

Université du Québec  
Institut National de la Recherche Scientifique  
Centre Énergie Matériaux Télécommunications

**STRATÉGIES INNOVANTES D'INTÉGRATION DES TECHNOLOGIES VERTES  
DANS LES FUTURS RÉSEAUX SANS FIL 5G ET AU-DELÀ**

Par

Boris AGBANGLA

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de  
*Maître es Sciences*, M.Sc.  
en Télécommunications

**Jury d'évaluation**

Examineur externe	Prof. Paul Fortier Université Laval
Examineur interne	Prof. Nahi Kandil UQAT
Directeur de recherche	Prof. Sofiène Affes INRS-EMT

*À toute ma famille.*

# REMERCIEMENTS

Ce travail a été élaboré au sein de l'équipe du Wireless Lab <[www.wirelesslab.ca](http://www.wirelesslab.ca)> du Centre Énergie, Matériaux et Télécommunications de l'Institut National de la Recherche Scientifique.

Je tiens à remercier toute personne qui a contribué de proche ou de loin à l'élaboration et au succès de ce travail.

Tout d'abord, je remercie mon directeur de recherche le Professeur Sofiène Affes qui m'a donné cette opportunité en premier lieu pour intégrer l'équipe du Wireless Lab et qui m'a offert un environnement propice avec ses riches conseils et sa présence permanente afin d'assurer l'accomplissement de mes travaux de recherche.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude particulière à Dr. Zaidi Slim, pour son suivi, sa patience, son support et pour m'avoir aidé à accomplir mon travail et d'évoluer en tant que chercheur.

Mes remerciements vont également aux membres de l'équipe du Wireless Lab qui m'ont aidé avec leur expérience déjà requise pour apprendre de leurs expériences et ainsi avancer plus rapidement.

Je suis aussi reconnaissant aux membres du Jury pour le temps et l'attention qu'ils ont accordés à ce mémoire.

Finalement, je suis redevable à toute personne qui a contribué à ce travail par sa simple présence ou ses connaissances.



# RÉSUMÉ

L'augmentation pertinente des technologies vertes (énergie renouvelable) dans les réseaux de communication mobile a incité plusieurs groupes de recherche à se concentrer sur la potentialité des énergies renouvelables en tant qu'alimentation prioritaire. Il est démontré que les opérateurs de réseaux mobiles manifestent un intérêt significatif pour l'alimentation des stations de bases (*BS*) par le biais des sources d'énergies renouvelables. Outre les énormes dépenses que les opérateurs de téléphonie mobile paient pour approvisionner les sites des stations de base, il est souligné que ces sites représentent des polluants majeurs du fait des énormes émissions de gaz à effet de serre ( $CO_2$ ). Étant donné que les stations de bases (*BS*) sont d'importants consommateurs d'énergie des réseaux cellulaires et qu'elles contribuent de manière significative aux dépenses opérationnelles, les alimenter en utilisant l'énergie du vent ou du soleil attire l'attention des opérateurs de téléphonie mobile. Cependant, l'une des tâches les plus critiques à accomplir lors de la conception d'un réseau mobile vert est le dimensionnement des différents types d'énergies renouvelables, ce qui implique un échange entre autosuffisance énergétique, continuité de service et contraintes de faisabilité.

Dans ce travail, nous avons proposé une stratégie de déploiement de certains types d'énergie renouvelable pour alimenter les stations de base, afin de les rendre plus autonomes, tout en réduisant les dépenses d'investissements (CAPEX) ainsi que celles d'exploitation (OPEX). Nous élaborons également une nouvelle stratégie de commutation ON/OFF des stations de base (*BS*) (c.à.d. activation et désactivation). En effet, l'implémentation de cette stratégie nous permet de réduire la consommation d'énergie lorsque le trafic est faible en préplanifiant hors ligne (offline) les *BS* en fonction des prévisions, puis en ligne (online) pour éviter la surcharge lorsque le trafic est dense, un scénario idéal dans le contexte de densification extrême prévu dans les futurs réseaux 5G.

**Mots clés:** énergie renouvelable, commutation on-off *BS*, efficacité énergétique, approche en ligne/hors ligne, réseaux 5G, densification extrême, CAPEX, OPEX.



# ABSTRACT

The relevant increase of green technologies (renewable energy) in mobile communication networks has prompted several research groups to focus on the potential of renewable energies as a prioritized source of energy. Mobile network operators are shown to have significant interest in powering base stations through renewable energy sources. In addition to the huge expenditures that mobile operators pay to supply base station sites, it is noticed that these sites represent major pollutants due to huge greenhouse gas emissions ( $CO_2$ ). Since base stations are important energy consumers of cellular networks and contribute significantly to operational expenses, powering them using the energy of the wind and the sun attracts attention of mobile operators. However, one of the most critical tasks to be done when designing a green mobile network is the sizing of different types of renewable energy, which implies an exchange between energy self-sufficiency, continuity of service and feasibility constraints.

In this work, we have proposed a strategy for deploying certain types of renewable energy to supply base stations, in order to make them more autonomous, while reducing capital expenditures (CAPEX) as well as operating expenses (OPEX). We are also developing a new base station (BS) on/off switching strategy (i.e. activation and deactivation). Indeed, the implementation of this strategy allows us to reduce energy consumption when traffic is low by pre-planning offline (offline) BSs according to forecasts, then online to avoid overloading when traffic is dense, an ideal scenario in the context of extreme densification planned in future networks 5G.

**Keywords:** renewable energy, BS on-off switching, energy efficiency, online/offline approach, 5G networks, extreme densification, CAPEX, OPEX.





# TABLE DES MATIÈRES

<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>iii</b>
<b>RÉSUMÉ</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>vii</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>ix</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>xi</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>3</b>
<b>1 REVUE DE LA LITTÉRATURE ET ÉTAT DE L'ART</b>	<b>7</b>
1.1 Introduction . . . . .	7
1.2 Réseaux sans fil . . . . .	7
1.2.1 Générations de systèmes cellulaires . . . . .	7
1.2.2 Architecture d'un réseau traditionnel . . . . .	10
1.2.3 Architecture d'un réseau hétérogène (HetNet) . . . . .	11
1.3 Technologies vertes . . . . .	15
1.3.1 Énergie solaire photovoltaïque . . . . .	15
1.3.2 Énergie éolienne . . . . .	16
1.4 Analyse de coûts . . . . .	17
1.4.1 Dépenses d'investissement (CAPEX) . . . . .	17
1.4.2 Dépenses d'exploitation (OPEX) . . . . .	18
1.4.3 Analyse de coûts des réseaux hétérogènes . . . . .	18
1.5 Conclusion . . . . .	19
<b>2 STRATEGIES DE DEPLOIEMENT</b>	<b>21</b>
2.1 Introduction . . . . .	21
2.2 Modelisation des différents types d'énergies renouvelables . . . . .	21
2.2.1 Modélisation d'un système photovoltaïque . . . . .	21
2.2.2 Modélisation d'un système éolien . . . . .	22
2.2.3 Calcul des différents coûts CAPEX et OPEX . . . . .	23
2.2.4 Stratégie de déploiement adoptée . . . . .	24
2.2.5 Métrique ou fonction d'utilité proposée . . . . .	25

2.3	Commutation ON/OFF des BSs . . . . .	25
2.3.1	Modèle du système . . . . .	26
2.3.2	Stratégie de commutation proposée . . . . .	27
2.4	Conclusion . . . . .	32
<b>3</b>	<b>ANALYSE DE PERFORMANCES ET SIMULATIONS</b>	<b>33</b>
3.1	Énergies renouvelables . . . . .	33
3.2	Commutation on/off des BS . . . . .	36
3.3	Conclusion . . . . .	40
	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>41</b>
	<b>RÉFÉRENCES</b>	<b>43</b>

# LISTE DES FIGURES

1.1	Architecture d'un réseau cellulaire actuel. . . . .	10
1.2	Systèmes cellulaires conventionnels. . . . .	11
1.3	Architecture d'un réseau HetNet. . . . .	12
1.4	Déploiement d'une macrocellule-picocellule extérieure. . . . .	13
1.5	Déploiement d'une macrocellule-femtocellule intérieure. . . . .	14
1.6	Système photovoltaïque[18]. . . . .	16
1.7	Système éolien [21]. . . . .	17
2.1	Schématisation du déploiement. . . . .	24
2.2	Modèle du système. . . . .	26
2.3	Commutation on-off BS proposée sous forme de graphe - Étape 1: Analyse offline ou hors ligne. . . . .	28
2.4	Commutation on-off BS proposée sous forme de graphe - Étape 2: Analyse online ou en ligne. . . . .	28
3.1	Puissance fournie versus surface totale. . . . .	34
3.2	CAPEX versus surface totale. . . . .	35
3.3	OPEX versus surface totale. . . . .	35
3.4	Fonction d'utilité versus le poids de coût $w_p$ . . . . .	36
3.5	Taux de réduction de puissance versus la densité d'utilisateurs pour $w_p = 0.5$ . . . . .	38
3.6	Consommation moyenne par BS versus la puissance de commutation pour $\lambda = 7 \cdot 10^{-4}$ et $w_p = 0.5$ . . . . .	39
3.7	Consommation moyenne par BS versus la puissance de commutation pour différentes valeurs de $w_p$ . . . . .	40



# LISTE DES TABLEAUX

- 1.1 Différence entre les types de génération mobile. . . . . 9
- 1.2 Différence entre les types de BS. . . . . 15
  
- 2.1 Types de panneaux et rendement respectifs. . . . . 22
  
- 3.1 Différents paramètres de simulations. . . . . 33
- 3.2 Différents paramètres de simulation. . . . . 37



# LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

<b>AMPS</b>	<b>Système avancé de téléphonie mobile</b> ( <i>Advanced Mobile-Phone System</i> )
<b>BS</b>	<b>Station de base</b> ( <i>Base Station</i> )
<b>CAPEX</b>	<b>Dépenses capitales</b> ( <i>Capital Expenditure</i> )
<b>CDMA</b>	<b>Accès multiple par répartition de codes</b> ( <i>Code division multiple access</i> )
<b>DAS</b>	<b>Systèmes distribués d'antennes</b> ( <i>Distributed Antenna Systems</i> )
<b>EDGE</b>	<b>Services de données améliorés pour l'évolution du GSM</b> ( <i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i> )
<b>FEC</b>	<b>Codage de correction d'erreur directe</b> ( <i>Forward Error Correction</i> )
<b>GPRS</b>	<b>Service général de radiocommunication par paquet</b> ( <i>General Packet Radio Service</i> )
<b>GSM</b>	<b>Système mondial pour les communications mobiles</b> ( <i>Global System for Mobile Communications</i> )
<b>HetNet</b>	<b>Réseau hétérogène</b> ( <i>Heterogeneous Networks</i> )
<b>HSPA</b>	<b>Accès par paquet haute vitesse</b> ( <i>High Speed Packet-Access</i> )
<b>IP</b>	<b>Protocole Internet</b> ( <i>Internet Protocol</i> )
<b>ITU</b>	<b>Union internationale de la télécommunication</b> ( <i>International Telecommunication Union</i> )
<b>LTE</b>	<b>Évolution à long terme</b> ( <i>Long-Term Evolution</i> )

<b>LTE-A</b>	<b>Évolution à long terme avancée</b> ( <i>Long-Term Evolution Advanced</i> )
<b>MIMO</b>	<b>Système d’antennes à multiples entrées et multiples sorties</b> ( <i>Multiple-Input Multiple Output</i> )
<b>MMS</b>	<b>Service de messagerie multimédia</b> ( <i>Multimedia Messaging Service</i> )
<b>NMT</b>	<b>Téléphonie mobile nordique</b> ( <i>Nordic Mobile Telephony</i> )
<b>NOMA</b>	<b>Accès multiple non-orthogonal</b> ( <i>Non-Orthogonal Multiple Access</i> )
<b>OFDMA</b>	<b>Accès multiple par répartition orthogonale des fréquences</b> ( <i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i> )
<b>OPEX</b>	<b>Dépenses d’exploitation</b> ( <i>Operational Expenditure</i> )
<b>PV</b>	<b>Photovoltaïque</b> ( <i>Photovoltaic</i> )
<b>QoS</b>	<b>Qualité du service</b> ( <i>Quality Of Service</i> )
<b>RE</b>	<b>Énergie renouvelable</b> ( <i>Renewable energy</i> )
<b>SCMA</b>	<b>Accès multiple des sous-porteuses</b> ( <i>SubCarrier Multiple Access</i> )
<b>SMS</b>	<b>Service de message court</b> ( <i>Short Message Service</i> )
<b>TDMA</b>	<b>Accès multiples par division temporelle</b> ( <i>Time-Division Multiple Access</i> )
<b>UE</b>	<b>Utilisateur</b> ( <i>User Equipment</i> )
<b>UMTS</b>	<b>Système universel de télécommunications mobiles</b> ( <i>Universal Mobile Telecommunication System</i> )
<b>WIMAX</b>	<b>Interopérabilité mondiale pour l’accès au micro-ondes</b> ( <i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> )
<b>1G</b>	<b>Première génération</b> ( <i>1st Generation</i> )
<b>2G</b>	<b>Deuxième génération</b> ( <i>2nd Generation</i> )
<b>3G</b>	<b>Troisième génération</b> ( <i>3rd Generation</i> )
<b>4G</b>	<b>Quatrième génération</b> ( <i>4th Generation</i> )
<b>5G</b>	<b>Cinquième génération</b> ( <i>5th Generation</i> )





# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Aujourd'hui, les opérateurs de réseaux mobiles sont soumis à déployer des réseaux d'accès mobiles plus denses, en raison de la stupéfiante augmentation du trafic observée ces dernières années, et qui est appelé à se développer à un rythme remarquable dans les années à venir. Il semble être évident que la demande en énergie pour faire fonctionner les réseaux cellulaires est en croissance rapide et les opérateurs mobiles sont confrontés à des coûts opérationnels (OPEX) énormes dus à l'alimentation électrique [1][2].

