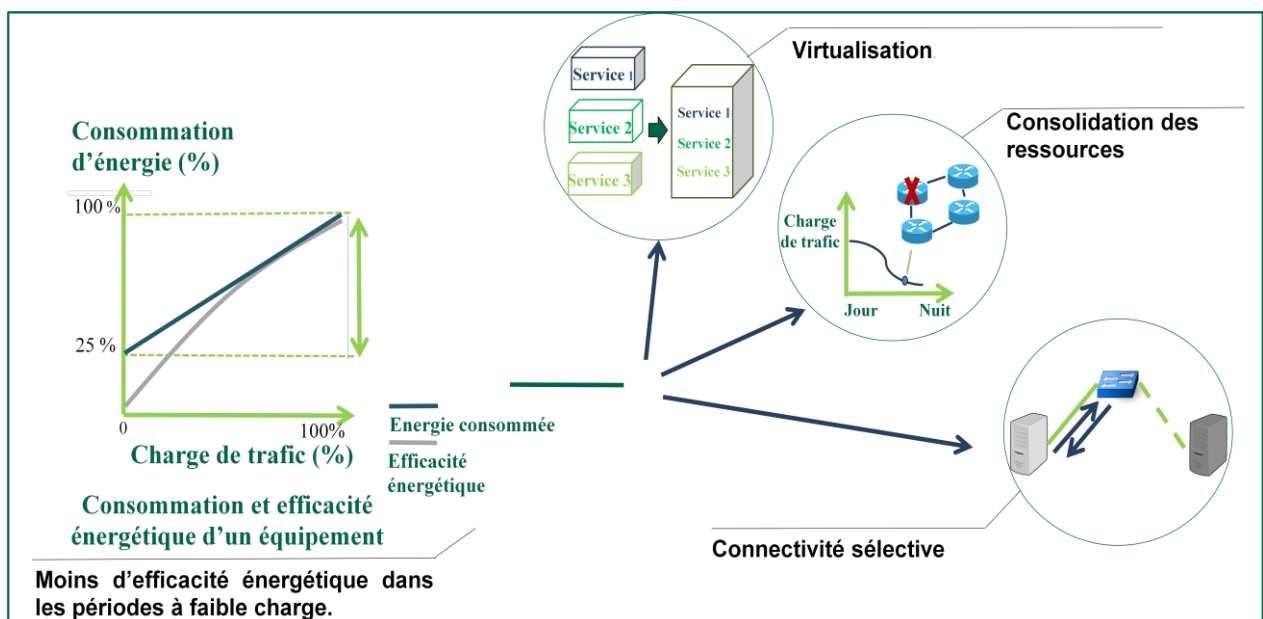


Fig. 2.6 Techniques d'économie d'énergie

Pour garantir une implémentation efficace des réseaux hétérogènes, des techniques d'organisation automatique au niveaux de ces derniers sont nécessaires pour moins d'interférences et de consommation d'énergie.

2.5 Proposition

Dans les milieux urbains, la coexistence de plusieurs types de SBs augmente la capacité du réseau et fournit aux utilisateurs plusieurs moyens de connexion. Cependant, le déploiement de ceux-ci par plusieurs fournisseurs conduit à plusieurs intersections au niveau des zones de couvertures ; de plus le taux de handover est plus important ce qui augmente les risques de l'effet Ping Pong [53].

La capacité des réseaux peut être supérieure aux besoins des utilisateurs dans certaines périodes. Nous précisons également que l'énergie des SBs n'est pas totalement proportionnelle à leur utilisation et celles-ci semblent être plus efficaces quand la charge de trafic augmente [54]. L'adaptation de la densité du réseau (le nombre des réseaux d'accès actifs) ouvre la voie vers la possibilité de réduire la consommation d'énergie tout en préservant la performance du réseau. Les moyens communs utilisés pour réduire la consommation d'énergie dans les réseaux cellulaires consistent à éteindre/allumer les SBs et/ou à adapter leur puissances de transmission. Toutefois, certains travaux révèlent que l'adaptation de la puissance de transmission dans ce cas offre un très faible pourcentage de gain en énergie [54], ce qui rend la solution de commutation d'états des SBs (éteindre/allumer) plus attractive.

La plupart des travaux sur l'économie d'énergie dans les réseaux cellulaires traitent le cas d'un réseau homogène contenant un seul type de SBs. Quelques travaux sur les réseaux cellulaires hétérogènes existent. Cependant, plusieurs facteurs restent à améliorer, en particulier le taux de consommation de ces réseaux. Les études qui ont été faites sur ce type de réseaux traitent majoritairement la gestion des interférences par l'utilisation de la radio cognitive [55].

Dans notre travail, nous nous intéressons à l'étude de la consommation énergétique des réseaux hétérogènes. Le but principal est d'optimiser dynamiquement le fonctionnement de ces réseaux par rapport à la charge de trafic. Contrairement aux solutions existantes, les solutions proposées prennent en compte le cas de plusieurs SBs avec la considération de la capacité requise par les utilisateurs, les solutions que nous proposons traitent les points suivants :

CHAPITRE II: PROBLEMATIQUE

- Economiser l'énergie par l'adaptation dynamique des réseaux hétérogènes.
- Garantir la couverture réseau aux utilisateurs se trouvant dans la zone géographique étudiée.
- Fournir la capacité nécessaire selon les exigences des utilisateurs.
- Affecter les utilisateurs aux réseaux d'accès les plus appropriés pour une efficacité énergétique optimale.

CHAPITRE III: MODELISATION STOCHASTIQUE ET MODELE DYNAMIQUE

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions la consommation d'énergie dans les réseaux hétérogènes. Ces réseaux sont considérés comme la base des futurs réseaux 5G. D'où l'importance d'y minimiser l'énergie consommée, en adaptant d'une manière dynamique leur densité selon la charge de trafic. Nous formulons dans ce qui suit le problème de la consommation d'énergie en exprimant le gain en énergie (i.e., l'énergie économisée) à maximiser, puis nous montrons que trouver une solution optimale à ce problème représente un problème NP-complet; ainsi, nous proposons une solution réalisable basée sur l'estimation de l'état du réseau par l'utilisation des réseaux de files d'attente. Compte tenu de cet état, nous procédons à adapter l'infrastructure du réseau par rapport à la capacité requise par les utilisateurs. Nous étudions dans la partie expérimentale, la performance de la méthode proposée selon différents critères. Les résultats montrent des améliorations significatives en termes de consommation d'énergie tout en préservant autant que possible les exigences des utilisateurs.

La spécificité de notre approche est l'étude du problème de la consommation énergétique au sein d'un réseau contenant autant de réseaux d'accès que possible. L'approche proposée consiste à éteindre/allumer les réseaux d'accès afin d'adapter la densité du réseau tout en préservant la capacité requise par les utilisateurs.

Le présent chapitre est structuré comme suit :

- Formulation du problème d'optimisation ;
- Explication de l'approche proposée qui est basée sur l'estimation de l'état du réseau avec l'étude des besoins des utilisateurs afin de trouver une configuration optimale ;
- Présentation des résultats de la simulation ;
- conclusion et discussion de l'approche proposée ;

3.2. Formulation du problème

3.2.1. Infrastructure du réseau utilisé

A la différence des travaux effectués par [56] où seules les Femtocells étaient prises en compte, notre approche peut gérer plusieurs types de réseaux d'accès (SBs cellulaires, WiMAX, Wi-Fi, etc...). Le réseau hétérogène étudié est illustré par la Fig. 3.1 ; une Macrocell couvre l'ensemble du réseau et comprend dans sa zone de couverture plusieurs réseaux d'accès utilisant différentes technologies de communication ; le modèle énergétique des

réseaux d'accès est exprimé par une partie statique consommée dès qu'une SB est allumée et d'une partie dépendante de la charge de trafic, qui varie en fonction de la capacité utilisée. Nous exprimons l'énergie totale consommée par une SB_j comme suit [57, 58]:

$$E_j = P_0 + P(\alpha) = P_0 + \alpha . b \quad (3.1)$$

Où:

P_0 : L'énergie statique.

$P(\alpha)$: L'énergie consommée en fonction de la charge de trafic.

α : Correspond au pourcentage de la charge utilisée.

b : L'énergie qui dépend de la charge lorsque la SB est entièrement utilisée.

Fig. 3.2 illustre le modèle d'énergie qui exprime l'énergie consommée en fonction de la charge de trafic.

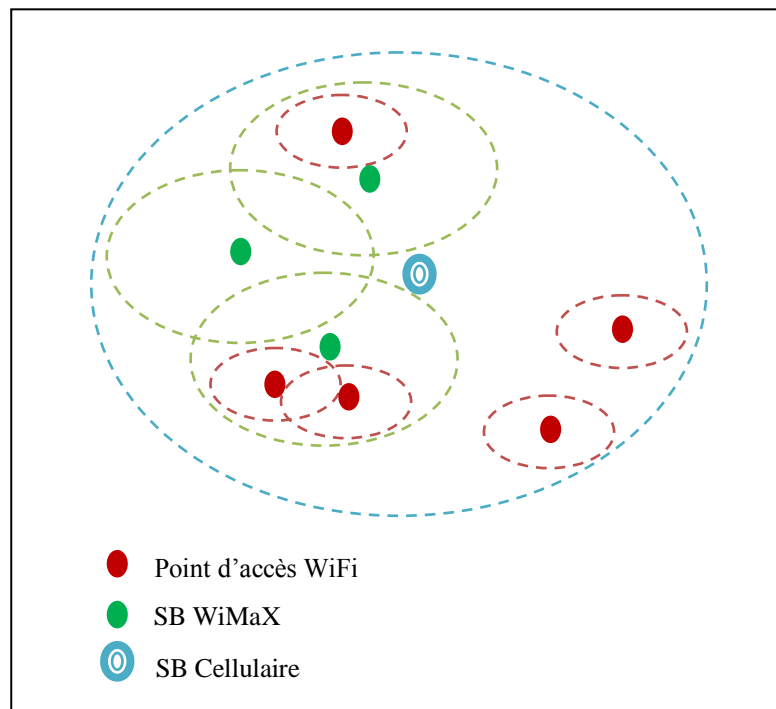


Fig. 3.1 Illustration de l'architecture utilisée

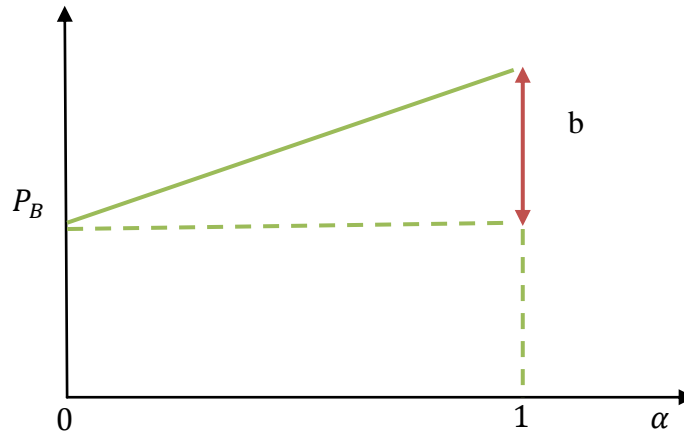


Fig. 3.2 Modèle de consommation d'énergie d'une station de base

3.2.2. Formulation du problème d'optimisation

Dans cette partie, nous exprimons le gain d'énergie qui doit être maximisé en trouvant une configuration optimale pour le réseau. La maximisation du gain conduit à éteindre certains PAs (Points d'Accès) et SBs dans le réseau sous la contrainte de la capacité exigée.

Nous représentons l'état des SBs/PAs par un vecteur \mathbf{X} de n éléments comme suit:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.2)$$

$$x_i = \begin{cases} 0 & \text{si le PA ou la SB sont éteints} \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.3)$$

Où x_i est l'état de la SB_{*i*}/PA_{*i*}

En prenant en considération le modèle d'énergie exprimé dans (3.1), nous définissons le gain d'énergie G comme suit:

$$G = \sum_{i=1}^n \left[\left(k_i \cdot \frac{C_{used_i}}{C_{TOT_i}} + m_i \right) \cdot (1 - x_i) - k_i \cdot \frac{f_i(C_t, X)}{C_{TOT_i}} \cdot x_i \right] \quad (3.4)$$

Notre objectif est de trouver le vecteur X qui maximise le gain G :

$$Argmax_X(G) \quad (3.5)$$

Avec:

$$\sum_{i=1}^n C_{used_i} \cdot (1 - x_i) = \sum_{i=1}^n f_i(C_t, X) \cdot x_i \quad (3.6)$$

Tels que:

$k_i \cdot \frac{Cused_i}{CTOT_i} + m_i$: le modèle d'énergie de la SB_i/PA_i.

$Cused_i$: la capacité utilisée par la SB_i/PA_i.

$CTOT_i$: la capacité totale de la SB_i/PA_i.

m_i : l'énergie statique de la SB_i/PA_i.

k_i : l'énergie dynamique maximale de la SB_i/PA_i.

$f_i(C_t, X)$: la capacité résultante des SBs/PAs éteints,

$C_t = (Cused_1, Cused_2, \dots, Cused_n)$: vecteur des capacités utilisées par chaque PAs/SBs à l'instant t .

Pour résoudre ce problème, la capacité utilisée dans chaque SB/AP active doit être estimée ainsi que la disposition des utilisateurs au sein du réseau après la mise hors tension de leur SB/PA relatif.

Même si le gain exprimé est linéaire après l'estimation de la distribution des utilisateurs, ce problème reste NP-complet et est connu sous le nom de la programmation linéaire 0-1 [59]. Pour résoudre ce problème avec moins de complexité, nous proposons un modèle stochastique permettant de prédire l'état du réseau puis nous procédons à adapter la densité de celui-ci en fonction de la charge de trafic en éteignant les SBs/PAs les moins efficaces.

Nous proposons dans ce qui suit une approche en deux étapes, visant à adapter la densité du réseau par rapport à la charge de trafic. La SB cellulaire reste toujours active pour assurer la couverture de l'ensemble du réseau, tandis que les autres SBs/PAs couverts par celle-là peuvent être éteints.

La première étape est basée sur la modélisation en file d'attente du réseau et vise à estimer la capacité utilisée dans chaque PA/SB. La deuxième étape consiste à utiliser une métrique permettant de classer les SBs/PAs en fonction de leur efficacité énergétique. Les SBs/PAs les moins efficaces sont éteints par la suite. Nous étudions également le problème de l'estimation de la capacité restante au sein du réseau après la réduction de la densité (pour satisfaire les besoins des utilisateurs résultant des SBs/PAs éteints).

3.2.3. Modèle de files d'attentes

Dans cette étape, nous cherchons à recueillir des informations sur les utilisateurs, car ceux-ci utilisent différentes applications et leurs comportements changent en fonction des moments et de l'état du réseau.

Pour estimer la charge de trafic dans les SB/PAs, nous utilisons un modèle stochastique, de tel sorte que chaque SB/PA est considéré comme une file d'attente M/M/N/0 à plusieurs classes de service (dans notre cas nous prenons en compte 3 classes de QoS) [60].

Le modèle de files d'attentes est caractérisé comme suit:

- Les arrivées des utilisateurs de chaque classe i suivent une loi de Poisson de taux λ_i
- La longueur de la file d'attente est nulle, aucun utilisateur n'est accepté dans le cas où les ressources sont insuffisantes.
- Le temps de service d'une SBi/PAi suit une loi exponentielle avec une moyenne de $\frac{1}{\mu_i}$

L'état d'une cellule est décrit comme suit: $S = (n_1, n_2, \dots, n_k)$, telle que n_i représente le nombre d'utilisateurs de classe i :

$\sum_{i=1}^k C_i n_i \leq C_T$ où C_i et C_T représentent respectivement la capacité utilisée par un utilisateur de la classe i et la capacité totale d'une SB/PA.

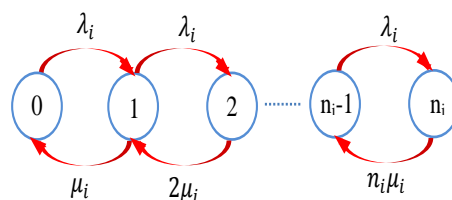
Le taux λ_i est défini en connaissant le nombre d'utilisateurs de classe i désirant utiliser la SB/PA durant une période de temps T .

Le taux de service dépend de la mobilité des utilisateurs et la couverture radio de la SB/PA en question et est exprimé comme suit :

$$\mu_i = \frac{V}{2R} \quad (3.7)$$

V , R représentent la vitesse moyenne des utilisateurs et la couverture radio de la SB/PA, respectivement.

La chaîne de Markov correspondant à chaque classe est représentée comme suit:



La probabilité des états est exprimée comme suit [60]:

$$\pi(S) = \pi(n_1, n_2, \dots, n_k) = \frac{\prod_{i=1}^k \frac{(\rho_i)^{n_i}}{n_i!}}{\sum_{s \in S} \prod_{i=1}^k \frac{(\rho_i)^{n_i}}{n_i!}} \quad (3.8)$$

Avec k les classes de QoS et $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$.

Pour estimer la capacité totale utilisée dans une SB/PA, nous estimons dans un premier temps le nombre d'utilisateurs de chaque classe de trafic. Nous avons donc :

$$E[N_i] = \sum_{s \in S} n_i \pi(s) \quad (3.9)$$

Avec N_i , variable aléatoire représentant le nombre moyen des utilisateurs de classe i dans une SB/PA.

Nous estimons la capacité totale utilisée dans une SB/PA, en se basant sur le nombre d'utilisateurs de chaque classe comme suit:

$$C_{used} = \sum_{i=1}^k C_i E[N_i] \quad (3.10)$$

3.2.4. Calcul de l'efficacité énergétique d'une SB/PA

Pour distinguer les SBs/PAs les moins efficaces et qui méritent d'être éteints, nous définissons une métrique qui prend en compte l'énergie consommée en fonction de la capacité utilisée, soit la quantité d'énergie dépensée pour un bit de données dans une SB/PA [17]:

$$E_{bit} \left[\frac{j}{Bit} \right] = \frac{\text{Energie_consommée}[W]}{\text{Capacité_tilisée [bit/s]}} \quad (3.11)$$

L'énergie consommée est estimée en connaissant le modèle énergétique d'une SB/PA et la capacité totale utilisée.

Compte tenu de la valeur de E_{bit} , nous pouvons attribuer à chaque cellule un degré d'efficacité de tel sorte que l'efficacité augmente quand la valeur de E_{bit} décroît. Ainsi, les SBs/PAs sont éteints progressivement par rapport à la valeur de E_{bit} , jusqu'à ce que le réseau atteigne la capacité minimale nécessaire pour couvrir l'ensemble de utilisateurs.

3.2.5. Estimation de la capacité restante

Avant d'éteindre une cellule, nous devons nous assurer que la capacité qui en résulte peut être prise en charge par les cellules actives. Ainsi, nous étudions la répartition des capacités au sein du réseau lors de la réduction de la densité. Pour ce faire, nous prenons en compte la

capacité du réseau et la zone de couverture de chaque SB/PA, car un utilisateur doit être couvert par la cellule pour pouvoir tirer profit de sa capacité comme illustré sur Fig. 3.3.

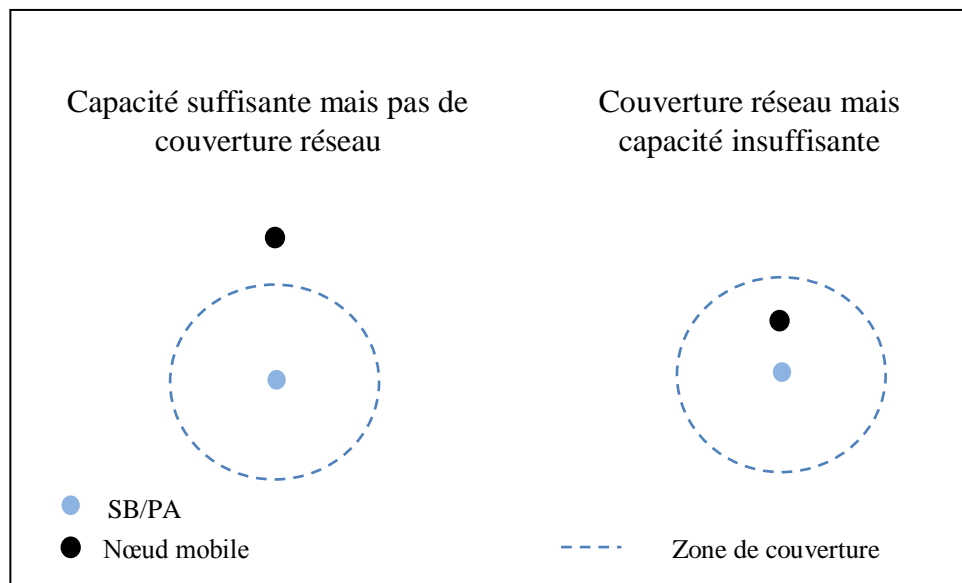


Fig. 3.3 Problème de la capacité et de la couverture

Étant donné que la zone de couverture change selon le type de la SB/PA, nous calculons la probabilité que les nœuds mobiles (noté N) résultant du processus de commutation de l'état des cellules soient couverts par un réseau d'accès. En connaissant la capacité et la zone de couverture des différentes cellules, nous estimons le pourcentage des nœuds mobiles pouvant être pris en compte par un type donné de réseaux d'accès, compte tenu de leur capacité restante, leur nombre et leur zone de couverture.

Nous supposons que pendant le processus de connexion, les SBs/PAs donnent plus de priorité aux nœuds mobiles qui ne disposent pas de réseaux d'accès à leur portée.

Soit X_i variable aléatoire de Bernoulli représentant la possibilité qu'un nœud mobile soit pris en charge par les SB/PA de type i . ($X_i = 1$) est alors la probabilité que le nœud mobile soit situé dans la zone de couverture d'une SB/PA et que la cellule en question possède suffisamment de capacité pour le prendre en charge.

