Réduction de la consommation énergétique dans les modules M2M utilisant la technologie LTE/LTE-A

Hajer Ben Rekhissa

▶ **To cite this version:**

Hajer Ben Rekhissa. Réduction de la consommation énergétique dans les modules M2M utilisant la technologie LTE/LTE-A. Electronique. COMUE Université Côte d'Azur (2015 - 2019), 2019. Français. NNT : 2019AZUR4085 . tel-02868640

HAL Id: tel-02868640
https://theses.hal.science/tel-02868640

Submitted on 15 Jun 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.

UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR

ÉCOLE DOCTORALE
SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION

THÈSE DE DOCTORAT

Réduction de la consommation énergétique dans les modules M2M utilisant la technologie LTE/LTE-A

Hajer BEN REKHISSA

Laboratoire d'Electronique Antennes et Télécommunications (LEAT)
iQsim

Présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en Électronique
d'Université Côte d'Azur
Dirigée par : Cécile Belleudy
Philippe Bessaguet
Soutenue le : 11 Décembre 2019

Devant le jury, composé de :
Fabien Mieyeville, Professeur, Université Claude Bernard Lyon
Matthieu Gautier, Maître de conférences HDR, Université Rennes
Fabien Ferrero, Professeur, Université Côte d'Azur
Raphaël Bernhard, Ingénieur, Orange LABS
Philippe Bessaguet, Directeur général, iQsim
Cécile Belleudy, Maître de conférences HDR, Université Côte d'Azur

Résumé

A l'heure actuelle, la communication des machines est devenue une technologie incontournable, en pleine expansion vue le nombre de services qu'elle est capable de proposer. La technologie M2M (Machine-to-Machine) se définit comme le mariage des technologies de l'information et de la communication avec des objets intelligents. Les réseaux cellulaires, tel que les technologies Long Term Evolution (LTE) et LTE-Advanced (LTE-A), sont de plus en plus utilisés afin d'assurer la communication des modules M2M. Cependant, adapter les réseaux LTE et LTE-A afin de satisfaire aux caractéristiques et exigences des modules M2M, en termes de qualité de service (QoS) et consommation énergétique, est crucial.

L'objectif de cette thèse est de proposer des solutions de réduction de la consommation énergétique pour les modules M2M utilisant les technologies LTE et LTE-A. Pour ce faire deux approches ont été proposées. La première approche consiste à stocker les paquets de données dans une mémoire tampon jusqu'à atteindre un seuil donné du nombre de paquets stockés et du délai maximal autorisé. Ceci permet d'augmenter le temps passé en mode basse consommation et de réduire le passage du mode veille au mode connecté, tout en tenant en compte des contraintes de délai.

La deuxième approche consiste à proposer deux techniques d'allocation de ressources radio en voie montante qui permettent de réduire la consommation énergétique dans les modules M2M tout en satisfaisant la QoS requise en termes de délai de transmission.

Mots clés : Machine-to-Machine, Long Term Evolution, Long Term Evolution-Advanced, consommation énergétique dans les modules M2M, réception discontinue, ordonnancement en voie montante, qualité de service, simulation.

Abstract

Machine-to-Machine (M2M) communication, which refers to the interaction between intelligent devices without human intervention, is gaining more prominence in mobile cellular networks. Long Term Evolution (LTE) and LTE-Advanced (LTE-A) networks are considered excellent candidates to support M2M communication. However, M2M communication over LTE/LTE-A networks faces some challenges. The main challenge is how to reduce energy consumption for M2M devices, as the majority of them are battery driven.

The aim of this thesis is to propose solutions to reduce energy consumption in M2M devices over LTE/LTE-A technologies.

We proposed two approaches; the first one consists of increasing time spent in low power mode by buffering data until reaching given thresholds of number of buffered data and maximum delay authorized. This approach allows to reduce signaling from idle state to connected state. Besides, it considers quality of service (QoS) requirements.

The second approach consists of proposing two uplink schedulers which take into account the coexistence of M2M and Human-to-Human (H2H) devices. Both of them consider channel quality while allocating resource blocks, which have a consequence reducing energy consumption in M2M devices. Our second algorithm consider, also, delay constraint.

Keywords: Machine-to-Machine communication, Long Term Evolution, energy consumption, discontinuous reception, uplink scheduling, quality of service, simulation.

Liste de publications

- BEN REKHISSA, Hajer, BELLEUDY, Cécile et BESSAGUET, Philippe. Power Efficient Packet Scheduling for M2M Devices over LTE/LTE-A Technologies. In: IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), Sep 2019
- BEN REKHISSA, Hajer, BELLEUDY, Cécile et BESSAGUET, Philippe. Energy efficient resource allocation for M2M devices in LTE/LTE-A. In: Journal Sensors, Décembre 2019, **https://doi.org/10.3390/s19245337**

Remerciements

Même si cette thèse est un travail personnel, je souhaite ici rendre hommage et exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation et à son aboutissement.

Mes premiers mots de remerciements s'adressent à mes encadrants de thèse, Philippe Bessaguet et Cécile Belleudy. Je leur remercie pour m'avoir confié ce sujet de thèse très passionnant et pour m'avoir fait bénéficier de leurs savoirs.

Je tiens à remercier M. Fabien Mieyeville, Professeur à l'Université Claude Bernard Lyon, et M. Matthieu Gautier, Maître de conférences HDR à l'Université de Rennes, pour l'attention qu'ils ont portée à mon travail. Je leur suis très reconnaissante d'avoir accepté de juger mon travail en me faisant l'honneur d'être mes rapporteurs de thèse.

Je tiens aussi à remercier M. Fabien Ferrero, Professeur à l'Université Côte d'Azur, qui a accepté de participer aux membres de jury.

Un grand merci à M. Raphaël Bernhard, Ingénieur à Orange Labs d'être parmi le jury de ma thèse et avec qui j'ai eu la chance de faire mon stage de master et qui m'a fait découvrir le domaine des objets connectés. Merci pour tous les encouragements.

Je remercie également mes collègues à la société iQsim et le laboratoire LEAT. Je les remercie pour leurs gentillesses, leurs conseils et surtout pour leurs amitiés.

Merci également à mes parents, mes sœurs et mes amis pour leurs soutiens inconditionnels et leurs conseils.

Finalement, un énorme merci à mon mari Khaled qui m'a soutenu durant toutes ces années. Sa patience, son aide et sa compréhension m'ont permis de mener bien cette thèse...Merci beaucoup.

Glossaire

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AS	Access Stratum
BB	Base Band
BCCH	Broadcast Control Channel
BCH	Broadcast Channel
BSR	Buffer Status Reports
CBC	Carrier-By-Carrier
CBC-M	Carrier-By-Carrier-Modified
CP	Cyclic Prefix
CRC	Cyclic Redundancy Check
CQI	Channel Quality Indicator
DCCH	Dedicated Control Channel
DMRS	Demodulation Reference Signal
DRB	Data Radio Bearer
DRX	Discontinuous Reception
DTCH	Dedicated traffic Channel
ED	Event Driven
eNB	evolved Node B
EPS	Evolved Packet System
EPC	Evolved Packet Core
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
eUTRAN	evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FDD	Frequency Division Duplexing
FDPS	Frequency Domain Packet Scheduling
GW	gateway
H2H	Human-to-Human
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HSS	Home Subscriber Server
IP	Internet Protocol
LENA	LTE-EPC Network SimulAtor
LoRa	Long Range

LoRaWAN	Long Range Wide-area network
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Medium Access Control
MCS	Modulation Coding Scheme
MIB	Master Information Block
MME	Mobility Management Entity
MTC	Machine Type Communication
NAS	Non-Access Stratum
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCCH	Paging Control Channel
PCH	Paging Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PE	Payload Exchange
P/PDN-GW	PDN Gateway
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PHR	Power Headroom Reports
PPI	Power Preference Indication
PRACH	Physical Uplink Control Channel
PRB/RB	Physical Resource Block
PS	Packet Scheduling
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PU	Periodic Update
QoS	Quality of Service
RACH	Random Access Channel
RE	Resource Element
RF	Radio Frequency
RLC	Radio Link Control

RME	Recursive Maximum Expansion
RME-M	Recursive Maximum Expansion Modified
RR	Round-Robin
RRC	Radio Resource Control
RX	Reception
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SFN	System Frame Number
S-GW	Serving Gateway
SR	Scheduling Request
SRB	Signaling Radio Bearers
SRS	Sounding Reference Signal
TA	Tracking Area
TB	Transport Block
TDD	Time Division Duplexing
TDPS	Time Domain Packet Scheduling
TTI	Transmission Time Interval
TX	Transmission
UE	User Equipment

Table des matières

Résumé *3*

Abstract *4*

Liste de publications *5*

Remerciements *6*

Glossaire *7*

Table des matières *10*

Liste des figures *12*

Liste des tableaux *14*

Chapitre 1. Introduction générale *15*

1.1 Contexte général de l'étude **16**

1.2 Contributions **18**

1.2.1 Réception discontinue en mode veille 18

1.2.2 Ordonnancement en voie montante 19

1.3 Plan du mémoire **20**

Chapitre 2. Introduction des technologies M2M et LTE *22*

2.1 Introduction **23**

2.2 Machine-to-machine **23**

2.2.1 Différence entre H2H et M2M 23

2.2.2 Architecture d'un réseau M2M 24

2.2.3 Domaines d'applications 26

2.2.4 Classification des applications M2M 28

2.2.5 Technologies de communications 30

2.3 LTE/LTE-A **32**

2.3.1 LTE et LTE-A 32

2.3.2 Architecture du réseau LTE/LTE-A 33

2.3.3 Architecture protocolaire 36

2.3.4 Le Bearer EPS 39

2.3.5 Canaux 40

2.3.6 La dimension fréquentielle en LTE 43

2.3.7 Trame radio 45

2.3.8 Consommation énergétique et mode de fonctionnement 46

2.4 Conclusion **47**

Chapitre 3. Etat de l'art *49*

3.1 Introduction **50**

3.2 Modèles énergétiques **50**

3.3 Techniques de réduction de la consommation énergétique **59**

3.3.1 Solutions pour l'optimisation du cycle DRX 59

3.3.2 Ordonnancement en voie montante 63

3.3.3 Solutions pour le contrôle de la surcharge 67
3.4 Simulateurs du réseau LTE 69
3.5 Conclusion 73
Chapitre 4. Réduction de la consommation énergétique par la réception discontinue en mode veille 74
4.1 Introduction 75
4.2 Modélisation d'un module M2M 75
4.3 Variation des paramètres du cycle de paging 78
4.3.1 Impact de la variation de la durée d'inactivité 79
4.3.2 Impact de la variation du cycle de paging 80
4.4 Coalesced DRX en mode veille 81
4.5 Adaptive coalesced DRX en mode veille 87
4.6 Self adaptive DRX en mode veille 91
4.7 Conclusion 94
Chapitre 5. Réduction de la consommation énergétique par ordonnancement en voie montant 96
5.1 Introduction 97
5.2 Procédure de transmission de données en voie montante 97
5.3 Différence d'ordonnancement en voies montante et descendante 98
5.4 Modélisation de l'ordonnanceur de paquets en voie montante 100
5.5 Stratégies d'ordonnancement 101
5.5.1 Algorithme 1: Carrier-By-Carrier-Modified 101
5.5.2 Algorithme 2 : Recursive Maximum Expansion Modified 103
5.5.3 Résultats 106
5.6 Conclusion 115
Chapitre 6. Conclusion générale et perspectives 117
6.1 Conclusion 118
6.2 Perspectives 120
Bibliographie 123

Liste des figures

Figure 1.1. Augmentation du nombre de modules M2M [4] 17
Figure 1.2. Différents type de connexions entre les modules M2M [5] 17
Figure 2.1. Architecture du réseau M2M (source : ETSI) 26
Figure 2.2. Domaines d'applications d'un module M2M [21] 27
Figure 2.3. Classification des applications M2M selon la concentration et la mobilité [20] ... 29
Figure 2.4. Technologies de communication du module M2M [27] 30
Figure 2.5. Comparaison de la consommation énergétique pour les protocoles Bluetooth, UWB, Zigbee et Wi-Fi [17] 31
Figure 2.6. Architecture du réseau LTE 33
Figure 2.7. Architecture de l'eUTRAN 35
Figure 2.8. Tracking Area [39] 36
Figure 2.9. Architecture protocolaire 37
Figure 2.10. Les états d'un UE en LTE 39
Figure 2.11. Bearer EPS [48] 39
Figure 2.12. Différents types de tunnels [48] 40
Figure 2.13. Les canaux de l'interface radio LTE et leurs imbrications [40] 41
Figure 2.14. Mappage entre les canaux [49] 43
Figure 2.15. Différence entre OFDMA et SC-FDMA 44
Figure 2.16. Grille de ressources radio 45
Figure 2.17. Structure de la trame LTE en FDD 46
Figure 2.18. Transition d'état de l'UE [51], [52] 47
Figure 3.1. Structure d'un module M2M utilisant la technologie LTE [55] 51
Figure 3.2. Facteurs influençant la consommation énergétique en transmission [57] 52
Figure 3.3. Consommation énergétique du module RF [4] 53
Figure 3.4. Principe de la technique réception discontinue [60] 54
Figure 3.5. Différentes périodes pour un modèle énergétique [53], [61] 55
Figure 3.6. Les états du module en DRX 58
Figure 3.7. Impact de la technique DRX sur la consommation énergétique [64] 60
Figure 3.8. Diagramme d'état de la technique DRX 61
Figure 3.9. Ordonnancement en LTE [70] 64
Figure 3.10. Procédure RACH [15] 68
Figure 3.11. Architecture du simulateur OPNET 70
Figure 3.12. Architecture du simulateur NS-3 71
Figure 4.1. Variation de la consommation énergétique en fonction du temps d'inactivité 80
Figure 4.2. Variation de la consommation énergétique en fonction du cycle de paging 81
Figure 4.3. RRC Connection release [92] 82
Figure 4.4. Etablissement de la connexion 82
Figure 4.5. Coalesced DRX en mode veille 84
Figure 4.6. Coalesced DRX en mode veille avec Qw = 3 paquets 85
Figure 4.7. Variation de la consommation énergétique en fonction de la taille de la mémoire tampon 85
Figure 4.8. Pourcentage du temps passé en mode connecté en fonction de la taille de la mémoire tampon 86
Figure 4.9. Délai moyen en fonction de la taille de la mémoire tampon 87
Figure 4.10. Adaptive coalesced DRX en mode veille 88
Figure 4.11. Variation du nombre de paquets stockés 89

Figure 4.12. Variation de l'énergie consommée en adoptant adaptive coalesced DRX en mode veille 90
Figure 4.13. Délai du premier paquet dans la file d'attente 90
Figure 4.14. Self adaptive DRX en mode veille 91
Figure 4.15. Variation du cycle de paging en fonction de la taille de la mémoire tampon 93
Figure 4.16. Variation de l'énergie consommée dans le cas de self adaptive DRX en mode veille 94
Figure 5.1. Procédure de transmission de données en voie montante 98
Figure 5.2. Différence entre l'allocation de ressources radio en voie montante et descendante 99
Figure 5.3. Matrice d'association UE-RB 101
Figure 5.4. Principe de l'algorithme RME-Modified 106
Figure 5.5. Variation de puissance de transmission (dBm) en fonction du nombre de modules M2M 112
Figure 5.6. Nombre de paquets dépassants leur limite de délai en fonction du nombre de modules M2M 113
Figure 5.7. Variation de l'efficacité spectrale (b/s/Hz) en fonction du nombre de modules M2M 115

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Comparaison entre les technologies M2M et H2H 24
Tableau 2.2. Domaines d'applications M2M [19] 27
Tableau 2.3. Nombre de ressources radio en fonction de la bande de fréquence 45
Tableau 4.1 Paramètres du trafic M2M 76
Tableau 4.2. Consommation énergétique en fonction de l'état et de l'activité d'un module M2M 77
Tableau 4.3. Paramètres de simulation 78
Tableau 5.1. Table d'allocation des ressources radio en FDPS- Carrier- by-Carrier 102
Tableau 5.2. Table d'allocation de ressources radio en RME 104
Tableau 5.3. Table d'allocation de ressources radio en RR 107
Tableau 5.4. Paramètres de simulation 107
Tableau 5.5. Modèle d'applications 109

Chapitre 1. Introduction générale

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une thèse CIFRE au sein de la société iQsim [1], leader de solutions de plateforme de cartes Sim virtuelles et de routeurs de communication mobile, et du laboratoire d'Électronique, Antennes et Télécommunications de l'Université de Nice Côte d'Azur (LEAT).

Le thème de cette étude s'articule autour de la réduction de la consommation énergétique dans les modules machine-to-machine utilisant les technologies Long Term Evolution (notée LTE dans la suite du document) et LTE-Advanced (LTE-A) .

Dans ce chapitre d'introduction, je présenterai tout d'abord le contexte général de l'étude et la problématique abordée. Les contributions de cette thèse sont ensuite décrites ainsi que le plan de ce mémoire qui rassemble à la fois la présentation des études et les résultats obtenus.

1.1 Contexte général de l'étude

A l'heure actuelle, la communication des machines est devenue une technologie incontournable. Cette nouvelle technologie se définit comme le mariage des technologies de l'information et de la communication avec des objets intelligents et communicants. Quoique récente, la communication des machines est présente dans plusieurs domaines comme dans le domaine de la santé où les appareils électroniques permettent de surveiller l'état du patient en permanence et à distance, ce qui permet de minimiser les cas d'urgences.

Les objets connectés transmettent leurs données, par exemple, vers un centre informatique capable de prendre des décisions, à travers un réseau de communication mobile, fixe ou hybride [2], [3], sans l'intervention de l'être humain.

Ces objets connectés sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne et leur nombre ne cesse d'augmenter. Selon une étude statistique faite par statistica et représentée dans la Figure 1.1 [4], le nombre de modules connectés atteindra les 62.12 milliards en 2024.

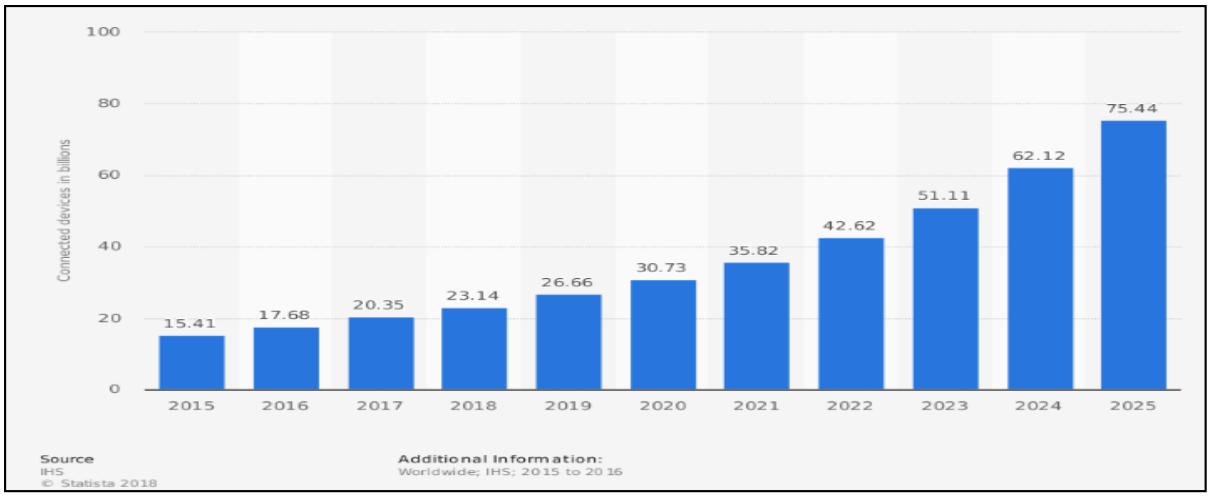


Figure 1.1. Augmentation du nombre de modules M2M [4]

Afin d'assurer la communication des modules M2M, plusieurs technologies de communication de courtes distances comme le Zigbee, le Bluetooth, ou de portée moyenne tel que le Wi-Fi ou de longue portée comme les réseaux cellulaires (2G, 3G, LTE, LTE-A), Lora et Sigfox ont été utilisées. La technologie LTE, appelée aussi 4G, est de plus en plus utilisée pour assurer la communication des modules M2M avec le centre de collecte d'informations, grâce aux avantages qu'elle offre par rapport aux technologies cellulaires 2G et 3G. En effet, les technologies LTE et LTE-Advanced (LTE-A) permettent d'avoir un débit de données plus important, de diminuer le temps de latence et d'augmenter le nombre de modules connectés à la station de base, ... La Figure 1.2 montre que d'ici 2022, les connexions 4G représenterons 54.3% du total des connexions contre 34.7% en 2017.

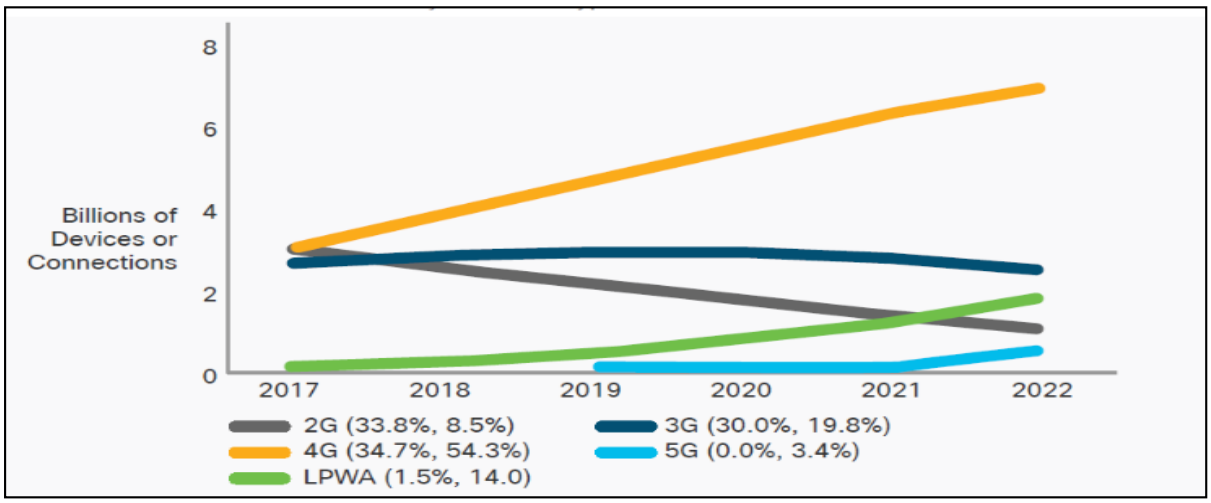


Figure 1.2. Différents type de connexions entre les modules M2M [5]

Cependant, à la différence des communications human to human (H2H), pour lesquelles les réseaux cellulaires sont principalement conçus, les modules M2M ont des caractéristiques et des exigences spécifiques [6]–[9] :

- certaines applications M2M, comme les modules utilisés pour assurer la sécurité du trafic dans les systèmes de transport intelligents, le contrôle des pipelines, nécessitent des temps de latence qui pourraient être inférieurs à ceux de la voix ou du trafic internet.
- dans certains cas, un grand nombre de modules M2M nécessite de transmettre simultanément leurs données, ce qui entraine l'envoi d'un énorme nombre de paquets de signalisation et par conséquent une surcharge du réseau.
- les applications M2M sont généralement caractérisées par l'envoi de paquets de petite taille (tel que les données envoyées par les compteurs de gaz). Assurer l'envoi de ces paquets, sans perte, est important.
- la majorité des modules M2M est alimentée par des batteries. Pour ce type de modules une réduction de la consommation énergétique est cruciale.

L'objectif de ces travaux de thèse est de réduire la consommation énergétique dans les modules M2M utilisant les technologie LTE et LTE-A. Pour ce faire, j'ai commencé par proposer trois mécanismes de réduction de la consommation énergétique. Ces mécanismes, qui se basent sur le principe de la technique « réception discontinue » (DRX), permettent d'augmenter le temps passé en mode basse consommation tout en satisfaisant la contrainte de délai. Et afin de gérer l'envoie des données stockées dans les modules M2M, j'ai proposé deux ordonnanceurs en voie montante qui permettent de considérer la contrainte de consommation énergétique tout en satisfaisant les exigences de qualité de services en termes de délai. Ces deux ordonnanceurs permettent de maximiser les gains d'énergie déjà obtenus par la première approche.

La section suivante résume les contributions de ma thèse.

1.2 Contributions

1.2.1 Réception discontinue en mode veille

La technique « réception discontinue » (DRX) consiste à passer le module M2M en mode veille et de ne le réveiller que pendant des périodes de temps définies afin de vérifier la présence de paquets de données en voie montante et descendante. En cas de présence de données, le module M2M doit abandonner le mode veille et passer en mode connecté.

En se basant sur la technique DRX, j'ai, dans un premier temps, fait varier :

- le temps d'inactivité, durée pendant laquelle le module reste toujours en mode connecté donc consomme plus d'énergie qu'en mode veille,
- la durée du cycle de paging, qui représente la durée pendant laquelle le module est déconnecté de la station de base donc ne peut ni recevoir ni envoyer des données,

afin d'étudier l'impact de ces ajustements sur la consommation énergétique. Par la suite, grâce aux résultats obtenus, j'ai proposé la technique coalesced DRX en mode veille qui consiste à stocker les données à envoyer à la station de base dans une mémoire tampon afin de diminuer le passage au mode connecté et par conséquent d'augmenter le temps passé en mode veille et diminuer la consommation énergétique engendrée par les messages de signalisation nécessaires pour passer du mode veille au mode connecté. Cette technique permet de réduire la consommation énergétique mais ne permet pas de tenir en compte du délai d'attente maximal autorisé par les applications M2M. C'est pour cette raison, que j'ai proposé la technique adaptive coalesced DRX en mode veille, qui permet de limiter le nombre de paquets stockés en fonction de la taille de la mémoire tampon ainsi que du délai maximal autorisé. Enfin la technique self adaptive DRX en mode veille, que j'ai proposé, consiste à adapter la durée du cycle de paging aux exigences de chaque application en termes de délai et de capacité de stockage des paquets.

1.2.2 Ordonnancement en voie montante

La technologie M2M est caractérisée par l'implémentation d'un nombre élevé de modules qui parfois nécessitent de communiquer en même moment. Pour assurer la communication des modules M2M, plusieurs ordonnanceurs ont été proposés. La majorité de ces ordonnanceurs ne tient pas compte de la consommation énergétique. Ma deuxième approche consiste à proposer deux algorithmes d'ordonnancement qui permettent d'assurer la communication des modules M2M ainsi que les modules H2H tout en réduisant la consommation énergétique. Pour ce faire, j'ai commencé par implémenter deux nouvelles catégories d'applications dans le simulateur LTE-Sim, les applications événementielles et les applications périodiques. Ces deux applications sont utilisées pour modéliser le trafic M2M. Pour le trafic H2H, j'ai utilisé des applications déjà implémentées : VoIP, Video et des applications à débit constant (CBR).

Le premier ordonnanceur proposé prend en compte la coexistence des applications H2H et M2M. Il consiste à allouer les ressources radio (RBs) en premier temps aux applications H2H ayant une bonne qualité du canal de transmission. Les ressources radio alors restantes sont

allouées aux modules M2M qui ont une bonne qualité de canal tout en s'assurant de ne pas atteindre la puissance de transmission maximale.

Cet ordonnanceur permet de réduire la consommation d'énergie mais ne permet pas de satisfaire la qualité de service requise par les modules M2M en termes de délai.

Le deuxième ordonnanceur proposé, quant à lui, permet de réduire la consommation énergétique tout en tenant compte du délai maximum permis pour chaque application M2M. Cet ordonnanceur utilise le principe de l'ordonnanceur Recursive Maximum Expansion [10] pour allouer des RBs aux modules H2H. Pour le reste des RBs, on commence par vérifier s'il existe des modules M2M dont leur délai autorisé atteint un certain seuil. Dans ce cas, ces modules auront les RBs requises pour envoyer leurs données. Le reste des ressources radio seront attribuées aux modules M2M qui n'ont pas encore atteint le seuil maximal de délai et qui ont la meilleure qualité de canal. Ce mécanisme permet de réduire la consommation énergétique tout en satisfaisant la qualité de service requise en termes de délai.

Afin de montrer l'efficacité de nos approches en termes de réduction de la consommation énergétique nous avons pris le cas des modules M2M à faible mobilité.

1.3 Plan du mémoire

Le plan de mémoire est structuré comme suit.

Dans le chapitre 2, je présenterai les caractéristiques de la technologie M2M c'est à dire les principales différences avec la technologie Human-to-Human, son architecture, les domaines d'applications ainsi que les technologies de communication. Une étude de la technologie Long-Term-Evolution est présentée par la suite.

Dans le chapitre 3, je présenterai, pour un module M2M équipé d'une technologie LTE-A, quelques modèles énergétiques sur lesquels je me suis basé pour étudier la consommation énergétique. Dans la deuxième partie de ce chapitre, je détaillerai quelques techniques de réduction de la consommation énergétique proposées dans la littérature. Parmi ces techniques, la technique de réception discontinue ainsi que l'ordonnancement en voie montante sont décrites.

Dans le chapitre 4, je présenterai ma première approche pour réduire la consommation d'un module M2M utilisant les technologies LTE et LTE-A. Le mécanisme proposé se base sur la technique réception discontinue en mode veille. Il consiste à réduire le passage du module M2M du mode veille au mode connecté et vice versa et ceci, en stockant, les paquets destinés

à l'envoi, dans une mémoire tampon jusqu'à ce que la mémoire tampon soit saturée ou lorsqu'un délai maximal d'attente soit atteint. De plus, dans ce chapitre et afin de maximiser les gains d'énergie, la durée du mode veille est ajustée en fonction de la taille de la mémoire tampon et du délai d'attente pour chaque application M2M.

A travers la simulation, j'ai montré l'efficacité de ces techniques en termes de réduction de la consommation énergétique et de satisfaction des exigences de qualité de service en termes de délai.

Dans le chapitre 5, deux nouveaux algorithmes d'ordonnancement en voie montante qui permettent d'assurer la communication des modules H2H et M2M sont proposés. Le premier ordonnanceur prend en compte la qualité du canal de transmission lors de l'allocation de ressources radio pour les modules M2M, ce qui permet de réduire la consommation énergétique. Cependant, cet algorithme ne permet pas de satisfaire les contraintes de délai de transmission. Le deuxième ordonnanceur proposé, appelé RME-Modified, permet de prendre en compte la coexistence des modules M2M et H2H. Cet ordonnanceur considère les exigences des modules M2M en termes de délai de transmission et de qualité de canal lors de l'allocation des ressources radio.

Ce manuscrit s'achève sur une conclusion générale synthétisant mes contributions et identifie des perspectives pour de futurs travaux de recherches, par exemple en vue d'adapter les solutions ainsi proposées à d'autres technologies de communication comme la 5G.

Chapitre 2. Introduction des technologies M2M et LTE

2.1 Introduction

La communication M2M, appelée aussi *Machine Type Communication* (MTC) dans les recommandations du standard 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), consortium de normalisation des technologies de réseaux mobiles, englobe toutes les technologies permettant l'échange de données entre des objets connectés et un centre de collecte.

Dans ce chapitre, je commencerai par introduire la technologie M2M en indiquant entre autres la différence entre cette technologie et la technologie H2H. Par la suite, je présenterai l'architecture du réseau M2M, ses domaines d'applications et les différents types d'applications M2M. Je détaillerai après les technologies de communications telles que les réseaux de courtes distances, de moyennes portées et de longues portées. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons choisi, pour des raisons que j'expliquerai par la suite, de travailler avec des technologies de communication longue distance qui sont les technologies LTE et LTE-A.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, je présenterai les technologies LTE et LTE-A. Dans un premier temps, l'architecture du réseau LTE et ses différentes couches protocolaires seront décrites. Je détaillerai, ci-après, les tunnels Evolved Packet System, les différents canaux, les techniques de multiplexages utilisées par les technologies LTE et LTE-A et la trame radio.

2.2 Machine-to-machine

2.2.1 Différence entre H2H et M2M

La communication M2M diffère de la communication *Human-to-Human* (H2H) qui nécessite l'intervention de l'homme, sur plusieurs aspects [11]–[14]. Le Tableau 2.1 énumère les principales différences entre ces deux technologies de communication. Tout d'abord, il faut noter que la communication H2H est souvent réalisée à l'aide d'un téléphone portable appelé de plus en plus un smartphone. En revanche, différents capteurs ou actionneurs avec des capacités de traitement différentes peuvent être utilisés pour assurer la communication M2M.

En outre, contrairement à la communication H2H dont le flux de communication est généralement descendant et de grande taille, les modules M2M sont caractérisés principalement par l'envoi de paquets de petite taille principalement en voie montante [11].
De plus, les modules M2M ont une faible mobilité (à l'exception de quelques applications) contrairement aux applications H2H puisque les hommes se déplacent la plupart du temps.

Tableau 2.1. Comparaison entre les technologies M2M et H2H

Caractéristiques	M2M	H2H
Mobilité	La majorité des modules M2M sont immobiles	Les êtres humains se déplacent la plupart du temps
Service	Généralement des SMS ou paquets de données	SMS/voix/web/multimédia, etc …
Flux montant	Le flux est principalement en voie montante	Peu de trafic montant
Flux descendant	Pas trop de trafic descendant sauf pour certaines applications	Le trafic est principalement en voie descendante
Nombre de modules	Des centaines ou des milliers de modules par station de base	Dizaines et parfois des centaines de téléphones par station de base [15]
Taille des paquets	Généralement des paquets de petite taille	Souvent des grands paquets
Délai de transmission	dizaine de millisecondes ~ plusieurs minutes [16]	250 ms (voix) à quelques secondes
Exigences de l'utilisateur	Efficacité énergétique, latence, autonomie	Délai de transmission, débit, perte de paquet

2.2.2 Architecture d'un réseau M2M

L'institut européen des normes de télécommunications (*European Telecommunications Standards Institute* (ETSI)) considère qu'un réseau M2M est composé de cinq éléments [17] :

1. les modules intelligents qui permettent de répondre à des requêtes et d'envoyer des données. Ce sont les capteurs et les actionneurs qui sont capables de transmettre des données directement ou à travers des passerelles vers un centre de collecte de données.
2. le réseau de connexion M2M qui fournit une connexion entre les modules intelligents et les passerelles. Le protocole de communication utilisé est généralement de courte distance comme le Bluetooth, le Zigbee, ...
3. la passerelle (*Gateway* : GW) qui sert d'un intermédiaire entre les modules M2M et le réseau.