A la lumière de ces informations, plusieurs efforts de recherche ont été développés pour améliorer l'efficacité énergétique des réseaux sans fil, avec le double objectif de réduire les coûts et d'améliorer la durabilité. Malgré leurs importances, l'économie d'énergie qui s'en découle est loin d'être suffisante pour réduire de manière significative la consommation énergétique des réseaux sans fil.

Une autre alternative potentiellement beaucoup plus efficace a été alors proposée par la communauté scientifique. Elle consiste en l'intégration des sources d'énergie renouvelables dans les réseaux sans fil pour alimenter les stations de base (BS). Cette solution attrayante permet de réduire la facture énergétique des opérateurs mobiles et est une approche prometteuse visant à les rendre plus indépendants du réseau électrique. Une solution rendue possible par les récentes percées technologiques dans le domaine de la physique et des matériaux. Cette approche est généralement adoptée dans certains pays émergents afin de garantir la continuité du service mobile, lorsque le réseau électrique traditionnel n'est pas fiable. De plus, cette approche peut fournir une solution économique avantageuse dans certaines zones rurales où la connexion des BSs au réseau électrique peut être plus coûteuse. Néanmoins, les dépenses d'investissement (CAPEX) peuvent effectivement être compensées à moyen terme par une réduction des dépenses d'exploitation (OPEX), grâce à la diminution de la quantité d'énergie achetée du réseau [3].

En outre, les algorithmes de commutation activation/désactivation (on/off) de station de base (BS) constituent également un moyen puissant d'assurer des économies d'énergie élevées. Ces algorithmes désactivent les parties non nécessaires du réseau (c.-à-d., BS) et déchargent les utilisateurs vers les BS voisins pendant les heures creuses (c.-à-d., moins d'utilisateurs). Ils activent également le nombre approprié de BS selon le besoin [4]. Ces fonctionnalités sont extrêmement intéressantes dans la mesure où elles permettent à un réseau conçu pour les périodes de forte densité de fonctionner efficacement, même à faible trafic, ce qui se produit très souvent. De plus, les algorithmes de commutation on/off de BS seraient particulièrement avantageux pour les réseaux de cinquième génération (5G) à venir caractérisés par une densification extrême des BSs, rendant ainsi le défi d'efficacité énergétique encore plus complexe.

Il existe principalement deux approches pour bien activer/désactiver un nombre donné de BS [5][6]: hors ligne (offline) et en ligne (online). L'approche hors ligne (offline), relativement simple, permet une planification préalable à la mise en marche des intervalles de commutation. Cependant, elle présente un inconvénient majeur, à savoir qu'elle ne prend pas en compte la charge actuelle (c.-à-d., instantanée) et n'est donc pas robuste aux événements imprévisibles (c.-à-d., une défaillance, point d'accès, etc.), ce qui retarde de ce fait son efficacité. D'autre part l'approche en ligne (online) considère exclusivement la charge réelle (c.-à-d., instantanée) afin de décider de désactiver ou non une BS. Par conséquent, elle est capable de gérer des événements imprévisibles en activant la partie du réseau appropriée (c.-à-d., le nombre de BS) afin de faire face à une augmentation ou une diminution soudaine du trafic. Malgré son importance, cette approche est complexe car la décision doit être prise et exécutée en temps réel. Outre cela, elle peut encourir un grand nombre d'opérations de commutation avec des coûts énergétiques importants qui peuvent non seulement augmenter considérablement le coût global de l'énergie du réseau, mais endommager également les équipements matériels. En effet, en utilisant cette approche, un grand nombre de BS sont arrêtées pendant les heures creuses.

Dans ce travail, nous abordons les méthodes disponibles pour dimensionner un système d'énergie renouvelable (RE) soit par des approches de simulation soit d'optimisation. Cette étude vise à fournir un outil analytique pour dimensionner la génération des systèmes RE, en équilibrant le besoin de satisfaire le réseau en demande d'énergie et d'indépendance du réseau électrique. Nous proposons également dans ce travail une stratégie de commutation on/off des BS basée sur la théorie des graphes afin de pouvoir contrôler plus ou moins le contexte de densification extrême prévu dans

les futurs réseaux 5G.

Ce travail est organisé comme suit. Après une brève introduction, nous procéderons dans le premier chapitre à une revue de la littérature et de l'état de l'art sur les énergies renouvelables en général et sur ceux abordés dans ce travail en particulier, les réseaux sans fil et les notions d'analyse de coûts. Dans le deuxième chapitre, nous exposerons les différentes stratégies proposées. Ensuite dans le troisième chapitre, nous présenterons et discuterons les résultats de simulations en termes de performances et complexité avant de conclure enfin ce mémoire.



# Chapitre 1

## REVUE DE LA LITTÉRATURE ET ÉTAT DE L'ART

### 1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps exposer brièvement, ce qu'on entend par technologies vertes et ensuite détailler plus ou moins les différentes technologies vertes sur lesquelles on s'appuiera durant toute notre étude. Puis nous allons présenter une vue d'ensemble sur les notions d'analyse de coût précédemment développées dans la littérature.

### 1.2 Réseaux sans fil

Dans les réseaux sans fil cellulaires, les anciens systèmes radios transmettaient des signaux analogiques et ceux d'aujourd'hui transmettent quant à eux des signaux numériques, composés de symboles binaires (bits), obtenus directement par un signal de données.

#### 1.2.1 Générations de systèmes cellulaires

La première génération (1G) de systèmes cellulaires conçus dans les années 60 utilise les communications analogiques avant que les communications numériques ne soient répandues.

La deuxième génération (*2G*) quant à elle a migré de l'analogique vers le numérique grâce à ses divers avantages. Les composants numériques sont moins chers, plus rapides, plus petits et requièrent moins de puissance. De plus, la qualité de la transmission s'est améliorée grâce à des codes correcteurs d'erreurs. La capacité des systèmes numériques est aussi plus importante comparée à celle des systèmes analogiques puisque ces derniers utilisent une modulation numérique spectralement plus efficace ainsi que plusieurs techniques plus performantes pour la répartition du spectre cellulaire. Les systèmes numériques profitent aussi des avantages des techniques de compression avancées et des facteurs d'activité de la voix. Finalement, en plus de la voix, les systèmes numériques offrent des services de données, tels que les messages courts, les courriels, l'accès à Internet et les capacités d'imagerie.

La norme système global pour la communication mobile dite GSM, utilise une combinaison d'accès multiples par division temporelle dite TDMA et de saut à fréquence lente avec une modulation de fréquence pour la transmission vocale. Toutes les normes numériques cellulaires de deuxième génération ont été améliorées pour prendre en charge les services de données par paquets à haut débit. Les systèmes GSM fournissent des débits de données allant jusqu'à 100 *Kbps* en fusionnant tous les intervalles de temps pour un seul UE. Cette amélioration est appelée service général de radiocommunication par paquet dite GPRS. Une amélioration plus fondamentale appelée services de données améliorés pour l'évolution du GSM dite EDGE, augmente encore les débits de données en utilisant une technique de modulation de haut niveau combinée avec un codage de correction d'erreur directe dit FEC.

Les systèmes cellulaires de la troisième génération (*3G*) sont basés sur une norme d'accès multiples par répartition de code dite CDMA, à large bande, développée sous les recommandations de l'union internationale de la télécommunication dite ITU [7]. Cependant, la norme *3G* est incompatible avec les systèmes *2G* de sorte que les fournisseurs de services doivent investir dans une nouvelle infrastructure avant de pouvoir fournir un service *3G*.

Les systèmes mobiles de la quatrième génération (*4G*) se concentrent sur l'intégration transparente des technologies sans fil existantes, y compris le *GSM*, le réseau d'accès local sans fil et le Bluetooth. Cela contraste avec la *3G* qui se concentre uniquement sur le développement de nouvelles normes et de nouveaux matériels. Les systèmes *4G* soutiennent des services complets et personna-

lisés, assurant une performance stable du système et un service de qualité. Toutefois, la migration des réseaux actuels vers le 4G présente encore quelques défis dans certaines régions du monde.

Les réseaux mobiles de la cinquième génération (5G) sont quant à eux une nouvelle norme universelle qui permettra une connectivité totalement transparente sans frontières entre les différents standards existants. Cette nouvelle norme offre une large variété de nouveaux services multimédias à un très haut débit de données. Il est prévu que la 5G outrepassera la 4G en termes de débit, d'efficacité spectrale et d'efficacité énergétique.

Le Tableau 1.1 résume les dissemblances entre les générations de systèmes cellulaires tiré de [7][8].

Génération	Acronyme	Types	Caractéristiques
1G	NMT, AMPS	Analogique	Services voix uniquement
2G	GSM/EDGE	TDMA	Voix + SMS, services multimédias simples (MMS, navigation sur internet)
3G	UMTS/HSPA	CDMA	Services de données pour le réseau UMTS, multimédias et vidéos en continu.
4G	LTE-A/ WIMAX 2.0	OFDMA	Architecture basée sur IP, services de données à très haut débit, applications dédiées
5G	Émergent	CDMA, OFDMA, SCMA, NOMA	Hétérogénéité transparente, services et applications avancés

Tableau 1.1 – Différence entre les types de génération mobile.



### 1.2.2 Architecture d'un réseau traditionnel

Les coûts d'installation et d'entretien d'une station de base sont énormes. À cause de ces coûts importants des BSs, les premiers systèmes cellulaires utilisaient un nombre de cellules relativement faible pour assurer la couverture d'une ville ou d'une région entière. Les BSs sont installées sur de grands bâtiments ou des montagnes et transmettent à très haute puissance. Ces grandes cellules sont appelées macrocellules. Ainsi donc la puissance du signal est rayonnée uniformément dans toutes les directions, de sorte qu'un mobile en mouvement circulaire autour de la BS aurait une puissance reçue plus ou moins constante si le signal n'est pas atténué. Ce contour circulaire idéal de puissance constante est traduit par un niveau d'abstraction en une forme de cellule hexagonale, car elle approxime le mieux un cercle pouvant couvrir entièrement une zone donnée avec plusieurs cellules topologiquement disjointes mais complémentaires.

En ce moment, pour modérer les problèmes de coûts liés aux BSs et pour étancher le besoin d'une forte densité d'UEs dans certaines zones, les systèmes cellulaires améliorés ne consistent plus uniquement en un système exclusivement composé de macrocellules. De là, des petites cellules ont été introduites dans les réseaux conventionnels. Ces petites cellules sont appelées des microcellules et picocellules, en fonction de leur zone de couverture ou de leur taille. Chaque type de cellule est capable de supporter approximativement le même nombre d'UEs. Alors, en milieu urbain, les systèmes cellulaires récents utilisent souvent des cellules à couverture plus étroite dont les BSs sont localisées au niveau de la rue tout en transmettant à faible puissance.