En utilisant le théorème de Bayes, nous obtenons:

$$P(X_i = 1) = \begin{cases} 1 & \text{si } C_u = 0 \\ 0 & \text{si } tca = 0 \\ \frac{nb_i * Coverage_i}{tca} * \Phi \left[\frac{rc_i}{C_u} \right] & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.12)$$

rc_i est la capacité restante d'une SB/PA de type i ,

tca représente la couverture totale du réseau,

$Coverage_i$ est la zone couverte par une SB/PA de type i ,

nb_i est le nombre SB/PA de type i éteints,

C_u est la capacité utilisée dans une SB/PA sur le point d'être éteint

$$\Phi(x) = \begin{cases} x & \text{si } x \leq 1 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.13)$$

En connaissant ces probabilités, nous estimons le nombre des nœuds mobiles pouvant être couvert par les SBs/PAs actifs avant d'éteindre une cellule. Le nombre de nœuds mobiles moyen pouvant être couvert par une SB/PA de type i est calculé par l'espérance comme suit :

$$E_i(X) = N \cdot P(X_i = 1) \quad (3.14)$$

Avec $X \sim$ Binomiale ($N; P$), N est le nombre de nœuds mobiles couverts par une SB/PA sur le point d'être éteint.

Ayant le nombre de nœuds mobiles qui peuvent être pris en charge par chaque type de SB/PA, nous estimons la possibilité que la capacité résultante en éteignant une SB/PA, soit couverte par le réseau et nous définissons la condition d'arrêt de notre algorithme comme suit :

$$\sum_i E_i(X) < N \quad (3.15)$$

3.3. Simulation et résultats

Nous avons considéré pour notre simulation un réseau composé d'une SB LTE, 6 SBs WiMax et 40 PAs WiFi.

Toutes les SBs/PAs du même type possèdent les mêmes paramètres tels que:

- Les portées des SBs cellulaire, WiMax et des PA WiFi sont de 1500m, 500m et 50m, respectivement.
- Le débit moyen de la SB cellulaire est de 20Mb/s tandis que la SB WiMax et le PA WiFi ont un débit de 30Mb/s et 50Mb/s, respectivement
- Trois classes de QoS sont considérées avec les débits suivants : 64kb/s, 128 kb/s et 1 Mb/s
- La vitesse des nœuds mobiles est fixée à 2m/s au départ, mais nous faisons varier par la suite cette valeur pour étudier l'impact de la vitesse sur notre méthode.

Lors de nos expérimentations nous commençons par comparer l'énergie consommée avant et après l'utilisation de notre approche en fonction de la charge de trafic.

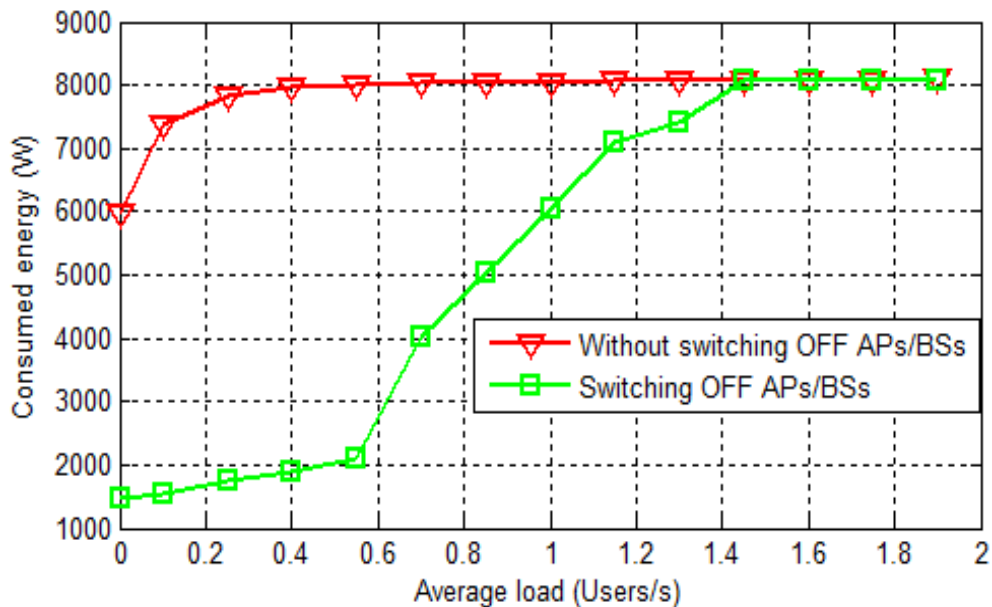


Fig. 3.4 Energie consommée en fonction de la charge de trafic

Nous pouvons constater d'après Fig. 3.4, que l'énergie consommée en utilisant notre approche augmente progressivement avec l'augmentation de la charge de trafic, à cause de l'augmentation du nombre de SBs/PAs nécessaires pour fournir la capacité requise. A partir d'un certain seuil, l'énergie consommée par notre solution se rapproche de l'énergie consommée initialement (sans éteindre les SBs/PAs); ceci est dû à la forte charge de trafic qui exige l'utilisation de la totalité de la capacité du réseau.

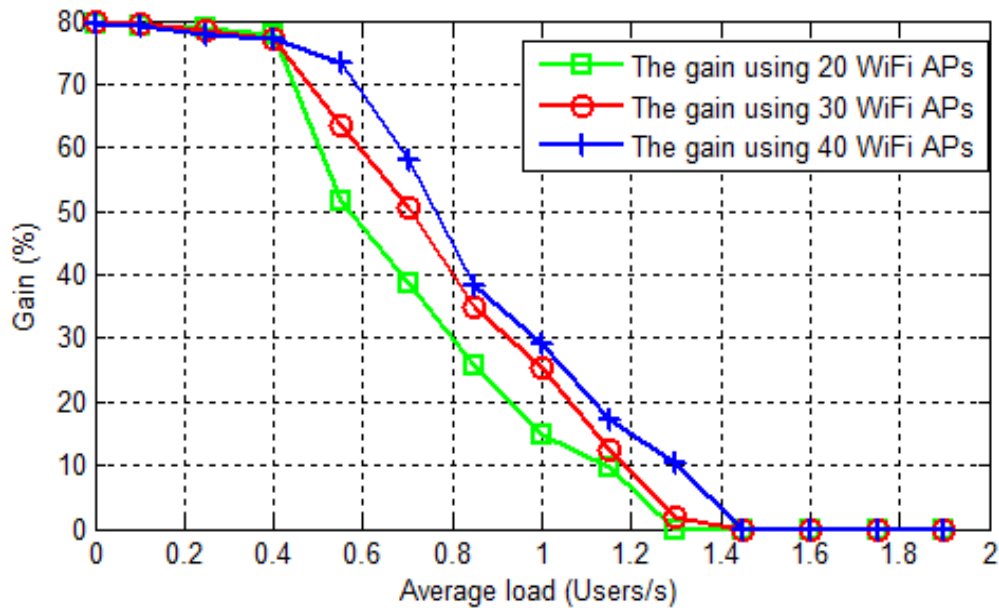


Fig. 3.5 Gain en énergie en fonction de la charge de trafic

Pour voir plus en détail le gain en énergie apporté par notre solution, nous montrons dans Fig. 3.5 le pourcentage du gain en fonction de la charge de trafic tout en faisant varier le nombre des PAs WiFi. Nous pouvons voir que notre solution fournit un gain élevé d'environ 80% en présence d'une faible charge de trafic. Ceci revient au grand nombre de SBs/PAs éteints, étant donné que la capacité requise diminue et un petit nombre de cellules suffit pour prendre en charge la totalité des utilisateurs.

Le gain estimé est plus élevé lors de l'utilisation des PAs WiFi, car ces derniers sont connus par leur faible consommation en énergie et deviennent plus accessibles par l'augmentation de leur nombre.

Fig.3.6 montre le taux de handover avec et sans l'utilisation de notre approche en fonction de la charge de trafic. Le taux de handover lors de l'utilisation de notre approche est plus bas que le taux initial (sans l'utilisation de notre approche), en particulier au moment où plus de PAs WiFi sont éteints (Fig. 3.7) car le nombre de SBs actives diminue suite à la désactivation des SBs les moins efficaces, ce qui entraîne moins de changement de réseaux (les utilisateurs changent de réseau qu'en cas de nécessité).

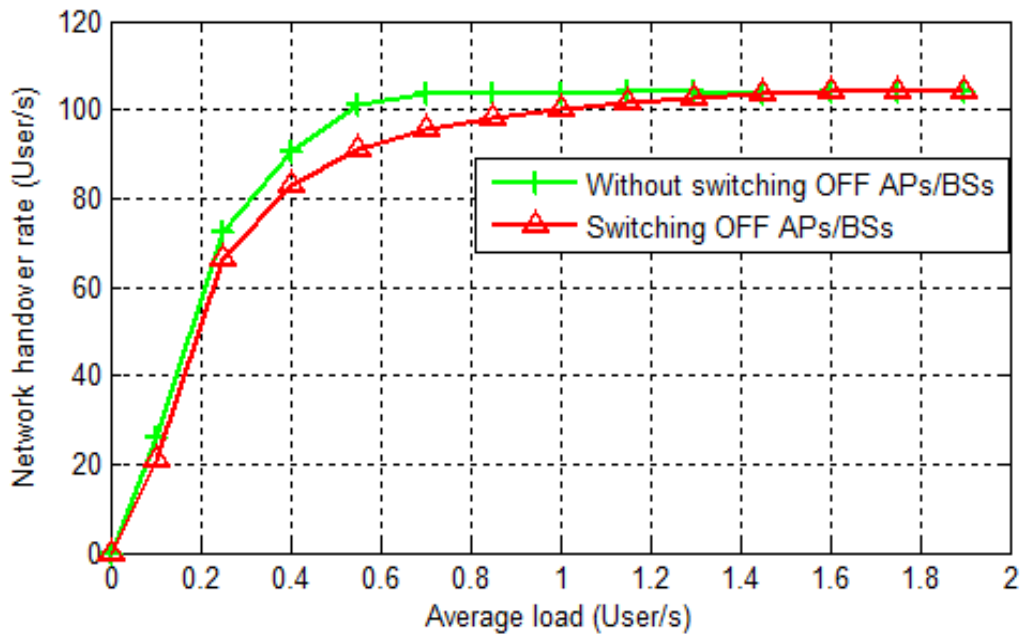


Fig. 3.6 Taux de handover en fonction de la charge de trafic

Enfin, pour vérifier que la capacité demandée par les nœuds mobiles est satisfaite par le réseau en appliquant notre approche, nous montrons dans Fig. 3.8, la capacité requise et la capacité délivrée par le réseau en fonction de la charge de trafic. Le graphe montre que la capacité fournie couvre celle qui est demandée tout en restant proche de la capacité optimale nécessaire.

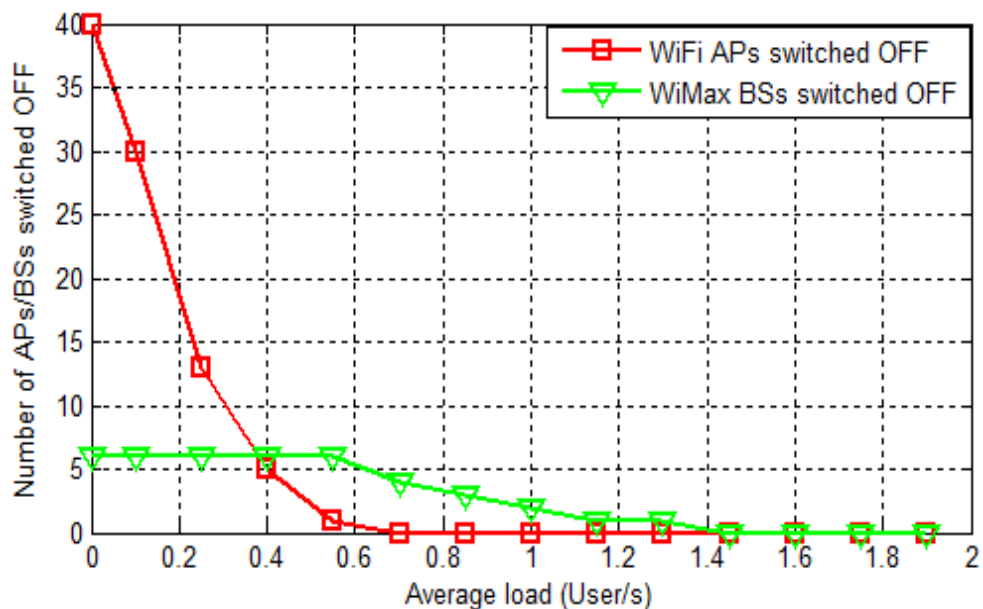


Fig. 3.7 Nombre de SBs éteintes en fonction de la charge de trafic

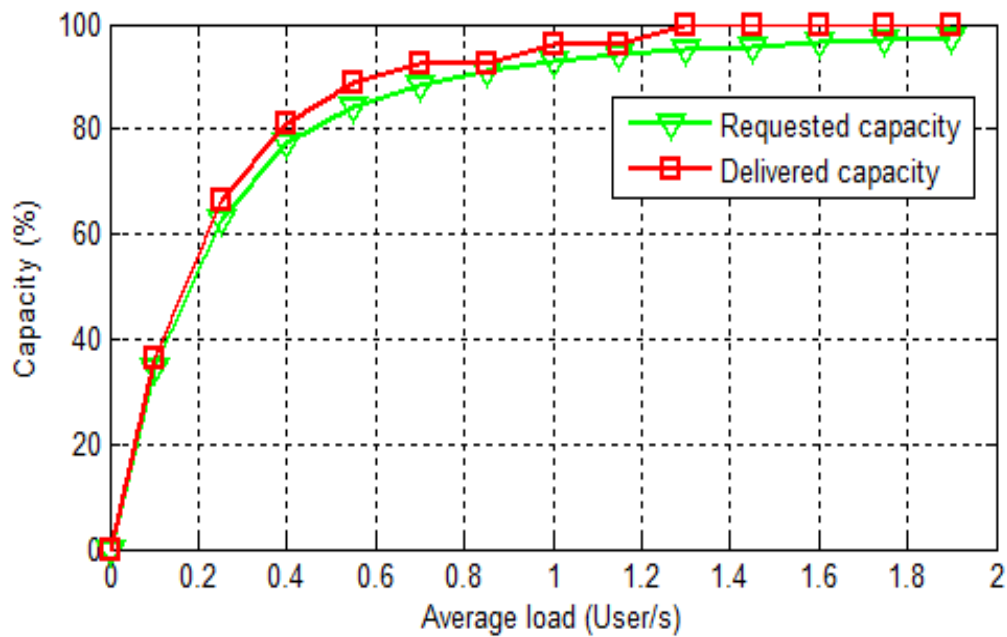


Fig. 3.8 Capacité demandée et la capacité délivrée en fonction de la charge de trafic

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la consommation d'énergie dans les réseaux hétérogènes en utilisant la commutation d'état (allumer/éteindre), visant à adapter la densité du réseau à la charge de trafic. Notre approche est basée sur la prévision de l'état des SBs en utilisant les réseaux des files d'attente et l'estimation de l'efficacité énergétique des réseaux. Nous proposons également un modèle probabiliste permettant d'évaluer l'aptitude du réseau à prendre en charge les utilisateurs après l'application de notre approche.

Nous avons proposé lors de nos expérimentations l'efficacité énergétique de la méthode proposée qui montre une économie d'énergie significative pouvant atteindre 80% dans les périodes à faible charge de trafic. Une série d'expérimentations est également menée dans le but d'étudier la capacité délivrée aux utilisateurs au moment de la réduction de la densité du réseau. La capacité fournie aux utilisateurs par l'utilisation de notre méthode correspond aux exigences des utilisateurs tout en évitant le sur-approvisionnement.

Nous étudions, ci-après, avec plus de détails le problème de l'affectation des utilisateurs dans les réseaux hétérogènes lors de la mise hors tension des cellules. Un modèle basé sur la représentation graphique des réseaux hétérogènes est proposé dans le chapitre suivant afin de permettre une gestion plus souple des utilisateurs lors de la réduction de la densité des réseaux.

**CHAPITRE IV : MODELISATION
GRAPHIQUE POUR UNE COUVERTURE
OPTIMALE**

4.1. Introduction

Le but de ce chapitre est d'étudier et d'améliorer l'efficacité énergétique des réseaux hétérogènes avec une couverture réseau optimale. Ceci est réalisé en ajustant la densité du réseau (le nombre de SB actives) en fonction de la charge de trafic tout en gardant les utilisateurs en cours de service couverts et munis de leur capacité requise. Nous exprimons d'abord le problème à optimiser, puis nous prouvons qu'il est NP-complet. Pour résoudre ce problème, nous proposons une heuristique basée sur la théorie de graphes afin de trouver une configuration optimale du réseau dans un temps polynomial. L'algorithme proposé considère à la fois la zone de couverture et la capacité délivrée de chaque type de SB. Le point fort de cette approche est son aptitude à assurer la couverture des utilisateurs à travers la modélisation du réseau sous la forme d'un graphe. Les expériences montrent que la méthode proposée peut atteindre une efficacité énergétique élevée atteignant jusqu'à 70% de gain en énergie pendant les périodes à faible charge de trafic.

Ce chapitre est structuré comme suit:

- Description de l'infrastructure utilisée avec la formulation du problème d'optimisation.
- Explication détaillée de la solution proposée.
- Simulation et discussion des résultats obtenus.
- Conclusion sur les différentes étapes utilisées dans notre approche et leur impact sur la consommation d'énergie.

4.2. Description du modèle

4.2.1. Infrastructure du réseau

Nous considérons un réseau hétérogène composé d'une Macrocell qui couvre l'ensemble du réseau. Dans la zone de couverture de celle-là, nous retrouvons de petites cellules; Microcells, Picocells et Femtocells. La station Macrocell reste toujours active pour garantir la couverture du réseau tandis que les autres petites cellules dans sa zone de couverture peuvent être éteintes ou allumées en fonction de la charge de trafic.

4.2.2. Modèle énergétique

Nous exprimons l'énergie totale consommée par une SB_i comme suit (le même modèle utilisé dans le chapitre précédent) [26, 61]:

$$E_i = m_i + P_i(\alpha) = m_i + \frac{c_i}{C_{tot_i}} \cdot k_i \quad (4.1)$$

$P(\alpha)$ est la partie de l'énergie dépendante de la charge de trafic, ou α représente le pourcentage de la charge utilisée.

m_i est la partie statique de l'énergie.

k_i l'énergie dynamique de la station de base BS_i .

$\frac{c_i}{C_{tot_i}}$ est le pourcentage de la capacité utilisée, tel que c_i et C_{tot_i} représentent la capacité utilisée dans BS_i et la capacité totale de BS_i , respectivement.

Les paramètres représentant l'énergie statique et dynamique dépendent du type de la SB. Nous donnons des exemples sur ces valeurs dans la partie relative à la simulation.

4.2.3 Formulation du problème

Le concept principal de cette approche est de réduire le plus possible la densité du réseau, tout en gardant les utilisateurs couverts et munis de leur capacité requise.

Nous considérons un réseau constitué d'un ensemble de N stations de bases hétérogènes. L'énergie consommée par chaque BS_i est exprimée par E_i . Le gain à maximiser est exprimé par la différence entre l'énergie consommée avant d'éteindre les SBs et après la réduction de la densité du réseau. Lorsqu'une BS_j est éteinte, sa capacité doit être prise en charge par une autre BS_i , ce qui se traduit par une énergie supplémentaire au niveau de cette dernière. L'énergie supplémentaire est exprimée par :

$$\delta_{ij} = \frac{c_j}{C_{tot_i}} \cdot k_i \quad (4.2)$$

δ_{ij} : représente l'énergie supplémentaire dans la station de base BS_i après la mise hors tension de BS_j .

c_j : est la capacité résultant de BS_j et qui est prise en charge par BS_i .

C_{tot_i} : est la capacité totale de BS_i .

k_i : est la partie dynamique de l'énergie consommée par BS_i .

A partir de cela, nous déterminons la configuration optimale qui maximise l'énergie économisée. D'une autre manière, nous cherchons les valeurs de x_{ij} tel que:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } BS_j \text{ est éteinte et sa capacité est} \\ & \text{couverte par } BS_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.3)$$

Le gain à maximiser est exprimé comme suit:

$$\max \sum_{i=1}^n \sum_{j \in d_i} x_{ij} (E_j - \delta_{ij}) \quad (4.4)$$

Avec:

$$s_1: \sum_{i, i \neq j} x_{ij} \leq 1 ; \quad (4.5)$$

$$s_2: \sum_{i, i \neq j} x_{ij} + \frac{\sum_{i, i \neq j} x_{ji}}{n-1} \leq 1 ; \quad (5)$$

$$s_3: \sum_{j, j \neq i} x_{ij} \cdot c_j + c_i \leq Ctot_i; \quad (4.6)$$

d_i : est l'ensemble des SBs couvertes par BS_i

n : est le nombre total des SBs

Nous expliquons dans ce qui suit les contraintes de notre problème d'optimisation:

s_1 permet d'assurer que la capacité de la station de base BS_j ne sera transférée qu'une seule fois.

s_2 permet de garantir que la stations de base éteinte BS_j ne reçoit aucune charge de trafic.

s_3 permet de respecter la capacité maximale d'une SB.

Le problème d'optimisation formulé figure parmi les 21 problèmes est NP-complets de Karp [59].