4. le réseau de communication M2M : permet d'assurer la communication de la passerelle et l'application M2M. C'est un réseau de longue distance tel que les réseaux cellulaires 2G, 3G et 4G, Lora, Sigfox, ...
5. l'application M2M : qui organise la collecte des données provenant des modules M2M. Ces informations reçues par la collecte seront traitées par une application d'exploitation des données.

Ces cinq éléments forment trois domaines, représentés dans la Figure 2.1 [18] :

- domaine des dispositifs : il est formé par un grand nombre de modules M2M et des passerelles. Les capteurs M2M intelligents effectuent des mesures qui seront envoyées vers une passerelle (GW). Cette dernière collecte les données de plusieurs nœuds et les envoie vers une station de base lointaine.
- domaine réseau : c'est l'interface de communication entre le domaine des dispositifs et le domaine applicatif. Plusieurs technologies de communications existent pour assurer la communication M2M tel que, le Zigbee, le Bluetooth, le Wi-Fi, les réseaux cellulaires, Lora, Sigfox ...
- domaine des applications : il est composé par un serveur et des applications clients. Le serveur assure le stockage des données envoyées par les modules M2M mais aussi le traitement de ces données. Les applications clients, quant à eux, fournissent des services aux usagers du réseau M2M.

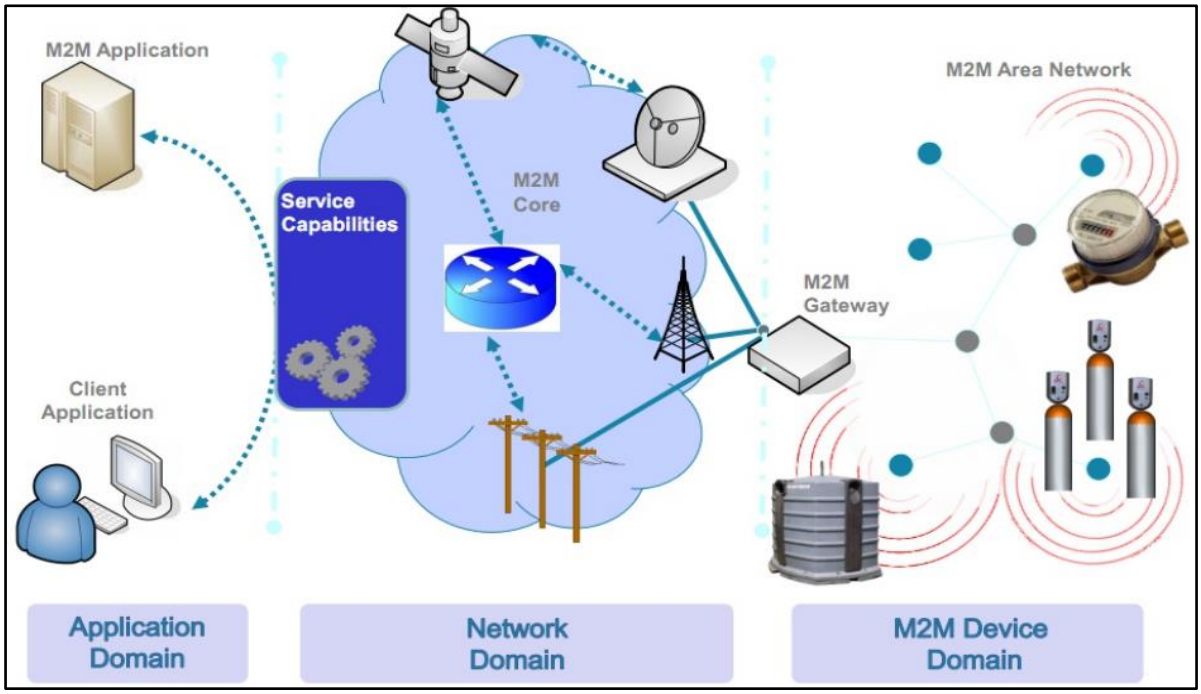


Figure 2.1. Architecture du réseau M2M (source : ETSI)

2.2.3 Domaines d'applications

La communication M2M est présente dans de nombreux domaines [11]–[14], [19], [20]. La Figure 2.2 et le Tableau 2.2 résument certains de ces domaines d'applications :

- la santé et le suivi à distance des patients : les appareils M2M collectent des informations sur les patients et les envoient vers une plateforme supervisée. Ce processus permet de décharger les hôpitaux du suivi de certains malades et d'alerter les médecins en cas d'urgences.
- la domotique : plusieurs objets connectés peuvent être utilisés dans les maisons afin d'assurer la sécurité des habitants (alarme), le confort (contrôler à distance le système de chauffage, l'éclairage, …) ...
- la surveillance et la sécurité : les dispositifs de surveillance déployés dans les locaux des entreprises ou dans les résidences permettent de fournir des informations de surveillance via des vidéos ou des photos.
- la télémétrie : l'objectif de la télémétrie est de mesurer, de superviser et de contrôler à distance des données. Les compteurs intelligents de gaz et d'électricité, par exemple, permettent d'envoyer les mesures de la consommation aux fournisseurs et, par conséquent, de faciliter et fiabiliser la facturation et anticiper d'éventuels pics de consommation.

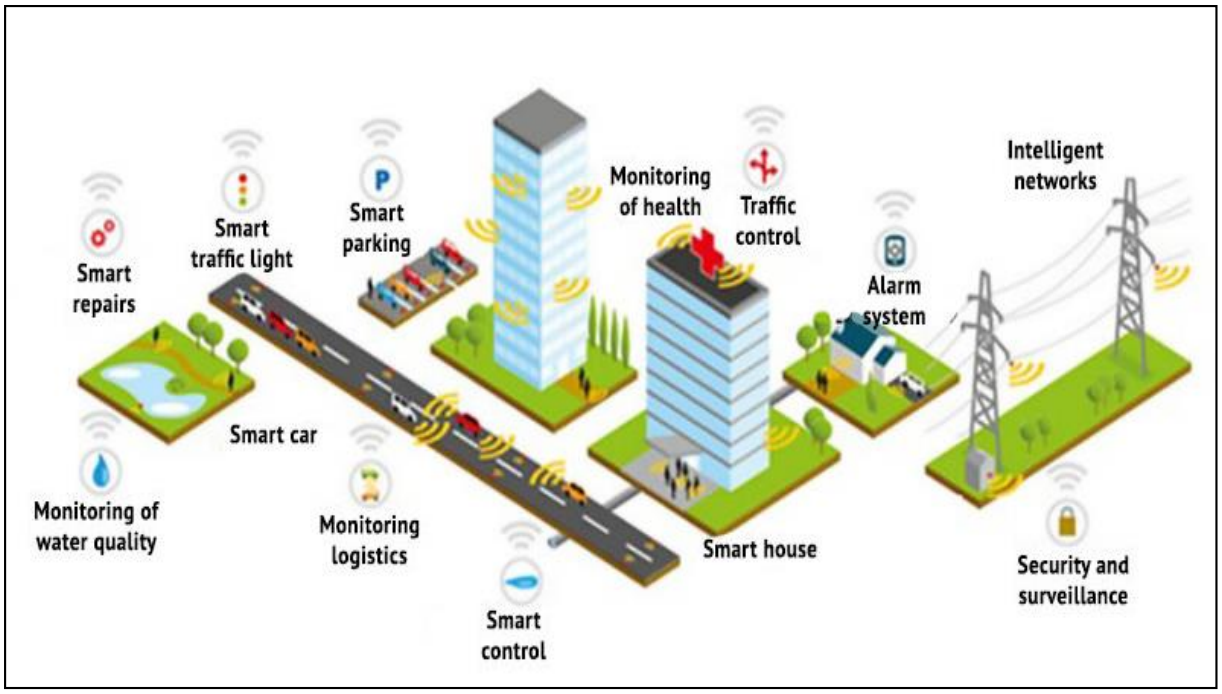


Figure 2.2. Domaines d'applications d'un module M2M [21]

Tableau 2.2. Domaines d'applications M2M [19]

Domaine d'application	Applications M2M
Sécurité	Systèmes de surveillance Contrôle d'accès Sécurité du conducteur/ voiture
Système de transport intelligent	Gestion de flotte Gestion des commandes Évaluer le suivi Information sur le trafic Péage routier
Paiement	Point de vente Distributeur automatique Machines de jeux
Santé	Surveillance de signaux biologiques Soutient des personnes âgées ou handicapées Diagnostic à distance

Maintenance/ contrôle à distance	Contrôle d'ascenseurs Éclairage Pompes Diagnostic des véhicules Automatisation industrielle
Mesures	Puissance/gaz/eau Chauffage Mesure industrielle
Autres applications futuristes	Applications robotiques Surveillance de l'environnement

2.2.4 Classification des applications M2M

Les applications M2M sont de plus en plus présentes dans notre vie quotidienne et on les retrouve dans de nombreux domaines applicatifs. Ces applications ont des caractéristiques et des exigences différentes. Par exemple, certaines applications médicales ont une contrainte forte de latence : les paquets de données doivent, quelque fois, être envoyés en urgence vers un centre médical. En outre, certains modules M2M comme les compteurs d'eau ou d'électricité sont fixes contrairement aux modules M2M implantés dans les camions et qui servent à suivre les marchandises. En raison de ces différences de caractéristiques, il est nécessaire de classer les modules M2M en différentes catégories.

Dans [20], les auteurs ont classé les applications M2M en quatre catégories : les applications dispersées et mobile, les applications dispersées et fixes, les applications concentrées et mobiles et les applications concentrées et fixes (Figure 2.3). La mobilité précise si le module doit se déplacer ou rester fixe.

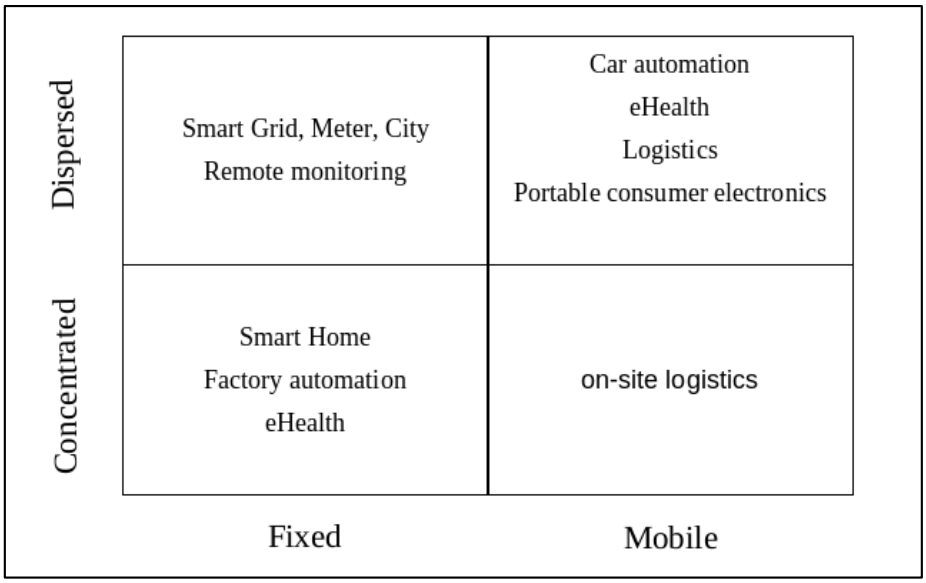


Figure 2.3. Classification des applications M2M selon la concentration et la mobilité [20]

Les auteurs de [22] utilisent une autre approche de classification des applications M2M qui est basée sur la latence des communications. Ils proposent ainsi de classer les applications M2M en quatre classes selon leur degré de tolérance au délai :

- classe 1 : les applications élastiques, ce sont les applications tolérantes au délai.
- classe 2 : les applications temps réel : ce sont les applications qui nécessitent le traitement de leurs données dans des délais impartis tel que les applications médicales qui peuvent nécessiter des interventions en urgence.
- classe 3 : les applications à délai adaptatif ; les applications vidéo par exemple sont des applications sensibles au délai, par contre, elles autorisent des retards occasionnels ou la perte de quelques paquets.
- classe 4 : applications au débit adaptatif : ces applications ajustent leur débit de transmission selon les ressources radio disponibles.

Dans [23]–[25], les auteurs se basent, plutôt sur le mode de communication des données et proposent cinq classes ; les applications périodiques, celles qui répondent à une demande, celles pilotées par des événements, à envoi continu et les application hybrides. Les applications périodiques s'appuient sur des modules M2M qui s'allument périodiquement afin d'effectuer des mesures et les transmettre à un centre de gestion de données. Les applications qui sont pilotées par une requête répondent à certaines instructions des serveurs d'applications MTC en transmettant des données. Cependant, les applications événementielles sont les modules qui réagissent à un événement ou à une demande critique, tel que les détecteurs de fumées qui seront déclenchées suite à la présence d'une fumée. Ces applications sont prioritaires et ne

tolèrent pas de délai. Les applications à envoi continue sont des applications qui envoient en continue leurs données vers un serveur de données. Les applications hybrides sont la combinaison des applications précédentes.

Dans le cadre des travaux de cette thèse, nous avons considéré les applications M2M périodique et évènementielles. Ces types d'applications représentent la majorité des applications M2M. De plus, nous avons considéré des modules M2M fixes ou peu mobiles.

2.2.5 Technologies de communications

Afin d'assurer des communications M2M, plusieurs technologies ont été utilisées ; des technologies de courte, moyenne ou longue portée [26].

Figure 2.4. Technologies de communication du module M2M [27]

La Figure 2.4 représente certaines de ces technologies de communications, parmi lesquelles :

- le Zigbee : cette technologie est développée par plusieurs industriels (Zigbee Alliance). Elle est basée sur le standard IEEE 802.15.4. Elle est caractérisée par sa courte portée, faible consommation énergétique et son faible débit. Trois modules sont nécessaires afin d'assurer la communication M2M : le coordinateur, le routeur et le end-device [28].

- le Bluetooth : Cette norme de communication, apparue en 1999, permet l'échange bidirectionnel de données à très courte distance (théoriquement la portée peut aller jusqu'à 100 m) [29], [30].
- le Wi-Fi : C'est le standard IEEE 802,11 qui est un réseau local (*Local Area Network* (LAN)). Grâce à sa topologie en étoile, où les modules sont connectés à un hub, il est facile d'ajouter ou de supprimer des nœuds sans affecter le fonctionnement du reste du réseau. Le Wi-Fi a l'avantage d'avoir une bande passante élevée (20 MHz) et une portée moyenne, par contre il consomme plus d'énergie que le Zigbee (Figure 2.5) [29].

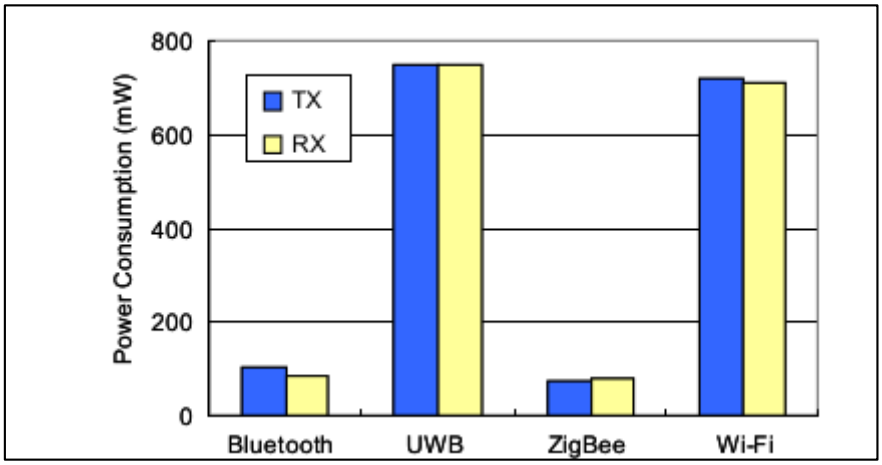


Figure 2.5. Comparaison de la consommation énergétique pour les protocoles Bluetooth, UWB, Zigbee et Wi-Fi [17]

De nos jours, de nombreux objets connectés ont besoin de communiquer sur de longue distance, c'est pour cette raison que les protocoles de courte distance ainsi ceux qui utilisent des hubs sont devenus inefficients [19]. Il est donc nécessaire de s'appuyer à l'avenir sur des technologies de longue portée [19]. Les modules M2M peuvent alors utiliser les technologies cellulaires (2G, 3G et 4G) ou des solutions privées comme Sigfox ou LoRa.

- Sigfox : ce protocole a été créé par une société française. C'est un réseau bas débit et à longue portée. Un objet Sigfox peut envoyer jusqu'à 140 messages à 300 bits/s par jour et avec une charge utile ne dépassant pas 12 octets par message. Le protocole Sigfox est bidirectionnel sous condition : un objet Sigfox peut recevoir 4 messages par jour à des instants définis. Jusqu'à un million de modules M2M peuvent être connectés au même point d'accès, avec une couverture de 30 à 50 km dans les zones rurales et de 3 à 10 km dans les zones urbaines [30], [31].

- LoRaWAN : Semtech était à l'origine du protocole LoRa (*Long Range*). En janvier 2015, Semtech et les représentants de plusieurs opérateurs télécoms européens ont annoncé la création de la LoRa Alliance ou LoRaWAN (*Long Range Wide-area network*). La technologie émet avec une puissance très faible et consomme très peu d'énergie. La topologie du réseau LoRa est en étoile; les équipements, appelés *end-devices,* communiquent avec des concentrateurs, appelés *gateways*. Ces concentrateurs centralisent les messages pour les transmettre au serveur de gestion du réseau. Ce protocole assure une couverture jusqu'à 5 km en zones urbaines et 15 km en zones rurales [30], [32].
- Technologies cellulaires standard : en plus de leur longue portée, les technologies cellulaires comme la 2G, la 3G et la 4G utilisent une infrastructure réseau déjà déployée. La technologie 2G comme GPRS est considérée comme robuste pour assurer la communication des modules M2M. La technologie 3G n'est pas adaptée à la communication M2M à cause de sa faible efficacité énergétique et du coût élevé du modem [19]. La technologie 4G (LTE et LTE-A) est de plus en plus utilisée par les modules M2M. Car en plus de son débit élevé, la LTE/LTE-A permet d'atteindre une latence 10 fois plus faible que la 2G et la 3G. En outre, contrairement aux technologies 2G et 3G, le réseau LTE supporte l'IPV6, ce que le rend bien adapté à des déploiements M2M de masse. D'où vient notre choix d'utiliser la technologie 4G pour assurer les communications entre des modules M2M et le centre de collecte des données. En outre, son nom LTE indique une évolution à long terme (*Long Term Evolution*). Ce fait, dans un cadre industriel, est important pour les développements qui seront réalisés autour de cette technologie.

2.3 LTE/LTE-A

2.3.1 LTE et LTE-A

La norme LTE (Long Term Evolution) a été introduite par le consortium 3GPP dans les Releases 8 et 9 de la norme LTE. Afin d'améliorer cette norme, la 3GPP a définie la norme LTE-Advanced (LTE-A) dans la release 10 qui permet :

- d'avoir un débit supérieur à celui obtenu par la technologie LTE,
- la possibilité de déployer des relais radio qui permettent d'étendre la couverture radio,

- d'avoir des performances radios accrues au niveau d'une cellule pour pouvoir servir plus de terminaux mobiles.

La technologie LTE-A est, alors, une évolution de la technologie LTE et utilise la même architecture que la LTE.

Dans la suite de ce manuscrit, les techniques proposées pour réduire la consommation énergétique sont valables pour les technologies LTE et LTE-A.

2.3.2 Architecture du réseau LTE/LTE-A

Le réseau LTE/LTE-A appelé aussi EPS (*Evolved Packet System*) est un réseau IP de bout en bout, c'est à dire tout le trafic entre un module M2M et le réseau, que ce soit signalisation, transfert de données ou de voix, est basé sur les protocoles internet. La Figure 2.6 montre qu'un réseau LTE est composé de deux parties : la partie cœur du réseau (*Evolved Packet Core* (EPC)) et la station de base (eNB).

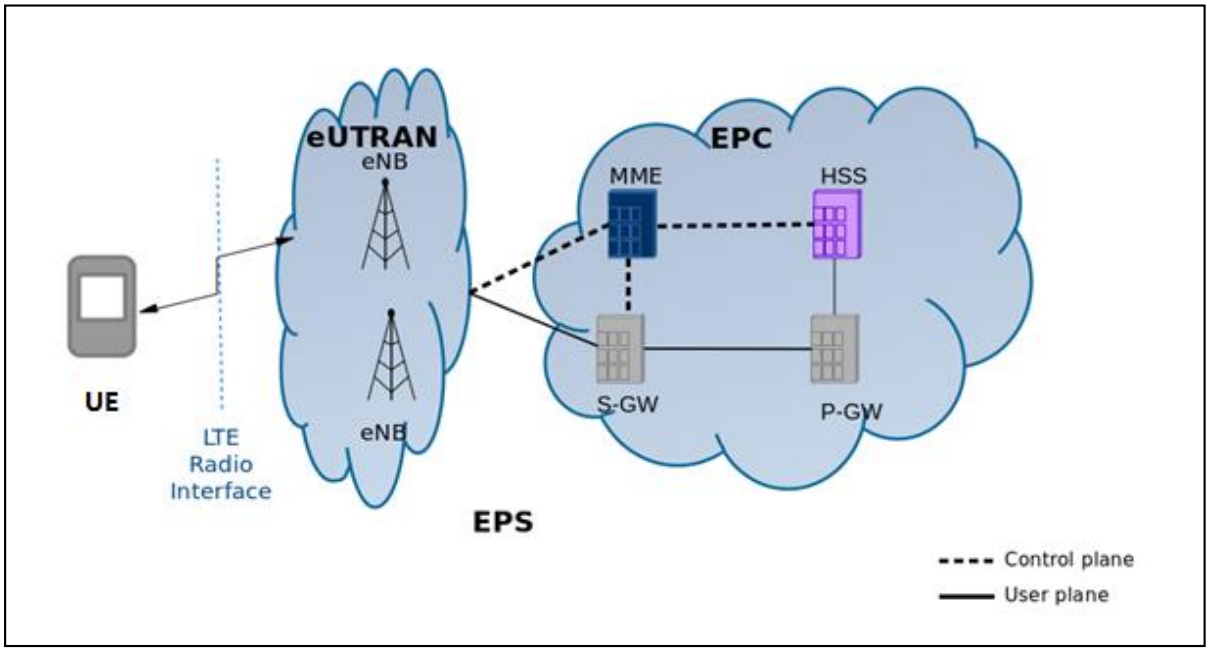


Figure 2.6. Architecture du réseau LTE

2.3.2.1 Cœur du réseau (EPC)

L'EPC est le cœur du réseau LTE. Il est responsable du contrôle du terminal mobile (UE : *User Equipment*) et l'établissement des tunnels. Un tunnel (*bearer)* assure la transmission des paquets IP avec une qualité de service (*Quality of Service* (QoS)) déterminée. L'EPC est composé de quatre éléments que nous détaillerons par la suite [33]–[37] :

- *Home Subscriber Server* (HSS),
- l'entité de gestion de mobilité *(Mobility Management Entity :* MME*)*,
- la passerelle PDN *(PDN Gateway :* P-GW ou PDN-GW*)*,
- la passerelle de service *(Serving Gateway :* S-GW*)*.

Dans la suite, je désigne par UE le terminal mobile, qui peut être un module M2M ou un module H2H.

a) Home Subscriber Server (HSS)

Le HSS est une base de données qui peut être utilisée simultanément par la 2G, 3G et 4G. Cette base de données où sont stockés tous les profils des UEs, fournit au MME toutes les informations d'authentification.

b) Entité de gestion de mobilité (MME)

Le MME est le nœud qui gère la signalisation entre le terminal mobile (UE) et le cœur du réseau LTE. Il assure plusieurs fonctions telles que, l'authentification des modules en stockant les profils et les données des terminaux dans le HSS, et la sélection du S-GW et P-GW afin de transférer les données lors de la connexion du terminal mobile. Le MME gère aussi l'activation et la désactivation des tunnels (ces aspects seront détaillés plus tard).

c) Passerelle PDN : P-GW

La passerelle PDN (*Packet Data Network*), appelée aussi P-GW, assure l'acheminement des données du terminal mobile vers le réseau externe (internet) et réciproquement.

d) Passerelle de service : S-GW

La passerelle de service *(Serving Gateway)* joue le rôle d'un intermédiaire entre la P-GW et la station de base ; elle permet de router les paquets de l'eNB à la P-GW et vice versa. En outre, quand l'UE se déplace et change de station de base, la S-GW sert comme un point d'ancrage de mobilité assurant le maintien du chemin de données.

2.3.2.2 Le réseau radio

Le réseau radio, appelé eUTRAN (*evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*), est composé par un seul élément l'eNB (*evolved Node B*) [38], [39]. Ce dernier dispose d'une

interface notée S1 avec le réseau cœur (EPC) et une interface notée X2 avec les eNBs voisins (Figure 2.7). Afin de communiquer par radio avec les modules M2M, l'eNB utilise les protocoles SC-FDMA en voie montante et OFDMA en voie descendante (ces deux techniques de modulation seront détaillées par la suite).

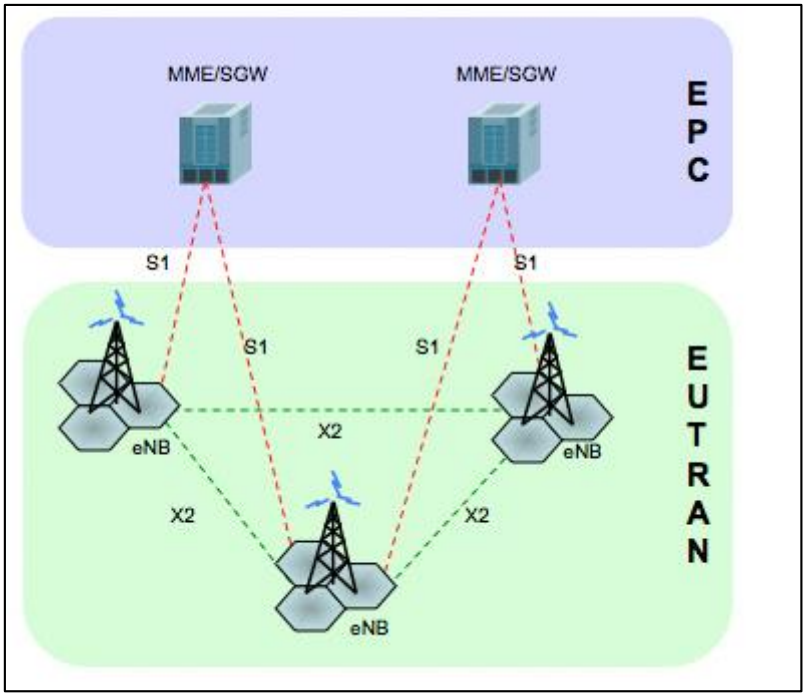


Figure 2.7. Architecture de l'eUTRAN

L'eNB a plusieurs fonctions parmi lesquelles :

- le contrôle des tunnels radio (*radio berears*),
- l'ordonnancement,
- la sélection du MME lors de l'attachement de l'UE,
- contrôler la mobilité de l'UE en mode connecté. Lorsque le module se déplace et s'éloigne de l'eNB, ce dernier vérifie le meilleur eNB voisin auquel l'UE peut se connecter,
- la compression et le cryptage des en-têtes IP,
- la transmission des données en mode *broadcast*.

La Figure 2.8 montre que chaque station de base peut gérer des cellules radio en utilisant plusieurs bandes de fréquence. Un ensemble de cellules forme un *Tracking Area* (TA) [40].

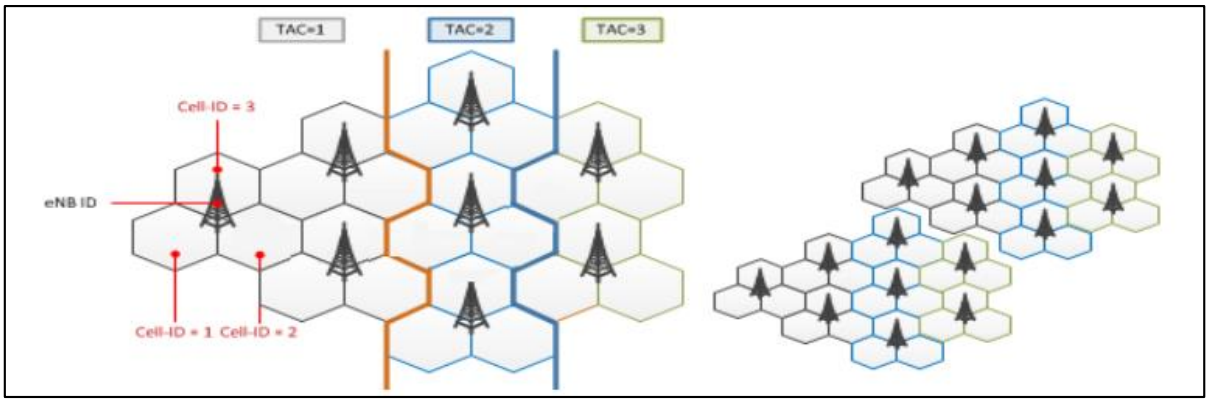


Figure 2.8. Tracking Area [39]

2.3.3 Architecture protocolaire

2.3.3.1 Plan usager et plan de contrôle

La technologie LTE est composée de deux plans [39]–[41] : un plan usager et un plan de contrôle (Figure 2.9).

Le plan usager transporte les données utiles telles que les paquets de voix, les vidéos et les paquets de données des modules M2M. Il est formé par trois sous-couches dont je détaillerai leurs rôles par la suite :

- couche MAC (*Medium Access Control*)
- couche RLC (*Radio Link Control*)
- couche PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*)

En revanche, le plan de contrôle transporte les données de signalisation communiquées entre l'UE et le MME telles que la signalisation de gestion de ressource radio, de gestion de mobilité, des services NAS (*Non Access Stratum*).

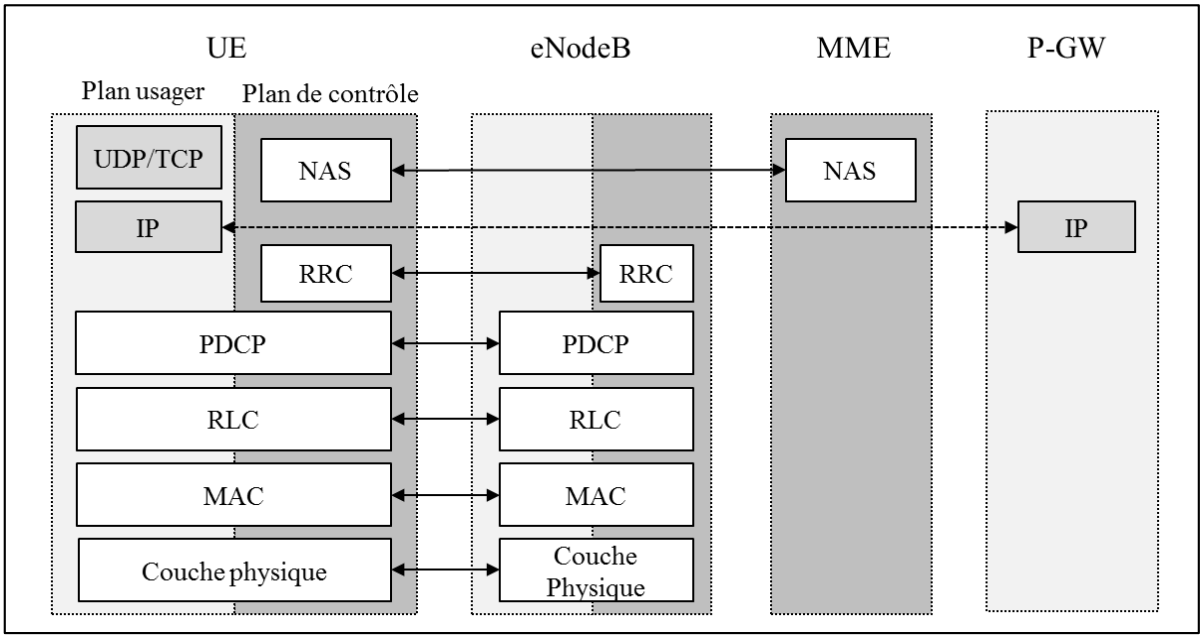


Figure 2.9. Architecture protocolaire

Le plan de contrôle est formé par les couches PHY (Physique), MAC, RLC, PDCP et la couche RRC (*Radio Resource Control*) qui forment le protocole AS (*Access Stratum*) et la couche NAS. Les couches inférieures de protocole AS ont les mêmes fonctionnalités que celles du plan usager puisque ces couches traitent les données délivrées par la couche supérieure selon la configuration précisée par la couche RRC sans faire la distinction entre données de contrôle et données de l'usager. Cependant, les données du plan usager et du plan de contrôle ne sont pas transmises de la même façon. Plusieurs porteuses radio (*radio bearer*) peuvent être établies entre l'UE et l'eNB pour assurer ce transfert.

La couche NAS assure [42] :

- l'authentification
- la gestion du tunnel EPS : établissement et libération du tunnel
- la mobilité de l'UE en mode veille
- la sécurité de transmission des messages de signalisation entre le terminal mobile et la MME

2.3.3.2 Interface radio

L'interface radio de la technologie LTE fournit des connexions entre les UEs et l'eNB. Elle se repose sur trois couches protocolaires :

- couche 1 : appelée aussi couche PHY ou couche physique [40], [43]; son rôle est d'assurer le transfert des données sous forme d'ondes électromagnétiques capables de se propager dans l'air. Elle assure aussi le codage du canal afin de minimiser les erreurs lors de la transmission. En outre la couche Physique effectue les fonctionnalités nécessaires pour la transmission des données comme les mesures radio afin d'estimer la qualité du canal de transmission, la détection de cellule pour s'y connecter...
- couche 2 : appelée aussi couche de liaison de données [39], elle contient trois sous couches :
  - MAC : c'est l'intermédiaire entre la couche physique et la sous couche RLC (*Radio Link Control*) [44]. Elle assure la correction des erreurs par retransmission HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) et l'allocation dynamique des ressources radio (ordonnancement).
  - RLC : cette sous couche assure les fonctions de contrôle du lien de données [45]. Elle permet, aussi, la détection et la correction des erreurs.
  - PDCP : elle est responsable de la compression et décompression des en-têtes IP, détection de la redondance, cryptage et décryptage des données [46].
- couche 3 : couche de signalisation (RRC) [47]. Elle sert au contrôle de l'interface radio. Cette couche est responsable de la configuration et du contrôle des couches de niveau 1 (PHY) et 2 (MAC, RLC et PDCP). Elle assure la gestion de la connexion RRC (établissement, reconfiguration et relâche), la gestion de la mobilité…

Un module M2M (UE) peut être soit en état connecté (*RRC-CONNECTED*) soit en état de veille (*RRC-IDLE*), comme le montre la Figure 2.10. En état de veille, l'UE n'a pas de connexion avec l'eNB, il ne peut ni envoyer ni recevoir des paquets. Par contre, dès que le module M2M ou H2H établit la connexion avec la station de base, il passe en état connecté, l'eNB alloue, alors, des ressources radio au UE afin de lui faciliter le transfert des données.