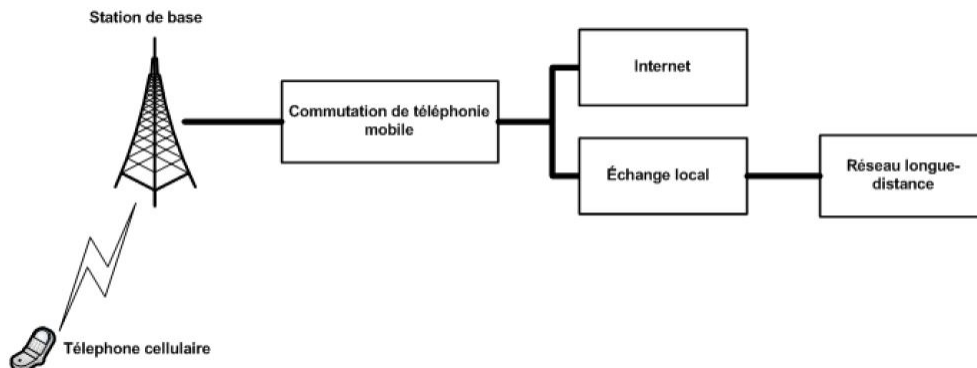


Figure 1.1 – Architecture d'un réseau cellulaire actuel.

En réalité, la forme hexagonale de la cellule n'est pas l'idéal pour une bonne approximation de la propagation du signal dans les microcellules. Les systèmes microcellulaires sont souvent illustrés

en utilisant des formes carrées ou triangulaires. Toutefois, ces formes présentent une grande marge d'erreurs dans leur approximation au signal de propagation de la microcellule [9]. Les figures 1.1 et 1.2 ci-dessous illustrent, respectivement, l'architecture des systèmes cellulaires conventionnels et actuels [7][8].

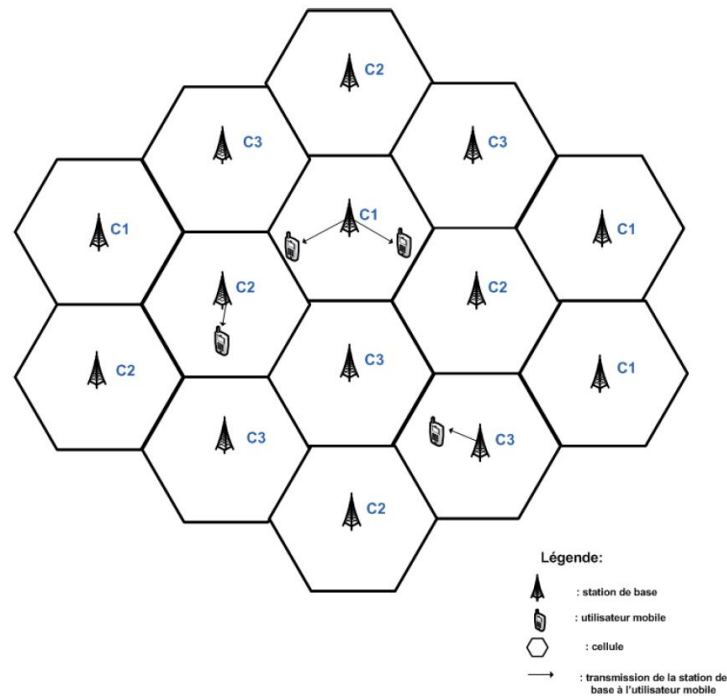


Figure 1.2 – Systèmes cellulaires conventionnels.

### 1.2.3 Architecture d'un réseau hétérogène (HetNet)

Le grand nombre d'appareils mobiles, tels que les téléphones intelligents, les tablettes et d'autres appareils continue d'accroître la croissance du trafic de données de façon exponentielle. Pour satisfaire cette croissance, les opérateurs de réseaux mobiles doivent augmenter significativement la capacité de leurs réseaux tout en réduisant le coût par bit livré. De nombreuses recherches ont démontré que le trafic de données mobiles augmente depuis 2008 au rythme de 100% par année et ne cesse de s'accélérer. Pour que le déploiement du réseau soit rentable économiquement, il est nécessaire de modifier le modèle de déploiement de l'infrastructure du réseau conventionnel. Cette modification peut être effectuée par le déploiement sous-jacent de BSs hétérogènes (microcellules, picocellules, femtocellules ou BS en environnement intérieur, relais, systèmes distribués d'antennes dits DAS, etc.) dans le réseau traditionnel. Ces BSs hétérogènes sont différenciées par leur puissance

de transmission, l'étendue de leur zone, etc.

Le réseau HetNet est établi selon le principe d'un déploiement d'un grand nombre de BSs à faible coût et à faible consommation sensiblement plus petites que les macrocellules traditionnelles. Plusieurs travaux montrent que le déploiement de BSs à faible puissance peut fournir des avantages au réseau tels que l'amélioration de la capacité, l'extension de la couverture, la réduction de coûts et l'efficacité énergétique.

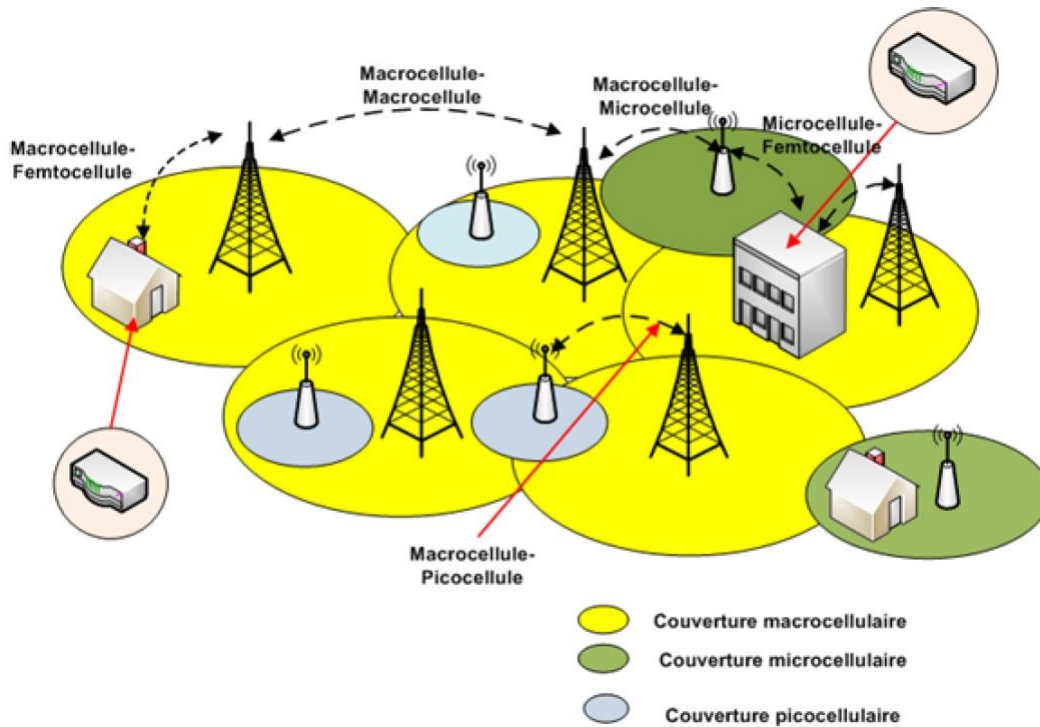


Figure 1.3 – Architecture d'un réseau HetNet.

Pour un HetNet donné, le rayon d'une petite cellule est typiquement de 10 à 200 m dans les zones urbaines ainsi que dans des édifices et il est supérieur à 2 km dans les zones rurales. Sa puissance de transmission se situe entre 20 mW et 2 W. D'un autre côté, le rayon d'une macrocellule est de quelques kilomètres et sa puissance de transmission est de 20 à 40 W. La figure 1.3 illustre l'architecture typique d'un réseau HetNet et la zone de couverture relative de chaque BS [10]. Les petites cellules peuvent être considérées comme des points d'accès de petite portée (300 m ou moins) et de faible puissance qui sont généralement équipées d'une antenne omnidirectionnelle. De plus, elles sont moins coûteuses et supportent moins d'UEs comparées aux macrocellules. Les picocellules

et microcellules sont gérées par l'opérateur tandis que les femtocellules sont typiquement installées et gérées par l'UE et ce, d'une manière non-planifiée [11]. Celles-ci améliorent la couverture radio pour les UEs mobiles à l'intérieur d'une maison ou dans un petit bureau. Contrairement aux microcellules et picocellules, les femtocellules utilisent la liaison de raccordement à large bande de l'UE final pour atteindre l'opérateur du réseau mobile. Plusieurs études ont démontré que les femtocellules ont la capacité de garantir une bonne  $QoS$ , une capacité de réseau élevée ainsi qu'une réduction des coûts d'infrastructure, de maintenance et d'exploitation pour les opérateurs de réseau [12].

#### A) La macrocellule

Les réseaux macrocellulaires sont constitués de BSs installées par un opérateur conventionnel, offrant un accès public et une couverture étendue, approximativement de l'ordre de quelques kilomètres. Généralement destinées à fournir un débit de données minimum garanti sous des contraintes de retard et d'interruption maximales tolérables, les macrocellules émettent généralement jusqu'à 46 dBm, desservant des milliers de clients et utilisant une liaison de raccordement dédiée.

#### B) La picocellule

Les picocellules sont généralement déployées de manière centralisée, desservant quelques dizaines d'UEs dans un rayon de 300 m ou moins et ayant une plage de puissance de transmission typique de 23 dBm à 30 dBm. Les picocellules sont principalement utilisées dans des environnements où la pénétration de la macrocellule est insuffisante (par exemple, des immeubles de bureaux). De plus, les picocellules peuvent être déployées au bord de la macrocellule afin d'étendre la couverture ou le débit. La figure 1.4 illustre le déploiement d'un réseau de macrocellules-picocellules extérieures [13].

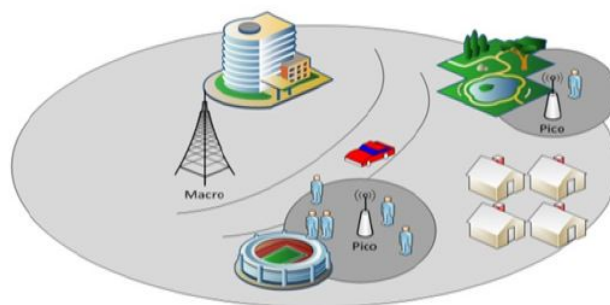
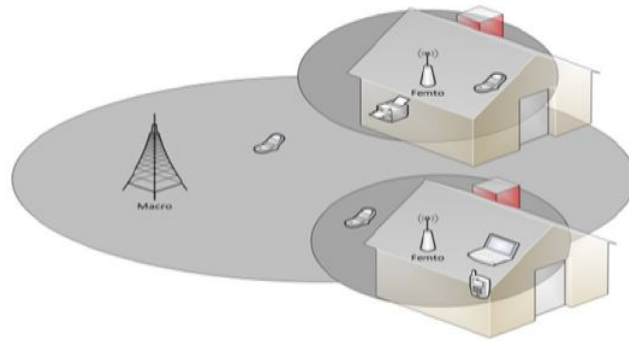


Figure 1.4 – Déploiement d'une macrocellule-picocellule extérieure.

## C) La femtocellule

Les femtocellules diminuent le trafic de données à l'aide de la connexion à large bande des consommateurs et desservent une douzaine d'UEs actifs dans les foyers ou les entreprises. Typiquement, la plage de couverture de la femtocellule est inférieure à 50 m et sa puissance de transmission est inférieure à 23 dBm. La figure 1.5 qui a été tirée de [13] donne un aperçu de déploiement d'une macrocellule-femtocellule à l'intérieur des logements. En général, les femtocellules sont déployées par les propriétaires de résidence ou d'entreprise. Elles peuvent donc être déplacées facilement, ce qui pose des défis de localisation plus complexes que pour les microcellules et les picocellules.



**Figure 1.5 – Déploiement d'une macrocellule-femtocellule intérieure.**

## D) Les relais

Les relais sont des points d'accès déployés par l'opérateur pour acheminer les données de la macrocellule vers les UEs finaux et vice versa et dont la puissance d'émission est similaire à celle des picocellules. Ils sont positionnés de façon à augmenter la puissance du signal et à améliorer la réception dans certaines zones du réseau telles que les bords des cellules et les tunnels.

BSs	Puissance de transmission	Couverture
Macro	46 dBm	Quelques kilomètres
Pico et Micro	23-30 dBm	< 300 m
Femto	< 23 dBm	< 50 m
Relais	30 dBm	300 m

**Tableau 1.2 – Différence entre les types de BS.**

Le tableau 1.2 nous présente quelques caractéristiques des différents types de BS.