4.2.4 Heuristique basée sur le couplage de graphe

Etant donné que le problème d'optimisation est NP-complet, nous proposons dans cette section une heuristique basée sur les graphes pour trouver des solutions approximatives. L'idée principale de notre modèle est de représenter les relations de couverture entre les différentes SBs sous la forme d'un graphe. En connaissant les dépendances en termes de couverture des SBs, nous pouvons contrôler l'affectation des utilisateurs dans le cas où une SB est éteinte. Ainsi, nous réduisons la densité du réseau et la consommation d'énergie tout en assurant la couverture des utilisateurs. Nous donnons dans ce qui suit plus de détails sur la transformation graphique:

- Nous considérons le graphe acyclique orienté $G(V, E)$ tel que V est l'ensemble des nœuds représentant les SBs et E l'ensemble des arêtes représentant les relations de couverture entre les SBs; la contrainte de couverture est donc toujours respectée. Par exemple, si $v_i, v_j \in V$ sont associées par $e_{ij} \in E$, alors, cela signifie que BS_i couvre BS_j .
- Les arêtes sont pondérées et expriment l'énergie économisée en affectant les utilisateurs de BS_j à BS_i (BS_i couvre BS_j). Nous exprimons ces poids par w_{ij} tels que:

$$w_{ij} = \begin{cases} E_j - \delta_{ji} & \text{si } c_i + c_j \leq C_{tot_i} \text{ et } E_j - \delta_{ji} > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.7)$$

$w_{ij} \geq 0$, $\forall e_{ij} \in E$. Cette condition permet de respecter la contrainte de la capacité.

En ayant la transformation graphique expliquée ci-dessus, nous devons trouver une solution optimale qui nous permet de réduire le nombre de SBs. Pour cela, nous utilisons une approche basée sur le couplage de graphes. Nous appliquons dans un premier temps l'algorithme du «Maximum Weight Matching» sans tenir compte de l'orientation des arêtes. Cet algorithme nous permet de prendre des décisions indépendantes et disjointes avec une faible complexité.

A chaque étape de l'algorithme proposé, nous déterminons le «Maximum Weight Matching» noté M , puis nous contractons l'ensemble des arêtes résultant de ce dernier pour obtenir un nouveau graphe réduit. L'algorithme du «Maximum Weight Matching» nous permet de trouver l'ensemble des arêtes qui optimisent la consommation d'énergie. D'une autre manière, l'algorithme nous permet de déterminer les affectations d'utilisateurs devant être faites entre les SBs pour maximiser l'économie d'énergie.

La contraction d'une arête $e_{ij} \in M$, signifie que BS_j est éteinte et sa capacité est gérée par BS_i . Ainsi, avant de contracter les arêtes, on vérifie qu'il y a suffisamment de capacité dans la SB réceptrice, si la condition est vérifiée, alors l'arête est supprimée. L'algorithme est répété jusqu'à ce que tous les poids s'annulent, ce qui signifie qu'aucun gain supplémentaire ne peut être obtenu. Fig. 4.1 illustre un exemple d'une étape de l'algorithme proposé.

Nous rappelons que le graphique est orienté acyclique (si BS_i couvre BS_j , alors BS_j ne peut pas couvrir BS_i).

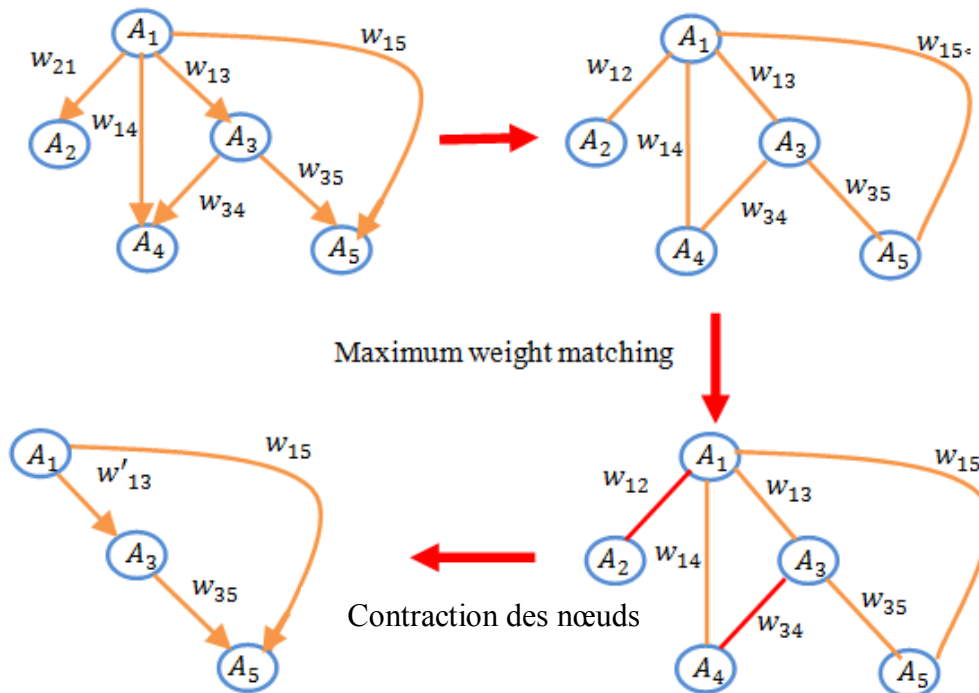


Fig. 4.1 Exemple d'une étape de l'algorithme proposé

Dans l'exemple précédent, les arêtes e_{12} et e_{34} sont contractées ce qui signifie que les SBs A_2 et A_4 sont éteintes et leurs utilisateurs sont affectés aux SBs A_1 et A_3 , respectivement.

La complexité de l'algorithme proposé est de $O(ev^2)$, car celui-ci est exécuté $O(v)$ fois (v et e sont le nombre total de nœuds et d'arêtes du graphe G , respectivement) et l'opération la plus coûteuse à l'intérieur de la boucle est la mise à jour du graphe avec une complexité de $O(ev)$.

Nous donnons dans le Tableau. 4.1, le pseudo-algorithme de l'approche proposée.

Dans le cas de l'augmentation de la charge de trafic après la réduction de la densité, certaines SBs du réseau doivent être allumées. Cela est géré d'une manière simple à l'aide de notre approche en procédant comme suit: Au moment où une SB atteint sa charge maximale, son premier descendant (SB) est activé.

4.3 Expérimentations

Nous discutons dans cette section nos résultats expérimentaux. Nous considérons pour la simulation, un réseau composé d'une Macrocell, de 30 Microcell et de 50 Picocell dans un premier temps. Nous supposons que chaque utilisateur du réseau nécessite une capacité de 1Mb/s. Les paramètres d'énergie utilisés pour chaque type de SB sont définis dans le Tableau. 4.2.

Tableau. 4.1 Algorithme basé sur le couplage

$G_1 = G_0, n:=1$
 Répéter
 Trouver le «Maximum Weighted Matching», M
 dans G_n
 Si $e_{ij} \in M$ alors
 si $w_{ij} > 0$
 contracter e_{ij}
 éteindre BS_j
 affecter les utilisateurs de BS_j à BS_i
 //mise à jour des poids
 Si $c_i + c_p \leq C_{tot_p}$ et $w_{pi} + k_p \cdot \frac{c_i}{C_{tot_p}} > 0$
 avec P parent de i

$$w_{pi} = w_{pi} + k_p \cdot \frac{c_i}{C_{tot_p}}$$

 sinon $w_{pi} = 0$
 supprimer $e_{lj}, e_{jl} \forall l \in V$
 n:=n+1
 Gn+1 est le nouveau graphe
 Jusqu'à $w_{ij} = 0, \forall i, j$

Tableau. 4.2 Paramètres des SBs

Paramètre	Valeur
m_i (macrocell)	800W
k_i (macrocell)	500W
m_i (microcell)	130W
k_i (microcell)	50W
m_i (picocell)	13W
k_i (picocell)	0.2W

Nous étudions d'abord l'efficacité énergétique (l'énergie consommée par bit) du réseau avant et après l'utilisation de notre heuristique. Nous varions alors la charge de trafic et nous calculons l'énergie consommée par bit. Les résultats obtenus sont illustrés sur la Fig.4.2. Les résultats représentent la moyenne de l'efficacité énergétique trouvée en répétant l'expérience 10 fois. Nous constatons qu'en utilisant notre méthode, l'énergie consommée par bit est réduite significativement en particulier pendant les périodes à faible charge de trafic où elle atteint environ 70% de gain. Lorsque la charge de trafic augmente, à partir d'un certain seuil, l'énergie consommée en utilisant notre méthode se rapproche de l'énergie consommée initialement. Du fait que plus de SBs sont allumées pour gérer la capacité requise.

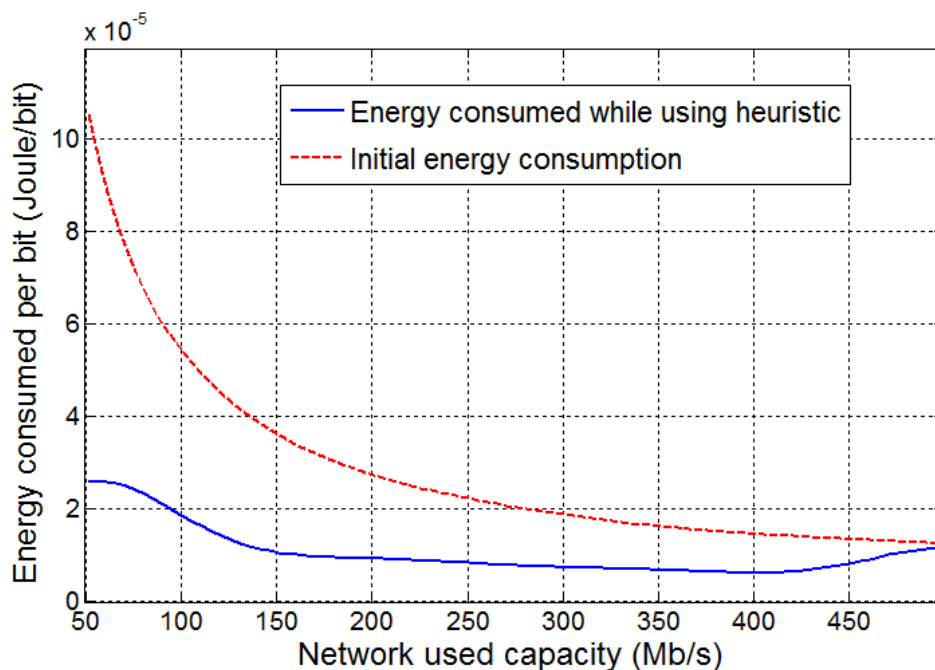


Fig. 4.2 Energie consommée par bit en fonction de la charge de trafic

Pour valider la performance de notre méthode, nous étudions à la fois l'efficacité énergétique et le temps de traitement. Nous effectuons d'abord une étude comparative entre notre heuristique et la solution optimale (la solution optimale est trouvée en utilisant un algorithme itératif pour des cas particuliers qui peuvent être calculés dans un temps acceptable). Les résultats sont présentés dans le Tableau. 4.3, où nous comparons le temps de traitement, ainsi que l'efficacité énergétique des deux solutions en faisant varier le nombre des relations de couverture entre SBs. Les résultats du Tableau. 4.3 montrent que l'heuristique proposée donne des résultats proches de l'optimale en termes d'efficacité énergétique avec une erreur moyenne de ($\approx 3.5\%$). Le temps de calcul présenté en seconde, montre que notre approche réduit d'une manière significative le temps de traitement par rapport à l'algorithme itératif.

Tableau. 4.3 Comparaison entre la solution optimale et l'heuristique proposée

Relation de couverture	Temps de calcul (s)		Efficacité énergétique (Kb/joule)		
	Solution optimale	Heuristique	Solution optimale	Heuristique	Erreur
19	68.04	0.009	84.81	81.56	3.83%
20	152.08	0.0119	69.54	66.71	4.06%
21	299.32	0.0128	68.68	66.88	2.62%
22	594.76	0.0167	70.47	67,47	3%
23	1201.5	0.0173	67.34	64.59	4.08%

Pour étudier la performance de notre heuristique avec des données réelles (c.-à-d., simuler le fonctionnement d'un réseau au cours des différentes périodes journalières), nous considérons la variation du débit moyen par cellule pendant les heures de nuit comme montré dans [62]. Le débit moyen utilisé dans une cellule diminue de minuit jusqu'à 5 heures (voir le Tableau. 4.4).

Nous appliquons notre heuristique par rapport à ces données tout en augmentant la fréquence d'application de notre approche. La Fig. 4.3 montre qu'en appliquant l'heuristique proposée, l'énergie économisée augmente pendant toute la période de test en raison de la diminution du nombre d'utilisateurs et la possibilité d'éteindre certaines SBs. Le pourcentage de l'énergie économisée dépend de la fréquence d'application de notre approche. De meilleurs résultats sont obtenus lors de l'utilisation de l'heuristique d'une manière plus fréquente. L'économie d'énergie peut atteindre 70% lors de l'application de l'heuristique avec un intervalle d'une heure pendant la période étudiée.

Tableau. 4.4 Le débit moyen par cellule durant la nuit

Heure	0	1	2	3	4	5
Débit moyen (Mb/s)	4	3	1.8	1.5	1.2	1

Le pourcentage d'énergie économisée, sur la Fig. 4.3, est calculé par le rapport de l'énergie économisée cumulée sur l'énergie consommée.

Pour étudier la manière avec laquelle le réseau réagit par rapport à l'ajustement de la densité, nous montrons dans Fig. 4.4, les taux de transfert d'utilisateurs résultant de l'application de l'heuristique. Nous considérons dans cette expérience, 10 SBs de chaque type (Picocell et Microcell). Le taux de transfert se traduit par le pourcentage d'utilisateurs qui doivent changer leur SBs initiales suite à la réduction de la densité. Nous rappelons qu'en utilisant notre

approche qui présente les relations de couvertures entre les SBs sous la forme d'un graphique, nous garantissons que les utilisateurs soient toujours couverts par au moins une SBs active.

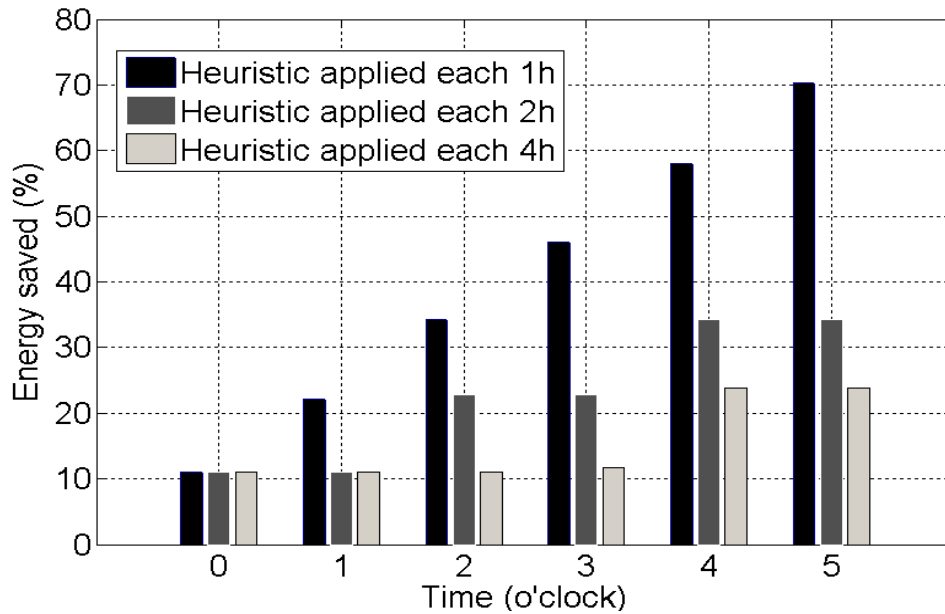


Fig. 4.3 Energie consommée suivant les heures journalières avec l'utilisation de l'heuristique proposée

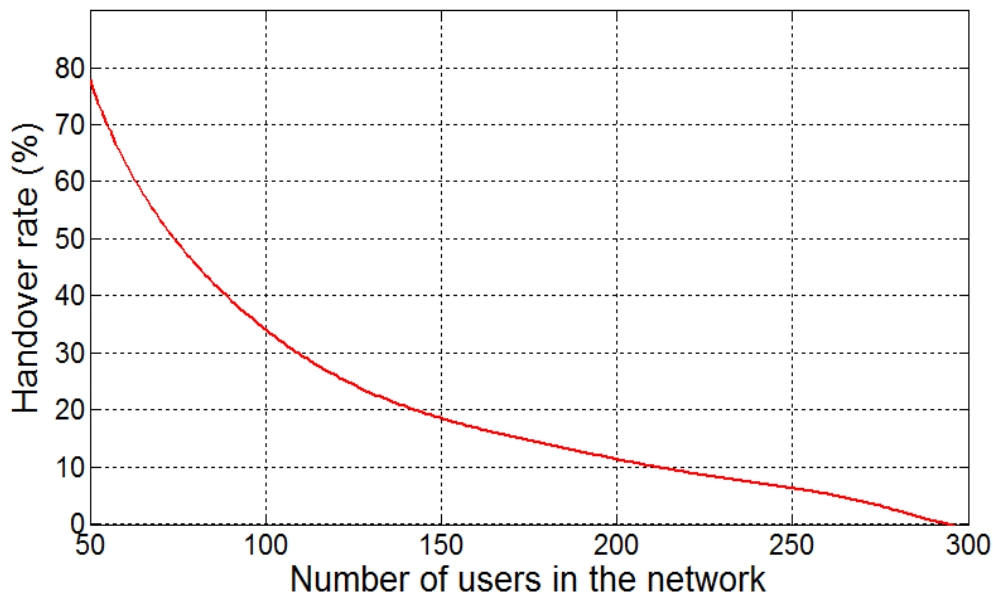


Fig. 4.4 Taux de handover en fonction du nombre d'utilisateurs dans le réseau

Les résultats montrent que le taux de transfert est élevé lorsque le nombre d'utilisateurs est faible. Avec un faible nombre d'utilisateurs au sein du réseau, plusieurs SBs sont éteintes, ce qui réduit de manière significative la densité du réseau obligeant plusieurs utilisateurs à changer de cellule. Le taux de transfert diminue avec le nombre croissant d'utilisateurs jusqu'à ce qu'il atteigne son minimum au moment où aucune SB ne peut être éteinte.

A partir des Fig. 4.3 et Fig. 4.4, nous déduisons qu'il existe une relation entre le taux de transfert et le gain en énergie de telle sorte que le taux de transfert augmente en fonction du gain.

Pour voir comment les différents types de SBs réagissent au processus d'ajustement, nous étudions dans Fig. 4.5 le nombre de SBs éteinte de chaque type en fonction de la charge de trafic. Les résultats montrent que le nombre de Microcells éteintes est plus élevé en présence d'une faible charge de trafic, en raison du faible nombre d'utilisateurs par microcellule qui se traduit par moins d'efficacité énergétique. En éteignant les microcellules, un grand pourcentage d'énergie est économisé étant donné leur forte consommation comparativement aux Picocells. Lorsque le nombre d'utilisateurs augmente, l'efficacité des Microcells augmente. Cependant, plus de Picocells sont éteintes vu la nécessité de laisser les Microcell allumées pour garantir la couverture des utilisateurs.

Les expériences montrent qu'une efficacité énergétique est améliorée considérablement en utilisant notre approche. Le processus d'optimisation du réseau est effectué avec peu de complexité et ceci revient à l'utilisation de l'algorithme du «Maximum-Weight Matching» permettant de prendre plusieurs décisions en même temps (Les arêtes sélectionnées par l'algorithme sont indépendantes).

Le taux de transfert résultant de l'ajustement du réseau peut être réduit en appliquant l'heuristique périodiquement dans des intervalles plus larges (avec des intervalles plus large le réseau conserve son état pour une durée plus longue).

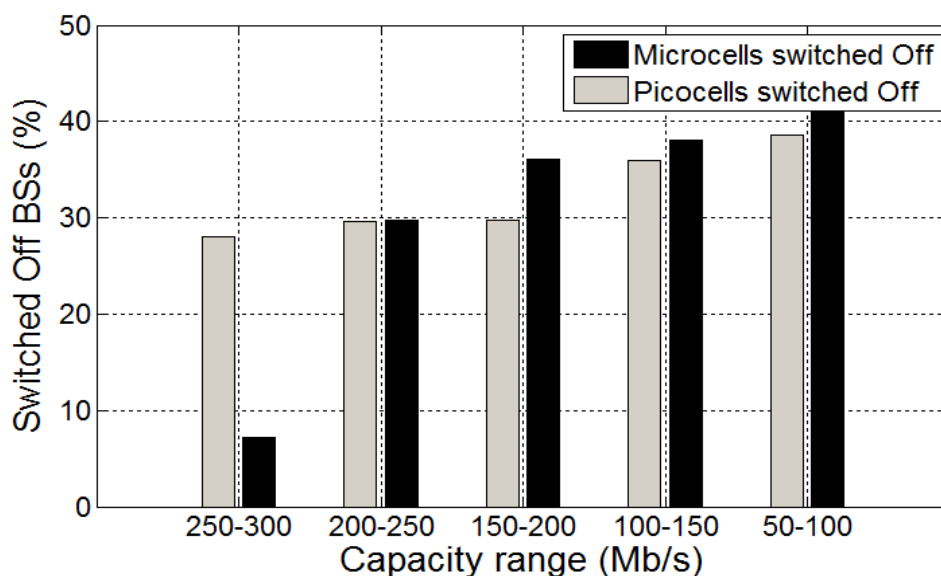


Fig. 4.5 Pourcentage de SBs éteintes en fonction de la charge de trafic

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous proposons une heuristique basée sur le « Maximum-Weight Matching » ; le but est de trouver une configuration réseau optimale conduisant à minimiser la consommation d'énergie. La méthode proposée consiste à représenter les relations de couverture réseau entre les SBs pour assurer la couverture des utilisateurs et pour résoudre le problème de leur affectation. Un algorithme est proposé par la suite pour déterminer le « Maximum Weight Matching » qui se traduit par le gain en énergie pouvant être obtenu. La réduction de la densité du réseau se fait par la contraction de l'ensemble des arêtes résultant de ce dernier pour obtenir un nouveau graphe.