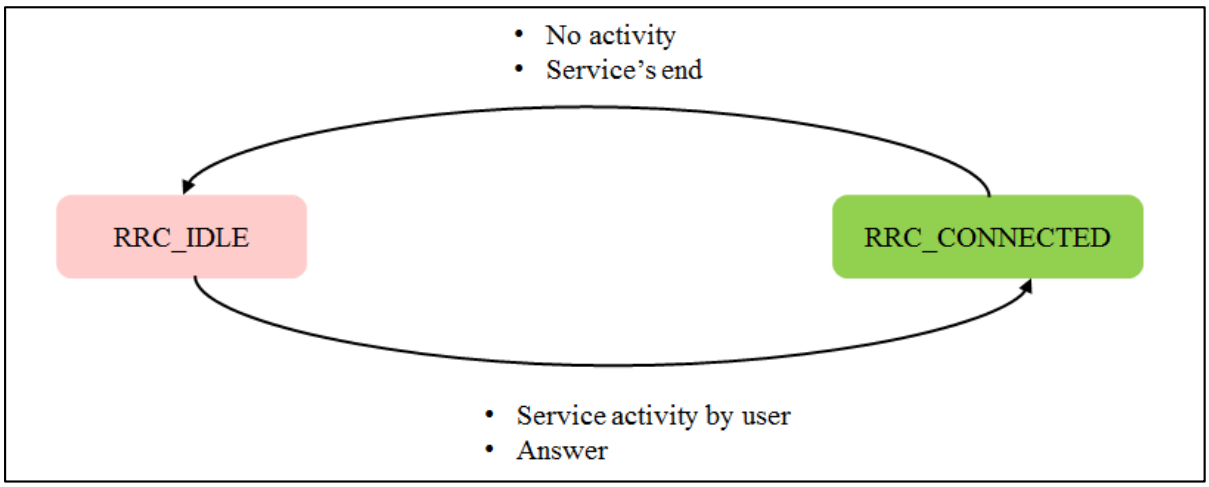


Figure 2.10. Les états d'un UE en LTE

2.3.4 Le Bearer EPS

Le bearer EPS est un tunnel entre l'UE et la P-GW (UE – eNB – S-GW – P-GW) où les paquets IP sont acheminés [40].

Comme le montre la Figure 2.11, un EPS bearer est la concaténation de trois tunnels (DRB, S1 bearer and S5 bearer) :

- DRB (*Data Radio Bearer*) : c'est le tunnel entre UE et l'eNB.
- S1 bearer : tunnel établi au niveau de l'interface S1-U qui est l'interface entre l'eNB et la S-GW.
- S5 bearer : ce bearer est établi au niveau de l'interface S5; interface entre la S-GW et la P-GW.

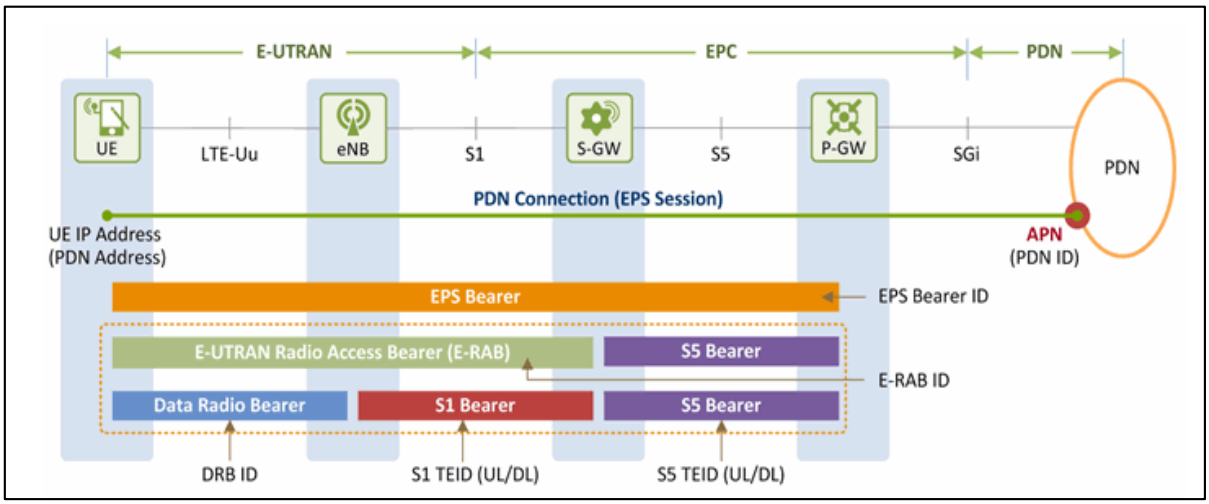


Figure 2.11. Bearer EPS [48]

Un UE (dans notre cas module M2M) peut avoir un ou plusieurs tunnels EPS (Figure 2.12). Chaque Tunnel est caractérisé par une qualité de service (QoS), c'est pour cette raison que chaque bearer EPS a son propre identifiant alloué par le MME. Deux types de bearer EPS existent, comme l'illustre la Figure 2.12 :

- tunnel par défaut (*Default Bearer*) : chaque UE doit avoir un tunnel par défaut. Ce dernier est créé lors de l'enregistrement d'un UE à l'eNB et sera libéré quand l'UE se détache du réseau et passe en état de veille (*RRC-IDLE*),
- tunnel dédié : si le bearer par défaut est insuffisant pour répondre aux besoins d'une application, alors un ou plusieurs tunnels supplémentaires avec une QoS spécifique peuvent être créés. Ces bearers peuvent être enlevés à la fin du trafic tout en gardant l'UE dans l'état actif.

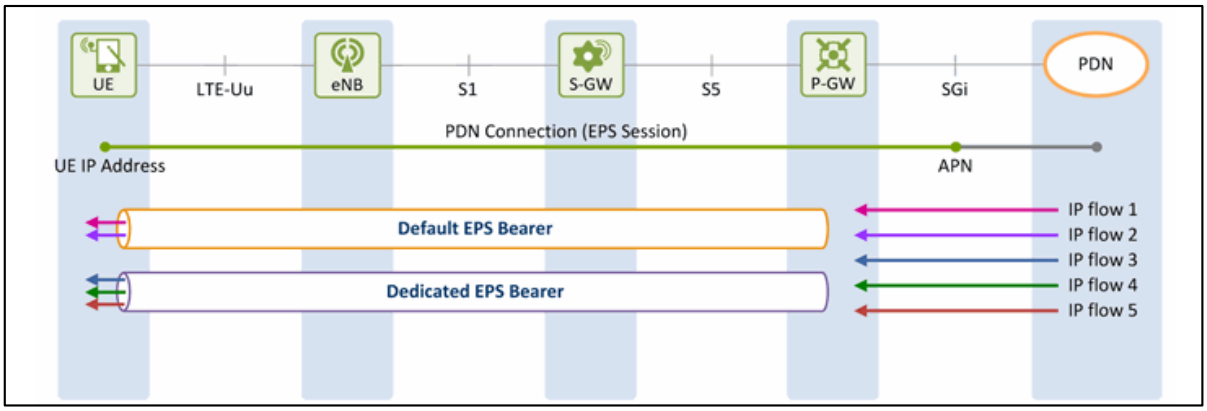


Figure 2.12. Différents types de tunnels [48]

2.3.5 Canaux

Afin d'assurer le transport des paquets, plusieurs canaux sont utilisés [40]. Ces canaux permettent à la couche N+1 de délivrer des informations à la couche N qui seront traitées selon les spécificités du canal. Il existe trois types de canaux (Figure 2.13) :

- les canaux logiques : ces canaux opèrent entre la couche RLC et la couche MAC
- les canaux de transports : ils définissent comment les données sont transmises dans l'air. Ils opèrent entre la couche MAC et la couche physique.
- les canaux physiques : ils sont utilisés par la couche physique et définissent où les données seront transmises (son emplacement dans la trame).

Dans une configuration donnée de l'interface radio, un canal logique ne peut être porté que par un seul canal de transport, mais ce dernier peut transporter plusieurs canaux logiques. Cette règle s'applique aussi pour les canaux de transport et les canaux physiques. Certains canaux

physiques ne sont associés à aucun canal de transport ni canal logique, car ils portent uniquement des informations relatives à la couche physique tel que le canal PDCCH. La Figure 2.13 illustre ce principe, dont trois canaux physiques sont représentés.

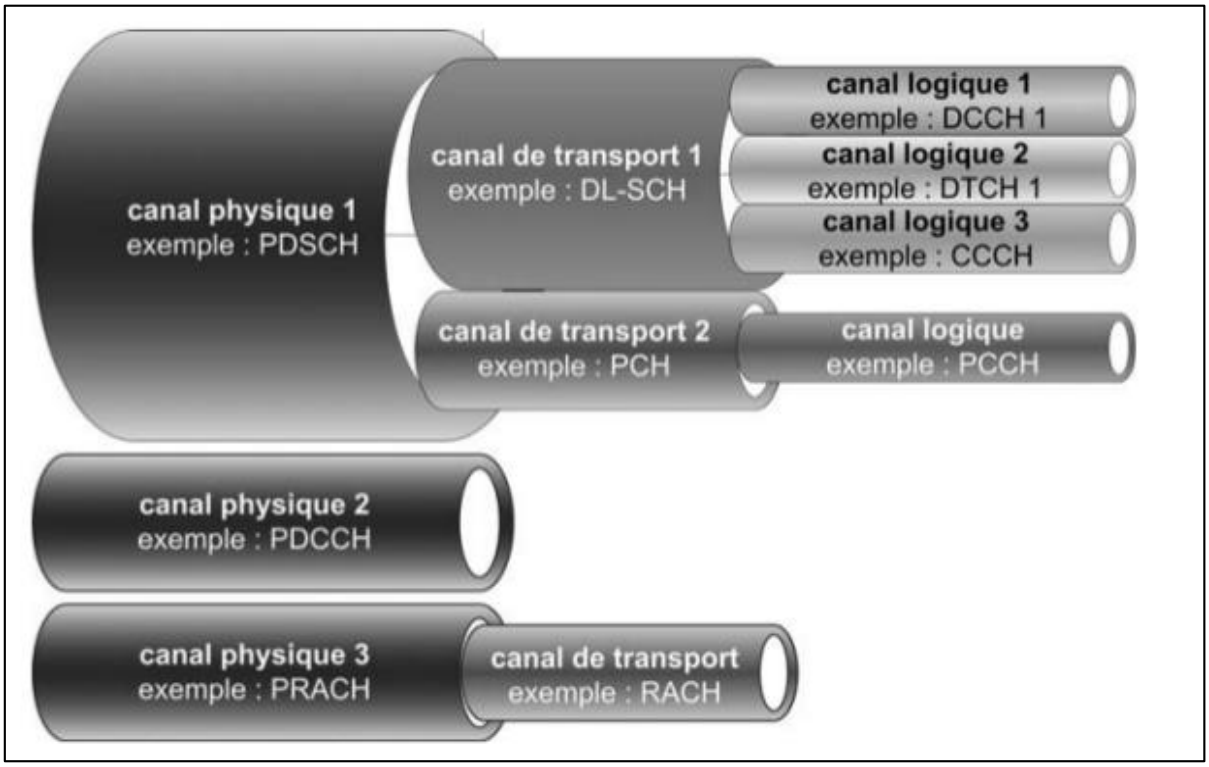


Figure 2.13. Les canaux de l'interface radio LTE et leurs imbrications [40]

2.3.5.1 Canaux logiques

Ces canaux définissent quel type d'information sera transmis dans l'air. Il existe deux types de canaux logiques : les canaux de trafic qui transportent les données pour le plan usager et les canaux de contrôle qui véhiculent les données pour le plan de contrôle. Parmi les canaux logiques, on cite :

- *Broadcast Control Channel* (BCCH) : c'est un canal dédié au plan de contrôle. Il sert à diffuser des informations de contrôle sur la cellule tel que l'identifiant de la cellule,
- *Paging Control Channel* (PCCH) : il transmet les informations nécessaires pour les notifications d'appels (paging),
- *Dedicated Control Channel* (DCCH) : ce canal porte la signalisation dédiée à l'utilisateur (RRC et NAS),
- *Dedicated trafic Channel* (DTCH) : il a pour rôle de porter les informations de trafic dédié à un usager.

2.3.5.2 Canaux de transport

Ces canaux définissent la façon dont les données sont transmises de la couche MAC à la couche Physique. Deux catégories de canaux existent : les canaux de transport dans le sens montant et les canaux de transport dans le sens descendant. Parmi lesquelles, je cite :

- *Broadcast Channel* (BCH) : ce canal assure la diffusion des informations sur la cellule, il porte exclusivement le BCCH et en particulier le *Master Information Block* (MIB) qui indique la largeur de la bande passante en voie descendante et le numéro de la trame radio (SFN : *System Frame Number*).
- *Paging Channel* (PCH) : il est utilisé afin de diffuser les informations de paging, qui sont les informations dédiées aux UEs quand il est en état de veille, sur la cellule.
- *Random Access Channel* (RACH) : ce canal, utilisé en voie montante, sert à établir la connexion RRC avec l'eNB.

2.3.5.3 Canaux Physiques

Ces canaux fournissent le moyen pour transmettre par radio les données des canaux de transport.

Les canaux utilisés en voie montante sont :

- *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH) : il sert à transporter les données utilisateurs et la signalisation des couches supérieures.
- *Physical Uplink Control Channel* (PRACH) : ce canal transporte le RACH
- *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH) : transporte les informations de contrôle

Parmi les canaux en voie descendante, on peut citer :

- *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH) : pour la transmission du PCH
- *Physical Downlink Control Channel* (PDCCH) : est le canal physique de contrôle dans le sens descendant et qui porte les informations permettant aux UEs de connaître les ressources radio qui lui sont allouées dans cette sous-trame (position des ressources radio) et des informations de contrôle permettant à l'UE de connaître les ressources et le schéma de modulation qu'il utilisera 4ms plus tard pour émettre ses données vers l'eNB.
- *Physical Broadcast Channel* (PBCH) pour la transmission du BCH
- *Physical Hibrid ARQ Indicator Channel* (PHICH) : il porte les acquittements d'HARQ

2.3.5.4 Mappage entre les canaux

La Figure 2.14 décrit l'association des canaux en voie montante et descendante. Selon le protocole RRC, un canal logique ne peut être porté que par un seul canal de transport, alors que ce dernier peut transporter plusieurs canaux logiques. Il en est de même pour les canaux de transport et les canaux physiques. De plus, certains canaux physiques ne transportent aucun canal de transport.

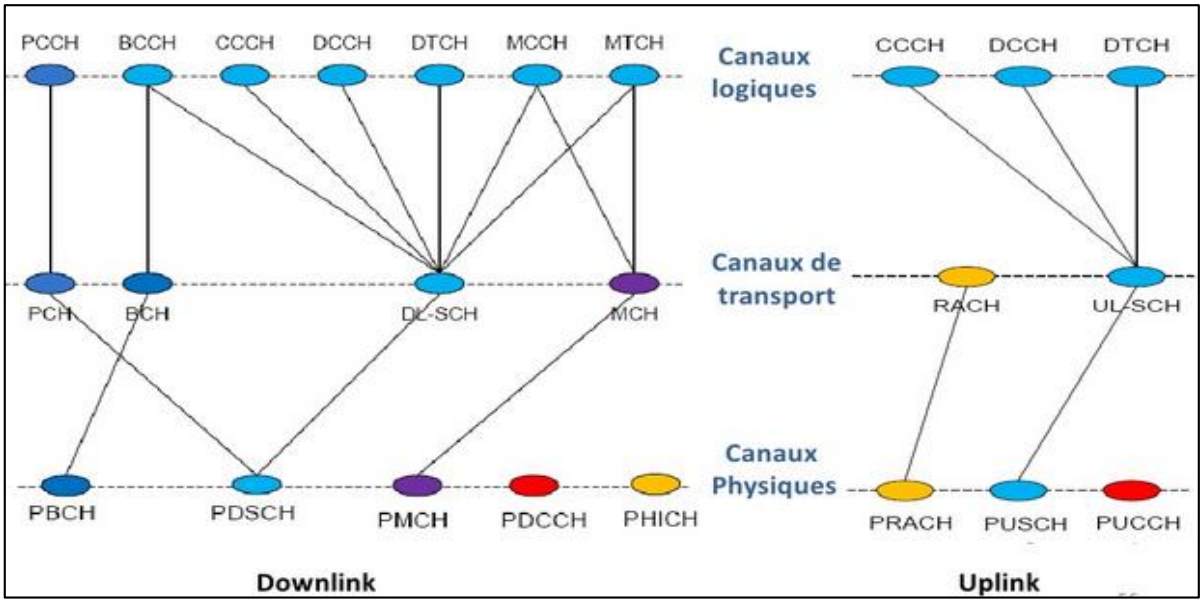


Figure 2.14. Mappage entre les canaux [49]

2.3.6 La dimension fréquentielle en LTE

La couche physique en LTE utilise la technique de multiplexage et de codage OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) en voie descendante. Cette technique consiste à partager des bandes de fréquences (ressources radio) entre plusieurs utilisateurs afin de transmettre des informations binaires. Ces bandes de fréquences sont appelées des sous-porteuses et elles sont orthogonales, c'est-à-dire un symbole modulé sur une sous-porteuse n'interfère pas avec d'autres symboles.

En outre, en LTE, la technique SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) est utilisée en voie montante. En OFDMA, les symboles sont transmis chacun à travers une sous-porteuse alors qu'en SC-FDMA chaque symbole est étalé sur l'ensemble de sous-porteuses allouées (Figure 2.15).

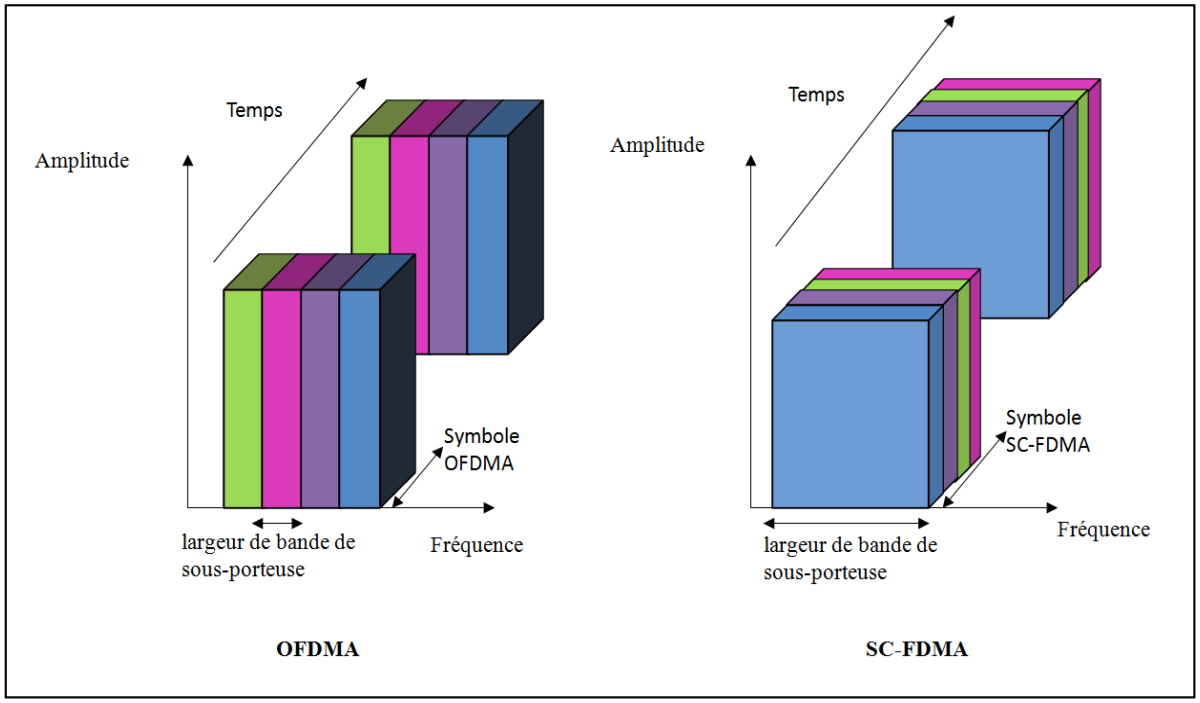


Figure 2.15. Différence entre OFDMA et SC-FDMA

L'allocation des ressources radio s'effectue dans le domaine fréquentiel et temporel, d'où la représentation sous forme d'une grille temps fréquence (Figure 2.16).

En LTE, la plus petite unité de ressource fréquentielle allouée à un UE est la ressource radio (*Physical Ressource Block :* PRB). Un PRB, noté aussi RB, a une durée de 0,5 ms, durée d'un slot, et une largeur fréquentielle de 180KHz.

De plus, un RB est constitué de 12 sous-porteuses d'une largeur de 15KHz chacune. Le plus petit élément constituant une ressource radio est appelé élément de ressource (*Resource Element : RE*).

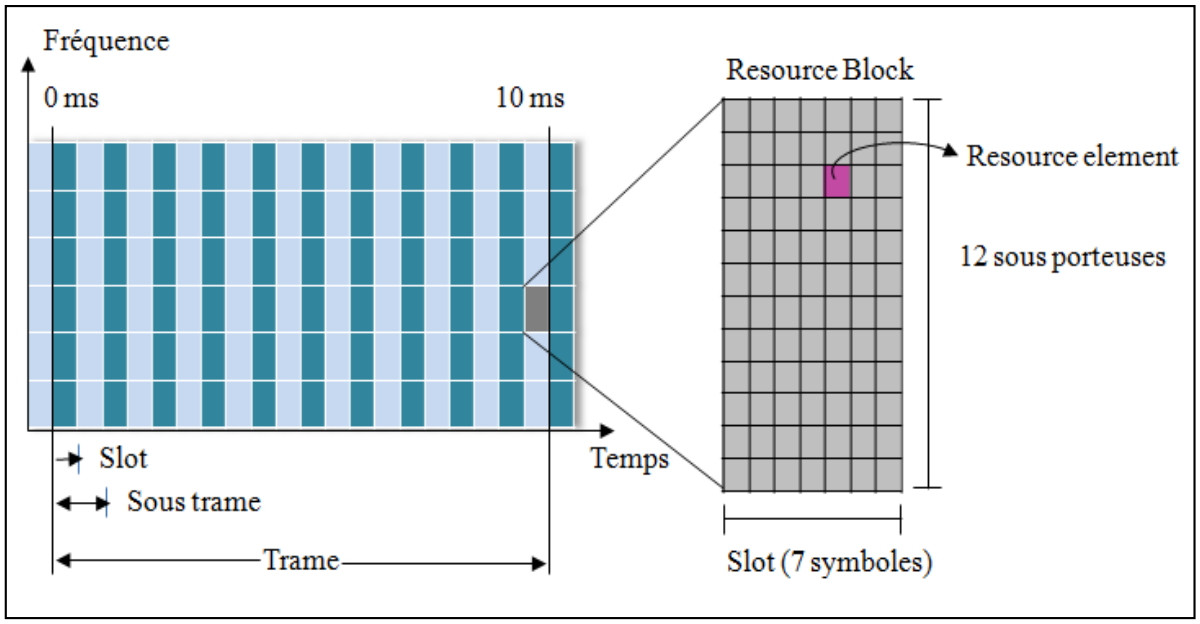


Figure 2.16. Grille de ressources radio

La technologie LTE supporte plusieurs bandes de fréquence. Le tableau suivant représente le nombre de ressources radio pour chaque bande de fréquence [50].

Tableau 2.3. Nombre de ressources radio en fonction de la bande de fréquence

Bande de fréquence (MHz)	Nombre de ressources radio
1,4	6
3	15
5	25
10	50
15	75
20	100

2.3.7 Trame radio

La Figure 2.17 représente une trame radio d'une durée de 10 ms. Chaque trame est composée de dix sous-trames de 1ms chacune. Une sous-trame constitue le TTI (*Transmission Time Interval*), le plus petit intervalle de temps qui peut être alloué à un UE.

Il existe deux structures de trame radio :

- Type 1 est adapté au domaine fréquentiel (FDD : *Frequency Division Duplexing*)
- Type 2 est adapté au domaine temporel (TDD : *Time Division Duplexing*)

En mode FDD, chaque sous-trame est composée de deux slots de 0,5 ms chacun (Figure 2.17). D'où, une trame radio est formée par vingt slots ; dix slots sont utilisés par la voie descendante et dix sont disponibles pour la voie montante. En cas du FDD *half duplex*, le module ne peut pas transmettre et recevoir en même temps, ce que limite le nombre de slots utilisés. Chaque slot contient soit six ou sept symboles OFDM selon la longueur du préfixe cyclique (*Cyclic Prefix* : CP).

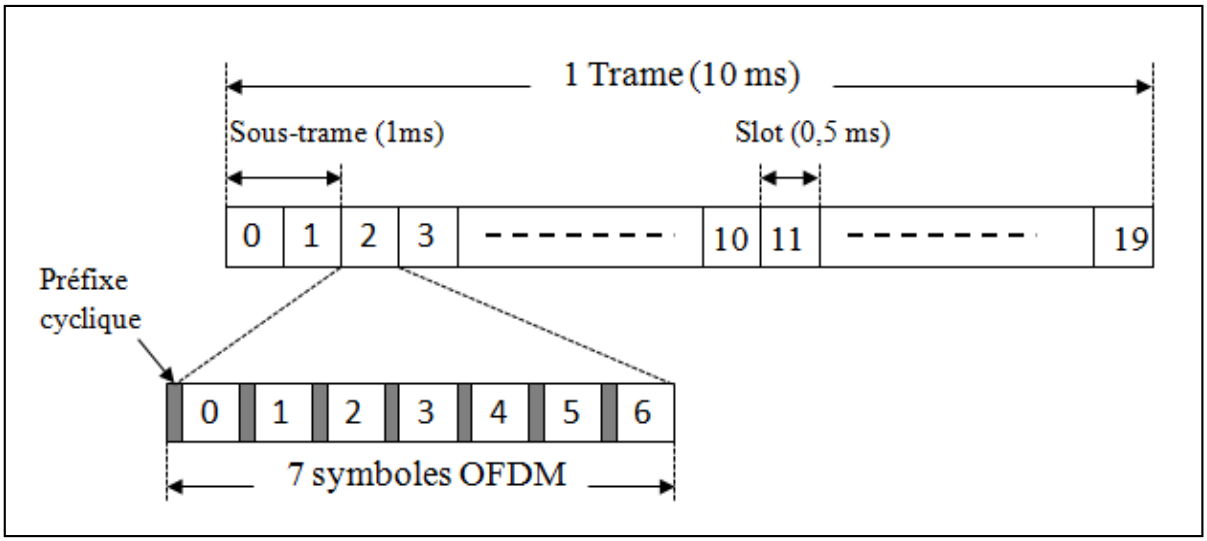


Figure 2.17. Structure de la trame LTE en FDD

Dans le domaine temporel, certaines sous-trames sont utilisées pour la voie montante et d'autre pour la voie descendante.

2.3.8 Consommation énergétique et mode de fonctionnement

La majorité des modules M2M sont alimentés par des batteries, d'où le fait que la réduction de la consommation énergétique est cruciale pour ces modules M2M. Afin d'économiser de l'énergie, quand il n'y a pas de données à envoyer ou à recevoir pendant une période de temps appelée RRC-Inactivty-Timer, le module M2M libère la connexion avec la station de base et passe à l'état RRC_Idle, comme l'illustre la Figure 2.18 [51], [52].

En RRC_Idle, le module M2M consomme moins d'énergie qu'à l'état RRC_Connected. Afin de réduire la consommation de puissance dans l'état RRC_Connected et RRC_Idle, LTE et LTE-

A proposent la technique DRX (*Discontinuous reception*) qui consiste à éteindre le module radio du module M2M et à le rallumer périodiquement afin d'écouter le canal PDCCH. Le module alterne entre une période de repos et une période d'activité. Je présenterai cette technique en détail dans le chapitre suivant.

A l'état RRC_Connected, le module passe en mode repos afin d'économiser de l'énergie. En DRX, le module en état connecté, qui a toujours un lien radio avec l'eNB et peut envoyer et recevoir des données, se met en mode repos la plupart du temps comme l'illustre la Figure 2.18. Cependant, en état RRC_Idle, le module n'a plus de connexion radio avec la station de base et se met en mode repos pour une durée plus longue qu'en état connecté et par conséquent utilise une puissance plus faible (< 15mW) que dans l'état connecté où la radio est allumée et utilise une puissance élevée (1000-35000 mW) [52].

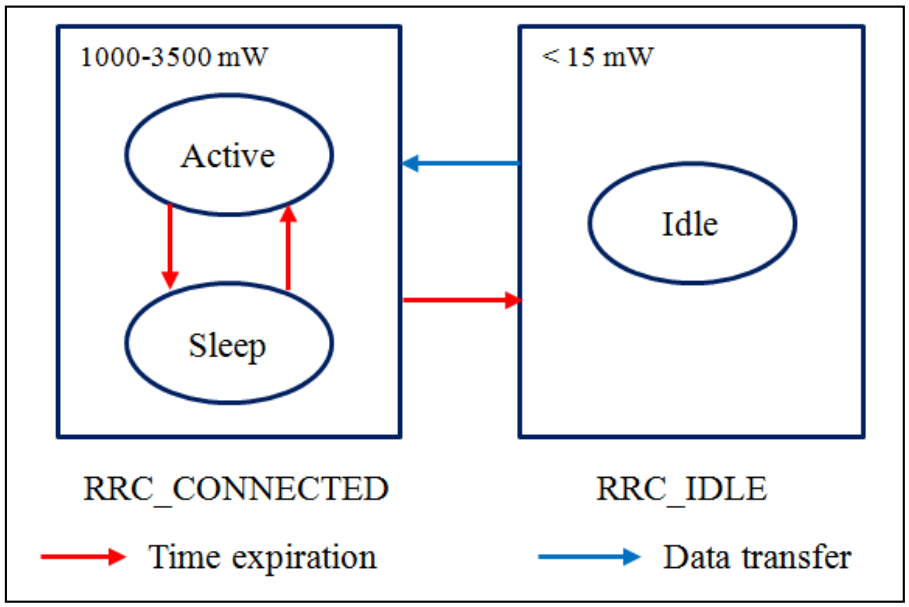


Figure 2.18. Transition d'état de l'UE [51], [52]

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, j'ai commencé par introduire la technologie M2M ; son architecture, les domaines d'applications ainsi que les protocoles de communications qui assurent la communication des objets connectés.

Dans la deuxième partie, j'ai présenté l'architecture du protocole LTE ainsi que sa pile protocolaire. J'ai détaillé par la suite, les tunnels de communication, les différents canaux et la trame radio qui assure le transfert des données depuis le module M2M jusqu'au serveur de gestion de données.

En utilisant le protocole LTE, les modules M2M ont l'avantage de communiquer sur de longues distances. En contrepartie, ce protocole consomme une certaine quantité d'énergie, d'où le défi de trouver des solutions afin de réduire la consommation énergétique dans les modules M2M et de prolonger ainsi leur autonomie.

Dans la suite de ce rapport, différentes techniques, proposées dans la littérature, de réduction de la consommation énergétique dans les modules M2M et utilisant la technologie LTE sont présentées. Je détaillerai, par la suite, les solutions que j'ai proposées pour répondre à ce problème.

Chapitre 3. Etat de l'art

3.1 Introduction

Les modules M2M sont alimentés principalement par des batteries et peuvent être parfois placés dans des endroits inaccessibles. Ainsi, il est difficile, voire quelques fois, impossible de remplacer ou recharger les batteries. Afin de concevoir des modules M2M possédant une autonomie suffisante, il est nécessaire de définir des techniques de réduction de la consommation. Aussi dans ce chapitre, j'étudierai les caractéristiques des différents composants d'un module M2M utilisant les technologies LTE/LTE-A et j'identifierai les principales sources de consommation d'énergie. Certains modèles énergétiques proposés dans la littérature seront ensuite listés et décrits.

Suite à la présentation de ces modèles, différentes techniques de réduction de la consommation énergétique, proposées dans la littérature, et permettant d'augmenter la durée de vie des modules M2M utilisant les technologies LTE/LTE-A seront étudiées. Dans la dernière partie de ce chapitre, j'énumérai quelques simulateurs de réseau LTE/LTE-A avec une description de leurs fonctionnalités.

3.2 Modèles énergétiques

Afin de réduire la consommation énergétique dans un module M2M, il est nécessaire de disposer de modèle énergétique permettant d'identifier et de quantifier les différentes sources de consommation et d'estimer la durée de vie de ces modules.

Un module LTE comporte trois parties principales [53], [54] :

- une partie radio (*Radio Frequency* : RF) qui est composée d'un duplexeur, un amplificateur de puissance, une chaine de réception (RX) et de transmission (TX) et des convertisseurs analogique-numérique et numérique-analogique. La partie radio englobe aussi un oscillateur à cristal qui permet la synchronisation temporelle et fréquentielle de l'émetteur-récepteur.
- un processeur de bande de base (*Base Band : BB*) qui assure le codage et le décodage.
- une horloge de faible puissance et de faible précision (*coarse clock*) qui maintient une synchronisation avec le réseau. Cette horloge est utilisée pour activer les modules pour des événements programmés régulièrement tel que la pagination, effectuer des mesures environnementales... Elle est toujours active et consomme une puissance faible et constante [53].

La Figure 3.1 représente la structure d'un module M2M et ses différents composants.