## 1.3 Technologies vertes

Les technologies vertes permettent de réduire les effets préjudiciables de l'activité humaine sur l'environnement. Le but est d'optimiser l'exploitation des énergies renouvelables (REs) et de trouver des solutions à long terme pour prévenir la dégradation des écosystèmes par l'humain dont la vie en dépend pourtant. Ces technologies ne permettent pas d'éradiquer définitivement tous les méfaits provoqués à l'environnement, mais elles les préviennent et/ou tentent de les réduire du mieux possible.

L'expression énergie renouvelable (RE) est employée pour désigner des énergies qui sont inépuisables et disponibles en grande quantité. Ainsi il existe cinq grands types d'énergies renouvelables : l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Dans la mise en œuvre de cette étude, nous allons nous intéresser à l'énergie solaire photovoltaïque et à l'énergie éolienne.

### 1.3.1 Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque correspond à l'électricité produite par des cellules dites photovoltaïques. Ces cellules reçoivent la lumière du soleil et sont capables de la transformer partiellement en électricité. La figure 1.6 nous illustre un système photovoltaïque.



**Figure 1.6 – Système photovoltaïque[18].**

En effet, ces panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés aussi bien à des fins domestiques qu'à la production d'énergie à grande échelle. L'inconvénient de l'énergie solaire est qu'elle est intermittente. Elle ne peut être exploitée que lorsque le soleil brille.

### **1.3.2 Énergie éolienne**

L'énergie éolienne correspond à l'électricité produite à partir du déplacement des masses d'air. Elle exploite l'énergie cinétique du vent. Les éoliennes peuvent être installées sur la terre ferme. On parle alors d'éoliennes onshore. Ce sont techniquement les plus simples à déployer. Mais plus efficaces sont les éoliennes installées en mer que l'on qualifie d'éoliennes offshore. La figure 1.7 nous illustre un système éolien.



**Figure 1.7 – Système éolien [21].**

Tout comme le photovoltaïque, l'éolien est une énergie intermittente. Les éoliennes ne produisent que lorsque le vent souffle. En revanche, contrairement aux panneaux solaires photovoltaïques, il est difficile d'installer une éolienne dans son jardin. La technologie est plutôt réservée aux grandes installations.

## **1.4 Analyse de coûts**

Les analyses de coûts sont basées sur certaines dépenses à savoir: les dépenses d'investissement de capital (CAPEX) et les dépenses d'exploitation (OPEX).

### **1.4.1 Dépenses d'investissement (CAPEX)**

Les dépenses d'investissement de capital représentent le coût de construction et d'installation des infrastructures ainsi que le coût des équipements nécessaires pour couvrir une certaine zone géographique.



### 1.4.2 Dépenses d'exploitation (OPEX)

Les dépenses d'exploitation représentent le coût des opérations de maintenance et de location des sites ainsi que le coût d'utilisation des équipements intermédiaires.

### 1.4.3 Analyse de coûts des réseaux hétérogènes

Des chercheurs proposent une nouvelle méthode pour le calcul du coût d'un réseau LTE-HetNet [14]. Cette méthode est basée sur deux types de dépenses précédemment énoncées (c.à.d. CAPEX et OPEX). Par conséquent, il est possible de calculer le coût d'un réseau qui déploie le type de station  $i \in \{\text{macro, micro, pico}\}$  en appliquant la formule suivante [14]:

$$C_i = N_{BS_i} \times (C_{cap_i} + C_{op_i}), \quad (1.1)$$

où  $C_i$  est le coût total d'une BS de type  $i$ ,  $N_{BS_i}$  est le nombre total de BSs de type  $i$  nécessaire pour couvrir la zone,  $C_{cap_i}$  et  $C_{op_i}$  désignent les coûts CAPEX et OPEX d'une BS de type  $i$ , respectivement.

L'équation qui permet de calculer le coût des dépenses en capital (CAPEX) est donnée par la formule suivante [14]:

$$C_{cap_i} = C_{eq_i} + C_{sb_i}, \quad (1.2)$$

où  $C_{eq_i}$ ,  $C_{sb_i}$  sont les coûts d'équipements et d'installation/construction d'une BS de type  $i$ , respectivement.

L'équation qui permet de calculer le coût des dépenses d'exploitation (OPEX) est donnée par la formule suivante [14]:

$$C_{op_i} = C_{sl_i} + C_{om_i} + C_{bh_i}, \quad (1.3)$$

où  $C_{sl_i}$  est le coût de location du site d'une BS de type  $i$ ,  $C_{om_i}$  est le coût des opérations de maintenance d'une BS de type  $i$ ,  $C_{bh_i}$  est le coût d'utilisation de réseaux intermédiaires d'une BS de type  $i$ .

De là, nous pouvons déduire le coût total d'un réseau HetNet qui prend en considération les différents types de stations de base en appliquant la formule suivante :

$$C_T = \sum_i C_i, \quad (1.4)$$

où  $C_i$  est le coût d'un réseau utilisant des BSs de type  $i \in (\text{macro}, \text{micro et pico})$ .

## 1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons énuméré quelques informations importantes sur les réseaux sans fil et les technologies vertes qui interviendront dans cette étude et également fourni quelques informations d'analyse de coût des réseaux hétérogènes (HetNet). Dans le chapitre suivant, nous ferons une étude de faisabilité de ces différents types d'énergies renouvelables afin d'estimer leurs coûts. A cela s'ajoutera la stratégie de commutation on/off des BSs.



## Chapitre 2

# STRATEGIES DE DEPLOIEMENT

### 2.1 Introduction

Dans cette partie de notre étude, nous allons procéder à une analyse économique des différentes technologies vertes (photovoltaïque et éolienne) et ensuite exposer la stratégie de commutation on/off proposée.

### 2.2 Modélisation des différents types d'énergies renouvelables

#### 2.2.1 Modélisation d'un système photovoltaïque

Un système photovoltaïque (PV) est composé principalement de panneaux solaires photovoltaïques grâce auxquels une partie du rayonnement solaire est directement transformée en électricité. Ces panneaux sont composés de cellules photovoltaïques, constituées principalement de silicium. Le principe de l'obtention du courant par les cellules photovoltaïques se nomme effet photoélectrique, qui consiste en l'émission d'électrons par un matériau soumis à la traction de la lumière [15]. Cette production d'énergie électrique peut alors être stockée dans des batteries ou converties à l'aide d'un onduleur pour qu'elle soit distribuée dans le réseau électrique. Il est à noter que l'irradiation solaire varie selon l'emplacement géographique de chaque région.

La puissance fournie par un panneau solaire photovoltaïque de type  $i$  peut s'exprimer comme suit[16]:

$$P_i = S_i \times I \times R_i \times C_p, \quad (2.1)$$

où  $P_i[W]$ ,  $S_i[m^2]$ ,  $I[W/m^2]$ ,  $R_i$  et  $C_p$  représentent, respectivement, la puissance fournie par un panneaux solaire photovoltaïque de type  $i$ , la surface du champ photovoltaïque du panneau de type  $i$ , l'irradiation solaire, le rendement du module photovoltaïque de type  $i$  et le coefficient de performance.

Il est à noter que dans des conditions d'essai standard conduites à une température de 25 °C et un éclairage énergétique de 1000  $[W/m^2]$ . Le tableau 2.1 nous présente les différents types de panneaux et leurs rendements respectifs.

Panneaux	Rendement
Monocristallin	14% à 19%
Polycristallins	11% et 15%
Amorphes	5% à 7%

**Tableau 2.1 – Types de panneaux et rendement respectifs.**

### 2.2.2 Modélisation d'un système éolien

Un système éolien est un système mécanique permettant de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. La puissance fournie par une éolienne de type  $i$  peut être exprimée comme suit [17][19]:

$$P_i = \frac{1}{2} \times \rho \times A_i \times V^3 \times C_p, \quad (2.2)$$

où  $P_i[W]$  représente la puissance fournie par une éolienne de type  $i$ ,  $A [m^2]$  est l'aire couverte par les pales (qui forment ainsi un cercle),  $\rho [Kg.m^{-3}] = 1.225$  représente la densité volumique de l'air,  $V [m.s^{-1}]$  indique la vitesse du vent et  $C_p$  est le coefficient de performance de l'éolienne selon Bertz[20].

Etant donnée que l'aire couverte par les pales de l'éolienne  $i$  forme un cercle, elle se calcule:

$$A = \pi \times L_i^2 \quad (2.3)$$

où  $L_i [m]$  représente la longueur des pales de l'éolienne. À partir de cette expression, on voit que la vitesse du vent influe de manière très importante sur l'énergie produite, ce qui implique que si la vitesse du vent double, la puissance est multipliée par 8.

### 2.2.3 Calcul des différents coûts CAPEX et OPEX

#### 1. CAPEX

Le coût CAPEX associé à ses deux différents types d'énergie renouvelable de type  $i$  s'exprime comme [22][23]:

$$CAPEX_i = C_{M,i} + C_{BOS,i} + C_{IL,i}. \quad (2.4)$$

Pour le photovoltaïque et l'éolienne:

- $C_{M,i}$  représente le coût du module photovoltaïque et le coût des turbines respectivement,
- $C_{BOS,i}$  est le coût de la balance du système,
- $C_{L,i}$  est le coût de la main d'œuvre.

#### 2. OPEX

Le coût OPEX associé à ces deux différents types d'énergie renouvelable de type  $i$  s'exprime comme suit [22][23]:

$$OPEX_i = C_{operations,i} + C_{maintenance,i}. \quad (2.5)$$

Pour le photovoltaïque et l'éolienne:

- $C_{operations,i}$  représente le coût des opérations qui inclut les opérations d'administration,
- $C_{maintenance,i}$  représente le coût de la maintenance qui inclut le coût de remplacement du module photovoltaïque et des turbines, le coût de nettoyage du module et de gestion de la végétation, d'inspection et surveillance du système.

## 2.2.4 Stratégie de déploiement adoptée

La méthode proposée consiste en des sous-zones où toutes nos BSs sont alimentées en électricité conventionnelle pour aboutir à des sous-zones où elles seront alimentées avec des REs. Tout ceci se fera dans le but d'amoinrir le coût énergétique des BSs tout en maintenant une bonne capacité de transmission.

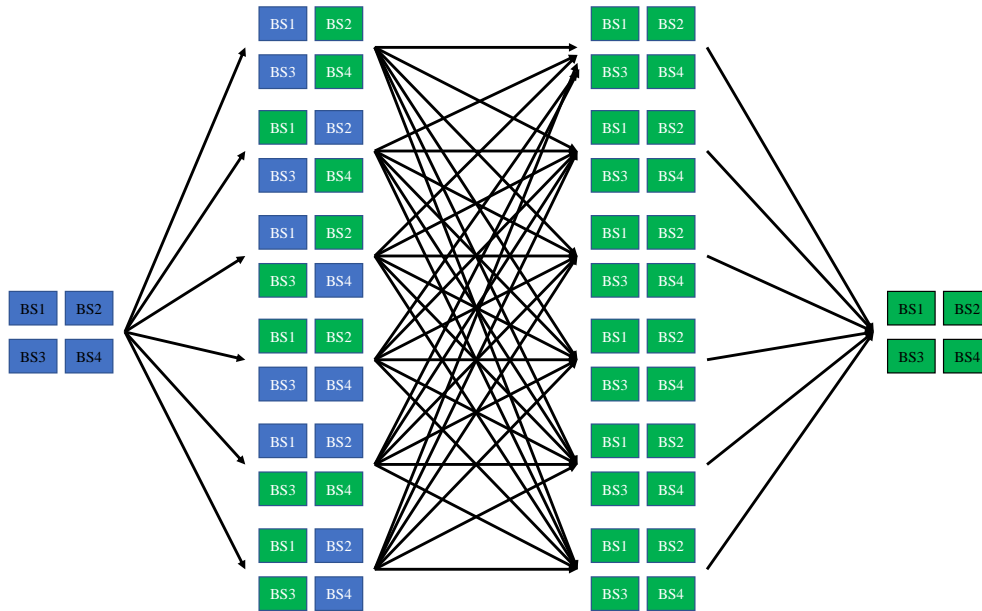


Figure 2.1 – Schématisation du déploiement.

La figure 2.1 nous schématise les différentes étapes de notre déploiement. Comme énuméré plus haut, nous avons des sous-zones en fond bleu pour indiquer que les BSs sont alimentées par l'électricité conventionnelle et en fond vert pour indiquer qu'elles sont alimentées avec les REs (technologies vertes).