Pour valider la performance de notre méthode, nous avons étudié au cours de nos simulations à la fois l'efficacité énergétique et le temps de traitement en comparant les résultats obtenus par notre heuristique et la solution optimale (trouvée en utilisant un algorithme itératif pour des cas particuliers). Une simulation avec des données de trafic réelles relatives à des périodes journalières précises, a démontré que la précision de notre approche proposée est estimée à 3,5%, avec 70% de gain en énergie durant les périodes à faible charge de trafic.

Dans le chapitre suivant, nous nous servons du protocole de handover utilisé dans les réseaux hétérogènes pour faire en sorte que les utilisateurs adoptent un comportement collaboratif, dans le but de réduire la consommation énergétique des réseaux.

CHAPITRE V: MIH POUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE

5.1. Introduction

Au niveau de ce chapitre, nous proposons de faire en sorte que le protocole de handover utilisé dans les réseaux hétérogènes fonctionne d'une manière collaborative, dans le but de réduire la consommation énergétique des réseaux. Notre étude est basée sur le protocole MIH [8]. Nous apportons des modifications au niveau des messages utilisés dans celui-ci pour créer une version économe en énergie. Les améliorations apportées sur le protocole MIH permettent la collecte d'informations concernant l'état du réseau ; informations que nous utilisons comme des statistiques et des indicateurs contribuant à gérer sa densité. Nos expériences sont effectuées en utilisant NS2.29 et l'extension de NIST (National Institute of Standards and Technology) dédiée au protocole MIH.

Ce chapitre est structuré comme suit :

- Définition de l'infrastructure du réseau utilisée.
- L'utilisation du protocole MIH pour l'économie de l'énergie dans la littérature.
- Proposition d'une approche d'économie d'énergie basée sur le protocole MIH.
- Etude comparative de notre solution par rapport au protocole MIH classique.
- Conclusion sur l'approche proposée et les résultats obtenus.

5.2. Infrastructure du réseau

L'infrastructure de notre réseau étudié est illustrée dans la Fig. 3.1 Nous considérons le cas d'un réseau hétérogène contenant des SBs WiMax et des points d'accès WiFi couverts par une SB cellulaire.

La réduction de la consommation d'énergie se fait par la réduction de la densité du réseau en faisant fonctionner moins de cellules. Pour ce faire, nous utilisons un processus de vote (Fig. 5.1), de telle sorte que si le nombre d'utilisateurs qui souhaitent utiliser une cellule donnée est inférieur à un certain seuil, celle-ci sera éteinte. Des modifications sur le fonctionnement du protocole MIH sont nécessaires pour la mise en place de la solution.

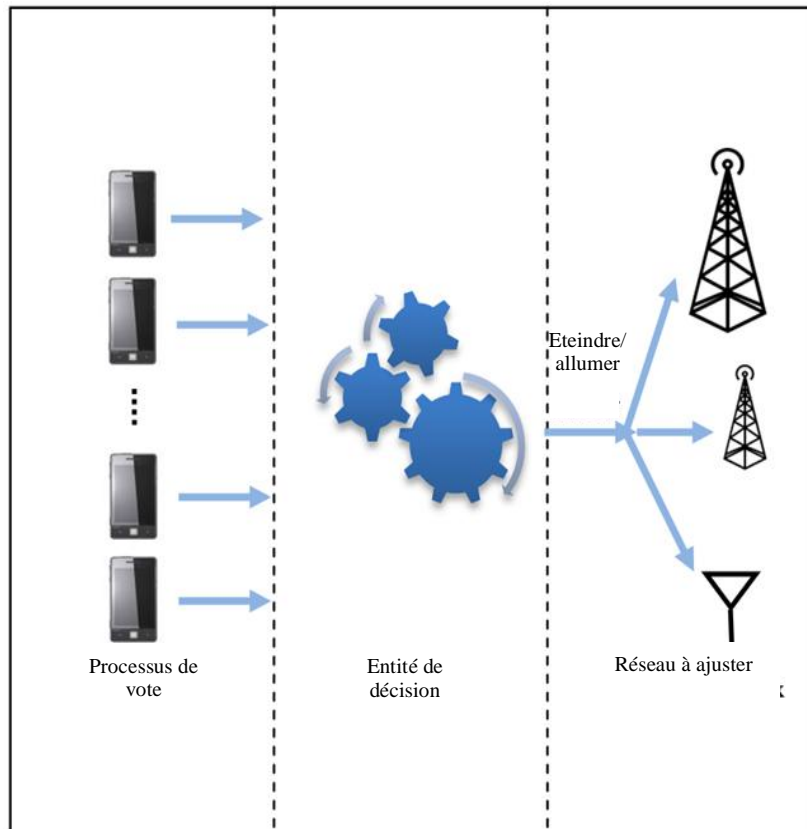


Fig. 5.1 Protocole de handover collaboratif

5.3. MIH pour l'économie de l'énergie

Contrairement aux autres travaux qui traitent de la consommation d'énergie dans les nœuds mobiles, l'approche proposée se sert du protocole MIH comme un outil de collaboration entre les nœuds mobiles et les différentes cellules. L'objectif est de réduire l'énergie consommée du côté des réseaux d'accès, tout en satisfaisant les besoins de la majorité des utilisateurs. La consommation d'énergie des réseaux d'accès n'est pas proportionnelle à leur utilisation. Nous réduisons alors leur densité pour maximiser l'utilisation de SBs actives.

5.3.1. Collecte d'informations sur le réseau

Avant de présenter nos modifications au niveau du protocole MIH, nous montrons d'abord brièvement le fonctionnement de celui-ci Fig. 5.2.

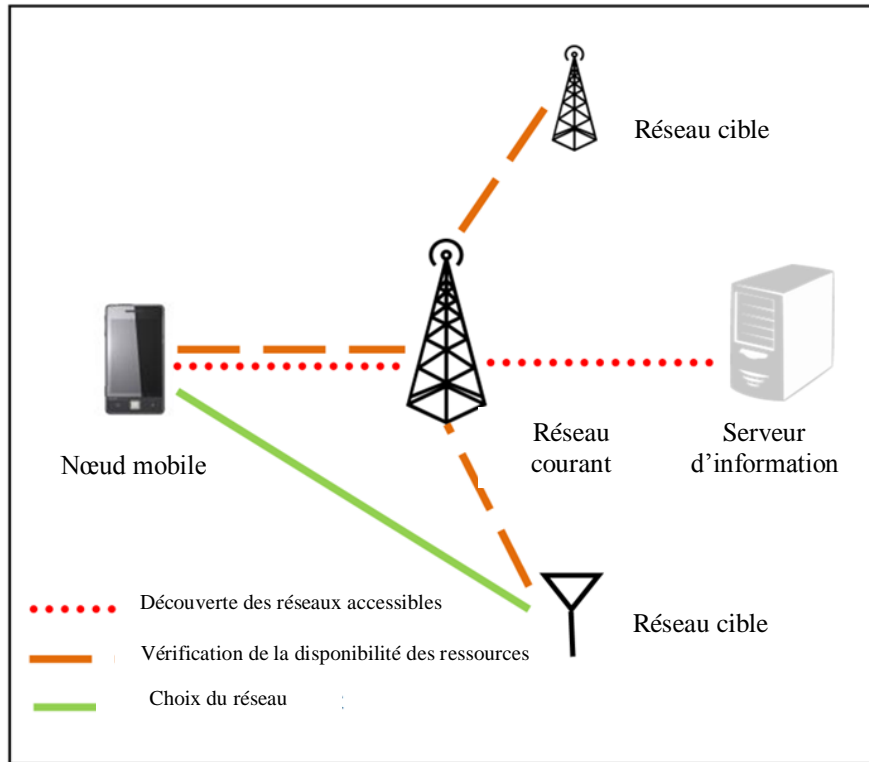


Fig. 5.2 Etapes utilisées dans un handover vertical

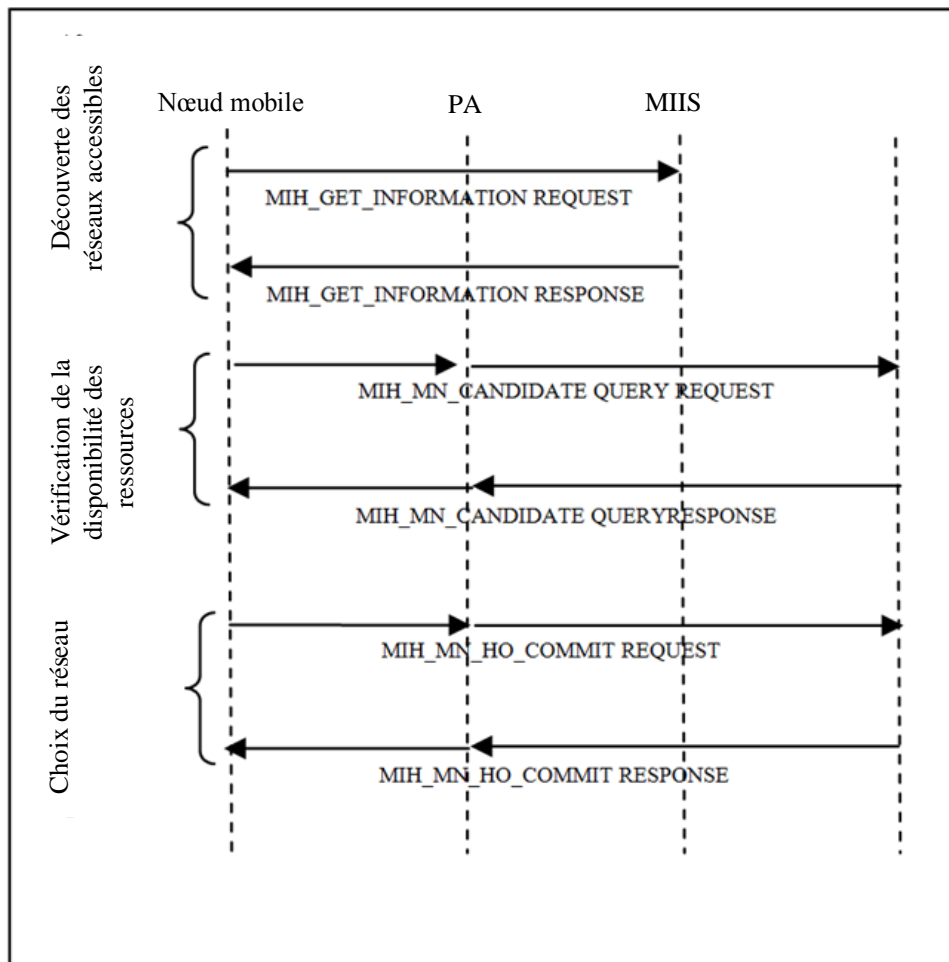


Fig. 5.3 Messages échangés lors d'un handover vertical

Nous distinguons trois étapes principales dans le processus handover en utilisant le protocole MIH (Fig. 5.3):

- La découverte du réseau: dans cette étape, les nœuds mobiles essaient d'obtenir des informations sur les réseaux d'accès existants qui leur sont accessibles, en envoyant une demande au MIIS (service d'information MIH). Le MIIS communique par la suite une liste contenant l'ensemble des SBs accessibles.
- La vérification de la disponibilité des ressources: après la réception de la liste des réseaux d'accès accessibles, le nœud mobile envoie une requête pour chaque réseau demandant des informations sur les ressources disponibles.
- Le choix du réseau: durant cette étape, le nœud mobile choisit le réseau offrant la meilleure QoS.

L'approche proposée s'intéresse aux deux requêtes suivantes:

- **MIH_MN_CANDIDATE QUERY RESPONSE** : ce message permet aux réseaux d'accès de répondre aux nœuds mobiles et de leur transmettre les informations concernant l'accessibilité du réseau. En se référant aux informations reçues, les nœuds mobiles choisissent le réseau auquel ils se connectent.
- **MIH_MN_HO_COMMIT_REQUEST**: Les nœuds mobiles utilisent ce message pour transmettre les informations nécessaires dans le but de s'associer au réseau choisis.

Ces requêtes sont utilisées pour collecter des statistiques sur l'état de chaque cellule au sein du réseau. La structure de stockage des informations est illustrée par le Tableau. 5.1.

Tableau. 5.1 Structure des informations dans le serveur

ID de l'AP	Type de l'AP	Etat de l'AP	Capacité utilisée
------------	--------------	--------------	-------------------

La capacité utilisée durant une période de temps T pour une cellule est estimée par rapport aux tentatives de connexion, tel que :

$$T = 2R/V \quad (5.1)$$

Où V représente la vitesse moyenne des nœuds mobiles et R est le rayon de la cellule (Fig.5.4).

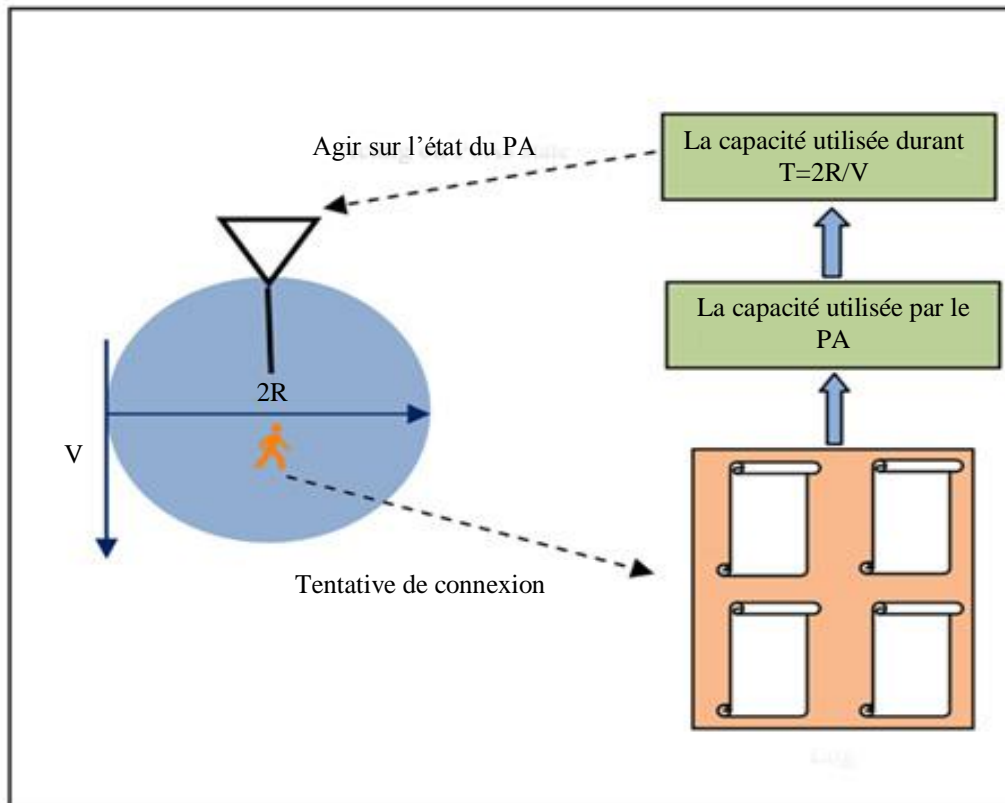


Fig. 5.4 Estimation de la capacité utilisée

Tableau. 5.2 Attributs du message MIH_MN_HO_COMMIT_REQUEST [8]

Intitulé	Type	Description
Destination Identifier	MIHF_ID	Identification de la destination
Status	STATUS	Statut de l'opération
Source Link Identifier	LINK_TUPLE_ID	Identification de la source
Preferred Candidate Link List	LIST(RQ_RESULT)	Liste suggérant les nouveaux PAs à prendre en considération
Preferred Candidate AuthenticatorList	LIST(LINK_AUTHENTICATORLIST)	Liste des données d'authentification pour le PA choisit

Pour prendre en compte les tentatives de connexion à un réseau actif ou inactif, nous procédons comme suit :

Au moment où le nœud mobile choisit le meilleur réseau auquel il souhaite se connecter (par le message MIH_MN_HO_COMMIT_REQUEST), en plus des informations conventionnelles, il informe le serveur d'information sur la possibilité qu'un réseau inactif soit aussi intéressant que celui qui est choisit.

Le message MIH_MN_HO_COMMIT_REQUEST aura donc la structure illustrée par le Tableau. 5.2.

Tableau. 5.3 Les attributs du message MIH_MN_CANDIDATE_QUERY RESPONSE [8]

Intitulé	Type	Description
Destination Identifier	MIHF_ID	Identification de la destination
Link Type	LINK_TYPE	Le type de la destination
Target Network Info	TGT_NET_INFO	Les caractéristiques des réseaux disponibles
Target sleep Network Info	TGT_NET_INFO	Les caractéristiques des réseaux éteints

Durant la procédure d'élection les nœuds mobiles doivent être en mesure de faire des choix parmi les réseaux inactifs. Pour ce faire nous étendons le message MIH_MN_CANDIDATE_QUERY_RESPONSE comme indiqué sur le Tableau. 5.3.

Les messages supplémentaires qui sont échangés après la modification du protocole MIH sont résumés dans Fig. 5.5.

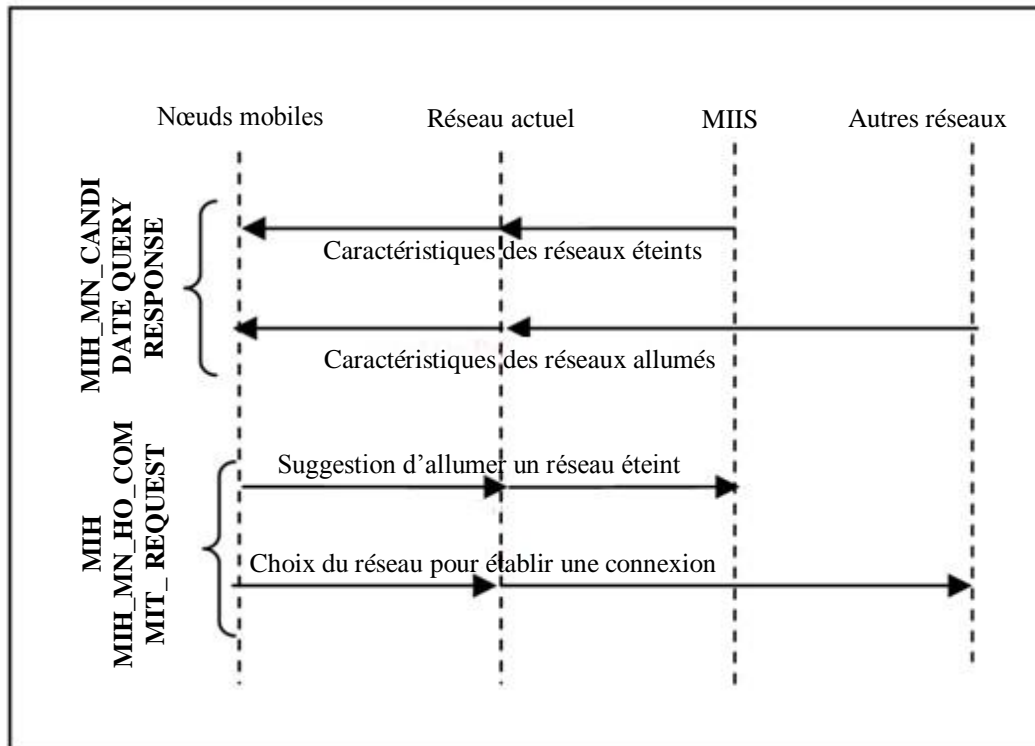


Fig. 5.5 Messages modifiés au niveau du protocole MIH

5.3.2. Éteindre/allumer les SBs

Dans cette étape, nous définissons les SBs les plus efficaces durant une période de temps T . Cela peut être fait en utilisant les informations recueillies sur les SBs choisies.

Afin de décider si un réseau d'accès mérite d'être activé ou désactivé, un seuil α est défini en fonction de la capacité du réseau. Dans notre cas, la valeur de α est empirique. Nous définissons α comme le pourcentage de la capacité utilisée dans une SBs. Nous faisons varier la valeur de α et étudions par la suite la consommation d'énergie ainsi que le taux de perte au sein du réseau.

Par la prise en compte des choix effectués par la totalité des nœuds mobiles, notre approche permet de satisfaire les exigences de la majorité des utilisateurs tout en économisant l'énergie consommée par l'ensemble du réseau. Nous résumons dans Fig. 5.6, les principales étapes de notre algorithme.