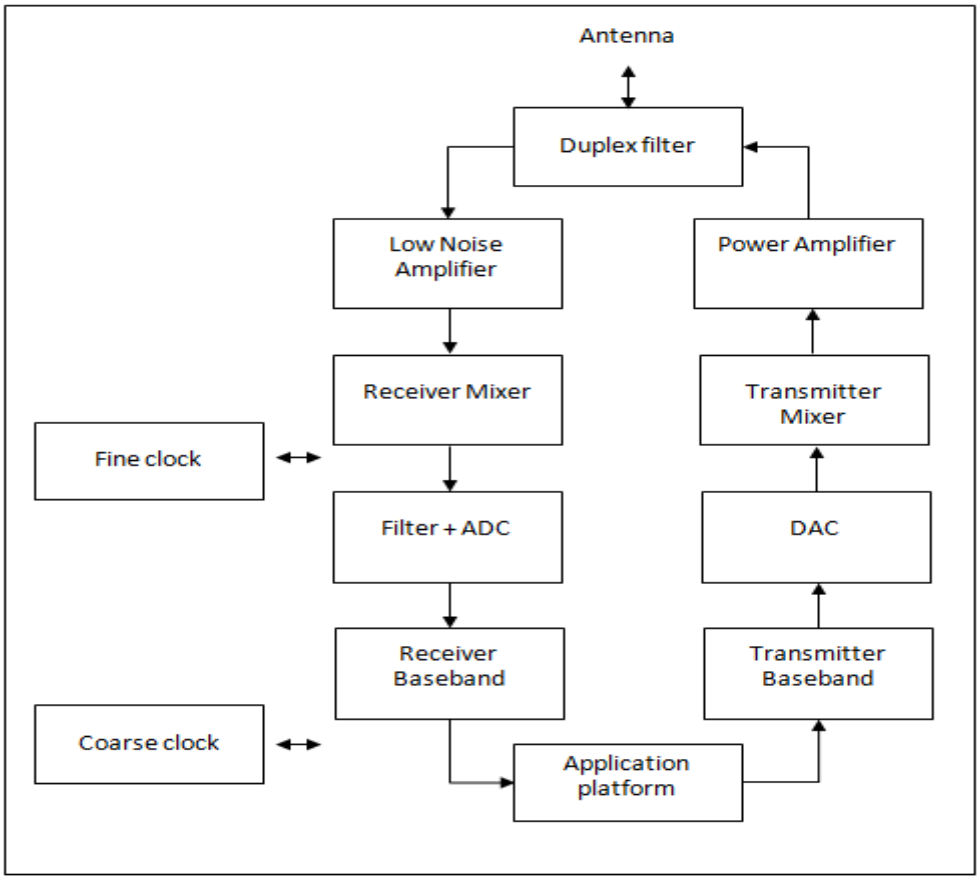


Figure 3.1. Structure d'un module M2M utilisant la technologie LTE [55]

Des travaux de recherches ont montré que la consommation énergétique d'un module M2M utilisant la technologie LTE est due principalement, à la puissance de transmission du module RF qui est nécessaire pour communiquer avec l'eNB, et à la durée d'émission des paquets [56]–[59].

La Figure 3.2 montre les facteurs qui permettent de déterminer la consommation énergétique du module RF. En effet, l'énergie consommée par le module LTE lors de la transmission des données dépend de la puissance de transmission (P_{TX}) et de la durée de temps nécessaire pour transmettre les données (T_{TX}). La puissance de transmission requise par l'UE pour transmettre ses paquets dépend de la qualité du lien radio renseignée par l'indicateur de la qualité du canal (CQI : *Channel Quality Indicator*). Cet indicateur permet de déterminer aussi le schéma de codage et de modulation (MCS) afin de moduler/démoduler les données. Grâce au MCS et à la bande passante, l'eNB calcule la taille du bloc de transport (TBS) qui peut être

alloué à l'UE pour transmettre ses données utiles. La taille des données transmises dépend aussi du nombre de ressources radio (Nb) alloués par l'eNB aux UEs.

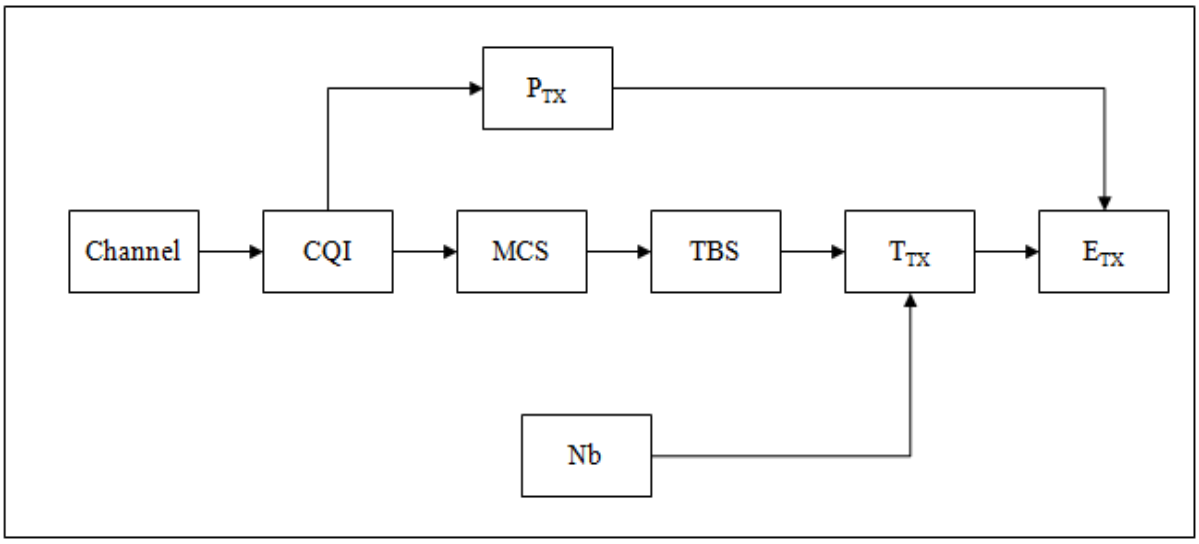


Figure 3.2. Facteurs influençant la consommation énergétique en transmission [57]

La puissance de transmission du module RF est définie dans le standard [50] par l'équation (1)

$$P_{TX} = \min(P_{max}, P_0 + 10 * \log_{10}(M) + \alpha * PL + \Delta_{TF} + f) \quad (1)$$

Avec : P_{max} est la puissance de transmission maximale autorisée en LTE [dBm]

P_0 est la puissance dissipée par les ressources radio (RBs) en cas d'absence d'atténuation de propagation [dBm]

M est le nombre de ressources radio alloués par l'eNB à chaque UE [-]

PL est le facteur d'atténuation de propagation [dB]

α est un facteur de compensation de perte de chemin. Il est spécifique à la cellule et se situe dans l'intervalle [0,1] [-]

Δ_{TF} est un paramètre lié au schéma de codage et de modulation (MCS) [dB]

f est une fonction de correction.

Birchall et al. [57] montrent que deux pics peuvent être observés sur la consommation énergétique du module RF (Figure 3.3) : le premier pic est dû au processus de demande de ressources radio à la station de base et le deuxième pic est dû à la transmission des paquets.

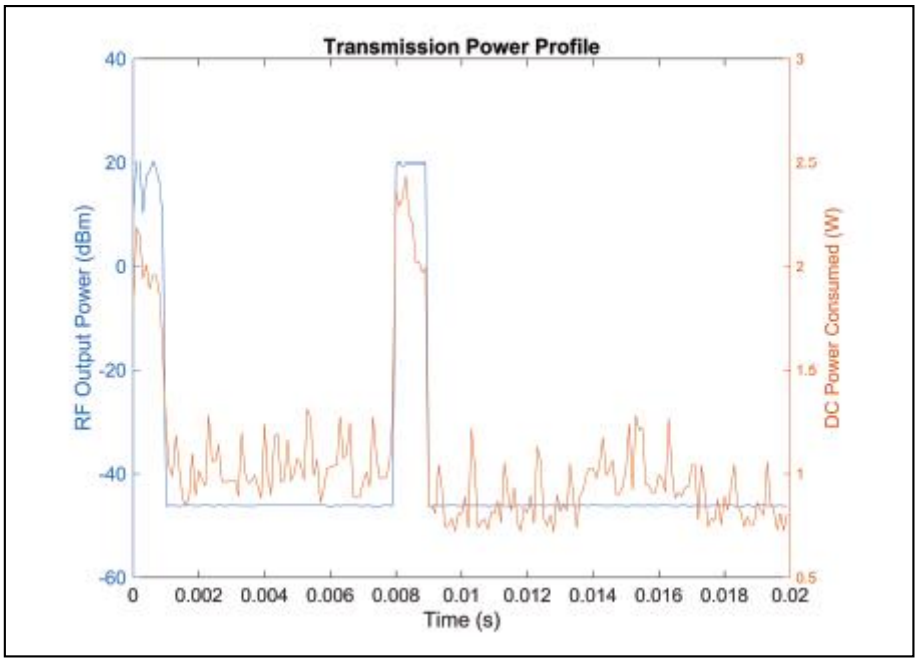


Figure 3.3. Consommation énergétique du module RF [4]

Dans la technologie LTE, afin de réduire sa consommation énergétique, le module utilise la technique de réception discontinue, notée DRX. Cette technique, que je détaillerai par la suite et qui est représentée dans la Figure 3.4, est utilisée en état RRC_Connected et RRC_Idle. En mode connecté, le module se réveille périodiquement durant le OnDuration pour scruter le canal PDCCH et se met en mode repos le reste du temps (durant short et long DRX). En RRC_Idle, le mode veille est appelé cycle de paging et le module se réveille périodiquement durant le «Paging Occasion» pour écouter le canal PDCCH (Figure 3.4).

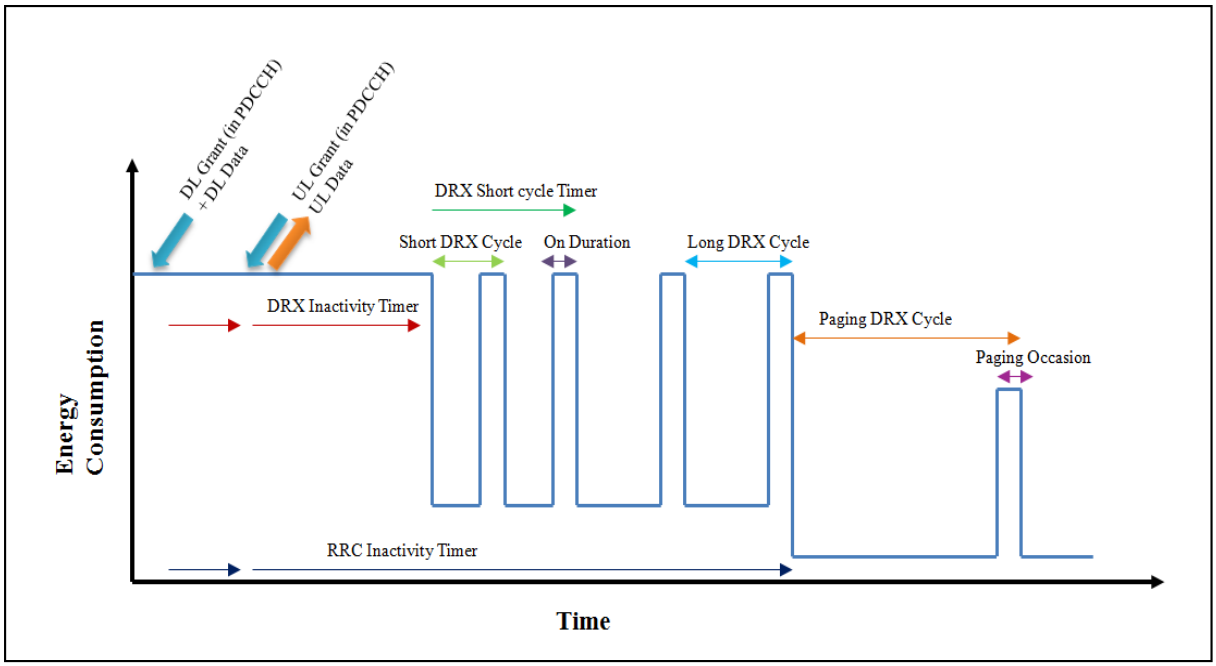


Figure 3.4. Principe de la technique réception discontinue [60]

Afin de calculer l'énergie totale consommée par un UE utilisant la technologie LTE, plusieurs modèles énergétiques ont été proposés.

Tirronen et al. [53], [61] ont choisi de traiter la consommation énergétique d'un module M2M qui reste toujours en mode connecté. Ce choix est fait pour éviter la consommation énergétique supplémentaire engendrée par les signaux de contrôle lors du passage du mode connecté au mode veille et vice-versa.

Le modèle énergétique proposé alors se base sur l'état de l'UE (module M2M) en état RRC-Connected et il dépend de quatre phases ou périodes représentées dans la Figure 3.5 :

1) Période active durant laquelle le module peut recevoir et envoyer des données (P_{act}, t_{act}),
2) Période d'inactivité appelé aussi période de repos en mode DRX dans l'état connecté durant laquelle le module n'écoute aucun signal radio afin de réduire la consommation énergétique (P_{sleep}, t_{DRX}),
3) Période de synchronisation fine nécessaire pour que le module M2M soit synchronisé avec la station de base. La synchronisation fine consiste à estimer le début de chaque symbole SC-FDMA de la trame radio (P_{clock}, t_{sync}),
4) Période d'émission (P_{tx}, t_{tx}) durant laquelle le module M2M envoie ses données.

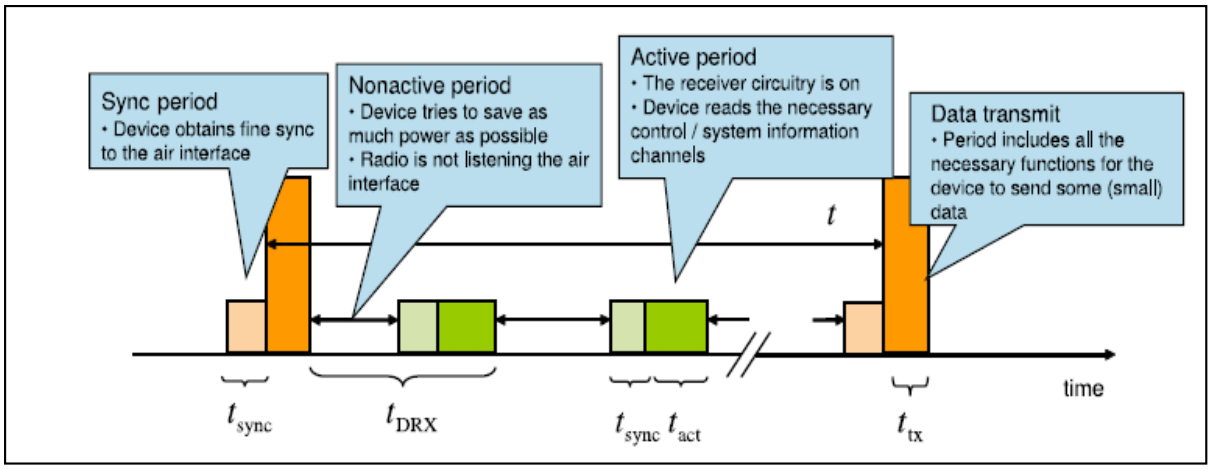


Figure 3.5. Différentes périodes pour un modèle énergétique [53], [61]

L'énergie totale consommée est la somme de l'énergie consommée durant chaque phase :

$$E_{\Delta t} = E_{act} + E_{sleep} + E_{base} + E_{tx} \quad (2)$$

Avec : E_{tx} : énergie consommée en émission,

E_{act} : énergie consommée lors de la réception de données,

E_{sleep} : énergie consommée en mode d'inactivité en RRC-Connected,

E_{base} : énergie consommée par l'horloge de base. Cette horloge, qui est toujours active, maintient une synchronisation grossière (qui consiste à estimer le début de chaque trame radio) avec le réseau et assure l'activation du module.

Selon [61], l'énergie consommée lors de l'émission est :

$$E_{tx} = t_{sync} \cdot (P_{act} + P_{clock}) + t_{tx} \cdot (P_{tx} + P_{clock}) \quad (3)$$

Pour calculer cette énergie, Tirronen prend en compte la durée nécessaire pour la synchronisation avec le réseau (t_{sync}) et la puissance dissipée pendant cette période.

Au final, le module reste actif pendant n cycles durant lesquels il reçoit des données en voie descendante et des messages de contrôle. L'énergie consommée durant cette période peut être calculée selon l'équation (4) :

$$E_{act} = n \cdot (t_{act} + t_{sync}) \cdot (P_{act} + P_{clock}) \quad (4)$$

L'énergie consommée en période d'inactivité en mode connecté est :

$$E_{sleep} = n \cdot \left(t_{DRX} - \left(t_{sync} + t_{act}\right)\right) \cdot P_{sleep} \quad (5)$$

Ce modèle énergétique, qui représente la consommation énergétique d'un module M2M seulement en mode connecté, est valable pour les modules M2M qui envoient des paquets en continu d'où l'intérêt de rester en mode connecté afin d'éviter des signaux de contrôle supplémentaires.

Pour la majorité des modules M2M, l'intervalle qui sépare la transmission de deux paquets consécutifs est long donc il est préférable de passer en mode veille car la consommation énergétique est plus basse qu'en mode connecté malgré les signaux de contrôle supplémentaires utilisés lors de la déconnexion et la reconnexion au réseau.

Un autre modèle énergétique est proposé par Lauridsen et al. et qui prend plutôt en compte les différents états d'un module M2M en état connecté (en mode actif et mode DRX) et en état de veille (RRC_Idle).

La puissance consommée est alors donnée par l'équation (6) [56] :

$$P_{\text{module}} = m_{\text{con}} * P_{\text{con}} + m_{\text{idle}} * P_{\text{idle}} + m_{\text{DRX}} * P_{\text{DRX}} \quad (6)$$

Avec : P_{module} : puissance consommée par le module M2M [w]

m_{con} : variable booléenne indiquant si le module est en mode connecté [-]

P_{con} : puissance consommée en mode connecté [w]

m_{idle} : variable booléenne indiquant si le module est en mode idle [-]

P_{idle} : puissance en mode idle [w]

m_{DRX} : variable booléenne indiquant si le module est en DRX [-]

P_{DRX} : puissance consommée en mode DRX, noté P_{Sleep} dans le modèle de Tirronen [w]

En se basant sur ce modèle et le modèle présenté par Tirronen [53], [61], j'ai établie un modèle énergétique qui permet de calculer l'énergie totale consommée. Cette énergie totale est la somme de l'énergie consommée dans chaque état :

$$E_{totale} = E_{con} + E_{idle} + E_{DRX} \quad (7)$$

Avec : E_{con} est l'énergie consommée en mode connecté,

E_{idle} est l'énergie consommée en mode idle,

E_{DRX} est l'énergie consommée en mode DRX à l'état RRC_Connected.

La première partie de l'équation (7) représente la consommation énergétique du module M2M en mode connecté. Cette énergie est la somme de l'énergie consommée en réception, transmission et quand le module est actif mais il ne transmet ni ne reçoit des paquets.

Ainsi l'énergie consommée est :

$$E_{con} = P_{on} * t_{on} + m_{Tx} * P_{Tx} * t_{Tx} + m_{Rx} * P_{Rx} * t_{Rx} \quad (8)$$

Avec : P_{on} est la puissance consommée quand le module est en mode connecté,

t_{on} est le temps passé en mode connecté,

m_{Tx} est une variable binaire indiquant une transmission active,

P_{Tx} est la puissance de transmission,

t_{Tx} est la durée d'une transmission d'un paquet (notée t_{tx} dans le modèle proposé par Tirronen),

m_{Rx} est une variable binaire indiquant une réception active,

P_{Rx} est la puissance de réception,

t_{Rx} est la durée de la réception d'un paquet.

La deuxième partie de l'équation (7) représente la consommation énergétique en mode RRC_Idle dans laquelle le module effectue périodiquement des mesures des cellules voisines et contrôle les messages de paging provenant du réseau. En cas de présence de paquet à recevoir ou à envoyer, le module doit passer de l'état RRC_Idle à l'état RRC_Connected.

$$E_{idle} = P_{Paging} * (t_{Paging} - t_{PagingOc}) + P_{PagingOc} * t_{PagingOc} + P_{connecting} * t_{connecting} \quad (9)$$

Avec : P_{Paging} est la puissance consommée en état RRC_Idle quand le module est en mode veille,

t_{Paging} est la durée du cycle de paging,

$P_{PagingOc}$ est la puissance consommée durant le paging Occasion,

$t_{PagingOc}$ est la durée du paging Occasion,

$P_{Connecting}$ est la puissance consommée pour passer de l'état RRC_Idle à l'état, RRC_Connected,

$t_{Connecting}$ est la durée nécessaire pour établir la connexion avec l'eNB,

Enfin la troisième partie de l'équation (7) est l'énergie consommée en mode DRX à l'état RRC_Connected. En effet, le module se met en mode DRX et se réveille périodiquement pour scruter le canal PDCCH. En se basant sur le modèle proposé par Lauridsen et al. dans [56], l'énergie consommée est la somme des énergie consommée en mode veille et quand le module est réveillé. La Figure 3.6 illustre les états du module M2M en mode DRX. La phase de réveil,

de synchronisation et de basse consommation dépendent de la période t_{LP}, période du cycle DRX. La durée de veille est alors calculée par l'équation (10).

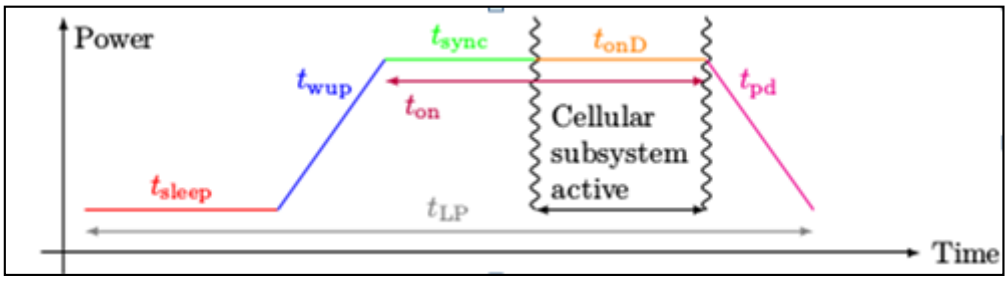


Figure 3.6. Les états du module en DRX

$$t_{Sleep}(t_{LP},t_{onD}) = t_{LP} - (t_{wup}(t_{LP}) + t_{Sync}(t_{LP}) + t_{pd}(t_{LP}) + t_{onD}) \quad (10)$$

Avec : t_{sleep} : temps de veille,

t_{LP} : période du long DRX,

t_{onD} : DRX *OnDuration*,

t_{wup} : temps nécessaire pour passer du mode DRX au mode connecté,

t_{sync} : temps de synchronisation après le réveil,

t_{pd} : temps nécessaire pour passer du mode connecté au mode DRX.

D'où

$$E_{DRX} = P_{Sleep} * t_{Sleep} + E_{R/F+Sync}(t_{LP}) \quad (11)$$

Avec : P_{sleep} est la puissance consommée lorsque le module est en veille,

$E_{R/F+sync}$: énergie consommée durant les phases de réveil, de synchronisation et de l'extinction du module.

Par conséquent l'équation (7) devient :

$$\begin{aligned} E_{totale} = {} & P_{on} * t_{on} + m_{Tx} * P_{TX} * t_{Tx} + m_{Rx} * P_{Rx} * t_{Rx} + P_{Paging} \\ & * (t_{Paging} - t_{PagingOc}) + P_{PagingOc} * t_{PagingOc} \\ & + P_{connecting} * t_{connecting} + P_{Sleep} * t_{Sleep} \\ & + E_{R/F+Sync}(t_{LP}) \end{aligned} \quad (12)$$

3.3 Techniques de réduction de la consommation énergétique

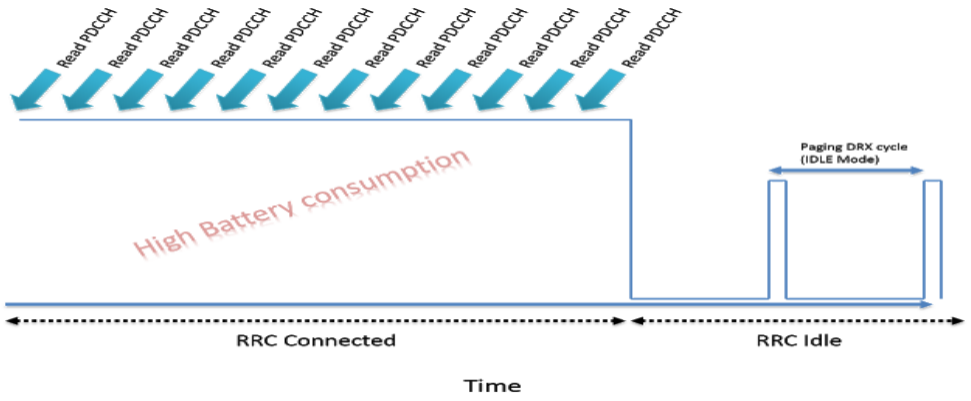
Dans le but de réduire la consommation énergétique dans les modules M2M et par conséquent d'augmenter leur durée de vie puisque la majorité de ces modules sont alimentés par des batteries, plusieurs chercheurs se sont penchés sur ce problème. Dans ce sous-chapitre, je présenterai quelques solutions pour pallier ce problème de consommation d'énergie pour les modules M2M dans les réseaux cellulaires.

Parmi les techniques proposées, je peux citer : la technique DRX (*Discontinuous Reception*) en mode connecté et en mode veille, l'ordonnancement en voie montante et le contrôle de la surcharge.

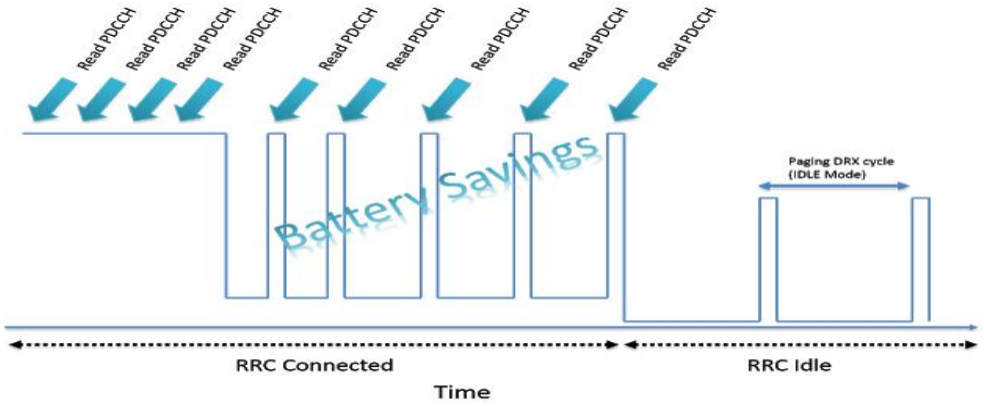
3.3.1 Solutions pour l'optimisation du cycle DRX

Afin de réduire la consommation énergétique dans les modules M2M, LTE/LTE-A propose une technique appelée réception discontinue (DRX : *Discontinuous Reception*) [62], [63]. Cette technique de la sous-couche MAC, peut être utilisée à la fois en état connecté (RRC_*Connected*) et en état de veille (RRC_*Idle*), elle consiste à éteindre le module RF de l'UE et à le rallumer périodiquement pour vérifier le canal PDCCH.

Sans l'utilisation de la technique DRX, un module M2M doit surveiller à chaque sous trame (1ms) le canal PDCCH, ce qui entraîne un accroissement de la consommation énergétique (Figure 3.7).



(a) Lecture du PDCCH en mode connecté et en mode veille



(b) Lecture du PDCCH en DRX en mode connecté et en mode veille

Figure 3.7. Impact de la technique DRX sur la consommation énergétique [64]

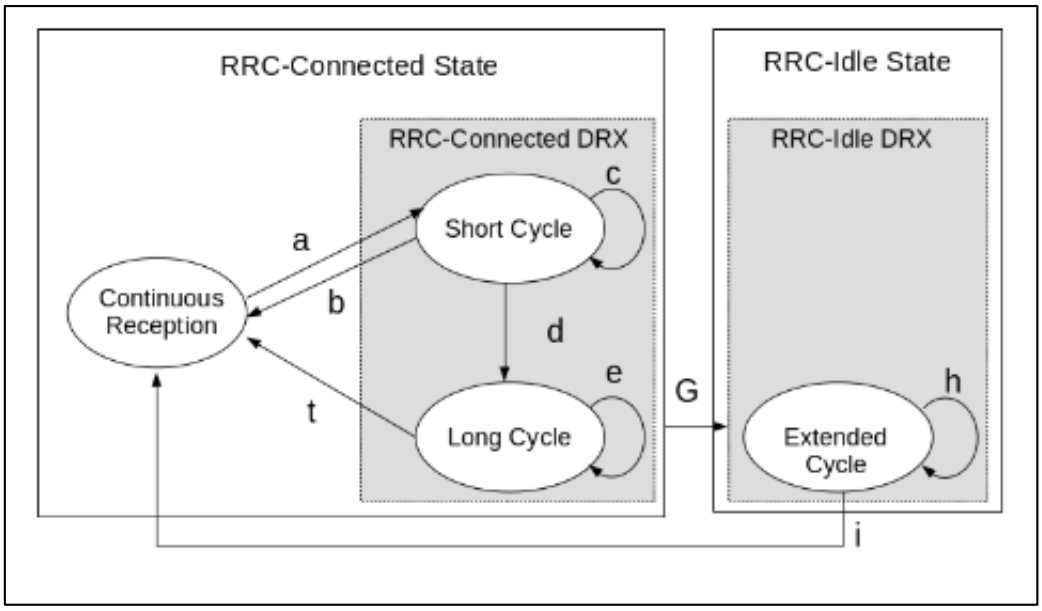


Figure 3.8. Diagramme d'état de la technique DRX

A chaque période On-Duration (Figure 3.4), le module se réveille pour écouter le canal PDCCH. Deux cas peuvent se présenter (Figure 3.8) :

- le module M2M doit envoyer ou recevoir des données, dans ce cas il doit abandonner le mode DRX et passer en mode actif (flux b et t dans la Figure 3.8). Dès que le module M2M finit de recevoir ou d'envoyer ses données, l'eNB active le temporisateur d'inactivité (*DRX Inactivity Timer*). Dès l'expiration de la durée d'inactivité DRX, l'UE passe en mode DRX (flux a dans la Figure 3.8).
- Il n'y a pas de données à envoyer ou à recevoir, le module se met en mode veille (short DRX Cycle). Si pendant n cycles short DRX, le module reste inactif, il passe alors en cycle long DRX dont la durée du cycle DRX est plus longue (flux d dans la Figure 3.8).

Si le module M2M reste inactif pendant une longue période (flux G dans la Figure 3.8 : *RRC Inactivity Timer*), il passe à l'état « RRC_Idle » dont le cycle DRX est un cycle plus long que celui en mode connecté et il n'y a pas de lien radio entre l'eNB et le module M2M. Le module RF sera alors éteint pendant une longue période et ne sera activé que durant des périodes appelées « Paging Occasion ». Si l'eNB souhaite communiquer avec le module M2M, il envoie alors un message de paging qui est transporté par le canal PDCCH. En se réveillant durant le Paging Occasion, le module M2M doit vérifier si les messages de paging envoyés par l'eNB le concernent. Le cycle DRX en mode Idle est appelé alors cycle de paging DRX (*paging DRX Cycle*).

Plusieurs chercheurs ont proposé des solutions de réduction de la consommation pour la technologie M2M qui reposent sur la technique DRX en mode connecté et en mode veille.

Robert et al. [9] ont fait varier les paramètres de la technique DRX en mode veille en fonction du PPI (*Power Préférence Indication*), définit lors de la release 11 [62] pour spécifier si le module est sensible au délai ou exige la réduction de la consommation énergétique.

En [65], Jha et al. proposent d'éteindre le module M2M entre deux envois consécutifs vu que pour un module M2M : le trafic est généralement montant et n'est pas fréquent (varie de quelques secondes à des heures).

Jha et al. en [66], utilisent la technique DRX en mode Idle et montrent que grâce à l'activité peu fréquente d'un module M2M, ce dernier peut réduire sa consommation énergétique en augmentant le cycle DRX au-delà de 2.56s (valeur maximale en 3GPP) et en diminuant la durée d'inactivité (*RRC inactivity Timer*).

Tirronen et al. [53], [61] montrent qu'en augmentant le cycle DRX en mode connecté, au-delà de 2.56s, la consommation énergétique est réduite considérablement dans les modules M2M. Ils exploitent le mode DRX en mode connecté afin d'éviter les messages de signalisations ajoutés lors d'établissement de la connexion si le module était en mode veille.

Tang et al. [67] proposent le concept de la « self adaptive DRX », qui est basé sur la sélection adaptative du cycle DRX normal et prolongé ; le cycle DRX normal consiste à détecter les demandes de retransmission contrôlées par l'eNB. Par contre, le cycle DRX prolongé consiste à vérifier les données de signalisation gérées par le MME. En utilisant cette technique, l'UE doit se réveiller deux fois pour écouter le canal PDCCH. Cette technique consiste à augmenter progressivement le paging cycle jusqu'à atteindre la valeur maximale s'il n'y a pas de données à recevoir ou à envoyer.

Une optimisation des paramètres DRX en fonction de la QoS est proposée dans [68], dans lequel les valeurs du cycle DRX court, cycle DRX long, inactivity timer, On-Duration sont calculées par l'eNB et transmises pour chaque UE. Tous les cycles DRX sont des multiples des autres. Le temps d'inactivité est réduit et, si l'UE reste inactif pour une longue période, il passe en mode veille prolongée. En adoptant cette solution, la consommation d'énergie d'un module M2M est réduite tout en garantissant la QoS requise.

Ramachandran et al. [69] proposent d'ajouter des informations dans les messages de signalisation comme l'état du module et la durée de session. En se basant sur ces informations, l'UE restera soit en mode veille, soit en mode connecté ou en mode basse consommation énergétique pour une période de temps précisée par le réseau.

Dans ces travaux de thèse, je proposerai des approches de réduction de la consommation énergétique qui se basent sur la technique de réception discontinue en mode veille. Ces approches permettent de maximiser le gain d'énergie obtenu par Jha et al. en [66], en augmentant le cycle de paging.

3.3.2 Ordonnancement en voie montante

L'allocation des ressources radio pour les objets connectés, appelé aussi ordonnancement en voie montante, constitue un des défis majeurs pour les applications M2M. En effet, le réseau M2M est caractérisé par le déploiement d'un grand nombre d'objets connectés qui nécessitent parfois de communiquer au même moment. Mais en raison d'une bande passante limitée (de 1,4MHz à 20 MHz), le nombre maximum de modules ordonnancés sur un TTI est borné.

Aussi, les ressources radio allouées à chaque module doivent être adjacentes dans le domaine fréquentiel, à cause de la modulation SC_FDMA.

Les normes LTE et LTE-A n'exigent pas l'utilisation d'un ordonnanceur bien défini, c'est pour cette raison que plusieurs types d'ordonnanceurs pour les modules M2M ont été proposés pour répondre à plusieurs exigences parmi lesquelles la réduction de la consommation énergétique.