En tenant compte du graphique ci-dessus, il est possible de reformuler le problème en celui du chemin le plus long/court pouvant être résolu facilement et efficacement à l'aide des algorithmes existants dans la littérature, tels que Dijkstra (item C.). À cette fin, il est nécessaire de développer une métrique tenant compte à la fois du coût du réseau et de la puissance. Notre méthode s'appuiera sur une telle métrique pour faire les choix appropriés.

Si cette métrique ne prend en compte que le coût du réseau, il en résultera une configuration

où les BSs seront alimentées uniquement par la RE la moins coûteuse. D'autre part, si la métrique ne tient compte que de la puissance, il en résultera une configuration où les BSs seront alimentées uniquement par la RE la plus puissante.

### 2.2.5 Métrique ou fonction d'utilité proposée

Comme indiqué ci-dessus, notre fonction d'utilité doit prendre en compte la puissance et le coût pour garantir le moindre coût d'investissement pour une meilleure puissance fournie. Afin de satisfaire ces caractéristiques, nous proposons dans ce travail d'utiliser la métrique suivante:

$$U_i = \underbrace{\left(\frac{C_{\max} - C_i}{C_{\max}}\right)^{w_p}}_{\text{Gain de coût}} \times \underbrace{\left(\frac{P_i}{P_{\max}}\right)^{(1-w_p)}}_{\text{Gain en puissance}}, \quad (2.6)$$

où  $U_i$  désigne la fonction d'utilité du coût pour la RE de type  $i$ ,  $P_i$  et  $P_{\max}$  représentent respectivement, la puissance fournie par la RE de type  $i$  et la puissance maximale,  $w_p$  est le poids du coût,  $C_{\max}$  est le coût maximal et  $C_i$  est le coût total de la RE de type  $i$ .

## 2.3 Commutation ON/OFF des BSs

Il existe principalement deux approches pour bien commuter (c.à.d. on/off) un nombre donné de BSs [5][6]: approches online et offline. La première approche décide des intervalles de commutation optimaux de chaque BS en se basant sur sa charge moyenne tout en exploitant les informations de ses opérations passées. L'approche offline est relativement simple et permet la planification à l'avance des intervalles d'activation et de désactivation. Cependant, elle présente un inconvénient majeur qui s'explique par le fait qu'elle ne prend pas en compte la charge réelle instantanée et n'est donc pas robuste à des événements imprévisibles, ce qui nuit à son efficacité. Par contre, l'approche online considère exclusivement la charge réelle (c.à.d. instantanée) afin de décider de désactiver ou non une BS. Par conséquent, elle est capable de gérer des événements imprévisibles en activant la partie réseau appropriée (c.à.d. le nombre de BSs) pour faire face à une augmentation ou à une diminution soudaine du trafic. En dépit de tout, cette approche est complexe car la décision doit être prise et exécutée en temps réel. En outre, il peut entraîner un grand nombre d'opérations de commutation on/off avec un coût énergétique relativement important qui peut non seulement



augmenter considérablement le coût énergétique total du réseau, mais également endommager les équipements matériels. En effet, en utilisant cette approche, un grand nombre de BSs sont arrêtées lorsque le trafic est moins dense à une heure  $H$  donnée. Cependant, si un trafic de données très élevé est généré à un temps  $H+\epsilon$ , où  $\epsilon$  représente une période relativement petite, la majorité des stations de base précédemment désactivées sur la base des informations de charge instantanée seront réactivées au prix d'un grand nombre d'opérations de commutation on/off, réduisant ainsi la rentabilité du réseau. Un tel inconvénient s'intensifie carrément sans des contextes de densification extrême prévus dans les futurs réseaux 5G.

### 2.3.1 Modèle du système

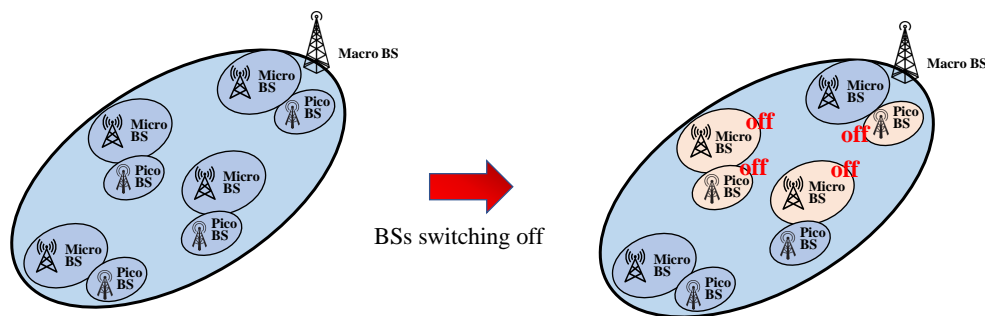


Figure 2.2 – Modèle du système.

Comme l'illustre la figure 2.2, nous considérons une zone de cellule unique d'un réseau HetNet, desservie par une macro-BS et  $N$  micros- et picos-BSs. La macro étend la couverture réseau dans cette zone, tandis que les micros et les picos fournissent une capacité supplémentaire à la limite de la zone et dans les hotspots (c.à.d point d'accès). Nous considérons également  $M$  UEs non uniformément répartis. Pour faire face au déluge inédit de trafic mobile prévu dans les réseaux 5G, ce dernier aura recours à une densification extrême des infrastructures de réseau, notamment des micros et des picos-BSs. Cependant, en augmentant le nombre de BSs et potentiellement le nombre d'antennes dans chaque BS [c.à.d., un MIMO ultra massif (UM-MIMO)], la consommation d'énergie du réseau atteindra certainement des niveaux critiques, ce qui rend crucial la capacité de commutation on/off des BSs dans les futurs réseaux 5G. Il est à noter ici que la macro ne peut pas être désactivée, car les micros et les picos ne peuvent à eux seuls fournir une couverture complète de la zone. Néanmoins, la décision quant au moment et au type de désactivation de BS doit être prise avec rigueur pour

garantir un certain niveau de qualité de service (QoS) aux UEs. À cette fin, il est nécessaire de relever certains défis.

Le premier consiste à développer une nouvelle métrique tenant compte à la fois du coût énergétique du réseau et de la qualité de service des UEs. Notre stratégie de commutation on-off des BSs s'appuiera sur une telle métrique pour faire les choix appropriés. Si ce dernier ne prend en compte que le coût énergétique, il en résultera une configuration où les BSs seront désactivées (Off-BSs) et où les UEs seront ainsi desservies exclusivement par la macro, ce qui détériore considérablement la qualité de service. D'autre part, si la métrique ne tient compte que de la qualité de service, il en résultera une configuration où les BSs seront activées (On-BSs), ce qui sera plus coûteux en énergie. Ces cas extrêmes mettent en évidence le besoin indiscutable d'une mesure qui inclut à la fois la QoS du réseau et le coût énergétique.

Le deuxième défi concerne le fait que notre stratégie de commutation des BSs doit exploiter les informations de charges instantanées et prévues. La charge instantanée est très utile pour faire face à la situation actuelle du réseau, tandis que les prévisions sont essentielles pour éviter le mauvais impact de la décision actuelle sur les conditions futures du réseau. Par conséquent, la stratégie proposée doit prendre en compte un intervalle de temps important (à savoir du présent au futur proche ou même à terme) avant de décider du statut de chaque BS (à savoir, activer ou désactiver). Cela rend le problème d'optimisation hautement multidimensionnel contrairement à ceux envisagés dans la plupart des travaux antérieurs dans lesquels les décisions sont prises de manière indépendante à des intervalles de temps différents.

### 2.3.2 Stratégie de commutation proposée

Dans le but de résoudre le problème d'optimisation multidimensionnel qui nous préoccupe, nous proposons dans ce travail d'exploiter le puissant outil de la théorie des graphes, principalement en raison de sa simplicité. À cette fin, nous devons identifier les différents états (c-à-d. les sommets) de notre graphe, ainsi qu'une source unique (c-à-d. l'état initial) et une destination unique (c-à-d. l'état final).

Par souci de simplicité, considérons un réseau comprenant une macro et 6 micro-BSs illustrées à la figure 2.3 où seuls les micros sont représentées, la macro étant toujours activée. Sur cette figure, les micro-BSs actives (c-à-d. dont les états sont «activés») sont représentés en vert. Soit  $t = 0$  l'heure

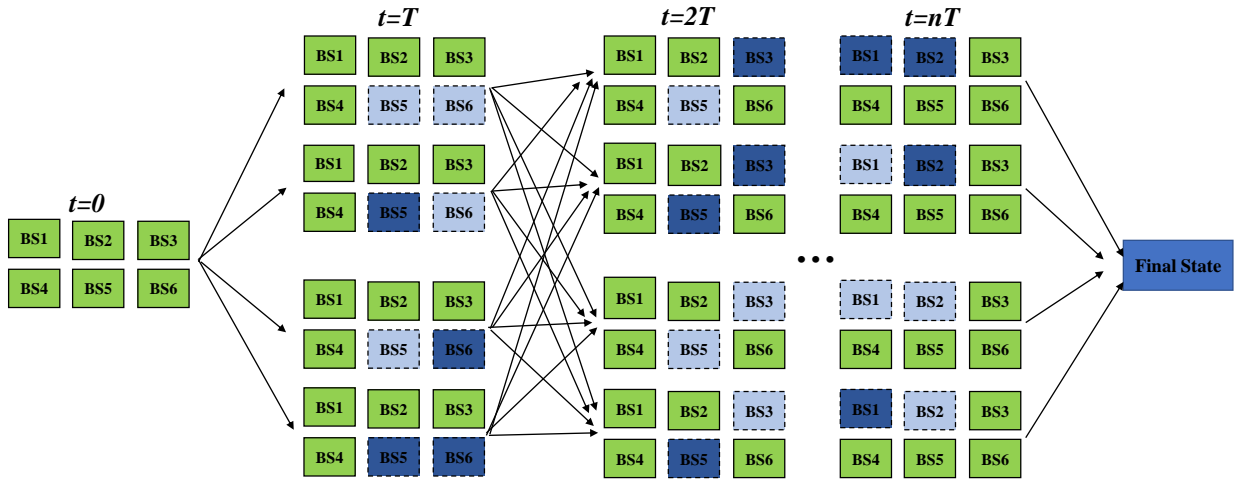


Figure 2.3 – Commutation on-off BS proposée sous forme de graphe - Étape 1: Analyse offline ou hors ligne.

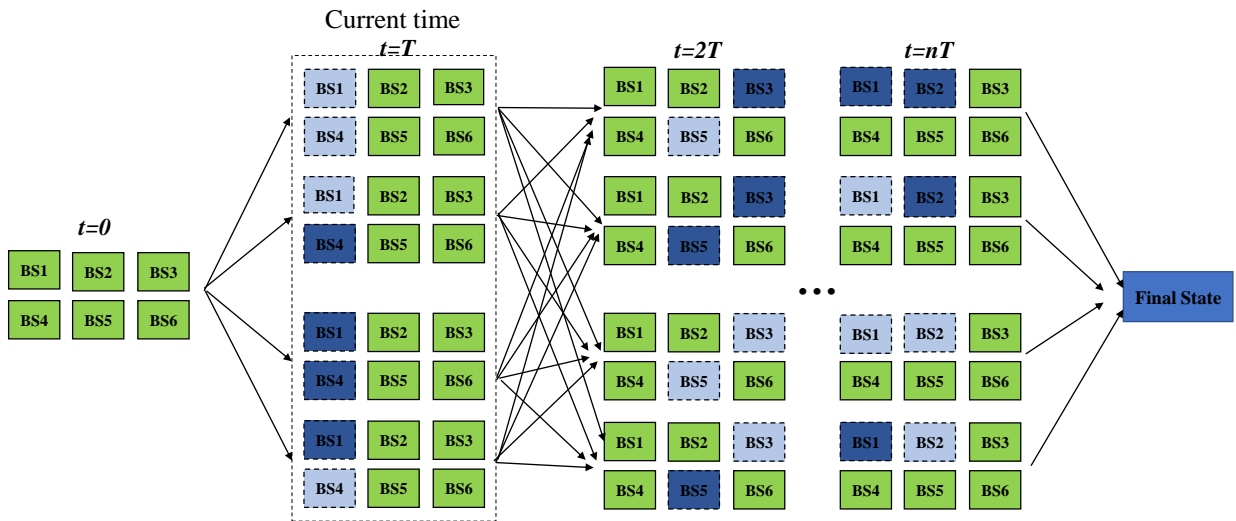


Figure 2.4 – Commutation on-off BS proposée sous forme de graphe - Étape 2: Analyse online ou en ligne.

de début correspondant à la phase initiale à laquelle six BSs sont actives. À la fin du premier cycle de durée  $T$  (c.-à-d.,  $t = T$ ), si le nombre des UEs desservis par une micro-BS donnée est inférieur à un certain seuil, cette BS est susceptible d'être désactivée (off BS). Dans la figure 2.3, on voit à  $t = T$  que BS5 et BS6 satisfont cette condition. Par conséquent, il existe quatre configurations de réseau différentes dans lesquelles les deux BS sont simultanément désactivées ou maintenues, où l'une est désactivée tandis que l'autre est maintenue et vice versa.