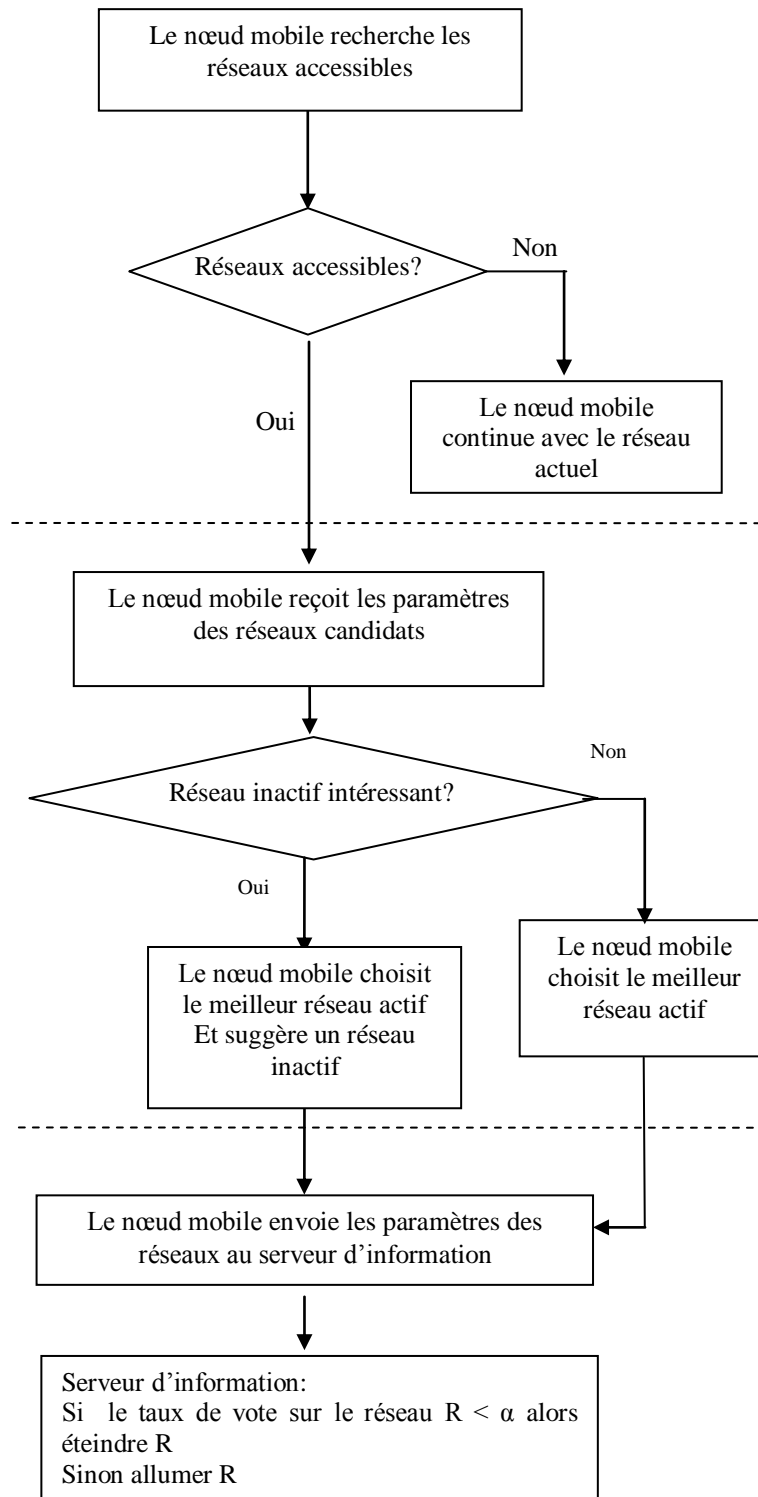


Fig. 5.6 Algorithme du protocole MIH modifié

5.4. Résultats de la simulation

Nos simulations sont effectuées en utilisant NS2.29 [26] avec l'extension NIST pour le protocole MIH. Nous apportons quelques modifications dans le module du MIH classique pour l'adapter à notre modèle proposé. Deux scénarios de simulation sont traités:

- Le premier scénario comprend l'utilisation de SBs WiMax ayant un rayon de couverture de 500m. L'objectif derrière l'utilisation de SBs WiMax (large couverture) est d'étudier avec plus de précision l'impact des interférences sur les performances du réseau.
- Le deuxième scénario a pour but de trouver les bons moments pour faire fonctionner les SBs WiMax et/ou les PAs WiFi. Ainsi, nous considérons des PAs WiFi ayant un rayon de 100m, et nous comparons leur efficacité énergétique par rapport aux SBs WiMax.

Les caractéristiques des réseaux d'accès WiMax et WiFi utilisées sont décrites dans le Tableau. 5.4 et le Tableau. 5.5, respectivement.

Nous effectuons nos expériences en utilisant un nombre croissant d'utilisateurs, qui se déplacent d'une manière aléatoire. Les tests effectués sont répétés 10 fois avant de prendre la moyenne comme résultat final.

Tableau. 5.4 Caractéristiques du WiMax

Paramètres	Valeurs
Modulation	OFDM 16QAM
UCD interval	5s
DCD interval	5s
Tx power	18W
Idle power	16.05W
Sleep power	4.8W

Tableau. 5.5 Caractéristiques du WiFi

Paramètres	Valeurs
Data rate	54Mb/s
Tx power	5 W
Idle power	4.6W
Sleep power	0.2W

5.4.1. Scénario WiMax

Dans cette première étape, nous comparons l'efficacité énergétique entre le protocole MIH développé par NIST et notre approche. Les conditions de la simulation sont citées ci-dessous :

- Nous utilisons plusieurs seuils pour α ; 25%, 50% et 75%. Rappelons qu'un seuil de 25%, signifie qu'un réseau d'accès est activé lorsque 25% de sa capacité est sollicitée par les nœuds mobiles.
- Nous utilisons la mesure ECR pour estimer l'efficacité énergétique; une valeur décroissante de ECR signifie que le réseau est plus économe en énergie.
- Nous considérons 700m de distance entre deux réseaux d'accès adjacents.

Les résultats obtenus sont illustrés sur Fig. 5.7 où la métrique ECR est calculée en faisant varier la quantité de données transmises. Les résultats montrent une amélioration significative au niveau de l'efficacité énergétique du réseau lors de l'utilisation de notre approche. L'énergie consommée par bit se rapproche de celle obtenue en utilisant le protocole MIH conventionnel lorsque le trafic augmente. Ceci peut être expliqué par le fait que les réseaux d'accès soient d'avantage sollicités en présence de plus de trafic ce qui nécessite plus de capacité et par la suite plus de SBs actives.

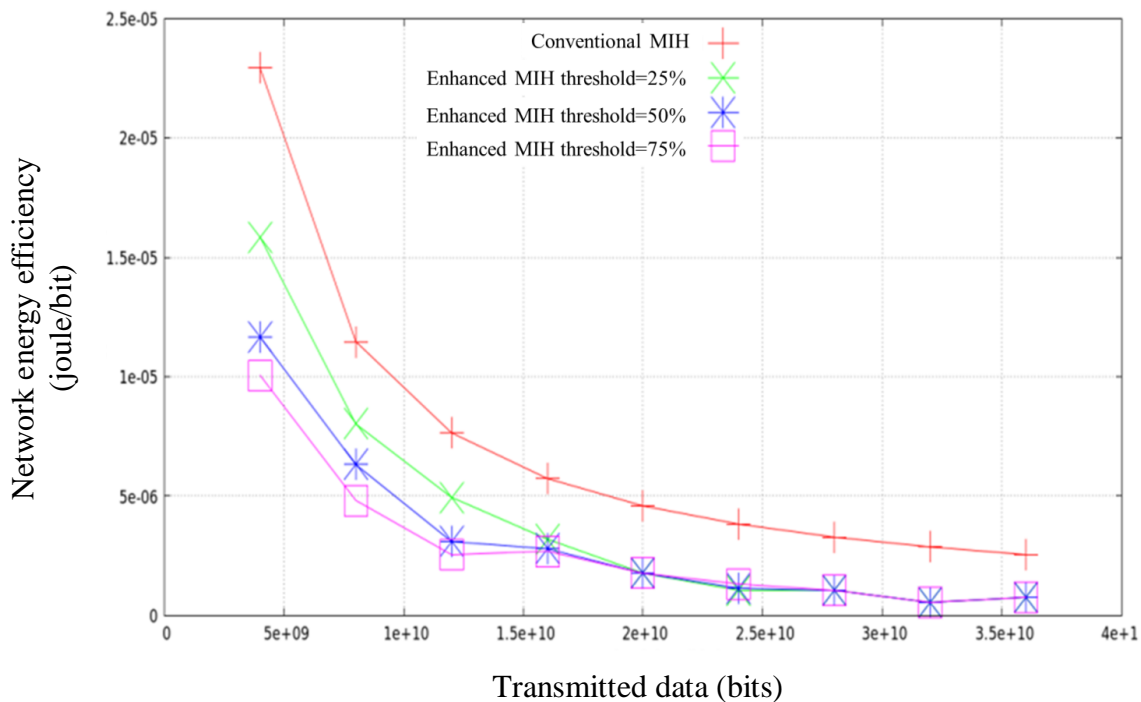


Fig. 5.7 Efficacité énergétique en fonction des données transmises

Pour voir l'impact de la réduction de la densité du réseau sur la performance, nous mesurons le taux de perte. Nous étudions d'abord le taux de perte pour plusieurs valeurs de α et nous faisons varier par la suite la distance séparant les différents sites pour déduire une distance optimale offrant les meilleures performances; les résultats obtenus sont illustrés sur Fig.5.8 et Fig.5.9, respectivement.

Nous pouvons voir à partir de Fig. 5.8, qu'en fixant la valeur de α à 75%, le réseau subit une importante perte de paquets, ceci est dû au manque de capacité au sein du réseau suite à la mise hors tension d'un grand nombre de réseaux d'accès (les réseaux d'accès qui ne sont pas utilisés à 75%). En utilisant des seuils à 50% et à 25%, le taux de perte diminue et de meilleurs résultats sont obtenus relativement au protocole MIH classique suite à l'atténuation des d'interférences (avec moins de réseaux d'accès la probabilité d'interférences diminue).

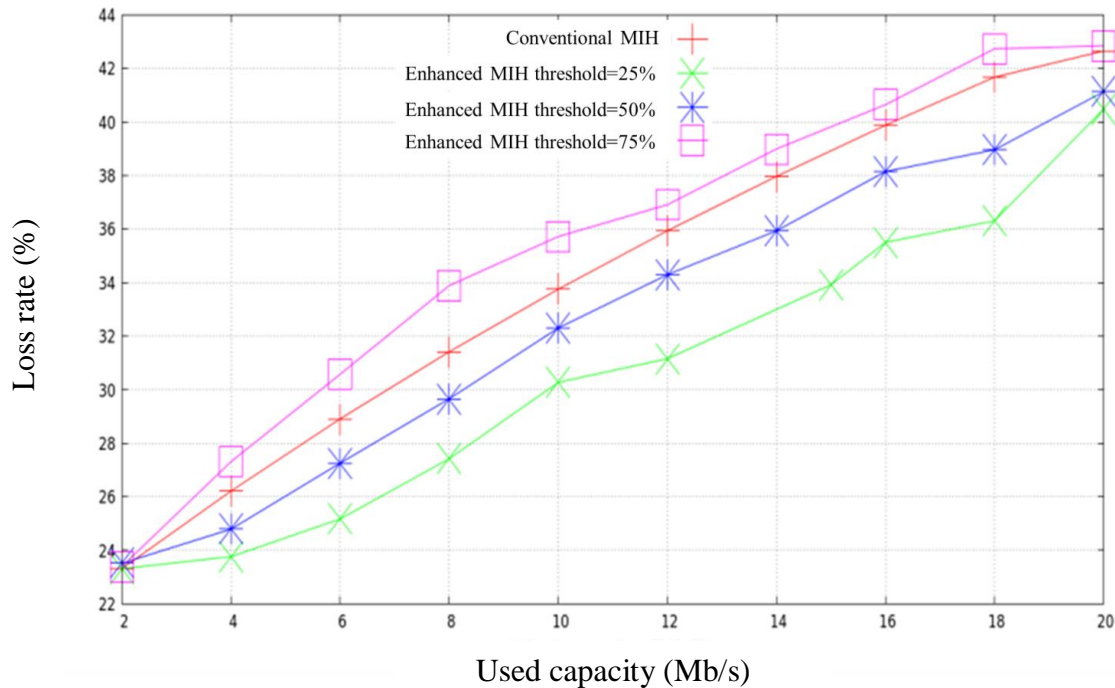


Fig. 5.8 Taux de perte en fonction de la capacité utilisée

Enfin, nous essayons de trouver la meilleure distance séparant deux réseaux d'accès pour moins de perte de paquets. Nous faisons varier la distance des réseaux adjacents de 100 m à 1000 m, et nous calculons le taux de perte pour chaque cas (Fig. 5.9).

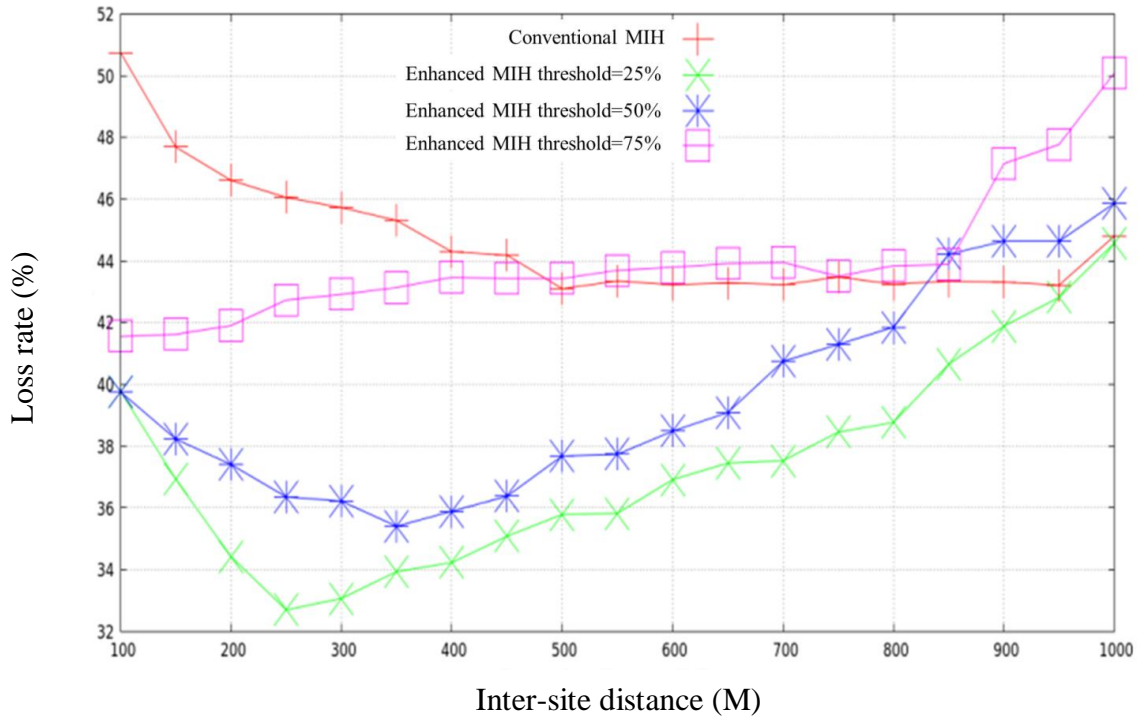


Fig. 5.9 Taux de perte en fonction de la distance entre sites

Nous constatons que le taux de perte perçu en utilisant notre approche est inférieur à celui du protocole MIH conventionnel quand la distance est courte. Ceci est expliqué par le fait que moins d'interférences se produisent lorsque la densité diminue. En prenant un seuil de 75% le taux de perte pour notre approche augmente et dépasse le cas d'un réseau MIH classique car la capacité devient insuffisante avec une grande distance (moins de réseaux sont accessibles). Avec les seuils 25% et 50%, le taux de perte de paquets baisse avec l'augmentation de la distance jusqu'à un certain seuil et croît par la suite.

Nous déduisons que pour une certaine distance et une certaine valeur de α , l'efficacité énergétique et la fiabilité peuvent atteindre l'optimum. Dans notre cas, l'utilisation d'une valeur de $\alpha = 50\%$ permet d'améliorer de façon significative l'efficacité énergétique tout en garantissant une bonne fiabilité des communications.

5.4.2. Scénario WiFi

Dans cette section, nous répétons les expériences précédentes en utilisant des PAs WiFi. Nous comparons les résultats que nous obtenons par rapport aux résultats précédents, pour définir les moments les plus appropriés pour utiliser un certain type de réseaux d'accès.

Fig.5.10, montre l'énergie consommée par bit en utilisant des PAs WiFi et des SBs WiMax.

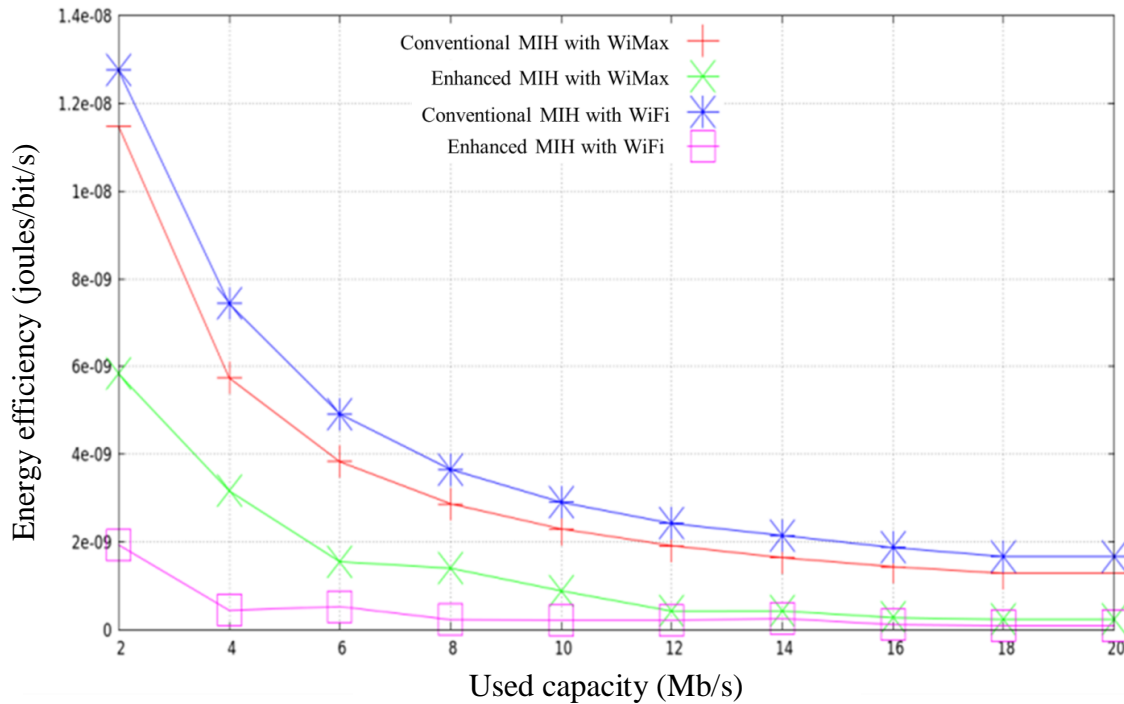


Fig. 5.10 Efficacité énergétique en fonction de la capacité utilisée pour les différentes SBs

Le graphique montre que plus d'énergie est économisée en utilisant plus de PAs WiFi. Les PAs WiFi sont plus efficaces en énergie par rapport aux SBs WiMax, de plus leur petite couverture radio permet de les éteindre sans avoir un grand impact sur le réseau. L'énergie consommée par bit s'approche pour les deux types de réseaux d'accès avec l'augmentation de la capacité utilisée.

Nous observons de Fig.5.11 que l'utilisation des PAs WiFi est plus avantageuse en termes de taux de perte lorsque la capacité utilisée est faible; Cependant, lorsque celle-ci augmente, le taux de perte augmente en raison des handover fréquents.

Enfin nous illustrons le comportement du réseau en utilisant notre approche par Fig.5.12

5.4.3. Utilisation du WiMax et du WiFi

Dans cette partie, nous combinons l'utilisation des deux technologies WiMax et WiFi dans le même réseau. Nous basculons entre l'utilisation de chaque type en tenant compte des seuils déduits des simulations précédentes et qui se résument comme suit :

- Les PAs WiFi montrent une plus grande efficacité en termes d'énergie et de performance lorsque la capacité utilisée est au-dessous de 9Mb/s.
- L'énergie consommée par bit est approximativement la même pour les SBs WiMax et WiFi lorsque la capacité utilisée atteint 12 Mb/s

Nous définissons donc le seuil β calculé par la moyenne de ces deux valeurs. Les points d'accès WiFi sont allumés si la capacité utilisée est au-dessous de β , autrement les SBs WiMax sont allumées. Les résultats sont illustrés sur Fig. 5.13 et Fig. 5.14 où nous pouvons voir que la performance du réseau est nettement améliorée avec moins d'énergie consommée suite à l'adaptation des paramètres α et β pour une meilleure performance et efficacité énergétique.