Plusieurs contraintes doivent être prises en compte lors du choix d'un ordonnanceur comme la consommation énergétique, le délai toléré pour le transfert des paquets, la priorité de traitement des applications temps réel, la qualité de service exigée...

L'ordonnancement des paquets (*Packet Scheduling : PS*) implémenté au niveau de la couche MAC de l'eNB consiste à partager les ressources radio (RBs) entre les différents modules M2M.

En mode connecté, le tunnel par défaut entre l'UE et l'eNB est établi. Les données du plan usager sont alors transmises à travers le tunnel DRB (Data Radio Bearer) (voir chapitre 2) et les données du plan de contrôle à travers les tunnels SRB (Signaling Radio Bearers). DRB assure la transmission ou la retransmission des données. Cependant, les SRB incluent plusieurs signaux contrôle, parmi lesquelles :

- *Scheduling Request* (SR) : permet de différencier les UEs actifs de ceux en mode veille. Si l'UE est connecté et qu'il a des données dans sa file d'attente, il envoie un SR pour demander à l'eNB des ressources radio afin d'envoyer ses données.
- *Buffer Status Reports* (BSR) : il informe l'eNB du nombre de paquets présents dans la file d'attente de l'UE.

- *Sounding Reference Signal* (SRS) : ce signal est envoyé par l'UE vers l'eNB pour l'informer de la capacité du canal de transmission. Il est toujours transmis dans le dernier symbole du SC-FDMA de durée 1ms.
- *Channel Quality Indicator* (CQI) : il indique la mesure de la qualité du canal entre l'eNB et l'UE.

L'ordonnancement des paquets (PS) est composé de deux parties (Figure 3.9) : l'ordonnancement temporel (*Time Domain Packet Scheduling :* TDPS) et l'ordonnancement fréquentiel (*Frequency Domain Packet Scheduling* : FDPS). Le TDPS n'alloue pas les ressources radio (RBs) mais identifie les UEs qui sont les plus prioritaires à transmettre, ce qui réduit la complexité pour la FDPS qui gère l'allocation des ressources radio.

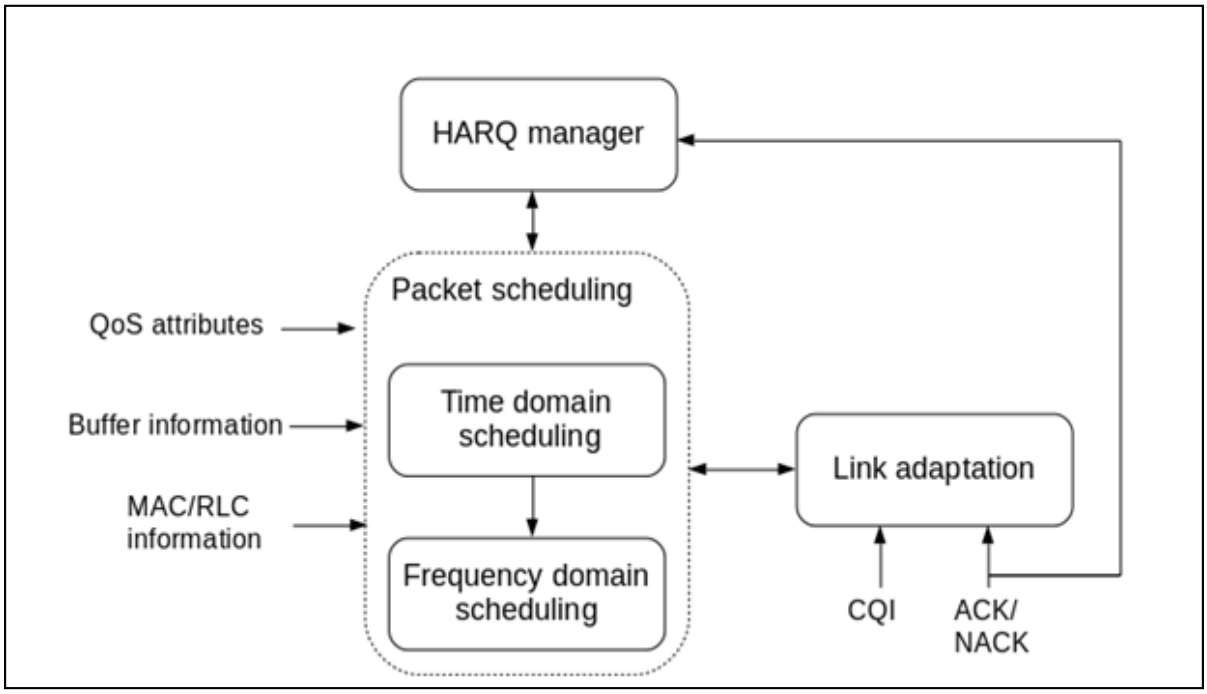


Figure 3.9. Ordonnancement en LTE [70]

Plusieurs travaux ont été réalisés afin d'étudier l'impact de l'ordonnancement en voie montante sur la consommation énergétique. Mehaseb et al. [70] classent les ordonnanceurs qui prennent en compte l'efficacité énergétique, en deux catégories :

- les ordonnanceurs qui réduisent le nombre de ressources radio (RBs) allouées à chaque module M2M,
- les ordonnanceurs qui augmentent le temps de transmission tout en diminuant le débit.

En [71] les auteurs proposent un ordonnanceur qui prend en compte la qualité du canal tout en garantissant le débit minimal requis. Cet ordonnanceur est constitué de deux parties : le

TDPS et le FDPS. En TDPS, les modules sont classés en fonction de la métrique présentée en (13).

$$M_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^{j-1} Ri,k}{GBR_i}, j \in [1,m] \quad (13)$$

Avec : $M_{i,j}$ est utilisée afin de déterminer la priorité du module i (parmi I modules) durant la sous trame j,

$R_{i,k}$ est le débit atteint par l'utilisateur i à la k^{ème} sous-trame,

GBR_i (*Guaranteed Bit Rate*) représente le débit requis par l'utilisateur i. Cette métrique est réinitialisée toutes les m trames.

En FDPS cet ordonnanceur consiste à classer, dans une première étape, les modules LTE en fonction de la métrique $M_{i,j}$ (13). Celui ayant la plus petite valeur de $M_{i,j}$ sera prioritaire. Par la suite, la deuxième étape consiste à déterminer les combinaisons de RBs qui permettent d'avoir les 10 meilleurs CQI et enfin allouer le nombre minimum de RBs du module LTE.

Les auteurs montrent que si le nombre de RBs alloués à chaque module est réduit de N à M alors la consommation énergétique est réduite selon l'équation (14).

$$\Delta P_{i,M,N} = P_{i,N} - P_{i,M} = 10 \times log(N/M) \quad (14)$$

En voie montante, la technologie LTE utilise la modulation SC-FDMA où une sous-porteuse ne porte plus un symbole de modulation, mais une combinaison linéaire des symboles de modulation du bloc transmis [72]. Cette technique a pour avantage d'avoir un rapport faible entre la puissance moyenne et la puissance maximale du signal appelé PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) et, qui par conséquent, engendre une réduction de la consommation énergétique [73], [74].

Jeong et al. [75] se sont basés sur ce fait et ont proposé un ordonnanceur qui utilise la métrique proposé par l'algorithme d'ordonnancement PF (*Proportional Fair*) [76]. L'algorithme PF consiste à maximiser la métrique suivante (équation (15)) :

$$M_i^c = r_i^c(t)/R_i(t) \quad (15)$$

avec :

- $r_i^c(t)$ est le débit instantané du UE_i au RB_c
- $R_i(t)$ est le débit moyen (calculé à l'instant t-1).

L'algorithme d'ordonnancement proposé par Jeong et al. [75] consiste à allouer le RB_c aux UE_i ayant la meilleure métrique M_i^c à l'instant t. Cet algorithme prend en compte non seulement les RBs adjacents, mais également chacun des deux RBs situés à gauche et à droite du RB avec la plus grande métrique. Par exemple, si un UE_i a la plus grande valeur de la métrique à RB_c et RB_{c+2} alors que ce n'est pas le cas au RB_{c+1}, alors les ressources radio RB_c, RB_{c+1} et RB_{c+2} seront allouées au UE_i afin de satisfaire la contrainte de contiguïté exigée par SC-FDMA. Cet algorithme a pour avantage d'avoir simultanément un débit élevé et une grande équité due à l'utilisation de la métrique PF. En plus, grâce à cette procédure, l'UE n'utilise pas des RBs ayant une mauvaise qualité de canal ce qui engendre une réduction du PAPR et par conséquent une augmentation de la durée de vie de la batterie.

Aijaz et al. [77] proposent deux algorithmes d'ordonnancement pour les modules M2M. Le premier consiste à allouer les ressources radio au module M2M ayant la meilleure qualité de canal ce qui permet d'avoir un meilleur PAPR. Cet algorithme permet de diminuer la consommation énergétique tout en tenant en compte les exigences de débit des données mais en contrepartie il ne garantit pas le respect des exigences en termes de délai. Afin de satisfaire efficacement aux exigences de délai des modules M2M, une procédure de planification des RBs est requise. Cependant, une telle planification n'est pas possible lorsque les ressources radio sont allouées avec l'objectif principal la minimisation de la puissance. C'est, pour cette raison, que le principe du deuxième algorithme, proposé dans [77], consiste à allouer un seul RB au module M2M ayant le délai minimal.

En [78] les auteurs ont proposés une combinaison entre l'ordonnanceur Round Robin (RR) et l'ordonnanceur First Maximum Expansion (FME) [10]. Selon le type du flux de trafic, les ordonnanceurs RR ou FME sont appliqués. L'ordonnanceur RR est utilisé pour les applications M2M temps réel, tandis que FME est utilisé pour les applications non temps réel. Ce mécanisme permet de maximiser le débit de données et d'assurer une équité entre les modules M2M avec une priorité plus élevée pour les applications temps réel. Cependant, il ne prend pas en compte des contraintes de la consommation énergétique.

Elhamy et al., en [79], ont proposé un algorithme d'ordonnancement en voie montante pour les modules M2M dont l'objectif est d'assurer un équilibre entre les exigences de débit de données et la contrainte de délai. Cet ordonnanceur prend en compte à la fois l'état du canal de transmission et les contraintes de délai.

Les auteurs en [80] ont proposé un algorithme d'ordonnancement prédictive pour les applications M2M évènementielles. Dans un groupe de modules M2M, si un module envoie un

signal SR à la station de base, alors il y a une forte probabilité que les modules à proximité envoient également un signal SR plus tard. Par conséquent, afin de réduire le délai, l'ordonnanceur proposé en [80] alloue des ressources radio à ces modules à proximité avant qu'ils envoient un signal SR. Cet ordonnanceur considère seulement les applications M2M évènementielles et ne tient pas en compte ni des applications M2M périodiques ni de la coexistence des modules H2H et M2M.
Dans ce manuscrit, je proposerai deux algorithmes d'ordonnancement, qui prennent compte la coexistence des modules M2M et H2H et qui ont pour objectif de réduire la consommation énergétique dans les modules M2M.

3.3.3 Solutions pour le contrôle de la surcharge

De nos jours, les modules M2M sont de plus en plus nombreux ce qui peut causer une saturation du réseau si plusieurs modules M2M en plus des modules H2H veulent communiquer en même temps. C'est pour cette raison, que plusieurs chercheurs se sont penchés sur cette problématique afin d'assurer la communication des modules M2M tout en respectant leurs exigences en termes de QoS et de consommation énergétique.

Afin de se synchroniser au réseau LTE-A, un module M2M doit envoyer un message RACH (*Random Access Channel*) à l'eNB. La Figure 3.10 représente la procédure RACH nécessaire pour établir la connexion entre l'eNB et le module M2M. Mais du fait que la RACH est basée sur un mécanisme d'accès aléatoire, la probabilité de collision augmente significativement ainsi que le délai d'attente. Par conséquent la consommation énergétique augmente [72].

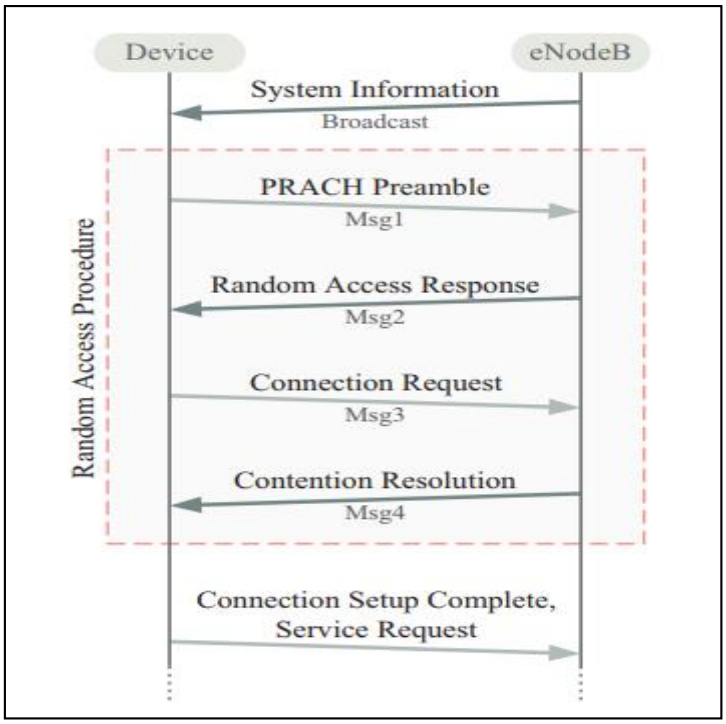


Figure 3.10. Procédure RACH [15]

Zheng et al. [73] ont proposé une solution pour la procédure RACH en présence des modules M2M et H2H. Ils ont classé les UEs en deux catégories : les modules M2M seuls et les modules H2H seuls. Si les deux catégories demandent accès en même temps, celle qui a le délai d'attente le plus élevé sera prioritaire et en cas de collision, l'autre catégorie sera prioritaire. Par exemple si une collision est causée par des modules M2M alors la priorité sera attribuée au module H2H et vice versa.

Batchu et al. [74] proposent une autre solution pour réduire la consommation énergétique. Ils proposent de supprimer la procédure d'enregistrement et d'établissement de la connexion avec le réseau LTE pour certains modules M2M. Un module M2M choisit un eNB parmi les eNBs disponibles et transmet ses données à un serveur M2M sans la nécessité d'établir explicitement la connexion avec le réseau LTE et d'être reconnu du côté du MME et de l'eNB. Après la transmission de ses données, le module M2M passe en mode basse consommation pour une période de temps bien définie. En se réveillant, le module refait la même opération.

Les auteurs en [76] proposent qu'un module M2M envoie toutes ses données stockées dans la file d'attente lors de l'établissement de la connexion pour la première fois. Si l'envoi

est effectué avec succès alors la procédure est terminée. Sinon, le module retransmet ses données pour une durée indéterminée ou il doit rétablir la connexion.

Andreev et al. [81] proposent d'envoyer les données du modules M2M à la station de base via le canal PUSCH au lieu de perdre du temps et de l'énergie à utiliser une signalisation PUCCH / PRACH supplémentaire.

De plus, la plupart des modules M2M transmettent des paquets de taille réduite [81], il est alors coûteux en terme d'énergie de procéder à l'authentification à chaque envoi de paquet dont la taille des paquets de données est égale ou même inférieure à celle des paquets de signalisation. Plusieurs chercheurs proposent de former des groupes de modules M2M qui communiquent avec l'eNB à travers un coordinateur appelé aussi « *cluster head* ». Cette technique permet de réduire le nombre de demandes d'accès direct à la station de base et rend le protocole évolutif.

En revanche, cette stratégie ne permet pas toujours d'économiser de l'énergie, en raison de la distance variable entre le module M2M et l'eNB. C'est pour cette raison, que les auteurs en [82] proposent un regroupement partiel; seulement les modules M2M qui sont loin de la station de base seront regroupés. L'énergie consommée est calculée pour chaque modules M2M ; les modules ayant une consommation énergétique supérieure à un seuil T seront regroupés. Dans chaque groupe de modules M2M, le module ayant la puissance de transmission minimale sera le « *cluster head* ». Chaque membre du groupe communique avec ce dernier à des instants bien déterminés afin d'éviter la collision et réduire au maximum la perte de d'énergie.

3.4 Simulateurs du réseau LTE

Il est nécessaire, avant d'implémenter des réseaux de communication, de faire des simulations afin d'estimer les gains d'énergie obtenus. Pour simuler un réseau LTE, il existe des simulateurs commerciaux et d'autres libres (open source). Parmi les simulateurs commerciaux payant, je cite Matlab, OPNET... Ce dernier [83] est formé de plusieurs packages qui peuvent être vendus séparément. OPNET [83], dont l'architecture est représentée dans la Figure 3.11, a pour avantage d'être développé par des experts. Mais, à cause de son prix élevé, peu de développeurs travaillent pour ajouter de nouvelles fonctionnalités, contrairement aux simulateurs open source.

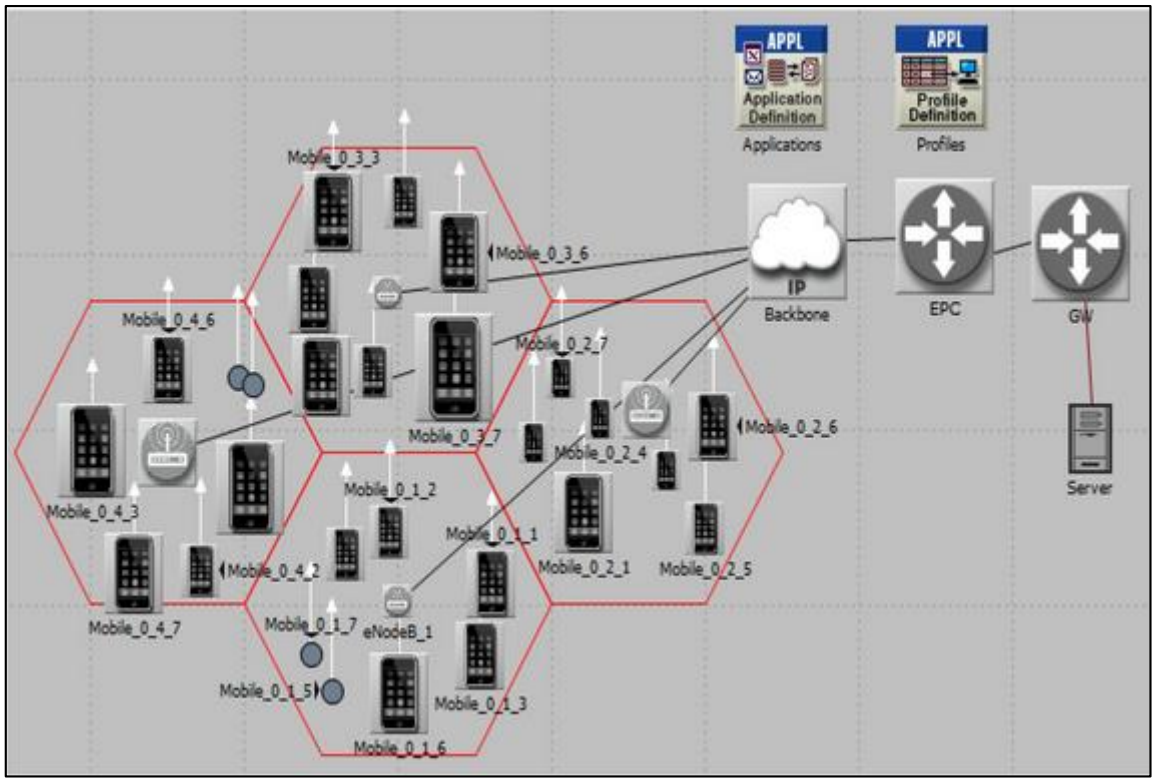


Figure 3.11. Architecture du simulateur OPNET

Plusieurs simulateurs libres ont été développés pour le réseau LTE, parmi lesquels je cite : NS-3 [84], LTE-Sim [85], LTE-Simulator [86].

La Figure 3.12 représente l'architecture du simulateur NS-3. Ce dernier est un simulateur libre développé en C++ [84]. Il a été conçu pour remplacer le simulateur NS2. LENA (*LTE-EPC Network SimulAtor*) représente le module LTE en NS-3. Toutes les couches réseaux entre l'eNB et l'UE sont représentées en LENA (RRC, PDCP, RLC, MAC et PHY). Par contre, seulement les fonctions en mode connecté sont représentés en NS-3, ni la technique DRX ni le mode veille ne sont implémentés. De plus, seulement l'ordonnanceur Round Robin (RR), que je détaillerai par la suite, est implémenté en voie montante. A cause de son architecture très complexe, il est difficile de modifier le code source du simulateur NS-3 pour ajouter de nouvelles fonctionnalités.

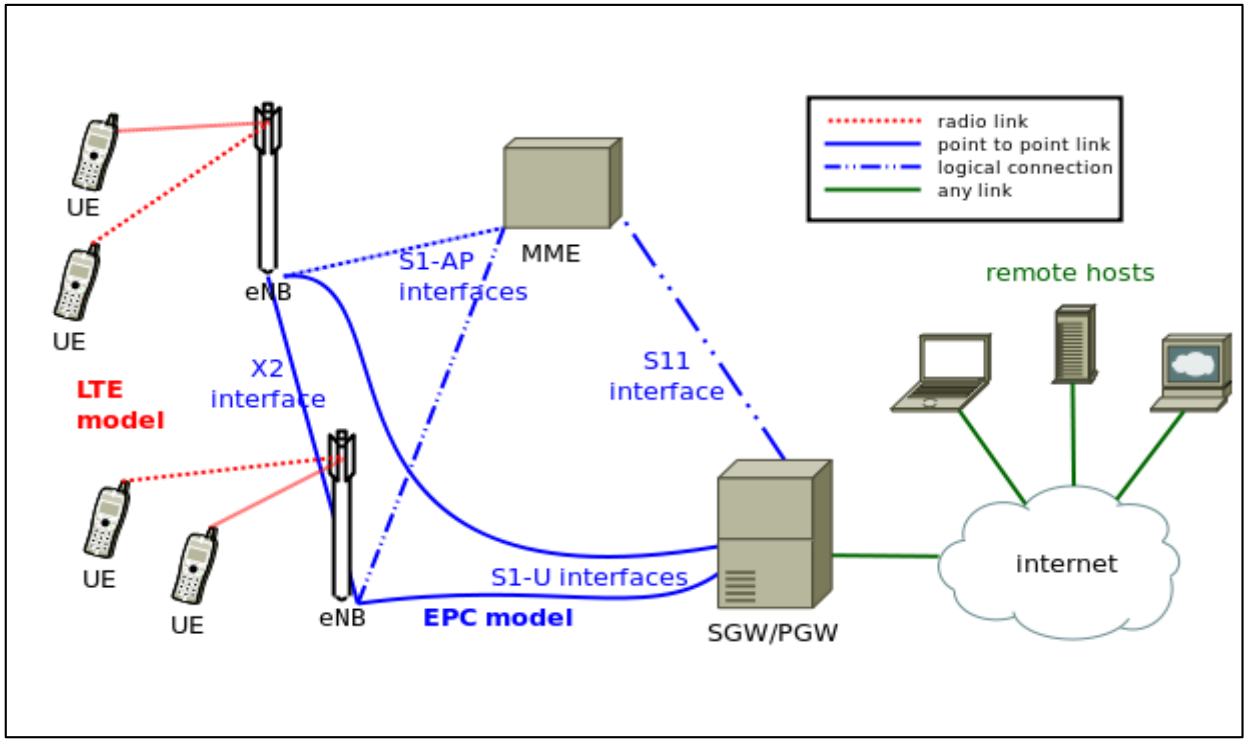


Figure 3.12. Architecture du simulateur NS-3

LTE-Simulator [86] est un simulateur open source développé en java. Bien qu'il n'implémente pas toutes les couches protocolaires du réseau LTE comme le fait NS-3, il permet de simuler la technique DRX en mode connecté et assure l'échange de paquets entre l'eNB et l'UE. Grâce à son code source allégé, il est facile de le modifier et d'implémenter la technique DRX en mode veille. C'est pour cette raison que j'ai utilisé ce simulateur pour valider ma première approche de réduction de la consommation énergétique.

Un autre simulateur libre qui permet de simuler le réseau LTE est LTE-Sim [85]. Ce dernier est développé en C++. Il implémente l'UE avec ses différentes couches protocolaires, l'eNB et aussi le MME/GW sous le même nœud. Il permet de simuler les fonctionnalités du réseau en mode connecté tel que l'ordonnancement. L'architecture de ce simulateur est beaucoup plus simple que le simulateur NS-3 ce qui rend la modification du code source plus facile. Il sera en effet plus aisé d'implémenter de nouvelles classes C++ assurant de nouvelles fonctionnalités pour le réseau LTE. LTE-Sim a pour avantage de simuler des stratégies d'allocation des ressources radio dans le domaine temps-fréquence, ce qui permet d'allouer à un utilisateur une ressource radio (RB) qui correspond à la petite ressource radio qui peut être alloué à un module pour la transmission.

C'est pour cette raison que j'ai choisi d'utiliser ce simulateur pour valider ma deuxième approche, qui consiste à proposer deux algorithmes d'ordonnancement en voie montante dans le but de réduire la consommation énergétique dans les modules M2M.

Le simulateur LTE-Sim est formé par quatre composants principaux :

- le simulator : le simulateur LTE-Sim propose une simulation événementielle dont les événements sont gérés par la classe Simulator,
- le NetworkManager : La mobilité des utilisateurs est gérée par la classe NetworkManager qui après chaque TTI, met à jour la position des UEs selon le modèle de mobilité adopté.
- le FlowsManager : cette classe a pour rôle de gérer les applications. LTE-Sim implémente quatre types de générateurs de trafic :
  - ✓ le générateur traced-based : qui envoi des paquets vidéo,
  - ✓ le générateur VoIP : génére les flus G.729 pour la voix,
  - ✓ le générateur CBR (Constant Bit Rate) génère des paquets avec un débit source constant,
  - ✓ le générateur Infinite Buffer modélise une source qui a toujours des données à envoyer.
- le FrameManager : la structure de la trame LTE est garantie par la classe FrameManager. Cette classe a pour rôle de contrôler l'ordonnancement des trames et des sous-trames (c'est-à-dire les TTIs) et d'assurer la synchronisation entre tous les eNBs.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, j'ai commencé par identifier les composants d'un module M2M utilisant les technologies LTE et LTE-A et d'identifier les principales sources de consommation d'énergie.

Par la suite, j'ai cité quelques modèles énergétiques proposés dans la littérature.

Certaines techniques de réduction de la consommation énergétique proposées dans la littérature pour les modules M2M ont été détaillées. Enfin, une présentation de certains simulateurs de réseau LTE a été présentée et une explication du choix des simulateurs que j'ai utilisés dans les travaux de cette thèse a été faite.

Dans les chapitres suivants, je présenterai mes deux approches pour pallier le problème de consommation dans les modules M2M ; la première est appelée coalesced DRX en mode veille et elle est basée sur la technique DRX en mode veille. Cette technique consiste à ajuster la période de veille en fonction du délai maximal de transmission ainsi que de la taille de la mémoire tampon où sont stockés les paquets en attendant d'être transmis vers l'eNB.

Ma deuxième approche consiste à étudier l'impact de l'ordonnancement sur la consommation énergétique. Sur ce principe, j'ai proposé deux algorithmes d'ordonnancement en voie montante qui permettent de réduire la consommation énergétique tout en respectant certaines contraintes.

Chapitre 4. Réduction de la consommation énergétique par la réception discontinue en mode veille

4.1 Introduction

Réduire la consommation énergétique est l'un des défis majeurs de la technologie M2M. Pour ce faire, je propose dans ce chapitre une première approche qui se base sur la technique DRX (*Discontinuous reception*) en mode veille. Cette technique consiste à passer le module M2M en mode basse consommation après une période d'inactivité en désactivant le module RF. Dans un premier temps, je commence par présenter le modèle d'énergie du module M2M sur lequel je me suis basé. Par la suite j'étudie, en simulation, l'impact de certains paramètres de la technique DRX sur la consommation énergétique. Enfin je détaille les solutions proposées en mode veille qui permettent de réduire la consommation énergétique tout en assurant une bonne qualité de service en termes de délai d'attente de transmission.

4.2 Modélisation d'un module M2M

A l'heure actuelle, il existe une grande variété de modules M2M tel que les capteurs de températures, les systèmes de sécurités des logements, les capteurs dédiés pour suivre l'état de santé d'un patient...

Plusieurs études du trafic d'un module M2M ont été faites [87], [88]. Selon ces études, le trafic d'un module M2M est généralement en voie montante. De plus dans la littérature, les applications M2M peuvent être classées en trois catégories [88] :

- des applications événementielles (*Event Driven* : ED) : ces applications sont pilotées par des événements. Lorsqu'un événement se produit, le module M2M se connecte au réseau et envoie son message à l'eNB (station de base). Ces applications sont généralement des applications temps réel [88]. Parmi les applications évènementielles temps réel, je cite une notification d'alerte d'alarme ou d'urgence de santé.
- des applications périodiques (*Periodic Update* : PU) : l'intervalle entre deux paquets consécutifs (IAT : *Inter Arrival Time*) de ces applications varie de quelques millisecondes à des heures. De plus, la taille des paquets est de quelques octets et constante. Ces applications autorisent généralement un délai de transmission qui varie de quelques secondes à quelques minutes [89]. Un exemple de ces applications est les compteurs intelligents de gaz ou d'électricité.

- des applications d'échange de charge utile (*Payload Exchange* :PE) : ce dernier type de trafic de données est émis après un événement, à savoir après l'un des types de trafic précédents (PU ou ED). Il comprend tous les cas où une plus grande quantité de données est échangée entre les dispositifs de détection et un serveur. Ce trafic est généralement en voie montante et peut être soit de taille constante comme dans la télémétrie, soit de taille variable comme une transmission d'image, ou même de transmission en continu de données déclenchée par une alarme. Ce trafic peut être temps réel ou non, en fonction du capteur et du type d'événement.

En se basant sur les études faites en [87], [90], les modules M2M génèrent des paquets de petites tailles à des intervalles de temps (IAT) relativement longs allant de quelques secondes à plusieurs heures. Cet intervalle entre deux paquets consécutifs (IAT) peut être soit déterministe ou distribué de manière exponentielle. Le tableau suivant résume les paramètres du trafic M2M sur lequel je me suis basé pour la simulation de cette approche.

Tableau 4.1 Paramètres du trafic M2M

Paramètres	Distribution	Moyenne
Intervalle entre deux paquets (IAT)	Exponentielle	10s à 24h
Intervalle entre deux paquets (IAT)	Fixe	10s à 24h
Taille des paquets	Fixe	1 octet à 10Koctets

Dans le cadre de ma première approche, j'ai pris le cas des applications qui autorisent le retard de transmission.

Pour calculer l'énergie consommée par le module M2M, j'ai utilisé l'équation (16) détaillée dans le chapitre précédent.

$$E_{totale} = P_{on} * t_{on} + m_{Tx} * P_{Tx} * t_{Tx} + m_{Rx} * P_{Rx} * t_{Rx} + P_{Paging} * (t_{Paging} - t_{PagingOc}) + P_{PagingOc} * t_{PagingOc} + P_{connecting} * t_{connecting} + P_{Sleep} * t_{Sleep} + E_{R/F+Sync}(t_{LP}) \quad (16)$$

Le Tableau 4.2 représente un exemple de modèle énergétique proposé par Huang et al. dans [91] et sur lequel je me suis basée pour évaluer la consommation énergétique. Les énergies consommées lors de la transmission et la réception sont variables en fonction de la taille des paquets de données respectivement en émission et en réception.

Tableau 4.2. Consommation énergétique en fonction de l'état et de l'activité d'un module M2M

Etat/Activité	Puissance (mw)	Durée (ms)
Connecté (transmission)	P_{Tx} = 1280,04 + (438,39 par Mbps)	t_{Tx}
Connecté (Réception)	P_{Rx} = 1280,04 + (51,97 par Mbps)	t_{Rx}
Connecté (pas de paquets en Tx/Rx)	P_{on} = 1060,0	t_{on} : RRC-Inactivity-Time
Mode veille	P_{Paging} = 11,4	(Cycle de paging - 43ms) par cycle de paging
En mode veille et écoute du réseau	$P_{PagingOc}$ = 594,3	$t_{PagingOc}$ = 43ms par cycle de paging
Passage du mode veille au mode connecté	$P_{Connecting}$ = 1210,7	$t_{Connecting}$ = 260,1

La durée maximale du cycle DRX est fixée à 2,56s dans la norme [47].

Pour valider mon approche, j'ai utilisé le simulateur LTE-Simulator (décrit dans le chapitre 3). Lors d'une première étape, j'ai fait varier la durée d'inactivité en mode veille et la durée du cycle de paging de la technique DRX afin de montrer leurs impacts sur la consommation énergétique. En effet, l'énergie totale consommée (équation (16)) est proportionnelle à la durée du cycle de paging et la durée d'inactivité (RRC-Inactivity-Time : t_{on}).

Les paramètres de simulation sont représentés dans le Tableau 4.3. Pour les applications à distribution exponentielle, le processus de poisson d'intensité λ a été utilisé pour générer les paquets. Le trafic M2M considéré pour les simulations, dont la taille du paquet est de 1Ko et la distribution est fixe ou exponentielle avec des valeurs moyennes de 30, 60 et 200s, est aligné avec les paramètres du trafic M2M représentés dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.3. Paramètres de simulation

Paramètres de simulation	**Valeurs**
Durée de la simulation	3600s (1h)
Nombre de cellule	1 de rayon 1km
paging Occasion	43ms
Applications périodiques	IAT : 30s, 60s, 200s
Applications évènementielles	loi de poisson avec λ= {30,60,200}s
Taille de paquet	1Ko

4.3 Variation des paramètres du cycle de paging

La Figure 3.4, représentée dans le chapitre précédent, représente le principe de la technique DRX en RRC_Idle. Cette technique dépend de trois paramètres :

- la durée d'inactivité (RRC-Inactivity-Timer) : le module M2M reste en mode connecté tant que la durée d'inactivité n'a pas encore expiré (t_{on}).
- le cycle de paging : c'est la durée d'inactivité du module : durant cette période le module éteint la majorité de ses composants afin de réduire la consommation énergétique (t_{Paging}).
- le paging Occasion : le module se réveille pour décoder le PDCCH ($t_{PaginOc}$).

Dans cette partie, je montrerai l'impact de la durée d'inactivité ainsi que du cycle de paging sur la consommation énergétique et par conséquent sur la durée de vie de la batterie.