Bien que nous utilisions les valeurs instantanées (c.-à-d. actuelles) des nombres d'UEs desservis pour identifier les BS à  $t = T$ , nous proposons d'exploiter les valeurs moyennes attendues (c.-à-d. prédites) pour identifier les potentiels BSs dans l'avenir proche ou lointain (i.e., à  $t > T$ ). Un graphique est ensuite créé, comme le montre la figure 2.3, dont l'état final est un état virtuel dans lequel tous les états intermédiaires convergent sans que cela n'entraîne de coût en énergie ou en coût QoS. Ce choix est en réalité motivé par le fait que l'état final doit être unique pour garantir l'existence d'une stratégie optimale. Afin de finaliser notre graphique, nous devons également fixer le nombre de cycles  $N_{\text{cyc}}$ . Plus élevé est ce dernier, plus efficace sera notre solution car elle tiendra compte du futur. Cependant, le nombre d'états possibles et les liens augmentent considérablement avec  $N_{\text{cyc}}$ , ce qui entraîne beaucoup plus de complexité. En réalité,  $N_{\text{cyc}}$  reflète à quel point la décision actuelle affectera l'avenir et est donc étroitement dépendante des politiques de l'opérateur et des conditions du réseau.

Après avoir créé le graphique, concentrons-nous désormais sur le coût de la transition inter-états et sur la manière de l'exploiter pour faire ressortir la stratégie optimale de commutation on/off des BSs.

#### A. Coût de transition entre états et métrique proposée

Comme indiqué précédemment, notre métrique doit prendre en compte le coût énergétique et la QoS pour garantir un compromis entre l'expérience perçue par l'utilisateur (c.à.d. performance du réseau) et le coût OPEX engendré. De plus, elle doit intégrer tous les changements de contraintes et/ou de paramètres au fur et à mesure qu'ils évoluent dans le temps. Afin de satisfaire ces caractéristiques, nous proposons dans ce travail d'utiliser le coût ou la métrique de transition d'états-graphes suivant:

$$M_{i,j} = \underbrace{\left( \frac{p_{\max} - p_{i \rightarrow j}}{p_{\max}} \right)^{w_p}}_{\text{Gain en puissance}} \times \underbrace{\left( \frac{T_j}{T_{\max}} \right)^{(1-w_p)}}_{\text{Gain en QoS}}, \quad (2.7)$$

où  $M_{i,j}$  désigne la métrique du coût entre les  $i^{\text{ème}}$  et  $j^{\text{ème}}$  états définie comme le produit des deux gains en coût de puissance et QoS,  $T_j$  et  $T_{\max}$  représentent respectivement, le débit d'utilisation moyen fourni par la configuration du réseau dans le  $j^{\text{ème}}$  état et le débit maximal,  $w_p$  est le poids de pondération géométrique du coût en puissance,  $p_{\max}$  est le

coût de puissance maximal et  $p_{i \rightarrow j}$  est le coût de la puissance de transition donné par:

$$p_{i \rightarrow j} = \sum_l \left( a_{l,i} \left( p_l^{op} + p_l^{TX} \right) + |a_{l,i} - a_{l,j}| p^{sw} \right), \quad (2.8)$$

où  $p_l^{op}$  et  $p_l^{TX}$  représentent, respectivement, les coûts de fonctionnement et de puissance de transmission par rapport à la  $l^{\text{ème}}$  BS dans l'état  $j$ ,  $p^{sw}$  est la puissance de commutation requise pour activer ou désactiver une station de base et  $a_{l,\star}$  est une variable binaire qui prend les valeurs 1 ou 0 lorsque la  $l^{\text{ème}}$  BS est "ON" ou "OFF" (c.-à-d. activé ou désactivée) dans le  $\star^{\text{ème}}$  état, respectivement.

Il est à noter que  $w_p$  dans (2.7) régit le compromis QoS/coût selon les politiques de l'opérateur et que  $w_p = 1$  ou  $w_p = 0$  accentuent respectivement, le gain de puissance ou de QoS. Dans ce cas, les décisions sont prises indépendamment de la QoS ou du coût de puissance. Cela signifie que le système résultant de  $w_p = 1$  ou  $w_p = 0$  en est un où toutes les stations de base sont "ON" ou "OFF".

## B. Outil d'optimisation proposé

En utilisant le graphique développé ci-dessus et la métrique, il est possible de reformuler le problème de commutation on-off multidimensionnel de BS en problème de chemin le plus long/le plus court pouvant être résolu facilement et efficacement à l'aide de tous les algorithmes existant dans la littérature tels que celui de Dijkstra résumé dans item C.. Nous proposons ici de concevoir le chemin optimal ou les états intermédiaires successifs d'une source à une destination qui maximise la métrique globale suivante:

$$\mathcal{M}^{Total} = \prod M_{i,j}. \quad (2.9)$$

Chaque état intermédiaire obtenu traduit en fait la configuration du réseau optimale (c.-à-d. des BS activées et désactivées) à un temps  $t$  donné. Ainsi donc, on peut adopter une procédure en deux étapes:

- 1<sup>ère</sup> étape

Nous identifions d'abord toutes les BSs pour une opération de commutation on-off, en exploitant les informations de charge moyennes attendues (c.-à-d. prédites). Ensuite, nous formons la source, tous les états intermédiaires et finaux, pour construire le graphe avant de calculer les coûts de transition entre états, comme illustré à la

figure 2.3. Par ailleurs, notons que le coût associé à toute transition vers l'état final est défini à 1 pour éviter d'affecter  $\mathcal{M}^{Total}$ . Enfin, nous exploitons l'un des algorithmes mentionnés ci-dessus, en l'occurrence celui de Dijkstra (item C.), pour déterminer le chemin optimal ou les états intermédiaires successifs appropriés.

- 2<sup>ème</sup> étape

À la fin de chaque cycle (c.-à-d.  $t = nT; n = 1, 2, 3, \dots$ ), nous exploitons les informations de charge instantanée actuelles pour mettre à jour les états intermédiaires (c.-à-d., configuration possible du réseau) comme indiqué à la figure 2.4. Ensuite, nous exploitons à nouveau l'algorithme de Dijkstra (item C.) pour mettre à jour le chemin optimal. Il est à noter que l'état de la source à  $t = nT$  n'est rien d'autre que le premier intermédiaire du chemin tracé à  $t = (n - 1)T$ . Comme mentionné ci-dessus, l'état source  $t = T$  correspond à la configuration dans laquelle toutes les BS sont actifs.

### C. Algorithme d'optimisation (algorithme de Dijkstra)

En théorie des graphes, l'algorithme de Dijkstra sert à résoudre le problème du plus court chemin. Il permet, par exemple, de déterminer le plus court chemin pour se rendre d'un point A à un point B. Plus précisément, il calcule les plus courts chemins à partir d'une source dans un graphe orienté pondéré par des réels positifs vers une destination. On peut donc écrire l'algorithme de la façon suivante:

---

**Algorithm 1** Algorithme de Dijkstra
 

---

**Require:** Un graphe  $G$

**Require:** Un noeud source  $S$

**Ensure:** Les plus court chemins de  $S$  vers tout les autres noeuds de  $G$

```

1: for all  $v \in V[G]$  do
2:    $d[v] \leftarrow +\infty$ 
3:    $\text{previous}[v] \leftarrow \text{undefined}$ 
4: end for
5:  $d[s] \leftarrow 0$ 
6:  $S \leftarrow \text{empty set}$ 
7:  $Q \leftarrow V[G]$ 
8: loop
9:    $Q$  is not an empty set
10:   $u \leftarrow \text{Extract}_{\text{Min}}(Q)$ 
11:   $S \leftarrow S \cup \{u\}$ 
12:  for all edge  $(u, v)$  outgoing from  $u$  do
13:    if  $d[u] + w(u, v) < d[v]$  then
14:       $d[v] \leftarrow d[u] + w(u, v)$ 
15:       $\text{previous}[v] := u$ 
16:    end if
17:  end for
18: end loop

```

---

Les résultats qui seront obtenus avec cet algorithme seront comparés dans les chapitres suivants avec d'autres algorithmes de la littérature.

## 2.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté la stratégie de déploiement des RE avec une commutation on/off des BS. Les opérations de commutation sont pré-planifiées offline en fonction des prévisions de charge, puis online sur la base de la charge instantanée soit pour réduire l'énergie consommée à faible trafic soit pour éviter la surcharge lorsque le trafic est dense.

Le prochain chapitre expose et discute les différents résultats obtenus grâce à notre stratégie et les compare à d'autres approches.





## Chapitre 3

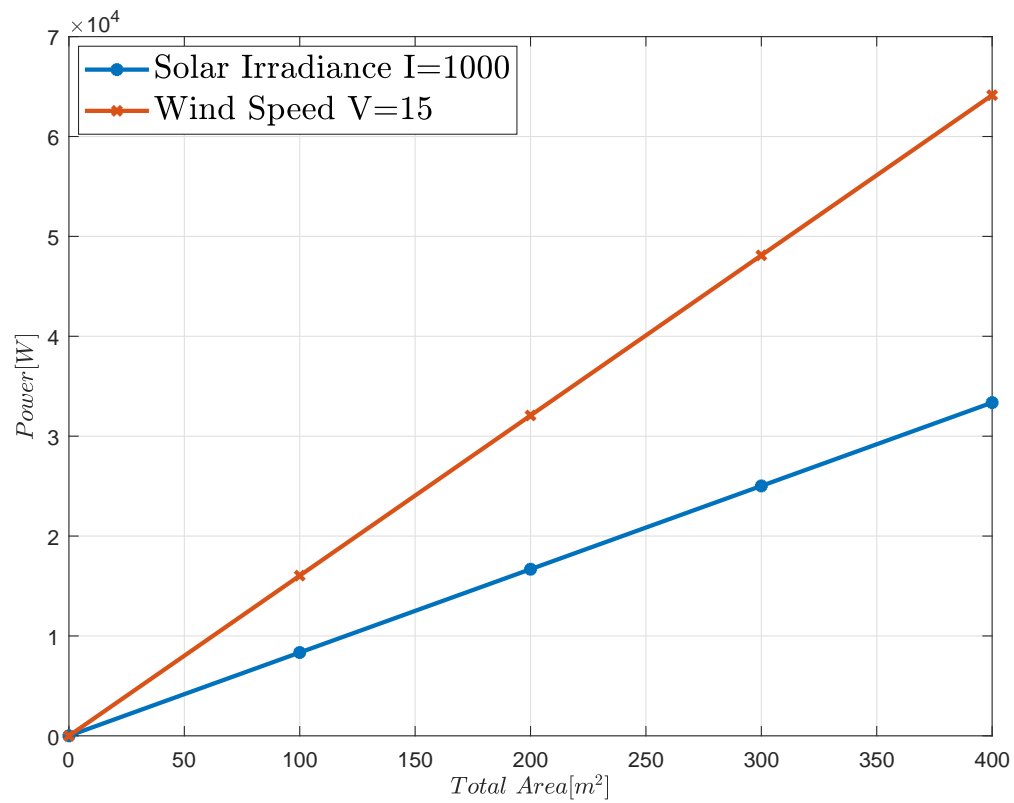
# ANALYSE DE PERFORMANCES ET SIMULATIONS

### 3.1 Énergies renouvelables

Paramètres	Valeurs
Diamètre du rotor	15 m
Coefficient de performance $C_p$	16/27
Vitesse du vent	15 m/s
Irradiation solaire	1000 W/m <sup>2</sup>
Densité de l'air	1.225 Kg/m <sup>3</sup>

Tableau 3.1 – Différents paramètres de simulations.

Le tableau 3.1 récapitule tous les paramètres de configuration de nos simulations.



**Figure 3.1 – Puissance fournie versus surface totale.**

La figure 3.1 montre qu'un système éolien fournit pour une même surface plus de puissance qu'un système photovoltaïque.