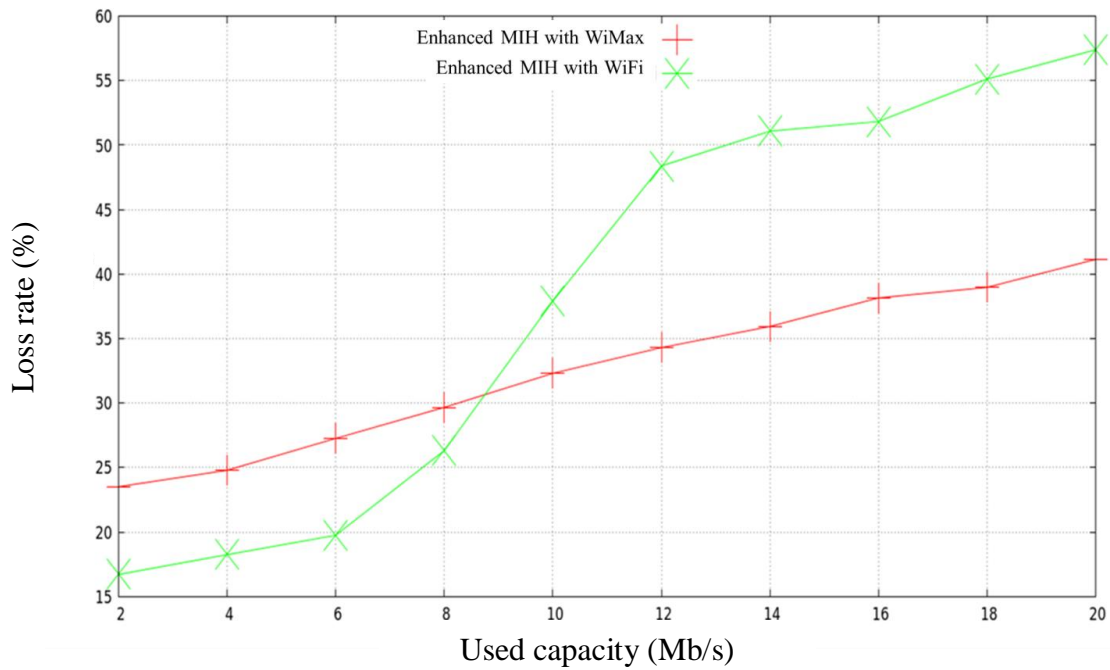


Fig. 5.11 Taux de perte en fonction de la capacité en utilisant des SBs WiMax et des points d'accès WiFi

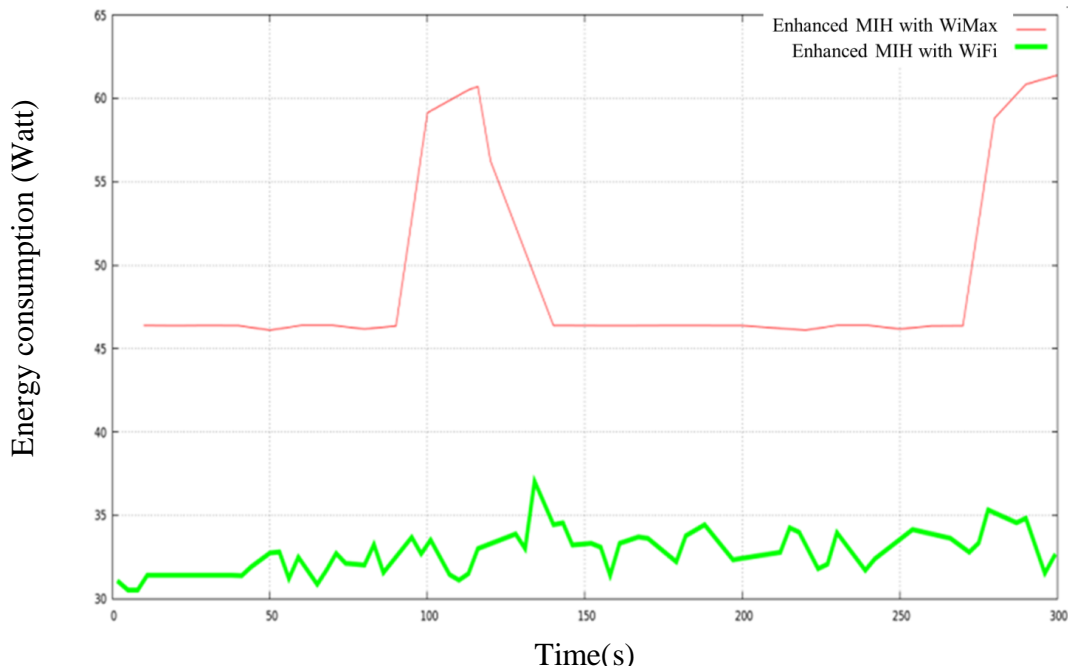


Fig. 5.12 Energie consommée en fonction du temps de simulation

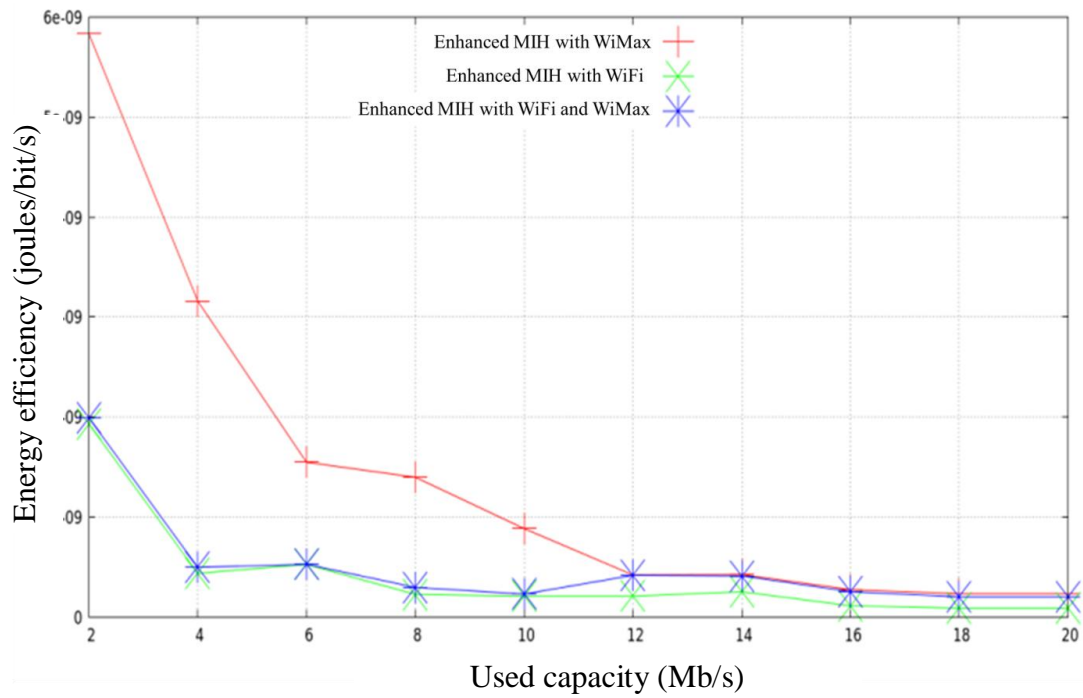


Fig. 5.13 Efficacité énergétique en fonction de la capacité en utilisant un réseau composé de SBs WiMaX et de points d'accès WiFi

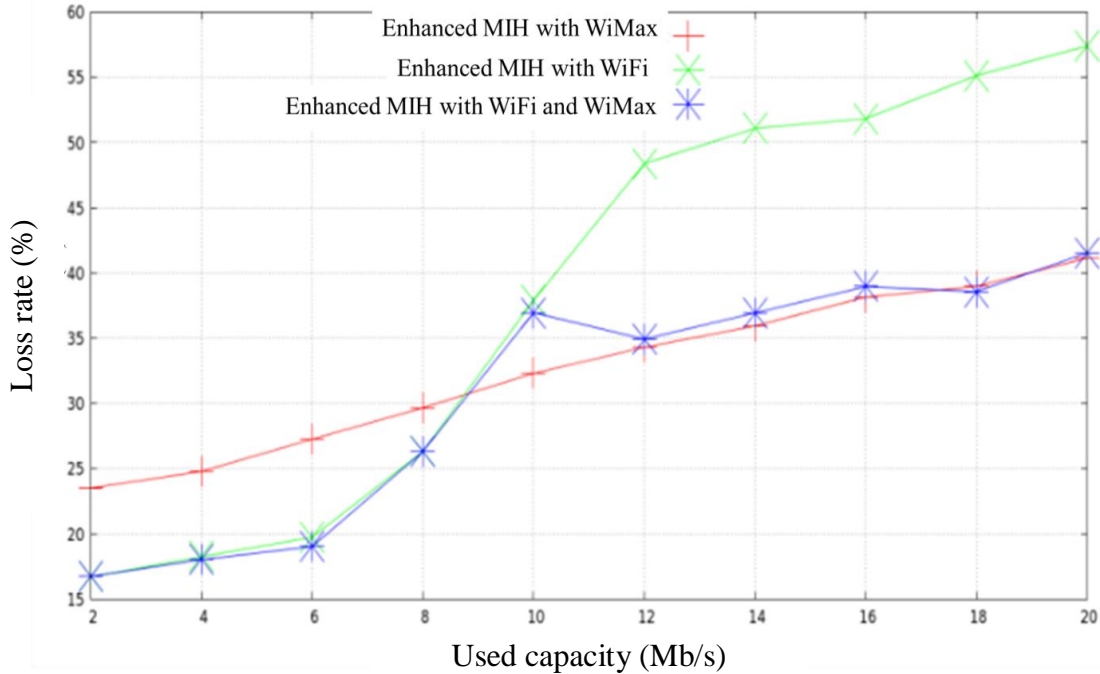


Fig. 5.14 Taux de perte en fonction de la capacité énergétique en utilisant un réseau composé de SBs WiMaX et de points d'accès WiFi

5.5. Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre le problème de l'économie d'énergie au sein des réseaux hétérogènes. L'approche proposée est basée sur l'utilisation du protocole MIH, nous nous sommes servis de ce dernier en tant qu'outil pour économiser l'énergie consommée.

L'objectif visé après les modifications apportées est de faire en sorte que les nœuds mobiles adoptent un comportement collaboratif et définissent les réseaux méritant d'être éteints ou allumés.

L'approche proposée s'intéresse à deux requêtes principales utilisées dans le protocole MIH, ces deux requêtes permettront d'acquérir des statistiques sur le nombre, le positionnement et les préférences des utilisateurs. Les données collectées sont utilisées par la suite pour éteindre/allumer les SBs les plus appropriées pour une consommation optimale.

Nous avons mené au cours de nos simulations deux séries de tests dans le but d'étudier avec précision l'impact des interférences sur les réseaux et de définir les moments idéaux pour faire fonctionner un type donné de SB.

Nos simulations ont été réalisées sur NS2.29 avec un module conçu pour le protocole MIH. Les résultats montrent que le fait de définir des seuils pour activer et désactiver un certain type de réseaux d'accès, permet d'obtenir une efficacité énergétique élevée avec une bonne performance des communications.

Dans le prochain chapitre, nous nous intéressons à l'étude d'un modèle complètement distribué ayant pour but de réduire les messages échangés ainsi que la complexité engendrée par le processus de découverte du réseau.

**CHAPITRE VI: PRISE DE DECISION
DISTRIBUEE BASEE SUR
L'APPRENTISSAGE**

6.1. Introduction

L'idée principale de ce chapitre est de proposer une méthode complètement distribuée dans le but de réduire l'énergie consommée par les réseaux hétérogènes. L'avantage d'un traitement distribué est de réduire les messages échangés ainsi que la complexité engendrée par la connaissance globale du réseau. Pour ce faire, nous proposons une méthode basée sur le CREB (Cell Range Expansion Bias) et la théorie des jeux.

Pour minimiser la consommation d'énergie, les valeurs optimales du CREB relatives à chaque cellule doivent être trouvées. Ce problème est NP-difficile, nous introduisons alors une approche d'apprentissage basée sur le MAB (Multi-Armed Bandit) pour permettre aux cellules d'apprendre les meilleures valeurs de CREB à travers plusieurs itérations. Les valeurs du CREB choisies dépendent de la consommation d'énergie instantanée, du débit et des interférences.

Le présent chapitre est structuré comme suit :

- Présentation de l'infrastructure du réseau étudié et la motivation derrière l'utilisation du CREB pour l'économie d'énergie.
- Expression du problème d'optimisation.
- Proposition d'une approche basée sur l'apprentissage avec la présentation du concept du MAB.
- Interprétations des résultats de simulation.
- Conclusion sur le CREB et son impact sur l'économie de l'énergie.

6.2. Infrastructure du réseau

Nous considérons dans notre méthode un réseau hétérogène composé d'une Macrocell et de plusieurs petites cellules : Picocell et Femtocell. Les utilisateurs se basent sur l'intensité du signal reçu pour se connecter à une SB. Nous présentons les paramètres du réseau comme suit :

- Le réseau est composé de n utilisateurs $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ et K cellules. Un utilisateur i associé avec la cellule k est noté par $u_{i,k}$.
- La cellule fonctionne avec une bande passante B contenant b blocs de ressources tel que $B = \{1, 2, \dots, b\}$.

Comme nous l'avons mentionné, nous utilisons le concept du CREB. Le CREB consiste à ajouter des poids à l'intensité du signal reçu. Le critère pour un utilisateur u d'effectuer un handover de la cellule j à la cellule k sera donc défini comme suit [63]:

$$(w_{k,u}^{pilot})dB + (R_k)dB > (w_{j,u}^{pilot})dB + (R_j)dB \quad (6.1)$$

$w_{k,u}^{pilot}$, $w_{j,u}^{pilot}$ représentent l'intensité du signal reçu de la part des SBs k et j , respectivement.

R_k , R_j représentent le CREB pour les SBs k et j , respectivement.

Dans l'approche proposée, chaque type de cellule possède ses propres valeurs de CREB:

$R_k = \{R_m, R_p, R_f\}$ tel que R_m , R_p et R_f représentent le CREB des Microcells, Picocells et Femtocells, respectivement. R_m , R_p et R_f contiennent un ensemble de valeurs représentant les valeurs à ajouter par rapport à l'intensité du signal reçu.

L'idée principale de notre approche est de trouver les valeurs du CREB permettant de réduire la consommation d'énergie. Le changement du CREB affecte l'association des nœuds mobiles aux SBs. D'une autre manière, nous cherchons à associer les nœuds mobiles aux SBs les plus efficaces en énergie. Pour ce faire, nous faisons en sorte que chaque cellule cherche à améliorer son efficacité énergétique. L'efficacité énergétique est définie par l'énergie consommée par rapport à la capacité utilisée dans une cellule. Notre problème d'optimisation consiste alors à trouver les valeurs permettant à une SB d'atteindre la meilleure efficacité énergétique.

6.3. Modélisation du problème d'optimisation

Nous commençons par exprimer le débit utilisé par l'utilisateur i dans la cellule k en utilisant le théorème de capacité de Shannon comme suit :

$$\varphi_{i(k)}(t) = \omega_{i,k} \log(1 + \lambda_{i,k}(t)) \quad (6.2)$$

$\omega_{i,k}$ est la bande passante allouée à l'utilisateur i par la cellule k .

$\lambda_{i,k}(t)$ est le rapport signal/bruit à un instant t et est calculé comme suit:

$$\lambda_{i,k}(t) = \frac{p_k \cdot g_{i,k}(t)}{\sum_{\substack{j \in K \\ j \neq k}} p_j \cdot g_{i,j}(t) + \sigma^2} \quad (6.3)$$

p_k est la puissance de transmission de la cellule k .

$g_{i,k}(t)$, $g_{i,j}(t)$ représentent le gain du canal de transmission entre la cellule k et l'utilisateur i et entre la cellule j et l'utilisateur i, respectivement.

σ^2 est la variance du bruit.

Nous définissons l'efficacité énergétique d'une cellule k à un instant t comme suit:

$$Eff_k(t) = \frac{\varphi_{k,tot}(t)}{\zeta_k(t)} \quad (6.4)$$

$\varphi_{k,tot}(t)$ est la capacité totale utilisée à un instant t

$\zeta_k(t)$ est l'énergie totale consommée par la cellule k à un instant t tel que [57]:

$$\zeta_k(t) = S_k + \frac{\varphi_{k,tot}(t)}{\varphi_{k,max}(t)} l_k \quad (6.5)$$

S_k est l'énergie statique.

l_k est l'énergie dépendante de la charge de trafic consommée par la cellule BS_k .

$\varphi_{k,max}(t)$ est la capacité totale qui peut être gérée par la cellule BS_k .

Nous exprimons ci-dessous le problème d'optimisation de l'efficacité énergétique pour une période T:

$$Max_{x_{i(k)}(t,R_k)} \sum_{t=0}^T \frac{\varphi_{k,tot}(t)}{\zeta_k(t)} \quad (6.6)$$

$$= Max_{x_{i(k)}(t,R_k)} \sum_{t=0}^T \left[\frac{\sum_{i \in U} x_{i(k)}(t,R_k) \cdot \omega_{i,k} \cdot \log \left(1 + \frac{p_k \cdot g_{i,k}(t)}{\sum_{\substack{j \in K \\ j \neq k}} p_j \cdot g_{j,k}(t) + \sigma^2} \right)}{\zeta_k(t)} \right] \quad (6.7)$$

Avec

$$x_{i(k),b}(t,R_k) \in \{0,1\} \quad (6.8)$$

$$\sum_{i \in U} x_{i(k),b}(t,R_k) = 1 \quad \forall b \quad (6.9)$$

$$\varphi_{i(k)}(t) \geq \varphi_{k,min} \quad (6.10)$$

$$x_{i(k),b}(t, R_k) = \begin{cases} 1 & \text{si le bloc de ressource } b \text{ est alloué} \\ & \text{à l'utilisateur } i \text{ dans la cellule } k \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (6.11)$$

$$p_k \leq p_{k,max} \quad (6.12)$$

Avec:

$x_{i(k)} = [x_{i(k),1}, \dots, x_{i(k),B}]$ le vecteur représentant l'état de chaque bloc de ressources dans la cellule k.

$p_{k,max}$ est la puissance maximale de transmission pour la cellule k.

$\varphi_{k,min}$ est la capacité minimale pouvant être attribuée à un utilisateur.

La condition (6.9) permet de garantir qu'un bloc de ressources ne soit alloué que pour un seul utilisateur à un instant t.

Pour résoudre ce problème, la valeur optimale du CREB doit être trouvée. Le changement au niveau du CREB affecte l'association des utilisateurs avec les cellules existantes. L'utilisation d'une valeur de CREB élevée pour une SB conduit à attirer plus d'utilisateurs, étant donné que l'intensité du signal perçue par l'utilisateur sera plus importante.

Nous proposons dans ce qui suit une approche basée sur l'apprentissage dans le but de réduire l'énergie consommée par un réseau hétérogène d'une manière distribuée.

Chaque cellule du réseau possède ses propres valeurs de CREB. Les utilisateurs se connectent aux SBs ayant l'intensité du signal la plus élevée. La capacité estimée est calculée par la formule exprimée sur (6.2). Par la connaissance de la capacité utilisée et de l'énergie consommée, nous pouvons estimer l'efficacité énergétique de chaque cellule. Une approche d'apprentissage basée sur le MAB est utilisée par la suite pour ajuster dynamiquement les valeurs du CREB à travers plusieurs itérations.

6.4. Approche basée sur le MAB

Les algorithmes du MAB sont utilisés généralement dans les systèmes multi-agents. Un problème de MAB classique se caractérise par de multiples manches indépendantes et un joueur. Le joueur apprend et joue sur plusieurs itérations la manche qui est censée maximiser sa récompense. L'apprentissage se fait à travers plusieurs itérations.

Pour être en mesure de choisir entre les différents manches existantes, une fonction de décision doit être définie.

Nous appliquons l'approche du MAB à notre problème en considérant les différentes cellules comme des joueurs qui essaient de maximiser leur efficacité énergétique par rapport à leurs manches [53]. Les manches d'une cellule k correspondent dans notre cas à une valeur de CREB $r_{j(k)}$ appartenant à l'ensemble R_k .

Une valeur initiale doit être attribuée à chaque manche afin d'exprimer la récompense que la cellule peut obtenir en choisissant celle-ci. La récompense est mise à jour par la suite en utilisant l'apprentissage. Nous exprimons la récompense en utilisant une manche $r_{j(k)}$ comme suit :

$$Eff_{k,r_{j(k)}}(t) = \frac{\varphi_{k,r_{j(k)},tot}(t)}{\zeta_{k,r_{j(k)}}(t)} \quad (6.13)$$

Pour obtenir les valeurs initiales de la récompense, chaque cellule doit tester l'ensemble de ses manches. Nous choisissons donc aléatoirement des manches pour chaque cellule k. Une fois la récompense initiale définie, les cellules choisissent la manche offrant la meilleure récompense. Fig. 6.1, illustre le processus du choix des manches. La fonction de décision permettant de faire ce choix est définie comme suit [64]:

$$d_{k,r_{j(k)}}(t) = u_{k,r_{j(k)}}(t-1) + \sqrt{\frac{2 \log\left(\sum_{j=1}^{|R_k|} n_{k,r_{j(k)}}(t-1)\right)}{n_{k,r_{j(k)}}(t-1)}} \quad (6.14)$$

$d_{k,r_{j(k)}}$ est la fonction de décision de la cellule k pour le manche $r_{j(k)}$. La manche $r_{j(k)}$ * choisit à un instant t est celui qui maximise la fonction $d_{k,r_{j(k)}}(t)$.

$n_{k,r_{j(k)}}(t)$ est le nombre de fois que la cellule k choisit le manche $r_{j(k)}$ comme étant le meilleur jusqu'à l'instant t.

$r_{j(k)}$ représente la manche j choisit par la cellule k.

$u_{k,r_{j(k)}}(t)$ est la récompense moyenne de la cellule k en utilisant la manche $r_{j(k)}$ à l'instant t.

$u_{k,r_{j(k)}}(t)$ est la moyenne de l'efficacité énergétique jusqu'à l'instant t:

$$u_{k,r_{j(k)}}(t) = \frac{s_{k,r_{j(k)}}(t)}{n_{k,r_{j(k)}}(t)} \quad (6.15)$$

$s_{k,r_{j(k)}}(t)$ est la récompense cumulée pour la manche $r_{j(k)}$ à l'instant t.

La fonction de décision utilisée est composée de deux termes, le premier représente la récompense moyenne, tandis que le deuxième prend en compte l'historique des manches utilisées.

Le pseudo algorithme de l'approche proposée est illustré par le tableau. 6.1.