4.3.1 Impact de la variation de la durée d'inactivité

La Figure 4.1 montre la variation de la consommation énergétique en fonction de la durée d'inactivité. On constate que plus la durée d'inactivité du module diminue plus la consommation énergétique diminue. Par exemple, pour une application, dont l'intervalle entre deux transmissions de paquets (IAT) est égal à 60s, la consommation énergétique diminue presque de 60% si le temps d'inactivité passe de 5s à 1s. En effet, en attendant l'expiration du temporisateur RRC-Inactivity-Timer, le module reste en mode connecté et par conséquent il consomme plus d'énergie qu'en RRC_Idle, ce qui entraine une décharge de la batterie. Pour améliorer la consommation énergétique, la durée du temporisateur RRC-Inactivity-Timer peut être réduite.

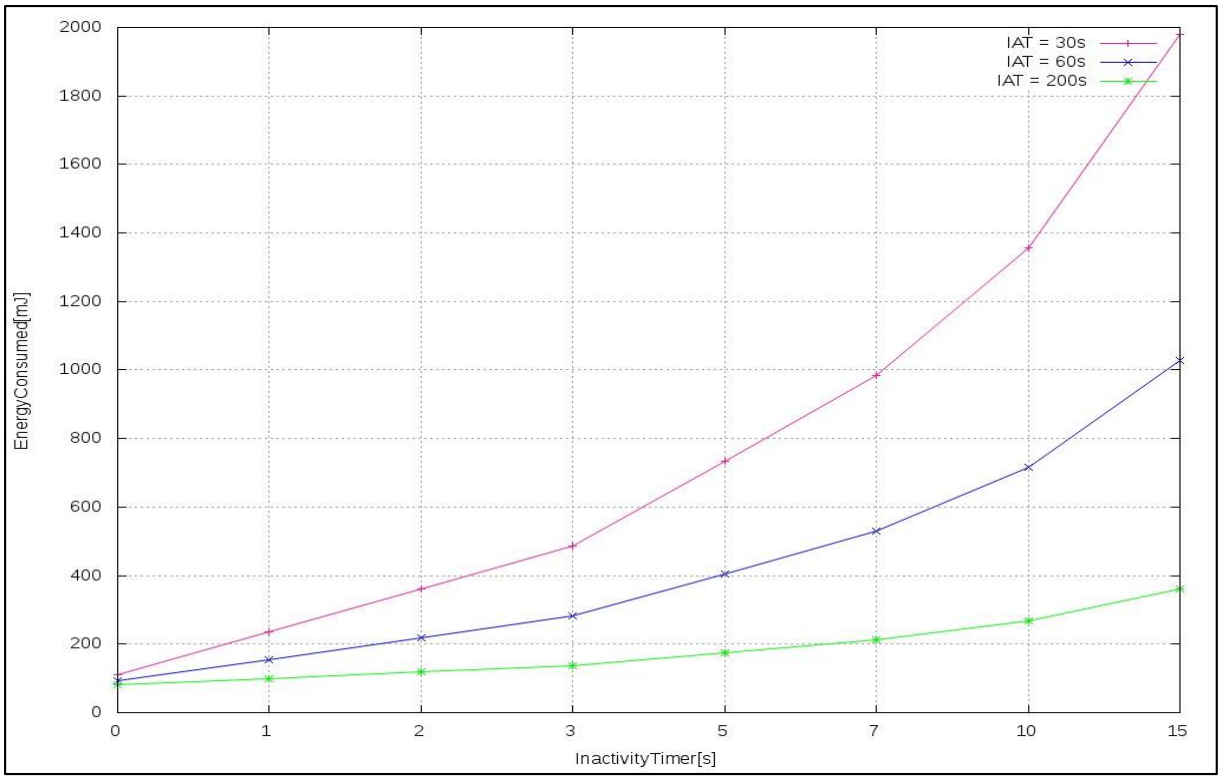


Figure 4.1. Variation de la consommation énergétique en fonction du temps d'inactivité

4.3.2 Impact de la variation du cycle de paging

La Figure 4.2 montre la variation de la consommation énergétique en fonction du cycle de paging. On constate que plus le cycle de paging est élevé (durée de veille) plus la consommation énergétique est réduite. Par exemple, pour une application dont l'IAT est de 200s, si on multiplie le cycle de paging maximal autorisé par la norme LTE (2.56s) par dix (25.6s) la consommation énergétique diminue de presque 30%.

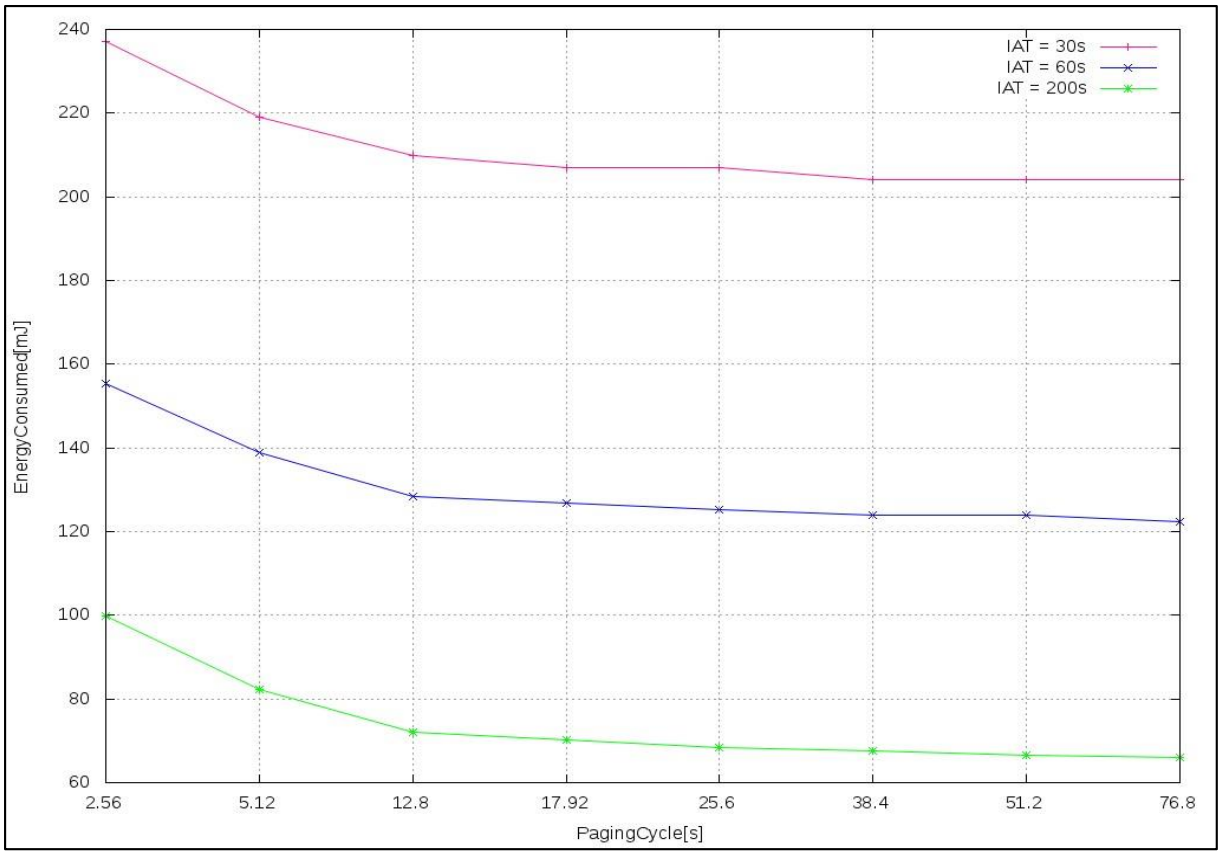


Figure 4.2. Variation de la consommation énergétique en fonction du cycle de paging

4.4 Coalesced DRX en mode veille

Après une durée d'inactivité appelée « RRC-Inactivity-Time », le module M2M reçoit une demande de libérer la connexion de la part de l'eNB. Cette procédure est appelée *RRC Connection Release* et est représentée sur la Figure 4.3. Suite à cette procédure, le module M2M n'a plus de connexion radio avec l'eNB et passe en mode veille. En mode veille, le module se réveille périodiquement durant le paging Occasion afin de vérifier le canal PDCCH et s'il y a des paquets à transmettre dans la file d'attente. En cas de présence de paquets à envoyer vers un centre de collecte de données, le module doit abandonner le mode veille et passer en mode RRC-Connected. Pour cela, l'UE (module M2M) doit demander à l'eNB (station de base) l'établissement de la connexion radio. Ce processus nécessite l'envoi et la réception de plusieurs messages de signalisation (Figure 4.4) et par conséquent engendre une augmentation de la consommation énergétique du module M2M.

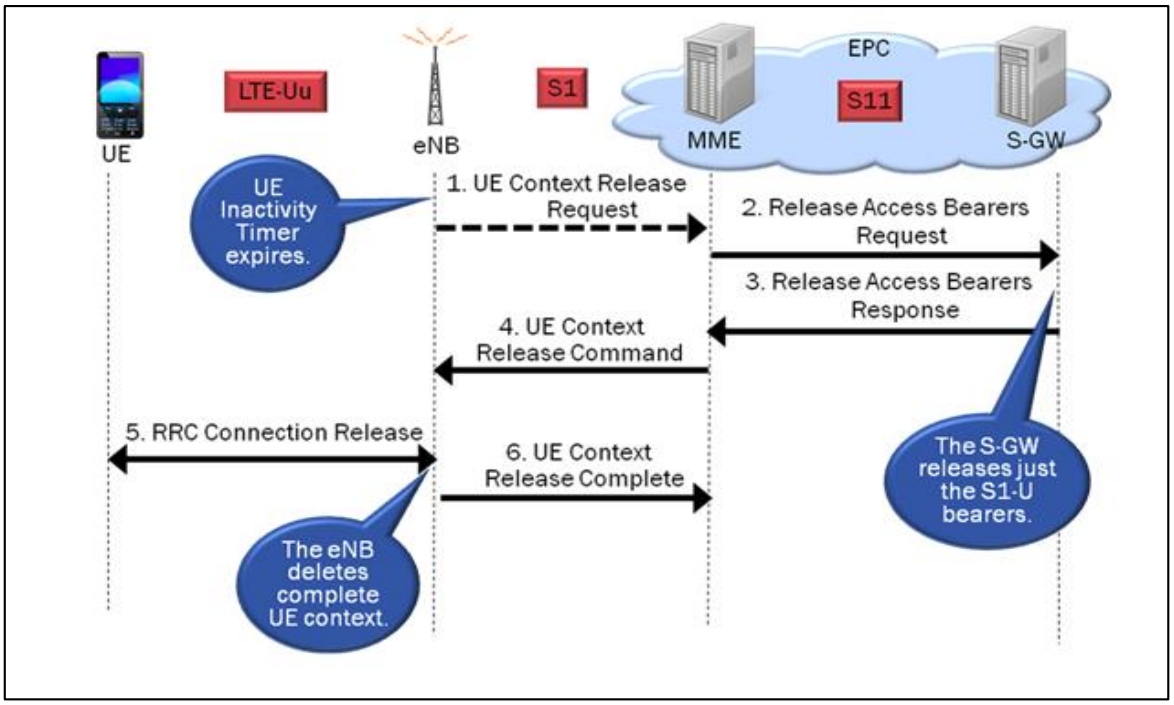


Figure 4.3. RRC Connection release [92]

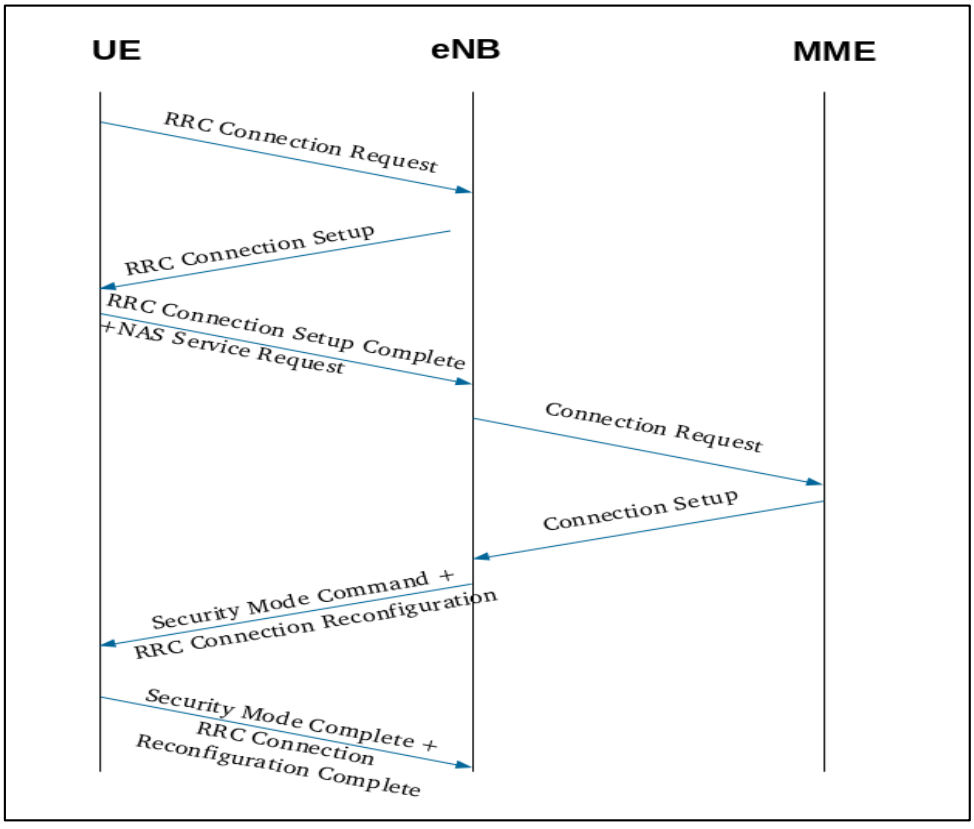


Figure 4.4. Etablissement de la connexion

Afin de réduire la consommation énergétique due aux messages de signalisation relatifs à la reconnexion et déconnexion à chaque fois que le module M2M doit transmettre un paquet, mon approche consiste à minimiser le passage en mode connecté et par conséquent augmenter le temps passé en mode veille. Ceci consiste à utiliser une mémoire tampon dans laquelle les paquets seront stockés. Le module abandonne le mode veille afin de transmettre ses données seulement si la mémoire tampon est saturée.

Par conséquent au lieu que le processus d'établissement de la connexion soit effectué pour chaque paquet, il sera établi une seule fois lors de l'envoi de la totalité des paquets présents dans la file d'attente.

Lorsqu'un module M2M doit envoyer un paquet en voie montante, deux cas existent :

- soit le module est en mode connecté. Dans ce cas les tunnels de communication (bearers) sont déjà établis, alors le module envoie son paquet et il remet à zéro le temporisateur RRC-Inactivity-Timer.
- soit le module est en mode veille (RRC-Idle). Dans ce cas les tunnels de communication avec les S-GW et P-GW n'existent pas, alors le module doit, dans un premier temps abandonner le mode veille et passer en mode connecté et établir par la suite les tunnels de communication pour pouvoir envoyer ses paquets.

Mon approche appelée, coalesced DRX en mode veille, consiste à stocker des paquets dans une mémoire tampon, et de n'abandonner ce mode seulement, si la mémoire tampon est saturée. Quand le module se réveille durant le paging Occasion et qu'il y a un paquet dans la file d'attente, il vérifie en premier lieu la mémoire tampon. Si elle est saturée, il abandonne alors le mode veille et passe en mode connecté, sinon il repasse en mode veille. Cette technique a pour avantage de minimiser le passage au mode connecté et par conséquent diminuer la consommation énergétique. La Figure 4.5 représente le principe de mon approche.

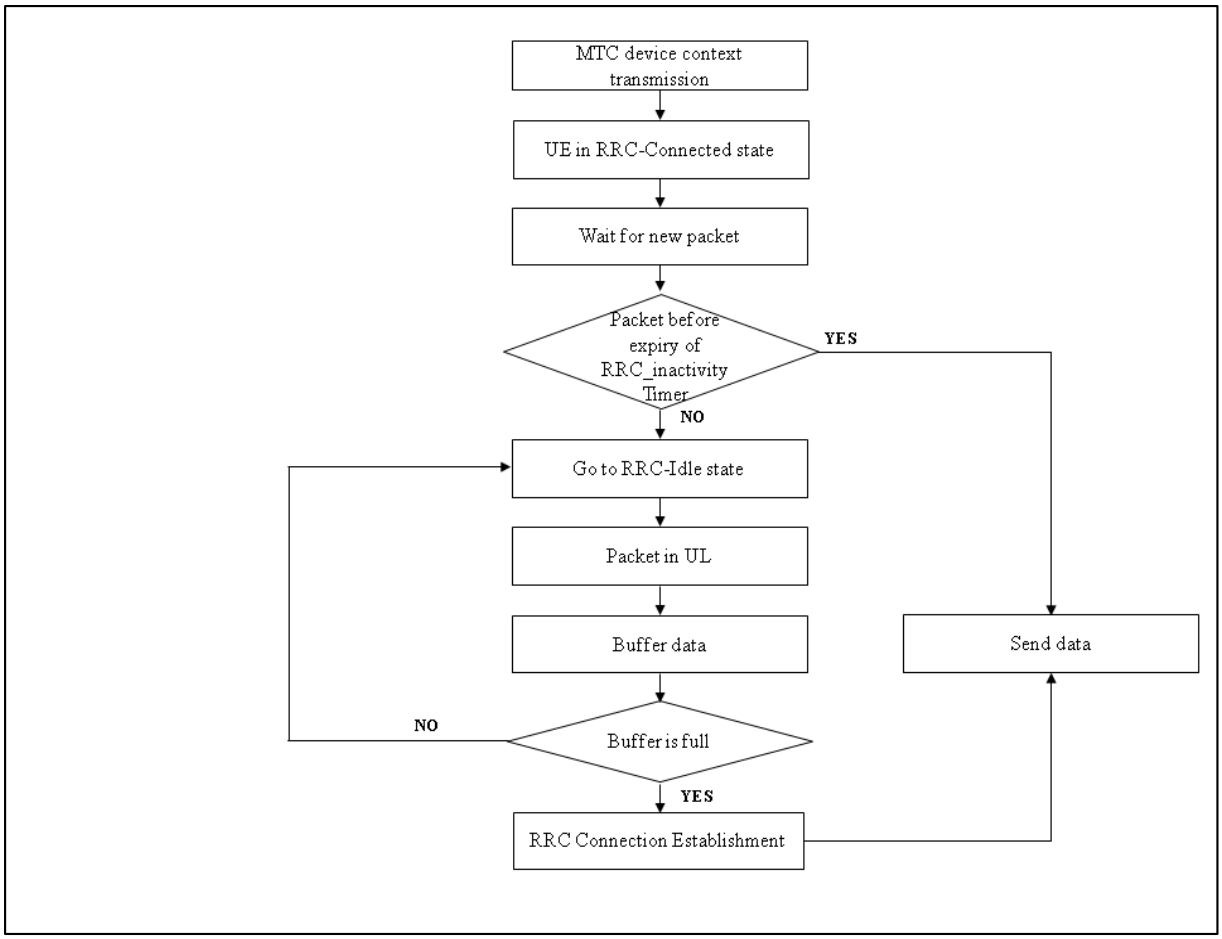


Figure 4.5. Coalesced DRX en mode veille

En réalité le nombre de paquets stockés est relatif à la taille de la mémoire tampon et de la taille des paquets. Afin de simplifier la simulation, j'ai utilisé la notion du nombre de paquets, au-delà d'un seuil Q_W, la mémoire est saturée.

La Figure 4.6 montre un exemple pour la technique Coalesced DRX en mode veille avec un seuil de paquets Q_W = 3 paquets. Au lieu d'abandonner le mode basse consommation à chaque fois, un paquet de données est présent dans la file d'attente, le module M2M stocke les paquets dans une mémoire tampon jusqu'à atteindre le seuil Q_W. Par conséquent, les transitions du mode RRC_Idle au mode connecté diminuent et le temps passé en mode RRC_Idle augmente considérablement.

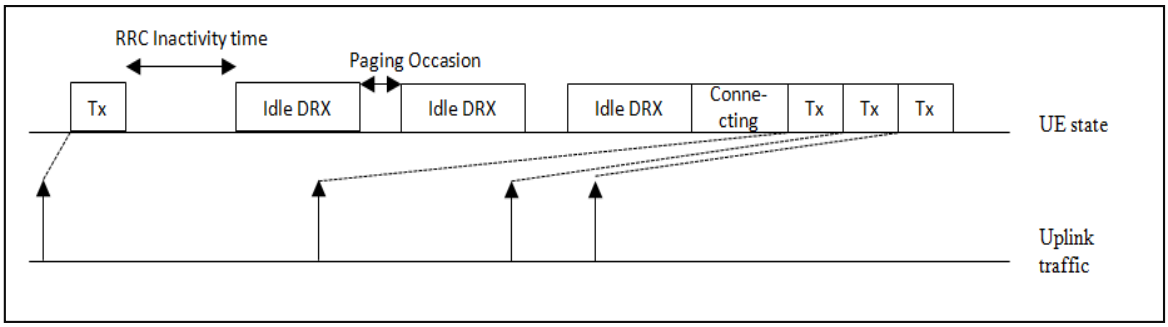
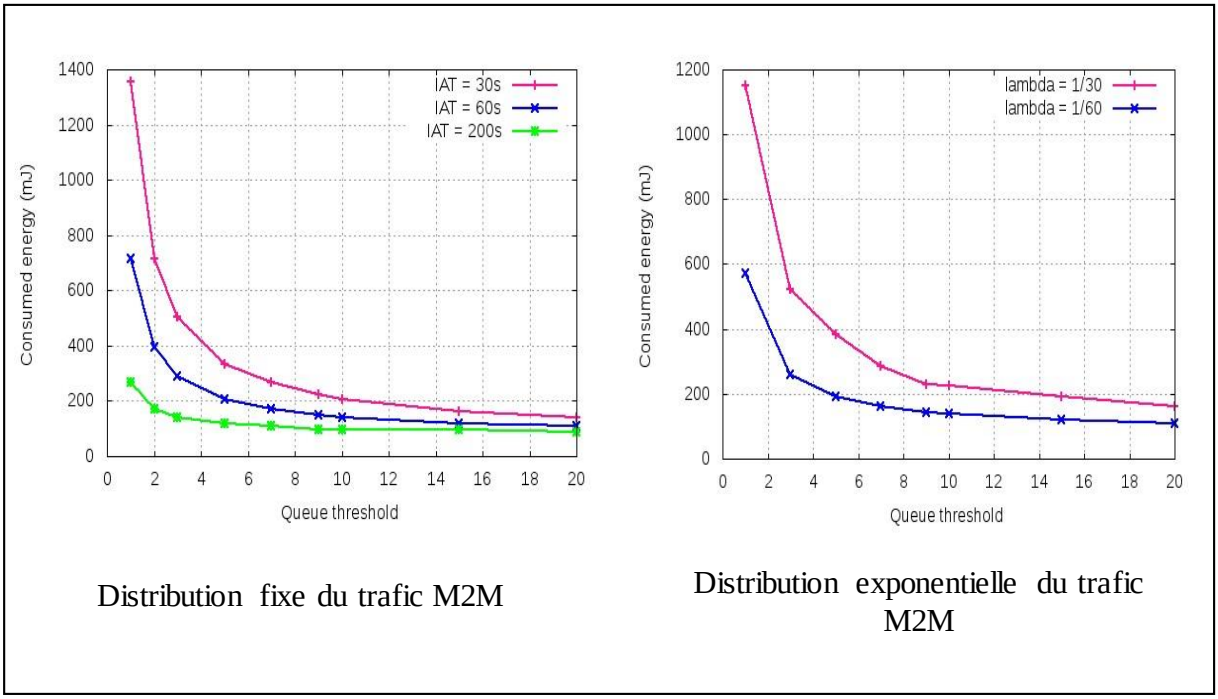


Figure 4.6. Coalesced DRX en mode veille avec Qw = 3 paquets

La Figure 4.7 représente la variation de la consommation énergétique en fonction du nombre de paquets stockés, pour deux types d'applications : applications à distribution fixe et applications à distribution exponentielle et dont le temps d'inactivité est fixé à 1 s. On constate que l'énergie consommée diminue si la taille de la mémoire tampon augmente. Pour une application dont l'intervalle entre deux transmissions de paquets (IAT) est égal à 60s, l'énergie consommée diminue de près de 80 % si la mémoire tampon permet de stocker dix paquets au lieu de les transmettre au fur et à mesure de leur création. Cette diminution de la consommation énergétique est aussi constatée pour les applications évènementielles à distribution exponentielle.

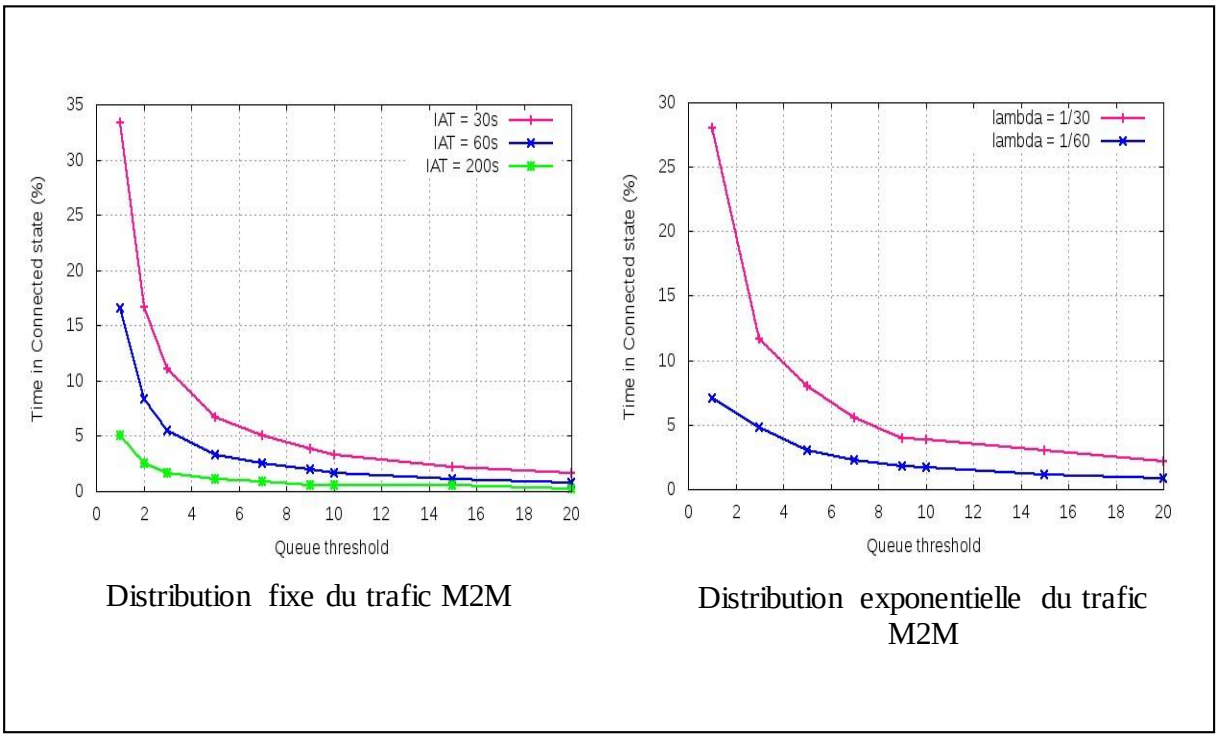


Distribution fixe du trafic M2M

Distribution exponentielle du trafic M2M

Figure 4.7. Variation de la consommation énergétique en fonction de la taille de la mémoire tampon

Cette diminution de la consommation énergétique est due à la diminution du nombre de passage en mode connecté et par conséquent la diminution du temps passé en mode connecté. En effet, après chaque établissement de la connexion et envoi des paquets, le module doit rester en mode connecté durant RRC-Inactivity-Timer, ce qui est coûteux en termes de consommation énergétique. La Figure 4.8 représente le temps passé en mode connecté en fonction du nombre de paquets stockés dans la mémoire tampon en attendant d'être transmis au centre de collecte de données. Par exemple, pour les applications dont l'IAT est égal à 60s, le module M2M passe 35% du temps en mode connecté s'il envoie chaque paquet à part. Par contre, si 10 paquets sont stockés dans la mémoire tampon avant d'être envoyés, ce pourcentage du temps est presque 1% du total du temps de la simulation. Pour les applications à distribution exponentielle, dont $\lambda = 1/30$, le temps passé en mode connecté est passé de 28% à 4% du total de la durée de simulation si la mémoire tampon permet de stocker 10 paquets au lieu d'un seul paquet.



Distribution fixe du trafic M2M

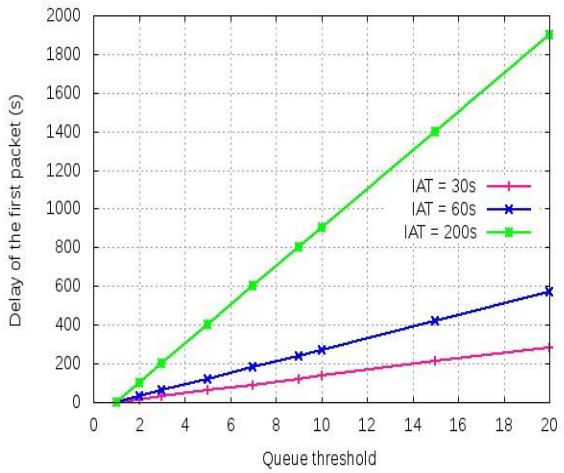
Distribution exponentielle du trafic M2M

Figure 4.8. Pourcentage du temps passé en mode connecté en fonction de la taille de la mémoire tampon

En contrepartie, la diminution de la consommation énergétique est accompagnée par une augmentation du délai de transmission des paquets (Figure 4.9). Pour une application dont l'IAT est égal à 200s, l'énergie consommée diminue de 20% si la mémoire tampon permet de stocker dix paquets par contre le délai moyen d'un paquet dans la file d'attente est de 900s.

Pour remédier à ce problème, une autre condition pour l'envoie des paquets a été ajouté. En plus de la taille de la mémoire tampon, l'UE (module M2M) doit établir la connexion avec l'eNB (station de base) pour envoyer ses données si au moins un des deux seuils suivants est atteint :

- la mémoire tampon est saturée,
- le premier paquet dans la file d'attente atteint le délai maximal autorisé par l'application.



Distribution fixe du trafic M2M

Distribution exponentielle du trafic M2M

Figure 4.9. Délai moyen en fonction de la taille de la mémoire tampon

4.5 Adaptive coalesced DRX en mode veille

La technique adaptive coalesced DRX en mode veille prend en compte deux paramètres :

- la taille de la mémoire tampon,
- et le délai maximal autorisé pour le premier paquet dans la file d'attente.

La Figure 4.10 représente le principe de la technique adaptive coalesced DRX en mode veille. Lorsqu'un paquet est dans la file d'attente, on vérifie tout d'abord si la mémoire tampon

est saturée. Si c'est le cas, le module doit procéder à l'établissement de la connexion avec la station de base afin d'envoyer par la suite les paquets présents dans sa file d'attente. Sinon, une autre condition est à vérifier, si le premier paquet stocké dans la mémoire tampon n'a pas atteint un seuil maximal. Si le seuil de délai est atteint alors le module passe en mode connecté, sinon il reste en mode veille.