Nous observons par ailleurs à partir des Figures 3.2 et 3.3 qu'un système éolien est toujours plus coûteux et nécessite beaucoup plus de dépenses opérationnelles qu'un système photovoltaïque pour une même surface.

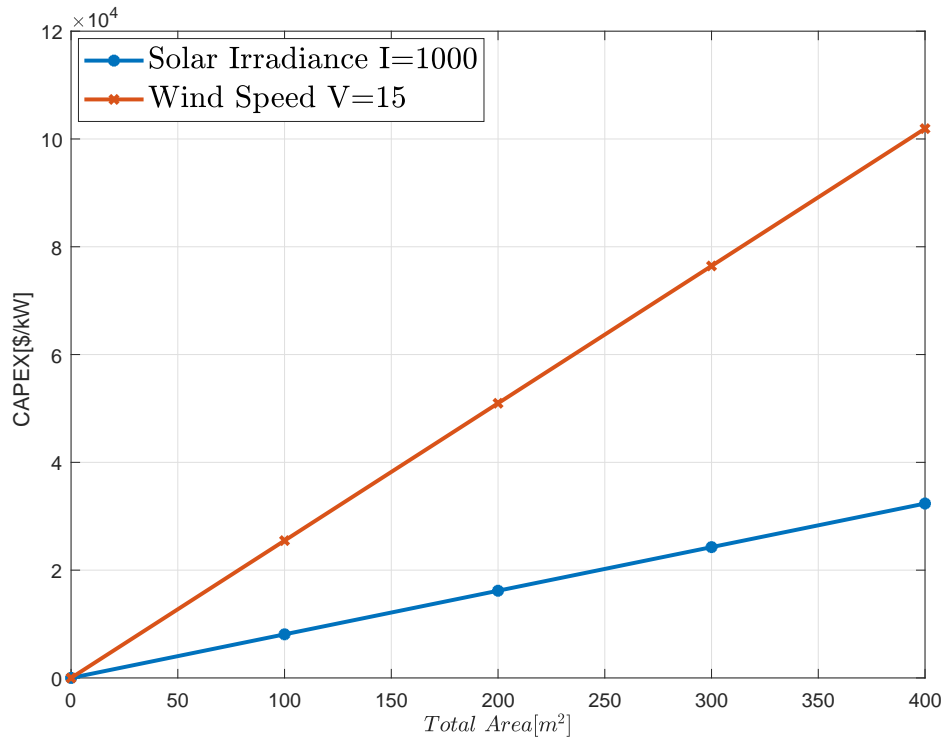


Figure 3.2 – CAPEX versus surface totale.

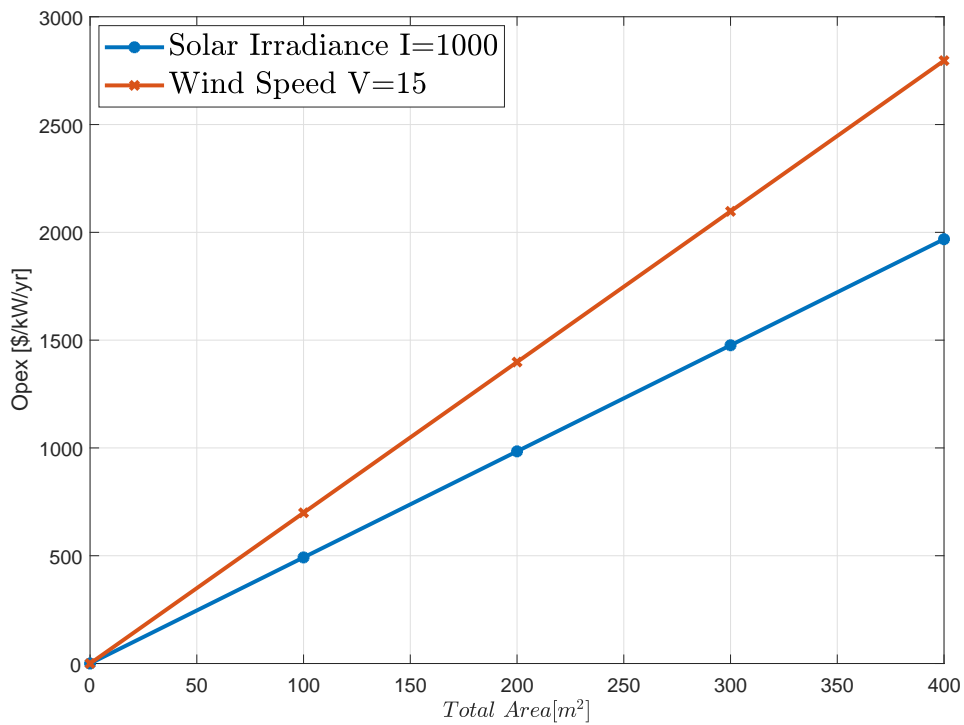


Figure 3.3 – OPEX versus surface totale.

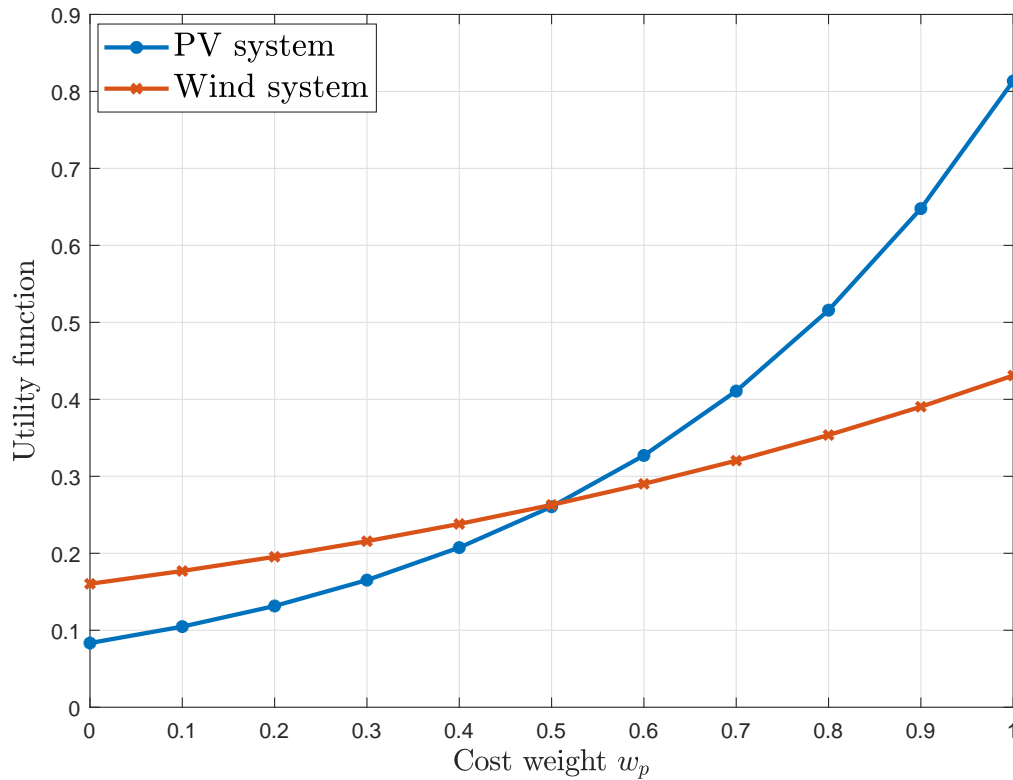


Figure 3.4 – Fonction d'utilité versus le poids de coût  $w_p$ .

De la figure 3.4 nous pouvons conclure ce qui suit:

- Si  $w_p > 0.5$ , il est clair que le système photovoltaïque est plus avantageux car il maximise mieux la fonction utilité définie dans l'équation (2.6).
- Si  $w_p < 0.5$ , il est tout aussi clair que le système éolien est plus avantageux car il maximise mieux à son tour la fonction utilité définie dans l'équation (2.6).

## 3.2 Commutation on/off des BS

Le tableau 3.2 récapitule tous les paramètres de configuration de nos simulations.

Paramètres	Valeurs
Nombre de BSs	100
Surface	1 km <sup>2</sup>
Distance inter-site	300 m
Bande passante totale par BS	20 MHz
Puissance opérationnelle par BS	100 W
Nombre seuil de UEs par BS	5

Tableau 3.2 – Différents paramètres de simulation.

À ce niveau, nous analysons les performances de la stratégie de commutation on-off proposée basée sur un graphe et nous la comparons avec deux références: MaxLoad [24] et EFS [25]. L'EFS (Efficiency First Strategy) préfère les BSs à haute efficacité énergétique tandis que MaxLoad a tendance à sélectionner les BS à forte charge de trafic. Ainsi, pour une même charge de trafic sur le réseau, moins de BS actives sont requises par EFS que par MaxLoad. En effet, la limite de ses deux algorithmes MaxLoad et EFS est qu'ils ne considèrent pas les emplacements des UEs dans le réseau.

Nous considérons une zone unicellulaire de 1 km<sup>2</sup> où nous déployons au hasard 100 micro-BSs ayant une puissance opérationnelle de 100 W et une distance intersite de 300 m. Nous déployons également à chaque  $T = 1$  heure un nombre aléatoire d'UE actifs choisis dans l'intervalle  $[0, \lambda]$  où  $\lambda$  est la densité de tous les UEs. Le seuil des UEs en dessous ou au-dessus duquel une BS est considérée comme éligible pour l'activation ou la désactivation est fixé à 5.

La figure 3.5 nous montre le taux de réduction de puissance obtenu par notre stratégie de commutation on-off de BS basée sur un graphe et ses équivalents par rapport à la densité d'utilisateur  $\lambda$ . Comme on peut l'observer à partir de cette figure, le taux de réduction de puissance de toutes les techniques diminue avec  $\lambda$ . En réalité, cela n'est pas surprenant, car la désactivation diminue lorsque le nombre d'UE dans le réseau augmente. Néanmoins, contrairement à notre technique, les performances de MaxLoad et EFS diminuent rapidement et s'approchent de 0 à des densités d'UE élevées. À  $\lambda = 7 \cdot 10^{-4}$ , notre technique réalise jusqu'à 170% et 600% de gains de réduction de puissance par rapport à MaxLoad et EFS. Cela prouve sa supériorité et met en évidence sa capacité à faire face au contexte ultra-dense prévu par la 5G, respectivement.

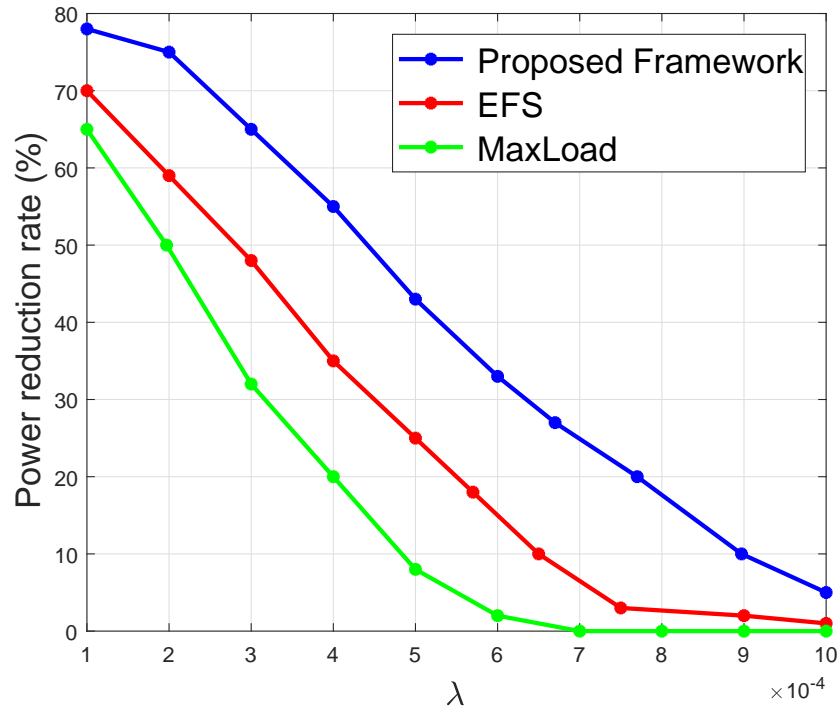


Figure 3.5 – Taux de réduction de puissance versus la densité d'utilisateurs pour  $w_p = 0.5$ .