Tableau. 6.1 Algorithme base sur l'apprentissage

1- Définir la récompense pour chaque manche

Pour $i=1$ jusqu'à $|R_k|$

- Chaque joueur choisit une manche $r_{j(k)}$ aléatoirement

- Calculer la récompense pour le manche choisit

$$u_{k,r_{j(k)}}(0) = \text{Eff}_{k,r_{j(k)}}(0)$$

Mise à jour de l'historique d'utilisation de la manche $r_{j(k)}$

$$n_{k,r_{j(k)}}(0) = 1$$

2- Choisir la manche maximisant la fonction de décision

Pour $t = 1, 2, 3 \dots$

//Chaque joueur calcule la fonction de décision pour les manches existantes

$$d_{k,r_{j(k)}}(t) = u_{k,r_{j(k)}}(t-1) + \sqrt{\frac{2 \log \left(\sum_{j=1}^{|R_k|} n_{k,r_{j(k)}}(t-1) \right)}{n_{k,r_{j(k)}}(t-1)}}$$

Choisir la manche maximisant la fonction de décision

$$r_{j(k)}^* = \text{argmax}_{r_{j(k)}}(d_{k,r_{j(k)}}(t))$$

Mise à jour de la récompense cumulée de la manche choisie

$$s_{k,r_{j(k)}^*}(t) = \text{Eff}_{k,r_{j(k)}^*}(t) + s_{k,r_{j(k)}^*}(t-1)$$

Mise à jour de l'historique de la manche utilisée

$$n_{k,r_{j(k)}^*}(t) = n_{k,r_{j(k)}^*}(t) + n_{k,r_{j(k)}^*}(t-1)$$

Si (la manche utilisée est la meilleur) alors

Mettre à jour la récompense de la manche utilisée

$$u_{k,r_{j(k)}}(t) = \frac{s_{k,r_{j(k)}^*}(t)}{n_{k,r_{j(k)}^*}(t)}$$

Sinon

Mettre à jour la récompense de la manche qui n'est pas utilisée

$$u_{k,r_{j(k)}}(t) = u_{k,r_{j(k)}}(t-1)$$

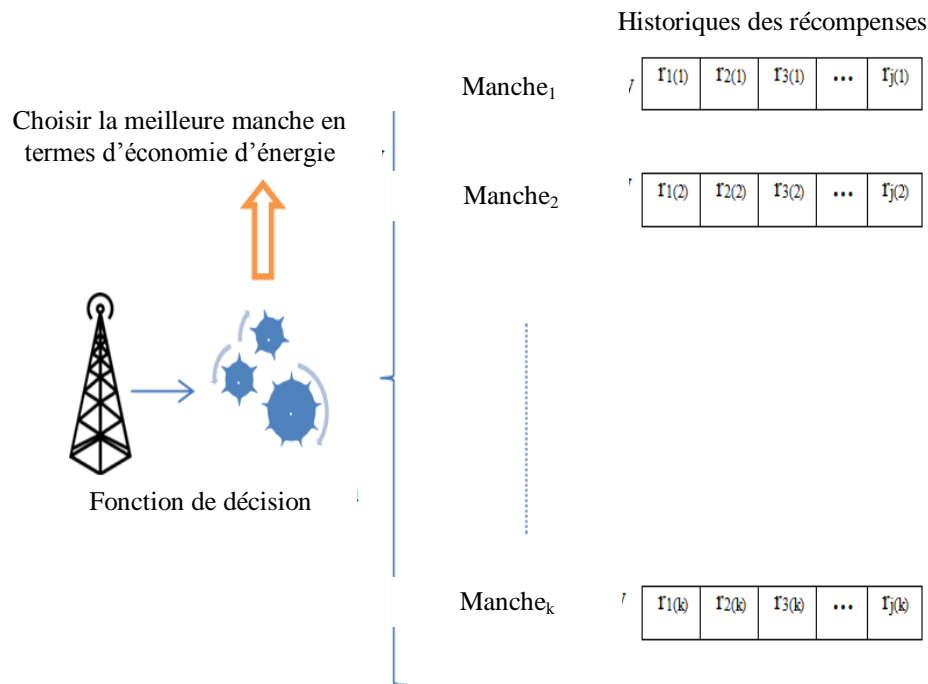


Fig. 6.1 Amélioration de l'efficacité énergétique en utilisant le « Multi-Armed Bandit »

6.5. Simulations et résultats

Partie 1:

Nous simulons dans cette section le fonctionnement de notre approche et comparons ses performances par rapport au nombre d'itérations et la capacité utilisée.

Nous utilisons un réseau composé d'une Macrocell couvrant un ensemble de Picocells et de Femtocells. Le positionnement des cellules au niveau du réseau est aléatoire. Le nombre de Picocells et de femtocells utilisés est de 5 et 10, respectivement. Nous supposons que les cellules du même type utilisent les mêmes paramètres; les caractéristiques de chaque cellule sont définies comme suit:

- La puissance d'émission maximale de la Macrocell, Picocells et Femtocells est fixée à 47, 37 et 27 dBm, respectivement.
- La capacité de la Macrocell est de 20Mb/s tandis que les Picocells et les Femtocells possèdent une capacité moyenne de 30Mb/s et 50Mb/s, respectivement.
- Le nombre d'utilisateurs dans le réseau est fixé dans un premier temps à 30. Les utilisateurs sont immobiles dans un premier temps pour pouvoir étudier l'efficacité du processus d'apprentissage.

- Chaque cellule a ses propres valeurs de CREB; dans notre cas, nous considérons les valeurs de chaque cellule comme suit:

$R_m = \{0\}$ pour la Macrocell , $R_p = \{0;3;6;9;12\}$ pour les Picocells et $R_f = \{0;3;6;9;12,15,18\}$ pour les Femtocells.

- La densité du réseau est réduite dans le cas de cellules vides.

Nous utilisons dans nos tests la métrique ECR [49] qui estime l'énergie consommée par bit et nous comparons les résultats obtenus par notre approche par rapport à un réseau hétérogène conventionnel.

Pour apercevoir l'énergie économisée en fonction de la charge de trafic en utilisant notre approche, nous faisons varier dans la Fig. 6.2, le nombre d'utilisateurs dans le réseau et nous calculons progressivement l'énergie consommée par bit. Les résultats montrent que l'énergie consommée par bit diminue avec la croissance de la charge de trafic. Les cellules ont tendance à être économes en énergie avec une charge de trafic élevée, car l'énergie consommée par bit diminue.

Nous étudions par la suite l'efficacité énergétique en fonction du nombre d'itérations pour différentes valeurs de capacité; Les résultats obtenus sont présentés sur Fig. 6.3. Nous constatons que l'énergie consommée par bit diminue avec l'augmentation du nombre d'itérations d'apprentissage. Les décisions prises par les cellules s'améliorent avec l'augmentation du nombre d'itération grâce à l'apprentissage.

Enfin, pour voir la manière avec laquelle le processus d'apprentissage réagit face à la vitesse des utilisateurs, nous effectuons des expériences en utilisant trois vitesses différentes 4m/s, 6m/s et 20m /s. Nous comparons ensuite l'efficacité énergétique pour chacune de ces valeurs (Fig.6.4).

Nous observons que la différence entre l'efficacité énergétique est minime lorsque l'écart entre les vitesses est petit (4m/s et 6m/s). Cependant, avec une vitesse de 20m/s, l'énergie consommée par bit augmente suite aux handover fréquents, qui se produisent au sein du réseau et qui causent le ralentissement du processus d'apprentissage.

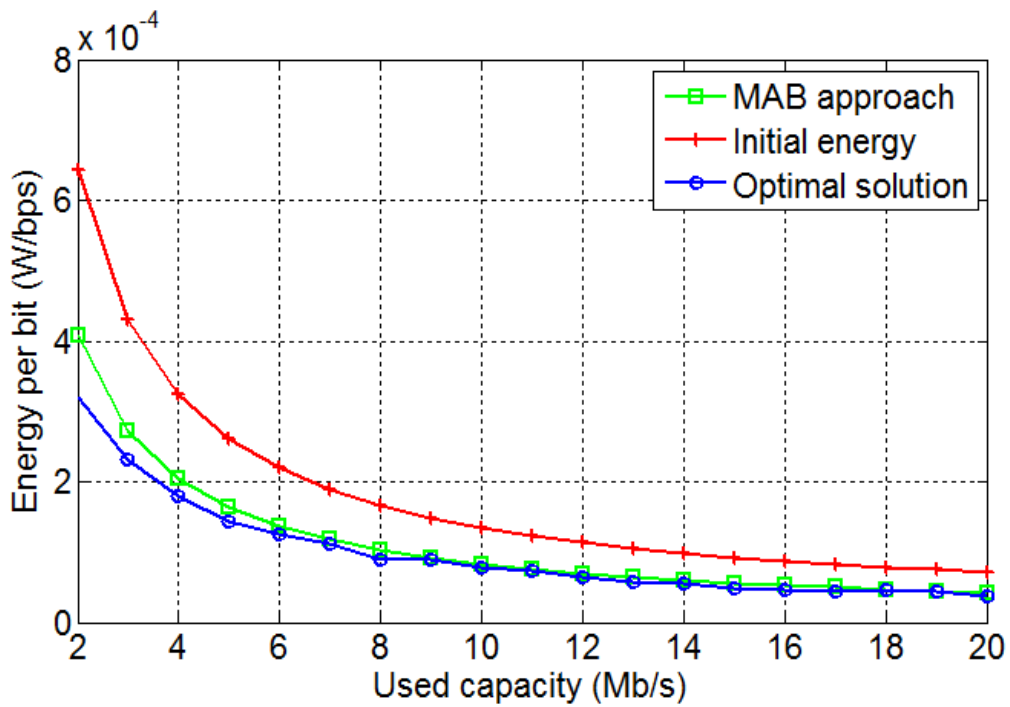


Fig. 6.2 Energie consommée par bit en fonction de la capacité utilisée

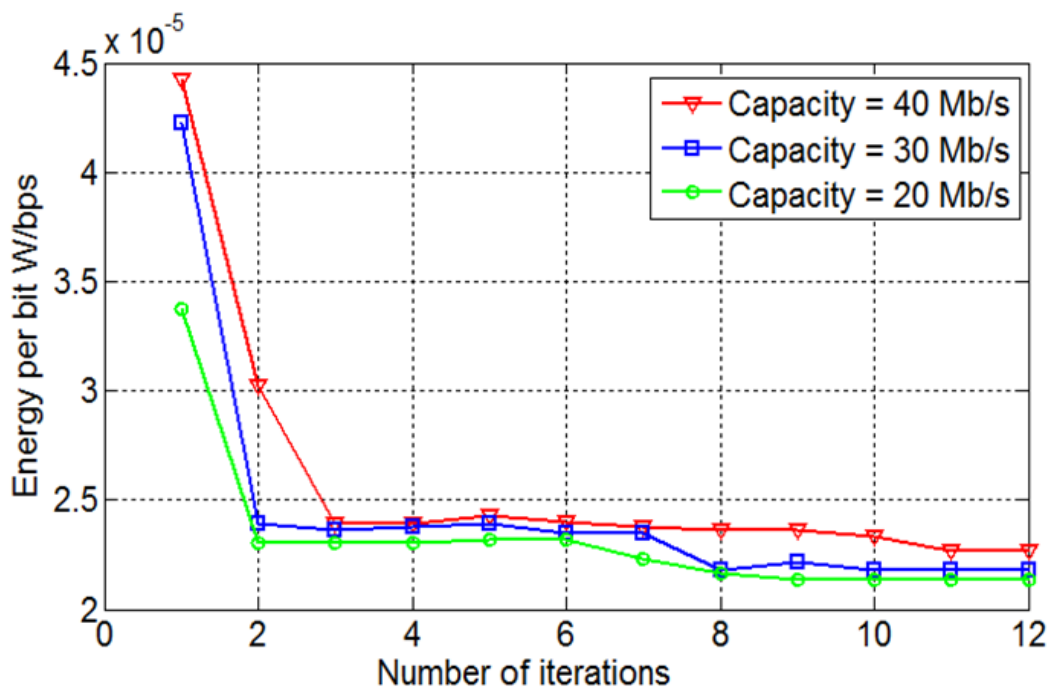


Fig. 6.3 Efficacité énergétique en fonction du nombre d'itérations

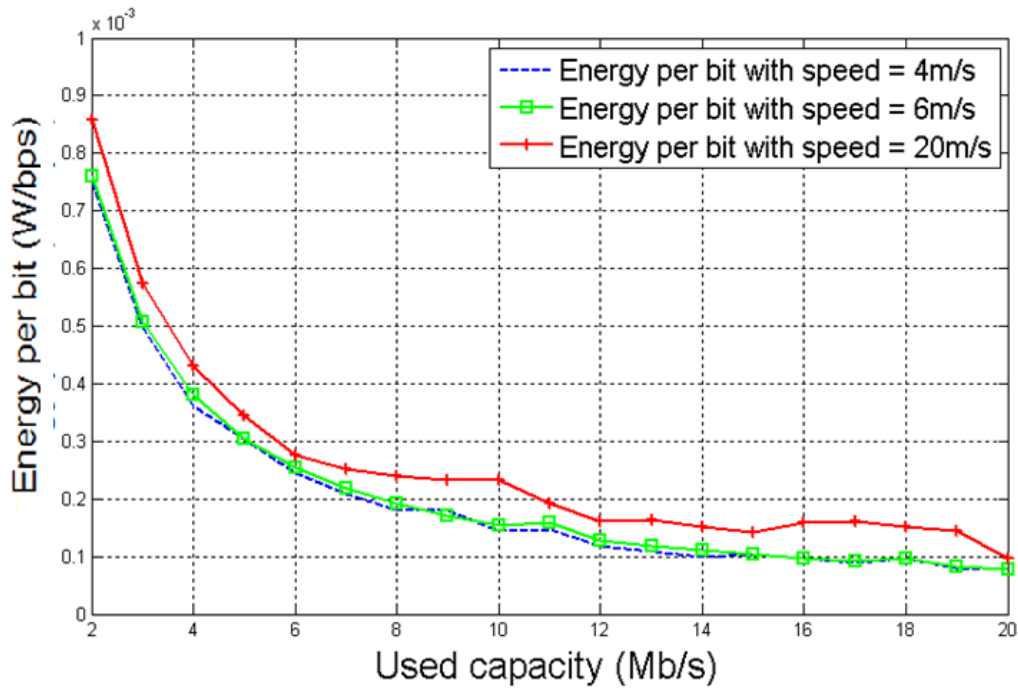


Fig. 6.4 Efficacité énergétique en fonction de la capacité pour différentes valeurs de vitesse

L'approche proposée montre des économies considérables en énergie, principalement dans les périodes à faible charge de trafic. La nature distribuée de l'algorithme proposé réduit le nombre de messages échangés au sein du réseau.

Partie 2:

Nous comparons dans cette partie l'efficacité énergétique de notre solution par rapport à une approche similaire proposée par [65]. Les auteurs de cette approche définissent un algorithme itératif ayant pour but de maximiser la capacité du réseau. Ils proposent par la suite d'éteindre certaines SBs pour réduire l'énergie consommée. La comparaison est présentée dans Fig. 6.5. Les résultats obtenus montrent que l'approche proposée par [65] (Suboptimal algorithm) présente plus d'énergie consommée par bit comparativement à notre méthode. Plus particulièrement, dans les périodes à faible charge de trafic.

L'utilisation du CREB au niveau des réseaux hétérogènes permet de promouvoir les SBs les plus efficaces en énergie. L'utilisation du processus d'apprentissage dans notre approche aide à déterminer les meilleures valeurs du CREB par la prise en compte des interférences au sein du réseau. Avec la détermination des valeurs optimales du CREB, les utilisateurs auront tendance à se connecter aux SBs les plus efficaces en énergie.

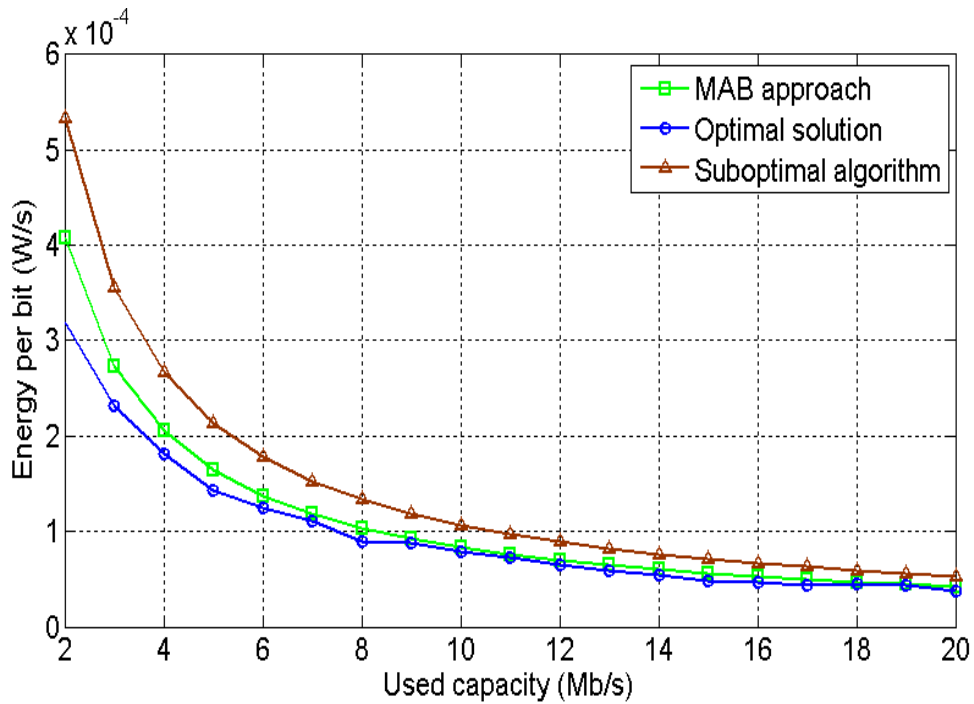


Fig. 6.5 Comparaison entre l'efficacité énergétique de notre approche par rapport à celle proposée par [66]

6.6 Conclusion

Nous avons proposé au cours de ce chapitre, une approche d'apprentissage distribuée permettant de prendre des décisions d'une manière décentralisée, afin de gérer le réseau avec une complexité moindre.

L'approche proposée est basée sur le CREB et l'algorithme du MAB. Le CREB consiste à ajouter des poids à l'intensité du signal reçu pour privilégier l'utilisation des petites SBs. Nous ajustons alors les valeurs du CREB des cellules dans les réseaux hétérogènes par l'utilisation d'un algorithme d'apprentissage basé sur le MAB dans le but de garantir une consommation optimale en énergie.

Nous avons réalisé deux séries de simulations, au cours de la première partie nous avons comparé les performances de notre approche par rapport au nombre d'itérations utilisées dans l'algorithme MAB ainsi que la capacité utilisée dans le réseau. L'impact de la vitesse sur le processus de réduction de la densité a été également abordé. Dans la seconde partie, nous avons comparé l'efficacité énergétique de notre approche par rapport à un modèle similaire proposé dans la littérature.

CHAPITRE VI: PRISE DE DECISION DISTRIBUEE BASEE SUR L'APPRENTISSAGE

Les résultats de la simulation ont montré que notre approche conduit à une réduction importante de l'énergie consommée en particulier dans les périodes à faible charge de trafic. L'efficacité énergétique de notre méthode s'améliore avec l'augmentation du nombre d'itérations d'apprentissage.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion

Afin de répondre aux besoins en matière de capacité au niveau des réseaux informatiques, les opérateurs de télécommunication multiplient le nombre d'équipements utilisés et créent des réseaux redondants d'une grande densité. Suite à cette démarche, l'énergie consommée par les TIC connaît une augmentation exponentielle.

Le domaine des TIC figure parmi les sources majeures de la consommation d'énergie, représentant 10% de l'énergie mondiale en 2010. Environ 0.5% de cette énergie est dédiée aux réseaux mobiles [65]. L'étude de l'efficacité énergétique reçoit actuellement un grand intérêt dans le but de réduire les émissions en CO₂. Les premières études concernaient principalement les centres de données. Cependant, les réseaux cellulaires reçoivent plus d'attention ces dernières années.

La montée de l'internet des objets conduit à la saturation des réseaux cellulaires actuels ; il est estimé que 50 milliards d'objets seront connectés vers l'année 2020. Les opérateurs se penchent sur l'utilisation des réseaux hétérogènes. L'hétérogénéité des réseaux ouvre la porte vers l'utilisation de plusieurs bandes de fréquences. Ceci est réalisé par l'utilisation de différents types de SBs. Chaque type de SBs se caractérise par sa technologie de communication et son rayon de couverture.

Dans les réseaux hétérogènes, une Macrocell est utilisée pour garantir la couverture globale du réseau. Des SBs de petites tailles sont introduites pour offrir plus de capacité. Ces réseaux peuvent également aider à réduire l'énergie consommée par les utilisateurs mobiles. Toutefois, les fluctuations au niveau de la charge de trafic créent des périodes de sur-apvisionnement ayant un impact négatif sur l'efficacité énergétique.

La présente thèse est menée dans le cadre de l'étude de la problématique de l'énergie dans les futurs réseaux cellulaires (Infrastructures hétérogènes). Nous avons essayé plus particulièrement de considérer les points suivants :

- La modélisation des environnements hétérogènes.
- L'expression de l'énergie consommée dans les réseaux hétérogènes.
- L'étude de la couverture et de la capacité dans un environnement hétérogène sous la contrainte de l'énergie.
- L'étude des protocoles utilisés dans les réseaux hétérogènes et la possibilité de s'en servir pour l'économie de l'énergie.

- La possibilité d'un fonctionnement distribué des réseaux hétérogènes pour l'économie de l'énergie.

L'approche principale utilisée dans notre démarche consiste à réduire la densité des réseaux en les adaptant d'une manière dynamique suivant la charge du trafic.

Contrairement aux travaux précédents, nous avons étudié le cas d'un réseau hétérogène typique, contenant autant de SBs que possible. Puisque l'optimisation de ces réseaux est d'une grande complexité, nous nous sommes basés sur des méthodes faisant appel à des heuristiques.

La première proposition élaborée au niveau de cette thèse consiste à modéliser le fonctionnement des réseaux hétérogènes par un modèle probabiliste. Plusieurs classes de services ont été prises en compte pour prédire l'état du réseau par l'utilisation des réseaux de files d'attente. Le problème majeur rencontré lors de la réduction de la densité des réseaux est celui de la couverture des utilisateurs et leur distribution au sein du réseau. Pour faire face à ces problèmes, nous avons proposé dans un premier temps une approche probabiliste permettant de prédire la distribution des utilisateurs après la réduction de la densité du réseau.

Afin de trouver une solution immédiate permettant de résoudre le problème de la couverture sous la contrainte de l'énergie, nous avons pensé à répartir les SBs d'une manière hiérarchique et à présenter le réseau sous la forme d'un graphe. Nous avons ainsi proposé une heuristique basée sur la théorie des graphes pour trouver une configuration optimale du réseau dans un temps polynomial. L'algorithme proposé considère à la fois la zone de couverture et la capacité délivrée par chaque type de SB.