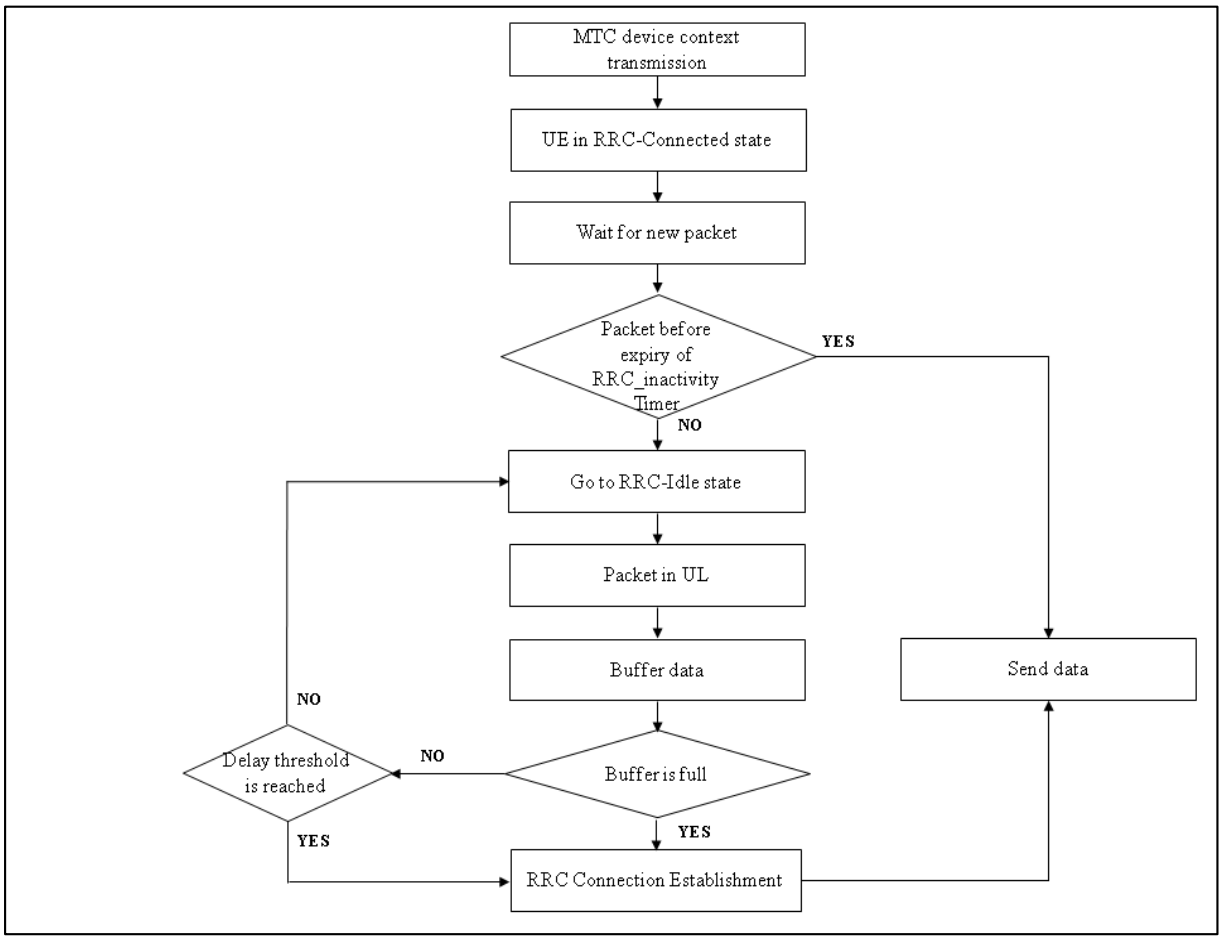
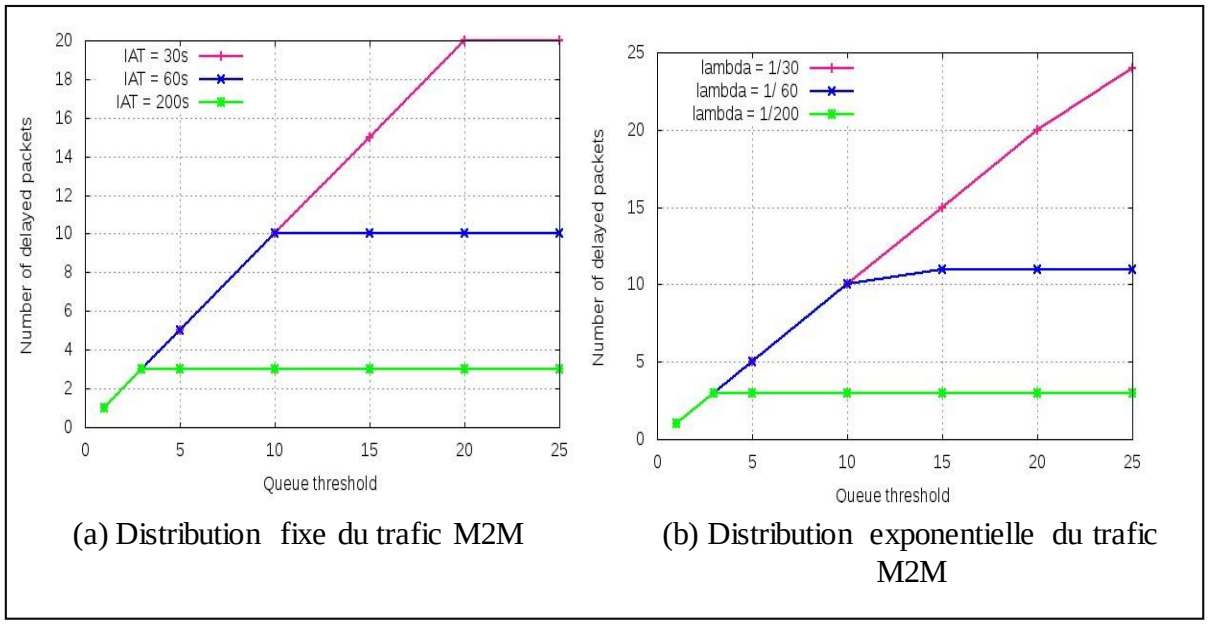


Figure 4.10. Adaptive coalesced DRX en mode veille

Pour montrer l'efficacité de cette approche, j'ai pris l'exemple dont le seuil de délai est égal à 600s, une valeur alignée avec les délais de transmission autorisés en M2M, et j'ai fait varier le seuil de paquets. On constate alors que le nombre de paquets stockés dans la file d'attente varie en fonction des deux seuils (Figure 4.11). A chaque fois que le module se réveille pour écouter le canal en mode veille, il vérifie que la mémoire tampon n'est pas saturée et que le premier paquet dans la file d'attente n'a pas encore atteint le délai maximal autorisé. Si c'est le cas, il reste en mode veille, sinon il abandonne le mode veille et passe en mode connecté afin

de transmettre ses paquets. La Figure 4.11 (a) montre que pour une application dont l'IAT= 200s et la mémoire tampon permet de stocker plus de 3 paquets, seulement 3 paquets peuvent être retardés à l'envoi afin de ne pas dépasser le délai maximal autorisé qui est fixé à 600s dans cet exemple de simulation.



(a) Distribution fixe du trafic M2M

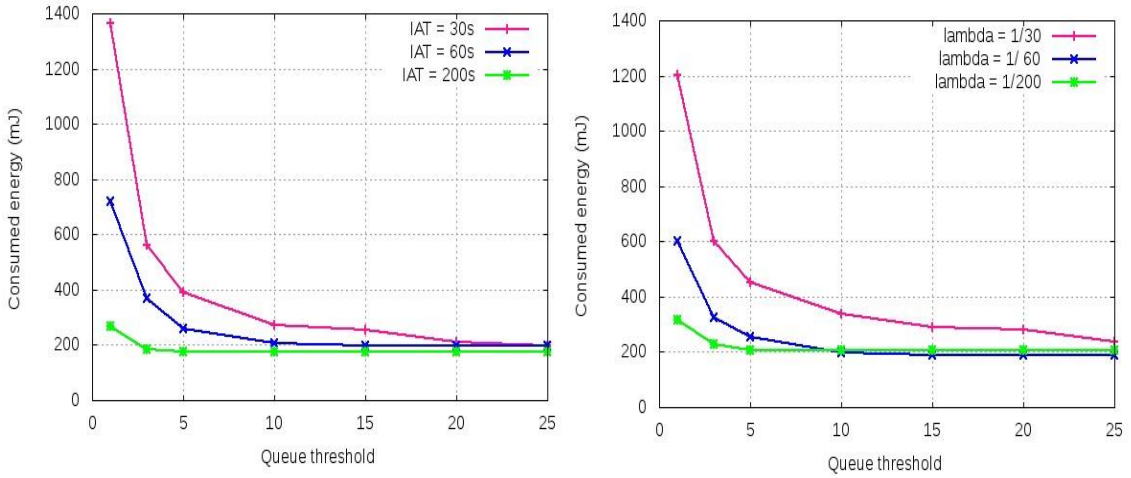
(b) Distribution exponentielle du trafic M2M

Figure 4.11. Variation du nombre de paquets stockés

Cette approche permet de réduire la consommation énergétique (Figure 4.12) tout en respectant la QoS exigée par le module en termes de délai maximal autorisé (Figure 4.13).

De la Figure 4.11 on constate, aussi, que pour un seuil de délai fixé pour chaque application M2M, un nombre maximal de paquets, appelé N_{max}, peut être stockés dans la mémoire tampon, 3 paquets maximum pour une application M2M dont l'IAT est égale à 200s. C'est pour cette raison, que l'énergie consommée, représenté dans la Figure 4.12, diminue considérablement tant que ce nombre N_{max} n'est pas atteint. Par contre, au-delà de N_{max}, l'énergie reste constante puisque même si la mémoire tampon a une capacité de stocker plus de paquets, seulement N_{max} paquets peuvent être retardés à l'envoi.

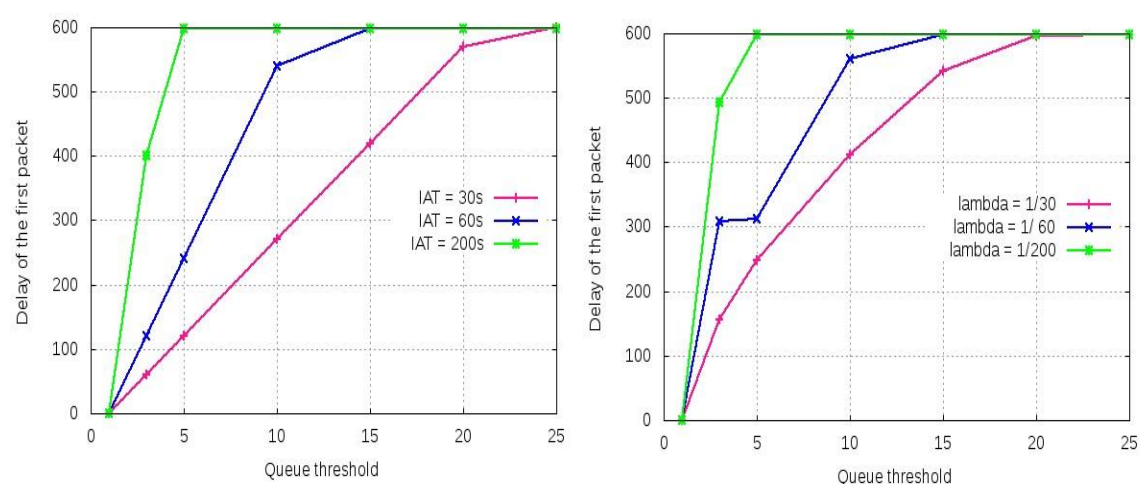
La Figure 4.13 montre que le délai d'attente du premier paquet arrivé dans la file d'attente ne dépasse pas le seuil maximal déjà fixé par l'application M2M, 600s dans cet exemple de simulation.



(a) Distribution fixe du trafic M2M

Distribution exponentielle du trafic M2M

Figure 4.12. Variation de l'énergie consommée en adoptant adaptive coalesced DRX en mode veille



Distribution fixe du trafic M2M

Distribution exponentielle du trafic M2M

Figure 4.13. Délai du premier paquet dans la file d'attente

4.6 Self adaptive DRX en mode veille

L'étude faite dans la partie 4.3.2 montre que la durée du cycle de paging a un impact sur la consommation énergétique dans un module M2M ; plus le cycle est long, plus la consommation énergétique diminue. En se basant sur cette étude et les résultats obtenus en utilisant la technique adaptive coalesced DRX en mode veille, je propose la technique appelée self adaptative DRX en mode veille. Le principe de cette technique consiste à faire varier la durée du cycle de paging en fonction de l'intervalle qui sépare deux transmissions de paquets (IAT) et du délai maximum d'un paquet dans la file d'attente. La Figure 4.14 montre le principe de la technique self adaptative DRX en mode veille.

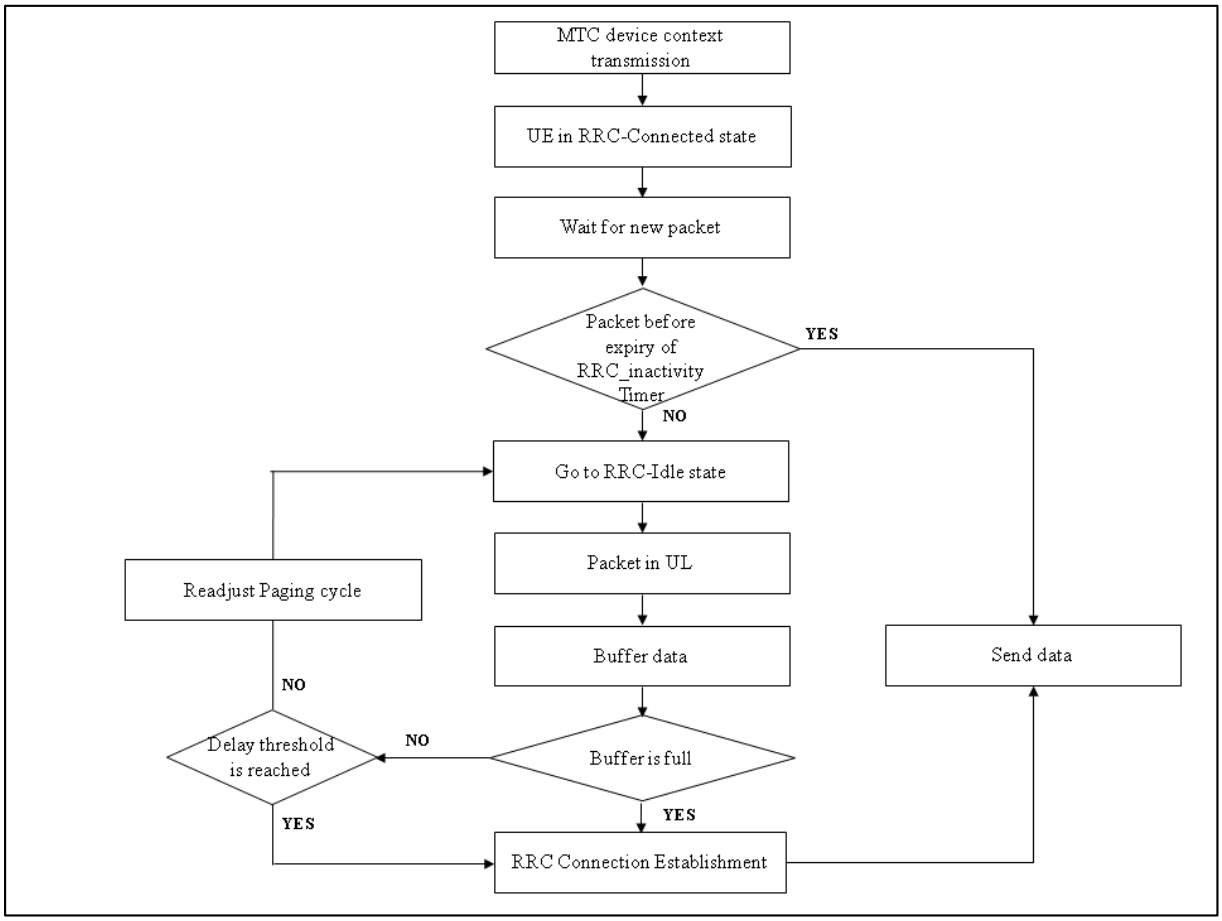


Figure 4.14. Self adaptive DRX en mode veille

La durée du cycle de paging est calculée par l'équation suivante :

$$\text{AdaptiveDRX} = \alpha_i * \text{DRX}_{\min} \quad (17)$$

Avec : DRX_{min} = 2.56s

α_i est égale à :

- $\alpha_i = \lfloor (Q_{th} * IAT + t_{Connecting})/DRX_{min} \rfloor$ si $Q_{th} * IAT + t_{Connecting}) < D_{th}$
- $\alpha_i = \lfloor (D_{th} - t_{Connecting})/DRX_{min} \rfloor$ si $Q_{th} * IAT + t_{Connecting}) \geq D_{th}$

L'Algorithme 1 explique le principe de calcule de α_i.

Algorithme 1. Calcul du cycle de paging

1: Let DRX_{min} equal to 2.56s

2: Let IAT be the inter arrival timer

3: Let Q_{th} be the queue threshold

4: Let D_{th} be the delay threshold

5: Let $t_{Connecting}$ be the time necessary to go from idle state to connected state

6: **if** $(Q_{th} * IAT + t_{Connecting}) < D_{th})$ **then**

7: $n = \lfloor (Q_{th} * IAT + t_{Connecting})/DRX_{min} \rfloor$

8: **else**

9: $n = \lfloor (D_{th} - t_{Connecting})/DRX_{min} \rfloor$

10: **end if**

11: **if** $(n > 1)$ **then**

12: $\alpha_i = n$

13: **else**

14: $\alpha_i = 1$

15: **end if**

Afin de montrer l'intérêt de cette approche, j'ai pris à titre d'exemple, un seuil pour le délai d'attente de transmission égal à 600s et j'ai fait varier la taille de la mémoire tampon. La Figure 4.15 représente la variation du cycle de paging en fonction de la taille de mémoire tampon. Plus la taille de la mémoire augmente plus le cycle de paging augmente tout en respectant la contrainte du délai maximal autorisé pour les paquets dans la file d'attente. Par exemple pour une application M2M, dont l'intervalle entre deux paquets consécutifs est de 60s, le cycle de paging qui permet de satisfaire les deux contraintes de délai et de la taille de la mémoire tampon est environ 300s si Q_{th} est de 5 paquets, alors qu'il est environ 600s si la mémoire tampon permet de stocker 10 paquets ou plus. De plus, dans la Figure 4.15, on constate que pour satisfaire la contrainte de délai, le cycle de paging a une valeur maximale au-delà de laquelle il devient fixe même si la mémoire tampon permet de stocker plus de paquets. Pour les applications M2M dont l'IAT est égal à 30s, la durée maximale d'un cycle de paging est d'environ 600s si le seuil de délai d_{th} est fixé à 600s.

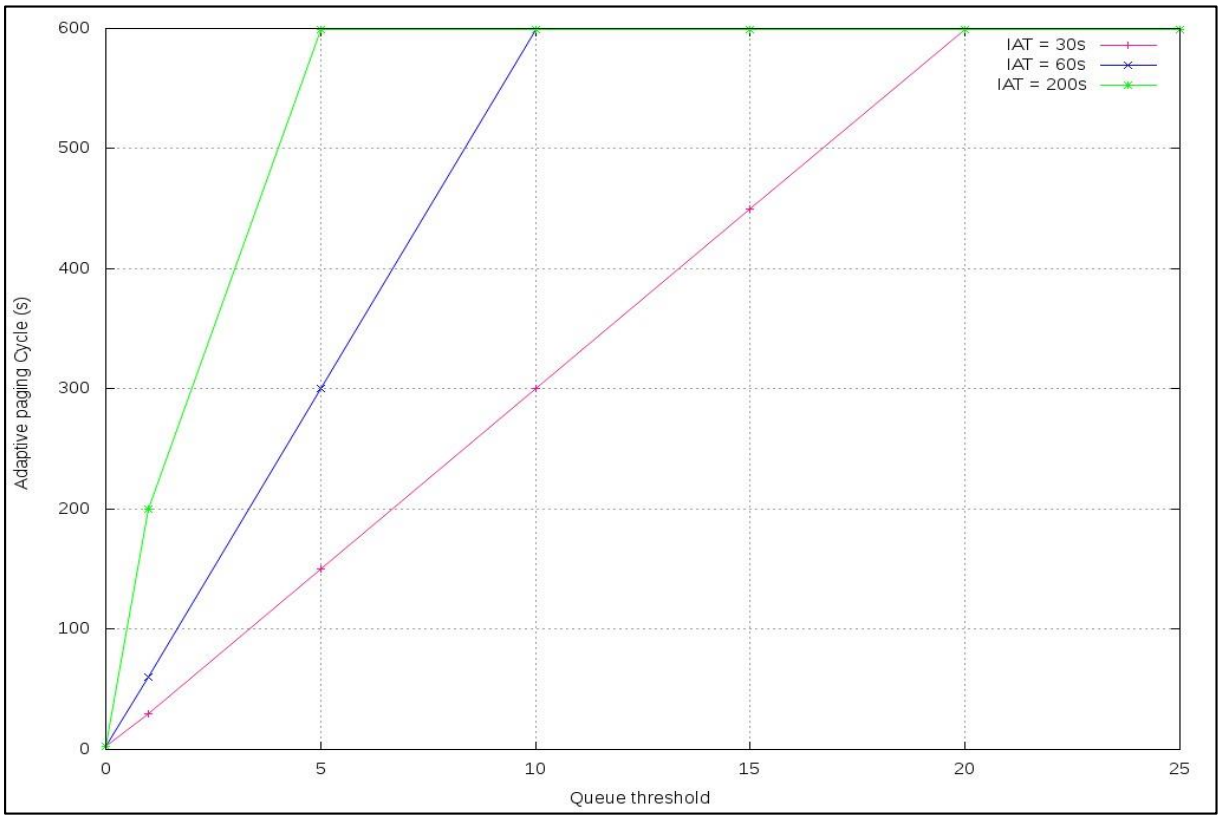


Figure 4.15. Variation du cycle de paging en fonction de la taille de la mémoire tampon

En augmentant la taille de la mémoire tampon, la consommation énergétique diminue si le délai du premier paquet dans la file d'attente n'a pas encore atteint le délai maximal. Dès que

le seuil de délai est atteint, le module abandonne le mode veille et passe en mode connecté afin de transmettre ses données même si la mémoire tampon n'est pas encore saturée (Figure 4.16).

En comparant les résultats obtenus par la technique adaptive coalesced DRX en mode veille et ceux obtenus par la technique self adaptive DRX en mode veille (Figure 4.12 et Figure 4.16), on constate que l'énergie consommée a diminué considérablement. Par exemple, pour une application M2M dont l'IAT est égal à 60s et pour une mémoire tampon de 5 paquets, l'énergie consommée varie environ de 250mJ à moins de 60mJ. Cette diminution engendre, par conséquent, une augmentation de la durée de vie de la batterie du module M2M.

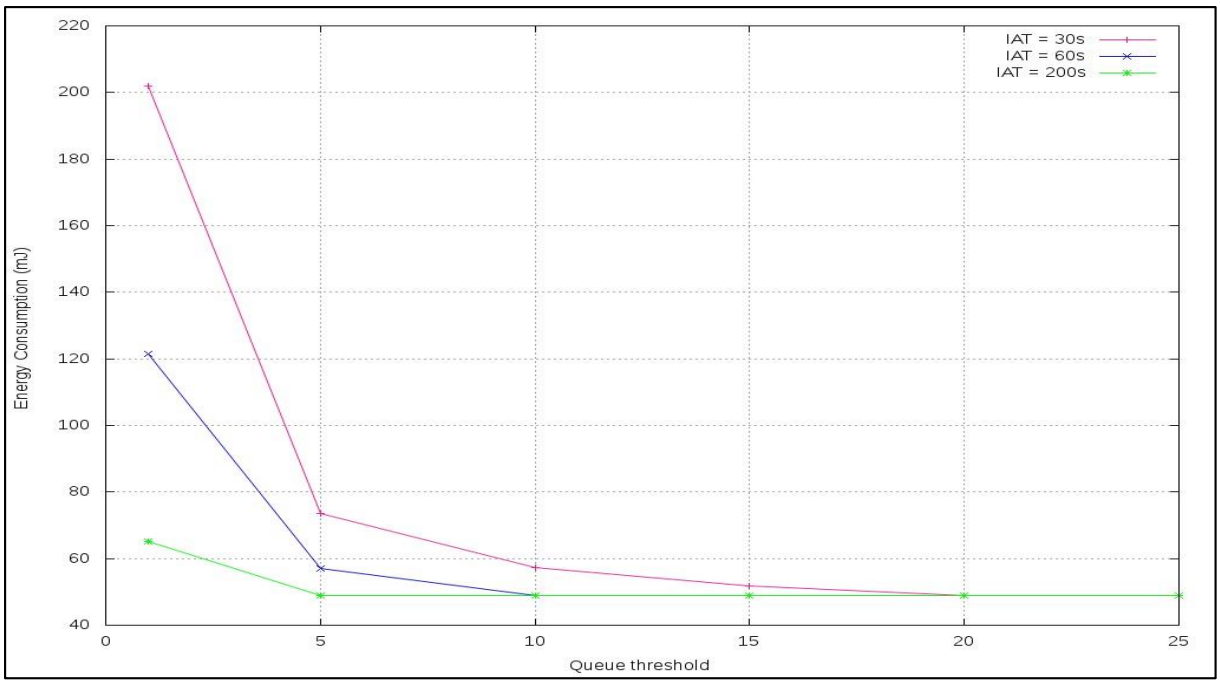


Figure 4.16. Variation de l'énergie consommée dans le cas de self adaptive DRX en mode veille

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, j'ai proposé trois techniques de réduction de la consommation énergétique pour les applications M2M qui autorisent le délai ; à savoir la technique coalesced DRX en mode veille, adaptive coalesced DRX et self adaptive DRX. Ces techniques se basent sur le principe de la technique réception discontinue en mode veille et qui consiste à éteindre une partie du module M2M afin de préserver la batterie. La technique coalesced DRX en mode veille, permet diminuer la consommation énergétique dans les modules M2M en minimisant l'énergie consommée suite au passage du mode RRC_Idle au mode RRC_Connected et vice versa et ce en retardant l'envoi des paquets en voie montante jusqu'à saturation de la mémoire

tampon. Par contre, le délai d'attente des paquets augmente considérablement. Pour remédier à ce problème, la technique adaptive coalesced DRX fixe un autre seuil qui est le seuil de délai. Par conséquent, cette technique permet de diminuer la consommation énergétique tout en satisfaisant la qualité de service requise par les modules M2M en termes de délai.

Afin de maximiser le gain obtenu par la technique adaptive coalesced DRX, la technique self adaptive DRX, consiste à faire varier la durée du cycle de paging en fonction de la taille de la mémoire tampon et du seuil de délai fixé par chaque application M2M.

Pour envoyer les paquets stockés dans la mémoire tampon du module M2M au centre de collecte de données, le module M2M a besoin de ressources radio allouées par l'eNB (station de base) pour envoyer ses données utiles.

Aussi, toujours dans le but réduire de manière plus significative la consommation, dans le chapitre suivant, je proposerai deux techniques d'allocation de ressources radio qui permettent le transfert des paquets depuis le module M2M vers la station de base tout en réduisant la consommation énergétique.

Chapitre 5. Réduction de la consommation énergétique par ordonnancement en voie montant

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, je traiterai l'ordonnancement en voie montante en LTE et LTE-A pour les applications M2M et H2H. Les modules M2M ou H2H emploient les ressources radio allouées par l'ordonnanceur pour transmettre des données en direction de la station de base. Pour ce faire, je commencerai par détailler le principe d'ordonnancement des ressources radio en voie montante et montrer la différence par rapport à l'ordonnancement en voie descendante. J'énumérai les critères de comparaison des ordonnanceurs. Je présenterai, par la suite, deux algorithmes d'ordonnancement pour allouer les ressources radio aux modules M2M et H2H tout en réduisant la consommation énergétique dans les modules M2M. Je comparerai, par la suite, leurs performances par rapport à d'autres ordonnanceurs présents dans la littérature.

5.2 Procédure de transmission de données en voie montante

La Figure 5.1 représente la procédure de transmission de données en voie montante. En LTE et LTE-A, un UE (module M2M ou H2H) reçoit les données à transmettre des couches supérieures (PDCP). Les données de plusieurs canaux logiques sont mises en file d'attente dans les tampons de la sous-couche RLC. L'UE envoie à l'eNB (station de base) des informations sur la taille des données stockées dans sa file d'attente. Il transmet, pour cela, l'indicateur *Buffer Status Report* (BSR).

L'ordonnanceur dans l'eNB prend la décision d'allouer des ressources radio (RBs) selon une stratégie d'ordonnancement bien définie et forme alors la table d'allocation. L'eNB envoie par la suite aux UEs la table d'allocation des RBs via le canal de contrôle en voie descendante (PDCCH). En recevant la table d'allocation, les UEs préparent leurs données à envoyer à l'eNB.

Dans la sous couche MAC de l'UE, un paquet PDU (Protocol Data Unit) est alors formé en se basant sur la table d'allocation. Comme le montre la Figure 5.1, le paquet PDU contient en plus des données provenant de la sous couche RLC, l'entête MAC. Ce paquet est transmis à la couche physique. Cette dernière ajoute les bits de contrôle de redondance cyclique (CRC) et envoie le bloc de transport (Transport Block : TB) ainsi formé à l'eNB [93] et ce après 4 ms depuis la réception de la table d'allocation de ressources radio.

La taille du bloc de transport alloué aux UEs pour transmettre ses données dépend de la qualité du lien radio (renseigné par l'UE à travers l'indicateur de la qualité de canal (CQI)) et des ressources radio allouées par l'eNB aux UEs.

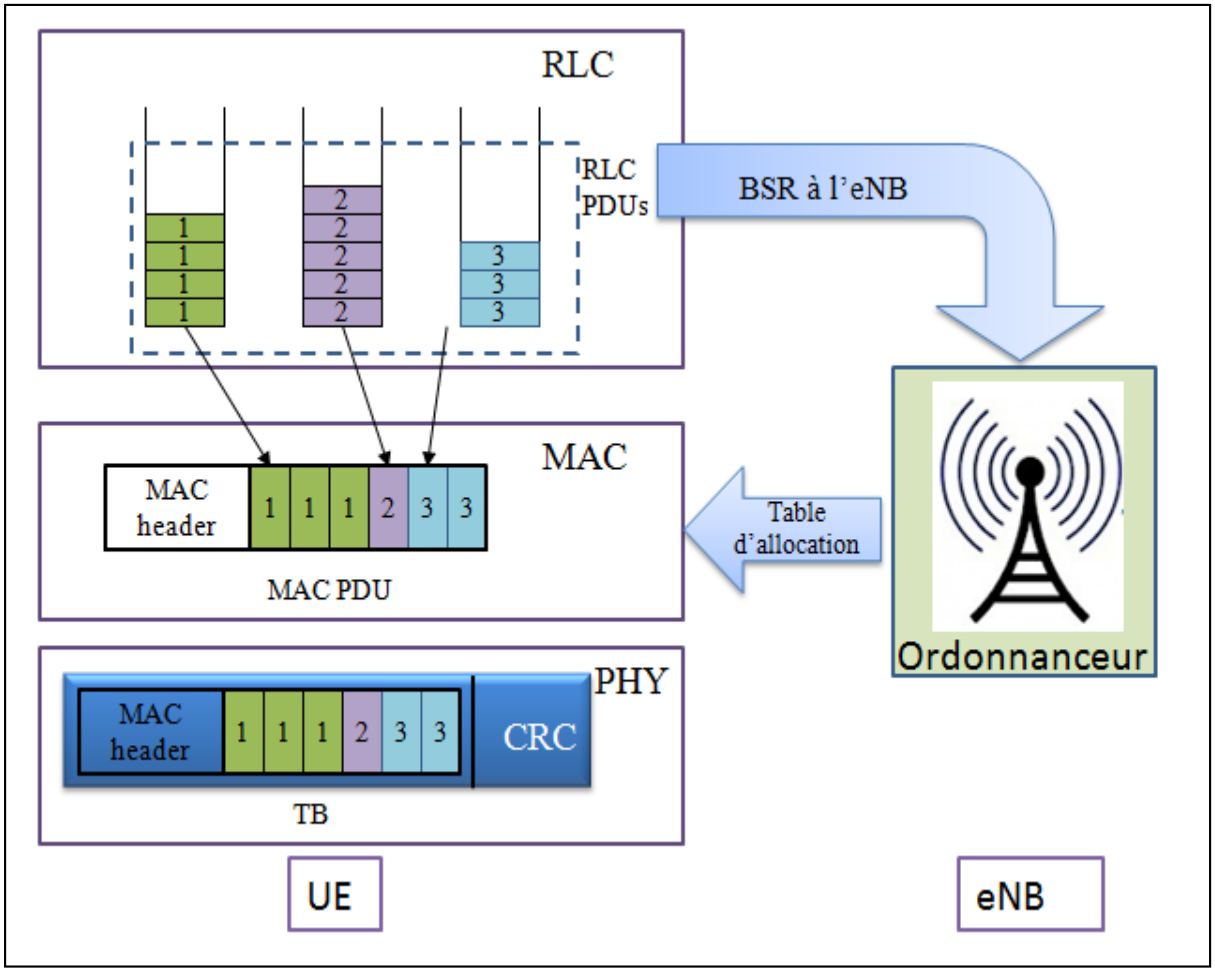


Figure 5.1. Procédure de transmission de données en voie montante

5.3 Différence d'ordonnancement en voies montante et descendante

L'ordonnancement en voie montante diffère de l'ordonnancement en voie descendante pour plusieurs raisons :

- une ressource radio (RB) est allouée à un seul UE dans la même sous-trame [50]

$$\sum_{i}^{N} x_i^c \leq 1, \forall c \quad (18)$$

$$x_i^c \in \{0,1\} \quad (19)$$

Avec : x_i^c est une variable binaire indiquant si RB_c est allouée à l'UE_i

N est le nombre d'UEs

- les ressources radio allouées à un module doivent être contiguës dans le domaine fréquentiel. Cette exigence est due à la modulation SC-FDMA. La Figure 5.2 montre la différence entre l'allocation des ressources radio en voie montante et descendante. En effet, en voie montante, toutes les ressources radio, allouées à chaque UE, doivent être adjacentes les unes aux autres, contrairement à l'ordonnancement en voie descendante dont il n'y a pas de contrainte de contigüité.

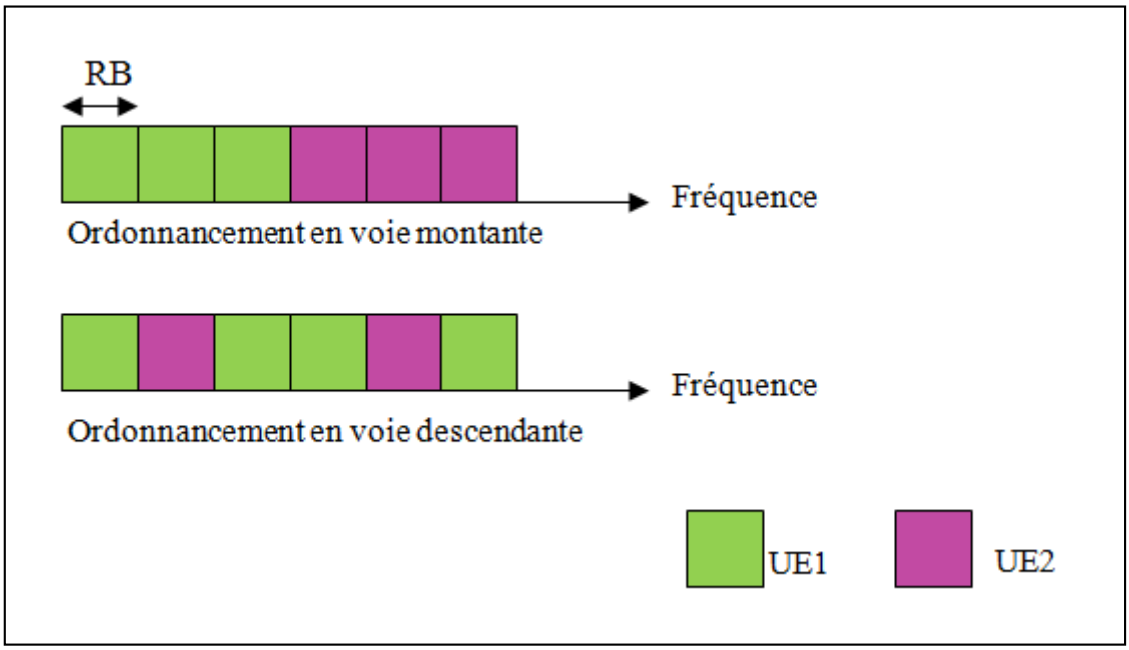


Figure 5.2. Différence entre l'allocation de ressources radio en voie montante et descendante

- En voie montante, les modules qui transmettent les données ont généralement une source d'énergie limitée d'où la nécessite de réduire la consommation énergétique afin d'augmenter la durée de vie de la batterie. Selon la spécification 3GPP [94], la puissance de transmission maximale est constante pour chaque catégorie de terminaux mobiles. En effet, les terminaux mobiles compatibles avec le fonctionnement du LTE et/ou du

LTE-A sont répartis en catégories [94]. Chaque catégorie dispose de caractéristiques propres, comme par exemple le débit maximal ou la puissance de transmission maximale. Dans ce manuscrit, on considère des terminaux LTE de la catégorie 3 dont la puissance de transmission maximale est 23 dBm. Cette contrainte est représentée par l'équation suivante :

$$\sum_{j=1}^{M} \Delta(n,j) P_{TX}(n) \leq 23dBm \quad (20)$$

avec $\Delta(n,j)$ est le vecteur d'allocation de l'UE_n à RB_j à chaque sous trame ($\Delta(n,j) = 1$ si RB_j est allouée à UE_n et $\Delta(n,j) = 0$ si RB_j n'est pas allouée à UE_n),

M nombre de ressources radio à chaque sous trame,

$P_{TX}(n)$ est la puissance de transmission totale pour l'UE_n à chaque sous trame.