La figure 3.6 illustre la consommation moyenne par BS en utilisant les trois techniques en fonction de la puissance de commutation à  $\lambda = 7 \cdot 10^{-4}$  et  $w_p = 0.5$ . À partir de cette figure, en utilisant MaxLoad, la consommation d'énergie de chaque station de base augmente linéairement avec la puissance de commutation. Ceci est dû au fait que cette technique ne prend en compte que la charge pour décider quelle BS activer ou désactiver (c'est-à-dire quelle que soit la puissance de commutation). Par conséquent, une BS peut effectuer des opérations de commutation on-off sans fin. Ceci est en contraste avec les techniques proposée et EFS dont la consommation de puissance de la BS augmente progressivement surtout à des valeurs de puissance de commutation élevées. Ceci est attendu puisque dans de tels cas, les deux techniques tendent à maintenir les BSs en activité, réduisant ainsi la fréquence des opérations de commutation on-off. De plus, à partir de la figure 3.6, la stratégie proposée basée sur les graphes exige des BSs beaucoup moins de coûts d'énergie du fait de l'approche online/offline adoptée qui évite des opérations de commutation on-off coûteuses basées sur les charges attendues au cours des prochains cycles.

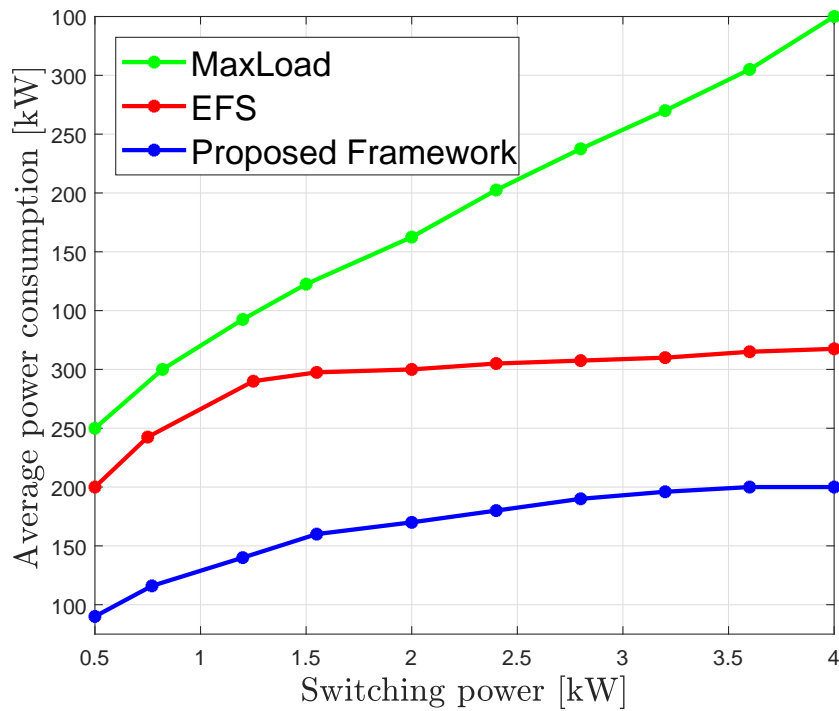


Figure 3.6 – Consommation moyenne par BS versus la puissance de commutation pour  $\lambda = 7 \cdot 10^{-4}$  et  $w_p = 0.5$ .

La figure 3.7 montre la consommation moyenne d'énergie par BS pour  $\lambda = 7 \cdot 10^{-4}$  et différentes valeurs de  $w_p$ . À partir de cette figure, nous observons que les performances de notre stratégie en termes de consommation d'énergie s'améliore avec  $w_p$ . C'est ce qui est attendu puisque la priorité est donnée au critère de puissance par rapport à la qualité de service lorsque  $w_p$  augmente. Cela souligne la grande flexibilité et l'adaptabilité de la stratégie proposée basée sur les graphes, capable d'aligner la commutation on-off de la BS selon les choix et préférences de l'opérateur.

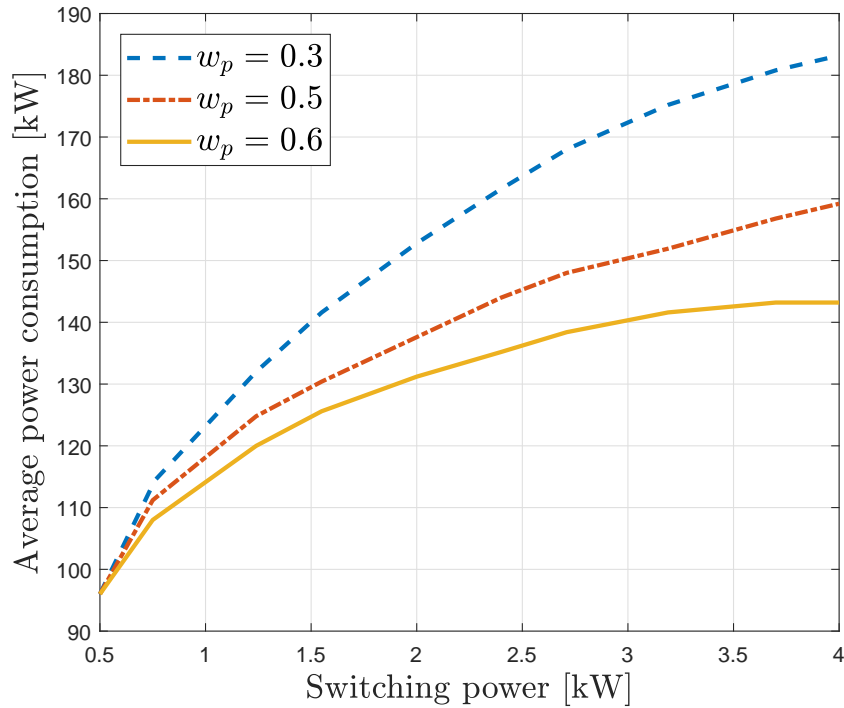


Figure 3.7 – Consommation moyenne par BS versus la puissance de commutation pour différentes valeurs de  $w_p$ .

### 3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé et discuté les résultats de simulations de nos nouvelles stratégies de déploiement des RE, à savoir le choix d'intégration d'une source d'énergie verte entre le photovoltaïque et l'éolien et la commutation on/off des BSs pour la réduction de la consommation d'énergie. Nous avons comparé notre nouvelle stratégie de commutation on/off des BSs basée sur la théorie des graphes à deux autres techniques références dans la littérature pour confirmer les gains importants qu'elle offre en termes de réduction de la puissance consommée.





# CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce mémoire, nous avons proposé une nouvelle approche pour le dimensionnement des RE pour des BSs cellulaires afin de pouvoir les rendre autonomes et plus dépendantes de sources d'énergie vertes, le photovoltaïque et l'éolien. Nous avons également développé une nouvelle stratégie de commutation on/off des BSs online et offline. Grâce à cette stratégie, les opérations de commutation on-off sont pré-planifiées offline sur la base des prévisions de charge, puis online sur la base des informations instantanées, soit pour réduire la consommation d'énergie lorsque le trafic est faible, soit pour éviter une surcharge lorsque le trafic est dense. Nous avons exploité ici l'outil de la théorie des graphes pour optimiser les états d'activation des BSs (c.à.d. on et off). Nous avons montré que la stratégie proposée réduit considérablement le nombre d'opérations de commutation on/off. Les simulations montrent une supériorité nette en termes de performances et de complexité de notre nouvelle technique sur celles proposées dans la littérature en termes de performances et de complexité de réduction de la puissance consommée par les futurs réseaux sans fil 5G.



# RÉFÉRENCES

- [1] Daquan Feng, Chenzi Jiang, Gubong Lim, Leonard J Cimini, Gang Feng, and Geoffrey Ye Li. A survey of energy-efficient wireless communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(1):167–178, 2012.
- [2] Eunsung Oh, Bhaskar Krishnamachari, Xin Liu, and Zhisheng Niu. Toward dynamic energy-efficient operation of cellular network infrastructure. *IEEE Communications Magazine*, 49(6):56–61, 2011.
- [3] Mattia Dalmasso, Michela Meo, and Daniela Renga. Radio resource management for improving energy self-sufficiency of green mobile networks. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 44(2):82–87, 2016.
- [4] Luca Chiaraviglio, Delia Ciullo, Michela Meo, M Ajmone Marsan, and I Torino. Energy-aware umts access networks, 2008.
- [5] Wei-Te Wong, Ya-Ju Yu, and Ai-Chun Pang. Decentralized energy-efficient base station operation for green cellular networks. In *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 5194–5200. IEEE, 2012.
- [6] Ping Ren and Meixia Tao. A decentralized sleep mechanism in heterogeneous cellular networks with qos constraints. *IEEE Wireless Communications Letters*, 3(5):509–512, 2014.
- [7] Andrea Goldsmith. *Wireless communications*. Cambridge university press, 2005.
- [8] Edenaliso Rakotomanana. *Association optimale d'utilisateurs dans un réseau cellulaire hétérogène*. PhD thesis, École de technologie supérieure, 2017.
- [9] Theodore S Rappaport et al. *Wireless communications: principles and practice*, volume 2. prentice hall PTR New Jersey, 1996.
- [10] Meysam Nasimi, Fazirulhisyam Hashim, and Chee Kyun Ng. Characterizing energy efficiency for heterogeneous cellular networks. In *2012 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)*, pages 198–202. IEEE, 2012.
- [11] Talha Zahir, Kamran Arshad, Atsushi Nakata, and Klaus Moessner. Interference management in femtocells. *IEEE communications surveys & tutorials*, 15(1):293–311, 2012.
- [12] Dionysis Xenakis, Nikos Passas, Lazaros Merakos, and Christos Verikoukis. Mobility management for femtocells in lte-advanced: Key aspects and survey of handover decision algorithms. *IEEE Communications surveys & tutorials*, 16(1):64–91, 2013.

- [13] D. Singh. Heterogeneous network (hetnet): A paradigm shift in cellular networks. <http://fr.slideshare.net/dev464898/ppt-het-net>, 2014.
- [14] M Moshirur Rahman, Charles Despins, and Sofiène Affes. Design optimization of wireless access virtualization based on cost & qos trade-off utility maximization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(9):6146–6162, 2016.
- [15] Takhir M Razykov, Chris S Ferekides, Don Morel, Elias Stefanakos, Harin S Ullal, and Hari M Upadhyaya. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, 85(8):1580–1608, 2011.
- [16] Henerica Tazvinga, Bing Zhu, and Xiaohua Xia. Energy dispatch strategy for a photovoltaic–wind–diesel–battery hybrid power system. *Solar Energy*, 108:412–420, 2014.
- [17] Kanzumba Kusakana and Herman Jacobus Vermaak. Hybrid renewable power systems for mobile telephony base stations in developing countries. *Renewable Energy*, 51:419–425, 2013.
- [18] staticflickr, [https://c1.staticflickr.com/9/8002/7538703720\\_7e93a1179f\\_b.jpg](https://c1.staticflickr.com/9/8002/7538703720_7e93a1179f_b.jpg)
- [19] Hafsi Slah, Dhaoui Mehdi, and Sbita Lassaad. Advanced control of a pmsg wind turbine. *International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application*, 5(01):1, 2016.
- [20] Luc Moreau. *Modélisation, conception et commande de génératrices à réluctance variable basse vitesse*. PhD thesis, Université de Nantes, 2005.
- [21] blogspot, [http://4.bp.blogspot.com/-51xbY8KUKRg/T\\_zSJiqKRWI/AAAAAAAAA7g/tLSEXh0d2h0/s1600/wind+turbine.jpg](http://4.bp.blogspot.com/-51xbY8KUKRg/T_zSJiqKRWI/AAAAAAAAA7g/tLSEXh0d2h0/s1600/wind+turbine.jpg)
- [22] Tyler J Stehly, Philipp C Beiter, Donna M Heimiller, and George N Scott. 2017 cost of wind energy review. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2018.
- [23] Ran Fu, David Feldman, Robert Margolis, Mike Woodhouse, and Kristen Ardani. Us solar photovoltaic system cost benchmark: Q1 2017. Technical report, EERE Publication and Product Library, 2017.
- [24] Tamer Beitelmal and Halim Yanikomeroglu. A set cover based algorithm for cell switch-off with different cell sorting criteria. In *2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, pages 641–646. IEEE, 2014.
- [25] Nuo Yu, Yuting Miao, Lan Mu, Hongwei Du, Hejiao Huang, and Xiaohua Jia. Minimizing energy cost by dynamic switching on/off base stations in cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(11):7457–7469, 2016.