Les expériences ont montré que cette méthode peut atteindre une efficacité énergétique très élevée arrivant jusqu'à 70% d'économie pendant les périodes à faible charge.

Pour optimiser la procédure du réveil des SBs nous avons opté pour l'utilisation d'un protocole collaboratif. Ce protocole est basé sur MIH ; nous apportons des modifications au niveau des messages utilisés dans celui-ci pour créer une version économe en énergie. Les améliorations apportées sur le protocole MIH permettent la collecte d'information sur l'état du réseau et d'utiliser ces informations comme statistiques et indicateurs aidant à gérer la densité du réseau.

La dernière approche que nous avons adoptée consiste à proposer une solution complètement distribuée, dans le but de réduire le nombre des messages échangés et de gérer la distribution des utilisateurs d'une manière plus souple. Pour ce faire, nous avons

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

proposé une méthode basée sur le CREB et la théorie des jeux. Nous avons introduit une approche d'apprentissage basée sur le MAB pour permettre aux cellules d'apprendre les meilleures valeurs du CREB à travers plusieurs itérations.

Nous résumons dans le tableau suivant les caractéristiques de chaque méthode :

Comparaison entre les approches proposées

Approche	Fonctionnement	Avantages et inconvénients
Modélisation stochastique et modèles dynamiques	<ul style="list-style-type: none">- Modélisation stochastique du réseau- Estimation du nombre d'utilisateurs dans chaque SB- Estimation de l'efficacité énergétique des SBs- Eteindre les SBs les moins efficaces avec la prédiction de la distribution des utilisateurs	<ul style="list-style-type: none">- Permettre une grande économie d'énergie arrivant jusqu'à 80% dans les périodes à faible charge de trafic- La couverture des utilisateurs est probabiliste avec le risque que certains utilisateurs se retrouvent en dehors de la zone de couverture
Modélisation graphique pour une couverture optimale	<ul style="list-style-type: none">- Représentation des relations de couverture réseaux sous la forme d'un graphe.- Estimation du gain en énergie et le représenter sous la forme de poids de graphe.- Réduction de la taille du graphe et de l'énergie consommée par l'utilisation du couplage pondéré	<ul style="list-style-type: none">- Permettre une grande économie d'énergie arrivant jusqu'à 70% dans les périodes à faible charge de trafic- Garantir une couverture immédiate aux utilisateurs
MIH pour l'efficacité énergétique	<ul style="list-style-type: none">- Modification des messages utilisés dans le protocole MIH- Implémentation d'une procédure d'élection- Détermination du nombre de SBs à éteindre d'une manière empirique	<ul style="list-style-type: none">- Utilisation d'un protocole préexistant- La détermination des paramètres est empirique et peut engendrer une perte de connexion pour certains utilisateurs
Prise de décision distribuée basée sur l'apprentissage	<ul style="list-style-type: none">- Chaque SB fonctionne d'une manière indépendante- Les SBs cherchent à ajuster les valeurs du CREB par l'utilisation de l'apprentissage (MAB)	<ul style="list-style-type: none">- Traitement distribué- Moins de messages échangés- Algorithme itératif et la vitesse d'adaptation dépend du mouvement des utilisateurs et de la densité du réseau

Perspectives

Le travail que nous avons mené dans le cadre de cette thèse doit être considéré comme une étape initiale dans la mise en œuvre de solutions de réduction d'énergie dans les réseaux hétérogènes. Ainsi, il participe à la marche vers la recherche de la satisfaction du besoin sans cesse croissant de l'économie d'énergie.

Dans la continuité de ce travail, nous envisageons : 1) à court terme, d'étendre les expérimentations sur les approches proposées pour des réseaux de plus grande taille, 2) A moyen terme d'étudier plus en détail les paramètres relatifs à la qualité des communications, et enfin, 3) à long terme, de combiner les méthodes appliquant une réduction de la densité des réseaux avec celles manipulant l'efficacité spectrale pour assurer plus d'efficacité énergétique.

L'étude de l'énergie consommée par les nœuds mobiles doit être également prise en compte.

Au niveau de la modélisation graphique des réseaux hétérogènes, nous comptons étendre la solution proposée et prendre en compte les chevauchements entre les zones de couverture des SBs.

Les futures SBs peuvent être alimentées par plusieurs sources d'énergie (hybrides): l'énergie provenant des grilles électriques et les énergies renouvelables. Le coût des énergies renouvelables est beaucoup moins important que celui des Grids. Il serait intéressant d'étudier la problématique de l'énergie dans les réseaux hétérogènes hybrides par la prise en compte du coût de chaque type d'énergie.

LISTE DES PUBLICATIONS

Conférences internationales

2016 H. Ameer, M. Esseghir, L. Khoukhi: Maximum Weight Matching based Heuristic for Future HetNets Greening, IEEE WCNC 2016

2016 H. Ameer, L. Khoukhi, M. Esseghir: Fully Distributed MAB based Approach for Energy Saving in Heterogeneous Networks, NTMS 2016

2015 H. Ameer, M. Esseghir, L. Khoukhi: Energy saving mechanism for future HetNets, IEEE PIMRC 2015

2015 H. Ameer, L. Khoukhi M. Esseghir: MIH (Media Independent Handover) for green wireless communications. IEEE CCNC 2015

Journaux internationaux

2016 H. Ameer, L. Khoukhi, M. Esseghir, L. Merghem: Energy Efficient Networks: Recent Research and Future Challenges - Nov 2016 - International Journal of Wireless and Mobile Computing

2015 H. Ameer, M. Esseghir, L. Khoukhi, L. Merghem: Enhanced MIH (media independent handover) for collaborative green wireless Communications - Aug 2015 - International Journal of Communication Systems - Wiley (IF:1.11)

REFERENCES

- [1] J.Wu, Green communications: theoretical fundamentals, algorithms and applications. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.
- [2] M. Jens, « The carbon and electricity footprints of the ICT sector - Yesterday, Today and tomorrow ».2013.
- [3] «CEET:Centre for Energy-Efficient Telecommunications : The University of Melbourne »: <http://www.ceet.unimelb.edu.au/>.
- [4] "Internet of Things (IoT) Opportunities," Cisco. [Online]. Available: <http://www.cisco.com/web/solutions/trends/iot/portfolio.html>.
- [5] C. C. Coskun and E. Ayanoglu, "Energy-Efficient Base Station Deployment in Heterogeneous Networks," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 3, no. 6, pp. 593–596, décembre 2014.
- [6] Y. Zou, J. Zhu, and R. Zhang, "Exploiting Network Cooperation in Green Wireless Communication," IEEE Transactions on Communications, vol. 61, no. 3, pp. 999–1010, Mar. 2013.
- [7] X. Sun and S. Wang, « Resource Allocation Scheme for Energy Saving in Heterogeneous Networks », IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 14, no 8, p. 4407-4416, august 2015.
- [8] "IEEE 802.21." [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/21/>. [Accessed: 20-Sep-2014].
- [9] "Loon for All – Project Loon – Google": <http://www.google.com/loon/>.
- [10] G. Faraci and G. Schembra, "An analytical model for electricity-price-aware resource allocation in virtualized data centers," in 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2015, pp. 5839–5845.
- [11] "www.ict-earth.eu" [Accessed: 20-Sep-2014].
- [12] "<https://www.celticplus.eu/project-operanet/>" [Accessed: 20-Sep-2014].
- [13] "<http://www.econetrenewable.com/>" [Accessed: 20-Sep-2014].
- [14] "<http://www.fp7-trend.eu/>" [Accessed: 20-Sep-2014].

- [15] A. Chavan, M. Alghamdi, X. Jiang, X. Qin, J. Zhang, M. Jiang, and M. Qiu, "TIGER- Thermal Aware File Allocation in Storage Clusters," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2015.
- [16] A. C. de S. Araujo, L. N. Sampaio, and A. Ziviani, "Balancing Energy, Redundancy, and Performance in Datacenter Networks," in *2015 XXXIII Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (SBRC)*, 2015, pp. 120–129.
- [17] C. E. Leiserson, "Fat-Trees: Universal Networks for Hardware-Efficient Supercomputing" *IEEE Trans. on Computer*, vol. 34, no. 10, pp. 892–901, Oct. 1985.
- [18] S. Saha, J. S. Deogun, et L. Xu, "Energy Models driven Green Routing for Data Centers", in *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, New York: IEEE, 2012.
- [19] X. Dai, M. Wang, and B. Benasou, "Energy-efficient virtual machines scheduling in multi-tenant data centers," *IEEE Transactions on Cloud Computing*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2015.
- [20] Z. Zhang, Y. Li, K. Huang, S. Zhou, and J. Wang, "Energy efficiency analysis of cellular networks with cooperative relays via stochastic geometry," *Communications, China*, vol. 12, no. 9, pp. 112–121, 2015.
- [21] W.-T. Wong, Y.-J. Yu, et A.-C. Pang, "Decentralized energy-efficient base station operation for green cellular networks", in *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2012, p. 5194-5200.
- [22] D. Tsilimantos, J.-M. Gorce, et E. Altman, "Stochastic Analysis of Energy Savings with Sleep Mode in OFDMA Wireless Networks", présenté à *IEEE INFOCOM - The 32nd IEEE International Conference on Computer Communications*, 2013.
- [23] A. Capone, I. Filippini, B. Gloss, et U. Barth, "Rethinking cellular system architecture for breaking current energy efficiency limits", in *Sustainable Internet and ICT for Sustainability (SustainIT)*, 2012, 2012, p. 1-5.
- [24] S. Bu, F. R. Yu, and H. Yanikomeroglu, "Interference-Aware Energy-Efficient Resource Allocation for OFDMA-Based Heterogeneous Networks With Incomplete Channel State Information," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 3, pp. 1036–1050, Mar. 2015.

- [25] H. Ameer, M. Esseghir, L. Khoukhi “Energy Saving Mechanism for Future HetNets,” *Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC)*, Aug. 2015.
- [26] M. W. Arshad, A. Vastberg, et T. Edler, “Energy efficiency improvement through pico base stations for a green field operator”, in *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2012, p. 2197-2202.
- [27] A. Khan, W. Kellerer, K. Koza, and M. Yabusaki, “Network sharing in the next mobile network: TCO reduction, management flexibility, and operational independence”, *IEEE Communications Magazine*, 49(10):134142, Oct. 2011.
- [28] A. Bousia, E. Kartsakli, A. Antonopoulos, L. Alonso, et C. Verikoukis, “Game theoretic approach for switching off base stations in multi-operator environments”, in *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2013, p. 4420-4424.
- [29] X. Wang, M. Sheng, M. Liu, D. Zhai, et Y. Zhang, “RESP: A k-connected residual energy-aware topology control algorithm for ad hoc networks”, in *2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2013, p. 1009-1014.
- [30] X. Wang and Q. Liang, “Efficient Sensor Selection Schemes for Wireless Sensor Networks in Microgrid,” *IEEE Systems Journal*, vol. PP, no. 99, pp. 1–9, 2015.
- [31] M. K. Sah, D. K. Gupta, and P. Rani, “Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks with Multiple Sinks,” in *2015 Second International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering (ICACCE)*, 2015, pp. 84–88.
- [32] M. Jahanet L. Narayanan, “Minimum energy broadcast in duty cycled wireless sensor networks”, in *2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2013, p. 980-985.
- [33] J. Hong, J. Cao, W. Li, S. Lu, et D. Chen, “Minimum-Transmission Broadcast in Uncoordinated Duty-Cycled Wireless Ad Hoc Networks”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no 1, p. 307-318, 2010.
- [34] F. Wang et J. Liu, “Duty-Cycle-Aware Broadcast in Wireless Sensor Networks”, in *IEEE INFOCOM 2009*, 2009, p. 468-476.
- [35] Y. Sun, O. Gurewitz, S. Du, L. Tang, et D. B. Johnson, “ADB: An Efficient Multihop Broadcast Protocol Based on Asynchronous Duty-cycling in Wireless Sensor

Networks”, in Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, New York, NY, USA, 2009, p. 43–56.

[36] S. Choudhury, S. G. Akl, et K. Salomaa, “Energy efficient cellular automaton based algorithms for mobile wireless sensor networks”, in 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012, p. 2341-2346.

[37] Y. Xi, M. Chuah, et K. Chang, “Performance Evaluation of a Power Management Scheme for Disruption Tolerant Network”, *Mobile NetwAppl*, vol. 12, no 5-6, p. 370-380, déc. 2007.

[38] W. Gao et Q. Li, “Wakeup scheduling for energy-efficient communication in opportunistic mobile networks”, in 2013 Proceedings IEEE INFOCOM, 2013.

[39] F. Han, Z. Safar, W. S. Lin, Y. Chen, et K. J. R. Liu, “Energy-efficient cellular network operation via base station cooperation”, in 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2012, p. 4374-4378.

[40] R. Balasubramaniam, S. Nagaraj, M. Sarkar, C. Paolini, et P. Khaitan, “Cell Zooming for Power Efficient Base Station Operation”, in Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013 9th International, 2013, p. 556-560.

[41] G. Da Costa, J.-P. Gelas, Y. Georgiou, L. Lefevre, A.-C. Orgerie, J. Pierson, O. Richard, et K. Sharma, “The GREEN-NET framework: Energy efficiency in large scale distributed systems”, in IEEE International Symposium on Parallel Distributed Processing, 2009. IPDPS 2009, 2009, p. 18.

[42] K. Bilal, S. U. Khan, S. A. Madani, K. Hayat, M. I. Khan, N. Min-Allah, J. Kolodziej, L. Wang, S. Zeadally, et D. Chen, “A survey on Green communications using Adaptive Link Rate”, *Cluster Comput*, vol. 16, no 3, p. 575-589, sept. 2013.

[43] R. Bolla, M. Giribaldi, R. Khan, et M. Repetto, “Network Connectivity Proxy: An optimal strategy for reducing energy waste in network edge devices”, in 2013 24th Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Green ICT (TIWDC), 2013, p. 1-6.

[44] A. Galanopoulos, G. Iosifidis, A. Argyriou, and L. Tassiulas, “Green video delivery in LTE-based heterogeneous cellular networks,” in World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2015 IEEE 16th International Symposium on a, 2015, pp. 1–9.

- [45] R. Bruschi, A. Lombardo, C. Panarello, F. Podda, E. Santagati, et G. Schembra, “Active window management: Reducing energy consumption of TCP congestion control”, in 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2013, p. 4154-4158.
- [46] C. E. Shannon, “Communication in the presence of noise (Reprinted from the Proceedings of the IRE, vol 37, pg 10-21, 1949)”, Proc. IEEE, vol. 86, no 2, p. 447-457, févr. 1998.
- [47] S. Eryigit, S. Bayhan, et T. Tugcu, “Channel switching cost aware and energy-efficient cooperative sensing scheduling for cognitive radio networks”, in 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2013, p. 2633-2638.
- [48] A. P. Bianzino, C. Chaudet, D. Rossi, et J.-L. Rougier, “A Survey of Green Networking Research “, arXiv:1010.3880 [cs], oct. 2010.
- [49] “ECR Initiative.”.Available: <http://www.ecrinitiative.org/>.
- [50] S. Nedeveschi, L. Popa, G. Iannaccone, S. Ratnasamy, et D. Wetherall, “Reducing Network Energy Consumption via Sleeping and Rate-adaptation”, in Proceedings of the 5th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation, Berkeley, CA, USA, 2008, p. 323–336.
- [51] M. Fiorani, M. Casoni, et S. Aleksic, “Hybrid optical switching for energy-efficiency and QoS differentiation in core networks”, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 5, no 5, p. 484-497, 2013.
- [52] Chen, L.-J., Sun, T., Yang, G., Gerla, M.: Usha: a simple and practical seamless vertical handoff solution. In: 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2006, vol. 2, pp. 1284–1285
- [53] Simsek, Meryem, Mehdi Bennis, and Ismail Guvenc. “Mobility Management in HetNets: A Learning-Based Perspective.” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2015, no. 1 (February 14, 2015): 26. doi:10.1186/s13638-015-0244-2.
- [54] L. A. Barroso and U. Hölzle, “The Case for Energy-Proportional Computing,” Computer, vol. 40, no. 12, pp. 33–37, Dec. 2007.
- [55] X. Chen, H. Xia, Z. Zeng, S. Wu, W. Zuo, and Y. Lu, “Energy-efficient heterogeneous networks for green communications by inter-layer interference

coordination,” in 2014 International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2014, pp. 70–74.

[56] L. Saker, S.-E. Elayoubi, R. Combes, and T. Chahed, “Optimal Control of Wake Up Mechanisms of Femtocells in Heterogeneous Networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 30, no. 3, pp. 664–672, 2012.

[57] P. Dini, M. Miozzo, N. Bui, and N. Baldo, “A Model to Analyze the Energy Savings of Base Station Sleep Mode in LTE HetNets,” in *Green Computing and Communications (GreenCom)*, 2013.

[58] K. Gomez, D. Boru, R. Riggio, T. Rasheed, D. Miorandi, and F. Granelli, “Measurement-based modelling of power consumption at wireless access network gateways,” *Computer Networks*, vol. 56, no. 10, pp. 2506–2521, juillet 2012.

[59] R. M. Karp, “Reducibility among Combinatorial Problems,” in *Complexity of Computer Computations*, R. E. Miller, J. W. Thatcher, and J. D. Bohlinger, Eds. Springer US, 1972, pp. 85–103.

[60] E. Altman, *Capacity of Multi-service Cellular Networks with Transmission-Rate Control: A Queueing Analysis*. 2002.

[61] A. Calhan and C. Ceken, “Speed sensitive-energy aware adaptive fuzzy logic based vertical handoff decision algorithm,” in 2011 18th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2011, pp. 1–4.

[62] E. Nan, X. Chu, W. Guo, and J. Zhang, “User data traffic analysis for 3G cellular networks,” in *Proc. 8th Int. ICST Conf.*

[62] “The Network Simulator - ns-2.” [Online]. Available: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. [Accessed: 20-Sep-2014].

[63] R. Thakur, A. Sengupta, and C. Siva Ram Murthy, “Improving capacity and energy efficiency of femtocell based cellular network through cell biasing,” in 2013 11th International Symposium on Modeling Optimization in Mobile, Ad Hoc Wireless Networks (WiOpt), 2013, pp. 436–443.

[64] P. Auer, N.C.-B., Fischer, P.: Finite time Analysis for the Multi armed Bandit Problem. *Machine Learning* 17, 235–256 2012.

- [65] Y. Jin, L. Qiu, and X. Liang, "Small cells on/off control and load balancing for green dense heterogeneous networks," in 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2015, pp. 1530–1535.
- [66] K. Dufková, J.-Y. Le Boudec, M. Popović, M. Bjelica, R. Khalili, and L. Kencl, "Energy Consumption Comparison Between Macro-micro and Public Femto Deployment in a Plausible LTE Network," in Proceedings of the 2Nd International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking, New York, NY, USA, 2011, pp. 67–76.
- [67] T. Bernard, H. Fouchal "A low energy consumption MAC protocol for WSN," in ICC 2012: 533-537.
- [68] K. Yang, S. Martin, T. Ali-Yahiya, J. Wu "Energy-Efficient Resource Allocation for Downlink in LTE Heterogeneous Networks," in VTC Fall 2014: 1-5

Hocine Abdelhakim AMEUR

Doctorat : Ingénierie Sociotechnique des Connaissances, des Réseaux et du Développement Durable

Année 2016

Vers des réseaux hétérogènes sans fil efficaces en consommation énergétique

L'environnement subit des dégradations importantes causées par l'utilisation des énergies non renouvelables. Plus particulièrement, le secteur des technologies de l'information et de la communication est responsable de l'émission de 2% du taux mondial de carbone. Les statistiques montrent que l'énergie consommée par les réseaux sans fil constitue 10% de l'énergie globale consommée annuellement. Avec la prolifération des objets connectés, les réseaux cellulaires deviennent le moyen de communication le plus utilisé. De ce fait, ces réseaux commencent à adopter un déploiement hétérogène afin de faire face au manque de capacité dans les infrastructures actuelles.

Dans cette thèse, nous nous concentrons principalement sur l'étude de l'économie d'énergie dans les réseaux cellulaires et en particulier, l'énergie consommée par les réseaux cellulaires hétérogènes (Heterogeneous Networks, HetNet), connus pour leur rôle principal dans les futures architectures de communication, à savoir la 5G. Les HetNets se distinguent par l'utilisation de différents moyens et technologies d'accès. En plus des stations de base conventionnelles, ces réseaux introduisent le concept des «Small Cells» qui se caractérise par l'utilisation de Microcells, Picocells et/ou Femtocells. Cette diversité offre plusieurs avantages au niveau de l'efficacité spectrale, de la capacité et de la couverture réseau.

Mots clés : téléphonie mobile - communication - énergie - consommation d'énergie - réseaux d'ordinateurs.

Energy Efficient Wireless Heterogeneous Networks

The environment is undergoing a significant damage caused by the use of non-renewable energy sources. The information and communications technology sector is responsible for 2% of the global carbon footprint. Statistics show also that the energy consumed by wireless networks represents around 10% of the annual energy consumption. With the widespread of the Internet of Things, cellular networks are becoming the most used communication technology. Therefore, these networks start using heterogeneous infrastructures to address the lack of capacity.

In this thesis, we focus on studying the energy saving problem within cellular networks. In particular, the energy consumed by heterogeneous cellular networks, which are known by their main importance in the future communication architectures namely, 5G networks. Heterogeneous networks (HetNets) use different types of access technologies. In addition to the conventional base stations, these networks introduce the concept of small cells which is characterized by the use of Microcells, Picocells and Femtocells. This diversity offers several advantages in terms of spectral efficiency, network coverage and capacity.

Keywords: mobile telephony - communication - energy - energy consumption - computer networks.

Thèse réalisée en partenariat entre :