Ces contraintes réduisent la flexibilité offerte à un algorithme d'allocation de ressources. La diversité fréquentielle et la diversité des utilisateurs ne peuvent pas être pleinement exploitées. Par conséquent, les ordonnanceurs proposés pour la voie descendante ne peuvent pas être appliqués directement en voie montante.

5.4 Modélisation de l'ordonnanceur de paquets en voie montante

L'ordonnancement consiste à allouer des ressources radio aux UEs actifs tout en assurant les performances souhaitées. La distribution des ressources radio est complexe à cause des facteurs à prendre en compte (délai, débit, équité...). De plus, un ordonnanceur en LTE, doit prendre les décisions optimales d'allocation de ressources radio en un court délai (1 ms). La conception d'un ordonnanceur est définie en deux étapes :

1. la première étape consiste à choisir une métrique M. Cette métrique est une fonction mathématique qui mesure le niveau de satisfaction de la performance du système par rapport aux exigences (délai de transmission des paquets, débit des données...). Cette fonction mathématique peut prendre en compte une ou plusieurs mesures de performance. L'ordonnanceur établie alors une matrice d'association UE-RB, représentée dans la Figure 5.3, de dimension $N*N_{RBs}$ avec N représentant le nombre de modules qui ont des données à envoyer et N_{RBs} représente le nombre de ressources radio. Les éléments de la matrice ($M_{i,j}$) sont les valeurs de la métrique choisie par l'ordonnanceur et qui est calculée pour chaque paire (UE_i, RB_j).

UE \ RB	RB_1	RB_2	...	RB_{NRB}
UE_1	$M_{1,1}$	$M_{1,2}$	...	$M_{1,NRB}$
UE_2	$M_{2,1}$	$M_{2,2}$	...	$M_{2,NRB}$
	...	...	...	...
UE_N	$M_{N,1}$	$M_{N,2}$	...	$M_{N,NRB}$

Figure 5.3. Matrice d'association UE-RB

2. La deuxième étape consiste à exécuter un algorithme de recherche qui consiste à parcourir la matrice d'association afin de trouver un mapping UE-RB optimal afin de satisfaire au mieux les exigences des UEs tout en respectant la contrainte de contiguïté.

5.5 Stratégies d'ordonnancement

Dans le but de réduire la consommation énergétique dans les modules M2M, j'ai proposé deux algorithmes d'ordonnancement, qui permettent en plus de conserver la consommation énergétique, de satisfaire les contraintes de QoS tel que le délai, la perte de paquets... En LTE, l'eNB assure l'ordonnancement des paquets en voie montante et descendante. En LTE, les modules H2H et M2M partagent les ressources radio, pour cette raison et pour une approche globale d'allocation de ressources radio, les ordonnanceurs que je proposerai, prennent en considération la coexistence de ces deux types de modules.

5.5.1 Algorithme 1: Carrier-By-Carrier-Modified

Cet ordonnanceur prend en compte la présence de modules H2H en plus des modules M2M. Le principe de ce premier algorithme consiste à allouer L_{H2H} ressources radio parmi N_{RBs} aux modules H2H. Le reste de ressources radio (L_{M2M}) est alloué aux modules M2M tel que :

$$L_{M2M} = N_{RBs} - L_{H2H} \quad (21)$$

L'allocation des RBs pour les modules H2H se base sur le principe de l'ordonnanceur FDPS-Carrier-By-Carrier (CBC) proposé par Lee et al. [95], c'est pour cette raison que mon premier ordonnanceur est appelé CBC-Modified (CBC-M). Le principe consiste à parcourir les RBs commençant par RB_1 jusqu'à RB_m et d'allouer chaque ressource radio au module H2H

ayant la meilleure métrique et qui respecte aussi la contrainte de contiguïté fréquentielle. L'Algorithme 2 représente le principe de l'ordonnanceur CBC.

Algorithme 2. Carrier-by-carrier

1: Let U be the set of schedulable H2H modules
2: Let M[i][j] be the metric of $H2H_j$ module at RB_i
3: Let A[m] be RB-to-H2H modules assignment status
4: **for** RB c = 1 to m **do**
5: pick the best H2H module i ∈ U with largest value $M_{i,c}$
6: assign RB_c to H2H module i
7: Let I be RBs already assigned to user i
8: **if** I = ∅ **then**
9: U = U - {A[c-1]}
10: **end if**
11: **end for**

Le Tableau 5.1 montre un exemple d'allocation de ressources radio en utilisant le principe de l'ordonnanceur CBC. L'UE_2 possède la meilleure valeur pour la ressource radio RB_1 alors cette dernière lui sera attribuée. Par contre, RB_2 est allouée à UE_1 qui a la meilleure métrique. Par la suite, UE_3 est allouée en RB_3. En RB_4, l'UE_1 a la meilleure valeur mais cette ressource radio ne peut pas lui être attribuée à cause de la contrainte de contiguïté. Mais, comme RB_5 sera attribuée à UE_3 qui possède la meilleure métrique, alors RB_4 lui sera attribuée aussi pour respecter l'adjacence des ressources radio.

Tableau 5.1. Table d'allocation des ressources radio en FDPS- Carrier- by-Carrier

	RB_1	**RB_2**	**RB_3**	**RB_4**	**RB_5**	**RB_6**
UE_1	0,52	**1,8**	0,2	1,7	0,9	0,7
UE_2	**0,9**	0,5	1	0,6	0,52	0,65
UE_3	0,71	0,4	**0,8**	**0,23**	**1,2**	0,55

Le reste des ressources radio, L_{M2M}, est alloué aux modules M2M selon le même principe avec une condition de ne pas atteindre la puissance de transmission maximale.

Algorithme 3. Allocation des ressources radio aux modules M2M selon CBC-M

1: Let M be the set of schedulable M2M modules
2: Let MCQI[i][j] the metric of $M2M_j$ module at RB_i
3: Let L_{M2M} the number of RBs not allocated to H2H users
4: Let $P_T(j)$ be the transmission power of $M2M_j$
5: Let P_{max} be the maximum transmission power
6: **for** $RB_c = RB_{m+1}$ to N_{RBs} **do**
7: find $M2M_k$ with best MCQI[c][k]
8: **if** ($P_T(k) < P_{max}$) **then**
9: assign RB_c to $M2M_k$
10: Let I be the number of RBs already assigned to $M2M_k$
11: **end if**
12: **end for**

5.5.2 Algorithme 2 : Recursive Maximum Expansion Modified

Dans cette partie, je détaillerai mon deuxième algorithme d'ordonnancement pour les applications M2M en voie montante qui considère la qualité de service requise par les applications en termes de délai de transmission, ainsi que la qualité du canal de transmission et la puissance de transmission, lors de l'allocation de ressources radio.

Cet ordonnanceur prend en compte la présence de modules H2H en plus des modules M2M. Les étapes d'ordonnancement sont les suivantes :

- Allouer LH2H ressources radio parmi NRBs aux modules H2H. Le reste des ressources radio (LM2M) est alloué aux modules M2M tel que :

$$L_{M2M} = N_{RBs} - L_{H2H} \quad (22)$$

L'ordonnanceur Recursive Maximum Expansion (RME) [10] est utilisé pour allouer L_{H2H} aux modules H2H. Le principe de cet ordonnanceur consiste à trouver la combinaison RBj-UE_i qui a la meilleure métrique. RME alloue les RBs à droite et à gauche de RB_j si UE_i a la meilleure métrique. L'allocation se poursuit des deux côtés jusqu'à qu'un nouveau UE possède une meilleure métrique. L'allocation s'arrête alors et une nouvelle recherche de combinaison RB_j-UE_i optimale s'effectue. Quand tous les UEs sont alloués mais qu'il reste encore des ressources

radio non allouées alors ces dernières seront attribuées aux UEs qui ont la valeur $M_{i,j}$ la plus élevée parmi les deux UEs adjacents.

Le Tableau 5.2 montre le principe d'allocation de l'ordonnanceur RME. L'UE_1 a la meilleure métrique en RB_2 alors cette dernière lui est allouée. Par contre en RB_1 et RB_3, UE_1 n'a pas la meilleure valeur. Aucune RB ne sera attribuée à l'UE_1 tant qu'il reste encore des UEs qui n'ont pas de ressources radio. Alors la recherche d'une nouvelle combinaison est effectuée. L'UE_3 a la meilleure métrique en RB_5 mais pas en RB_4 et RB_6. Donc seulement RB_5 est allouée à UE_3. Enfin en RB_3, l'UE_2 a la meilleure métrique. A la fin, les RBs qui ne sont pas encore allouées sont attribuées aux UEs adjacents afin de satisfaire la contrainte de contiguïté.

Tableau 5.2. Table d'allocation de ressources radio en RME

	RB_1	**RB_2**	**RB_3**	**RB_4**	**RB_5**	**RB_6**
UE_1	**0,52**	**1,8**	0,2	1,7	0,9	0,7
UE_2	0,9	0,5	**1**	**0,6**	0,52	0,65
UE_3	0,71	0,4	0,8	0,23	**1,2**	**0,55**

- Le reste des ressources radio est alloué aux modules M2M, selon le principe suivant :
  - A chaque instant t, les modules M2M actifs, envoient en plus du BSR qui représente le nombre de paquets dans la file d'attente, le délai maximal autorisé d'attente pour chaque paquet. Le module $M2M_j$ ayant le minimal délai d'attente ($lowestDelay_j$) est prioritaire.
  - Deux cas peuvent exister :
    - ✓ $lowestDelay_j$ est au-dessous d'un délai d'attente critique (*delayThreshold*). Dans ce cas, le module $M2M_j$ est le plus prioritaire. L'ordonnanceur calcule le nombre de ressources radio nécessaire pour envoyer la totalité des paquets du $M2M_j$ et lui attribue le maximum de ressources radio permettant d'envoyer le maximum de données et ce à partir de la ressource radio ayant la meilleure qualité de canal.
    - ✓ *lowestDelayj* est supérieur à *delayThreshold*. Dans ce cas :
      - ❖ on commence par trier dans un tableau T les ressources radio en fonction de leur qualité de canal par ordre croissant.
      - ❖ Pour tout élément du tableau T, on calcule le nombre de RBs qui peuvent être allouées au module $M2M_j$. Pour ce faire, pour chaque élément du tableau T, l'ordonnanceur commence à vérifier si le module $M2M_j$ a la meilleure qualité de

canal à RB_i. Si c'est le cas, il vérifie à droite et à gauche du RB_i. L'ordonnanceur s'arrête quand un autre module M2M a une meilleure qualité de canal que $M2M_j$.

- L'ordonnanceur vérifie pour le premier élément du tableau T si le module $M2M_j$ arrive à envoyer la totalité de ses données, cette condition est désignée par C_1. Si la condition C_1 n'est pas satisfaite alors, l'ordonnanceur vérifie parmi les autres éléments du tableau T, si un RB permet de satisfaire cette condition.
- Il vérifie par la suite si la puissance de transmission est inférieure à la puissance maximale. Cette condition est notée condition C_2.
- L'ordonnanceur alloue les ressources radio correspondant à l'élément T_k qui satisfait les conditions C_1 et C_2. Le module $M2M_j$ passe alors en mode veille.
- L'ordonnancement s'arrête quand toutes les ressources radio sont allouées ou quand tous les modules M2M sont en mode veille.

La Figure 5.4 montre le principe de fonctionnement de mon deuxième ordonnanceur appelé RME-Modified (RME-M).

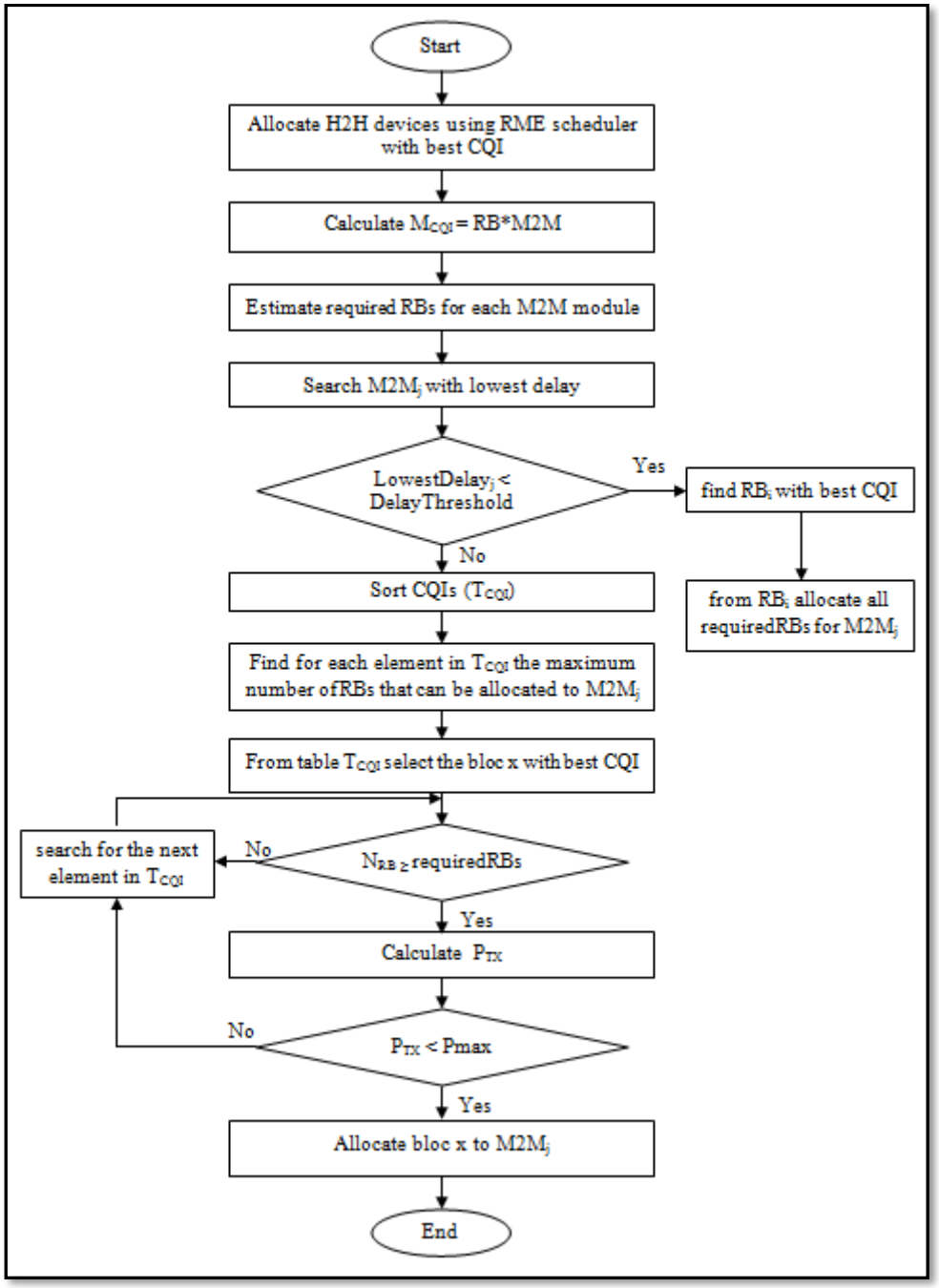


Figure 5.4. Principe de l'algorithme RME-Modified

5.5.3 Résultats

5.5.3.1 Scenario de simulation

Afin d'évaluer les performances de mes deux ordonnanceurs, CBC-M et RME-M, je les ai comparé à l'ordonnanceur Round-Robin, ordonnanceur de référence dans plusieurs travaux dans la littérature [96]–[99], et aux ordonnanceurs sensibles aux canal de transmission CBC et RME.

La stratégie de l'ordonnanceur Round-Robin (RR) consiste à partager toutes les ressources radio de manière équitable entre tous les UEs actifs sans tenir en compte de la qualité du canal de transmission et tout en respectant la contrainte de contiguïté. Chaque module aura le même nombre de RBs [100]. Cette stratégie permet d'avoir la meilleure équité de point de vue nombre de ressources radio mais pas au niveau du débit procuré à chaque module.

L'équation (23)

représente le nombre ressources radio allouées à chaque module.

$$nbRB_{UEi} = \frac{N_{RB}}{nb_{UEs}} \quad (23)$$

Avec : $nbRB_{UEi}$ est le nombre de ressources radio allouées à chaque module (M2M et H2H),

N_{RB} est le nombre total de ressources radio,

nb_{UEs} est le nombre de modules M2M et H2H.

Le Tableau 5.3 montre un exemple d'allocation de ressources radio aux différents UEs. L'ordonnanceur RR consiste à partager les 6 RBs de façon équitable entre les 3 UEs actifs tout en respectant la contrainte de contiguïté. De ce fait, chaque module se voit allouer 2 ressources radio. Ces RBs sont allouées à tour de rôle.

Tableau 5.3. Table d'allocation de ressources radio en RR

	RB_1	**RB_2**	**RB_3**	**RB_4**	**RB_5**	**RB_6**
UE_1	**0,52**	**1,8**	0,2	1,7	0,9	0,7
UE_2	0,9	0,5	**1**	**0,6**	0,52	0,65
UE_3	0,71	0,4	0,8	0,23	**1,2**	**0,55**

Afin de montrer les performances des algorithmes d'ordonnancement proposés dans ce manuscrit, j'ai utilisé le simulateur LTE-Sim [85].

J'ai opté pour un réseau LTE composé d'un seul eNB, d'une dizaine de modules H2H et de centaine de module M2M puisque les modules M2M sont plus nombreux que les modules H2H. Les paramètres de simulation sont présentés dans le Tableau 5.2. La bande passante est fixée à 5 MHz d'où 25 RBs sont valables chaque TTI (1ms) [43].

Tableau 5.4. Paramètres de simulation

Paramètre	Valeur
Nombre de cellules	1 de rayon 1km
Temps de simulation	5 s exécuté 10 fois
Mobilité	fixe pour les modules M2M 3 km/h pour les modules H2H
Bande passante	5 MHz donc 25 RBs
Puissance de transmission maximale pour un UE	23 dBm

Les applications H2H, que j'ai utilisé pour simuler le trafic H2H, sont des applications VoIP, des vidéos et des applications FTP qui sont déjà implémenté dans le simulateur LTE-Sim. Ces applications ont été modélisées en [101] (les applications vidéo) et [102] (les applications VoIP et FTP).

Les applications FTP sont des applications à débit constant (Constant Bit Rate : CBR). La taille et les instants d'arrivée des paquets peuvent être définis pour ce type de trafic.

Le générateur VoIP génère les flux G.729 pour la voix. En particulier la voix sous LTE-Sim a été modélisée par un modèle de chaine de Markov ON/OFF, où la période ON est exponentiellement distribuée avec une valeur moyenne de 3 s, et la période OFF a une pdf *(probabilty density function*) ou fonction de densité de probabilité exponentielle tronquée avec une valeur limite supérieure de 6.9 s et une valeur moyenne de 3 s. Durant la période ON, la source envoie des paquets d'une taille de 20 octets toutes les 20 ms, alors que durant la période OFF, le débit est égal à zéro.

Les applications vidéo utilisent un modèle réaliste de trace de fichiers vidéo.

Dans la littérature, la majorité des applications M2M peuvent être classées en deux catégories [88] :

- des applications événementielles,
- des applications périodiques.

Le simulateur LTE-Sim implémente seulement des applications vidéo, CBR et VoIP adaptées pour le trafic H2H, j'ai alors implémenté les applications M2M événementielles et périodiques.

La distribution des modules M2M dans ce scénario est comme suit : 70% des modules M2M utilisés sont des applications périodiques et 30% sont des applications événementielles.

Les applications événementielles utilisent le processus de poisson d'intensité λ = 50 ms pour générer les paquets. Alors que les applications périodiques génèrent un paquet périodiquement, dont l'intervalle de temps entre deux paquets consécutifs est fixe et a été sélectionné de manière aléatoire dans l'intervalle [0.05, 5] s. Les deux applications M2M avaient une taille de paquet de 125 octets [103]. Le nombre des modules M2M varient de 50 à 300 modules.

Le Tableau 5.5 résume les caractéristiques des applications M2M et H2H utilisées pour simuler le réseau LTE [104].

Dans notre scénario 30 modules H2H ont été simulés ; 10 pour chaque type de trafic. Afin d'assurer le minimum d'équité entre les modules M2M et les modules H2H, au maximum 60 % de la totalité des ressources radio sont allouées aux modules H2H.

Tableau 5.5. Modèle d'applications

Type d'application	Nombre de modules	Modèle	Délai maximal
Applications CBR	10	128kbps avec un paquet de taille 256 Octets	300ms
Applications VoIP	10	G.795	100ms
Applications Vidéo	10	H264 avec 128kbps	150ms
Applications M2M périodiques	70 % des modules M2M	IAT entre [0,05 5]s paquet de taille 125 Octets	égal à l'IAT
Applications M2M événementielles	30 % des modules M2M	loi de poisson avec λ=50ms taille du paquet = 125 Octets	égal à 50ms

5.5.3.2 Critères d'évaluation

Afin d'évaluer les performances de mes ordonnanceurs, je considère ces critères de comparaison :

- La consommation énergétique : la réduction de la consommation énergétique est l'un des critères principaux pour les objets connectés puisque la majorité de ces modules sont alimentés par des batteries. Selon la spécification [50], la puissance de transmission d'un module est :

$$P_{TX} = min(P_{max}\ ,\ P_0 + 10 * log_{10}\ (M) + \alpha * PL + \ \Delta_{TF} + f) \qquad (24)$$

Avec :

- ✓ P_{max} est la puissance de transmission maximale autorisée en LTE et qui dépend de la catégorie du module LTE
- ✓ P_0 est la puissance de transmission de base par ressource radio (RB) en cas d'absence d'atténuation de propagation
- ✓ M est le nombre de ressources radio allouées par l'eNB à chaque UE
- ✓ PL est le facteur d'atténuation de propagation
- ✓ α est un facteur de compensation de perte de chemin. Il est spécifique à la cellule et se situe dans l'intervalle [0 1]
- ✓ Δ_{TF} est un paramètre lié au schéma de codage et de modulation (MCS)
- ✓ f est une fonction de correction.

Lauridsen et al. [105] ont mené des expériences sur les modules LTE afin d'analyser la relation entre l'allocation des ressources radio en voie montante et la puissance d'émission de l'UE. Ils ont montré que la puissance de transmission dépend essentiellement du nombre de ressources radio. Par conséquent l'équation (24) devient :

$$P_{TX,M} = min(P_{max}\ ,\ P_0 + 10 * log_{10}\ (M)) \qquad (25)$$

- Comparaison de la satisfaction de la qualité de service

✓ Nombre de paquets ne satisfaisant pas la contrainte de délai

✓ Efficacité spectrale : l'utilisation efficace des ressources radio est l'un des principaux objectifs à atteindre. À cette fin, plusieurs types de mesure de performance peuvent être envisagés : par exemple, l'efficacité spectrale (exprimée en bit/s/Hz) peut être maximisée en servant toujours les utilisateurs qui ont les meilleures conditions de canal. Elle se définit comme étant le rapport entre le débit binaire (en bit/s) et la bande passante (en Hz).

5.5.3.3 Résultats de simulation

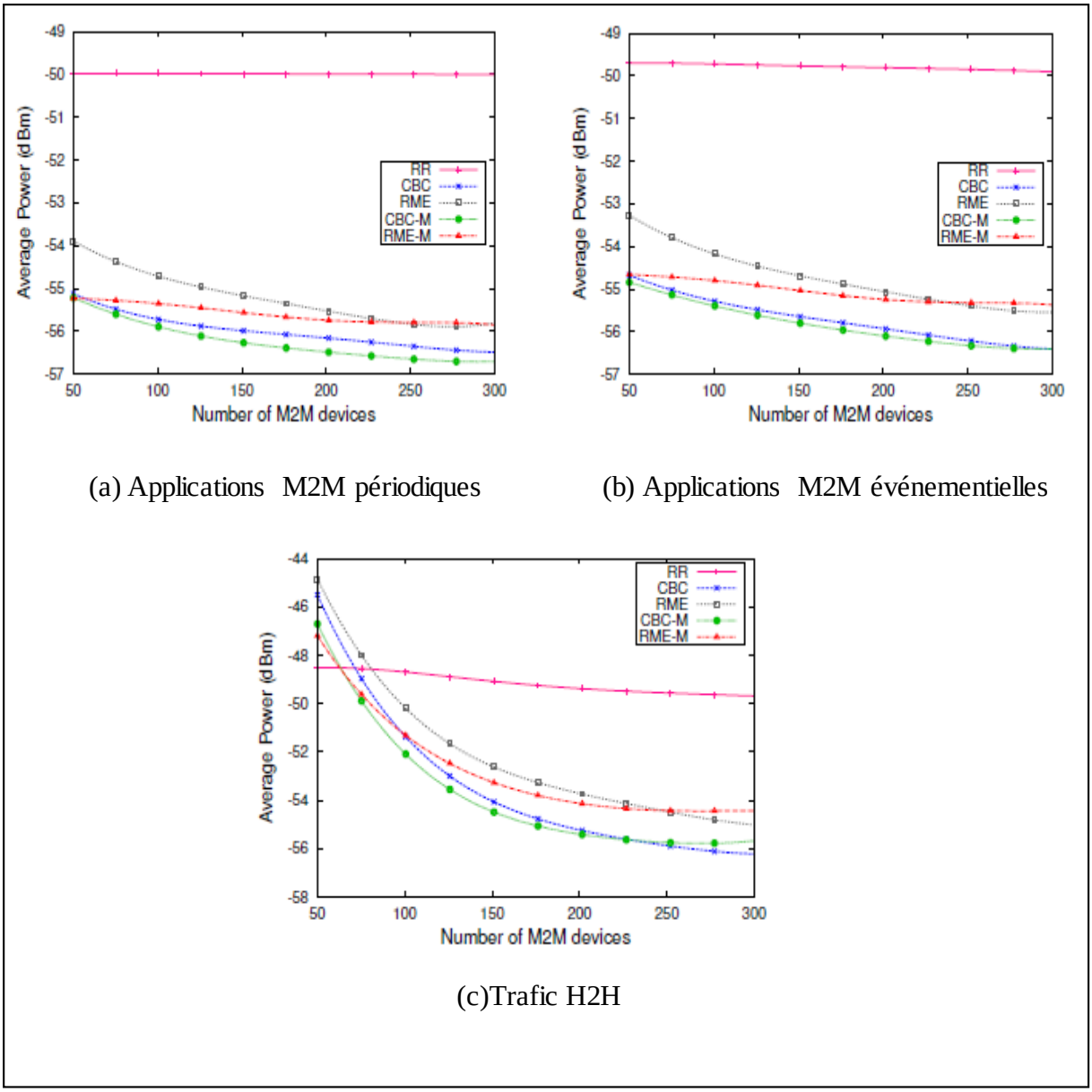
La Figure 5.5 représente la moyenne puissance de transmission en fonction du nombre de modules M2M.

On constate que l'algorithme CBC-M permet de réduire plus la puissance de transmission pour les applications M2M et H2H. En effet, l'ordonnanceur CBC-M permet de réduire de 7dBm la puissance de transmission par rapport à l'ordonnanceur RR ce qui correspond à 14% de gain de puissance de transmission. De plus, pour les deux types d'applications M2M. l'ordonnanceur RME-M permet de réduire de 1dBm la puissance de transmission par rapport à l'ordonnanceur RME. Ce fait est dû à l'allocation d'un set de ressources radio avec la meilleure qualité de canal de transmission ce qui permet d'augmenter la taille du bloc de transport et par conséquent d'envoyer plus de données sur moins de RBs. En diminuant le nombre de ressources radio allouées au module M2M pour envoyer la totalité de ses données, un gain ΔP de puissance de transmission est obtenu dont cette puissance de transmission est mesurée en utilisant l'équation (25).

En effet si le nombre de ressources radio allouées à un module M2M passe de M à N, on obtient un gain $\Delta P_{N,M}$ mesurée par l'équation (26) :

$$\Delta P_{N,M} = P_{TX,M} - P_{TX,N} = 10.\log(^{M}/_{N}) \qquad (26)$$

En outre, diminuer le nombre de ressources de radio nécessaires pour envoyer la totalité des données, permet de réduire la durée de transmission et par conséquent diminuer l'énergie consommée en transmission.



(a) Applications M2M périodiques

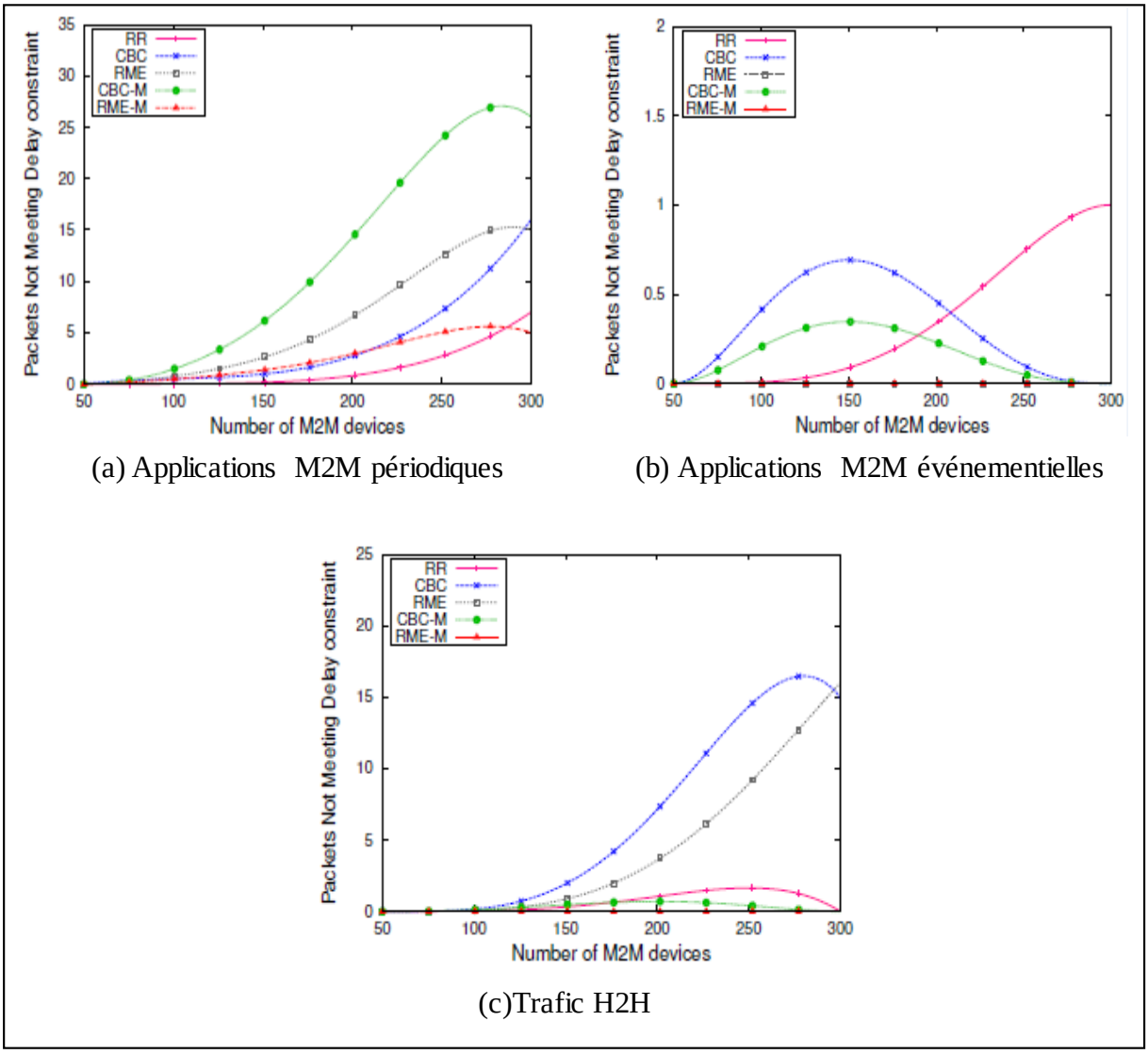
(b) Applications M2M événementielles

(c)Trafic H2H

Figure 5.5. Variation de puissance de transmission (dBm) en fonction du nombre de modules M2M

La Figure 5.6 montre que l'ordonnanceur RME-M permet de diminuer considérablement le nombre de paquets perdus à cause du dépassement du délai maximal, par rapport aux ordonnanceurs CBC, CBC-M et RME. Pour 250 modules M2M, par exemple, 13 paquets des applications M2M périodiques sont perdus en utilisant l'ordonnanceur RME, alors que seulement 5 paquets ont dépassé leur délai si on utilise l'ordonnanceur RME-M. En effet, l'ordonnanceur RME-M prend en compte le délai d'attente maximal autorisé pour les applications M2M, contrairement aux autres ordonnanceurs qui ne considèrent pas la contrainte de délai lors de l'allocation de ressources radio. Pour l'ordonnanceur RME-M, si un paquet atteint un seuil de délai qui est égal à son délai d'attente maximal, il devient prioritaire et il aura le maximum de RBs qui lui permettent d'envoyer la majorité

de ses paquets. Mais, l'ordonnanceur RR a le minimum de paquets dépassants leurs délai de transmission par rapport à l'ordonnanceur RME-M pour les applications M2M périodiques, car il permet de distribuer équitablement les ressources radio entre les différents modules M2M et H2H, par conséquent les applications M2M auront des ressources radio suffisantes pour envoyer leurs données. Pour les applications H2H, l'utilisation de l'ordonnanceur RME engendre une perte considérable de paquets de données ; par exemple, 16 paquets dépassent leur délai maximal d'attente si le nombre des modules M2M atteint les 300 modules alors qu'avec l'ordonnanceur RME-M tous les paquets sont envoyés des applications évènementielles sont envoyés avant l'expiration de leur délai.



(a) Applications M2M périodiques

(b) Applications M2M événementielles

(c)Trafic H2H

Figure 5.6. Nombre de paquets dépassants leur limite de délai en fonction du nombre de modules M2M

La Figure 5.7, qui représente la variation de l'efficacité spectrale en fonction du nombre de modules M2M, montre que les deux algorithmes d'ordonnancement que j'ai proposé permettent d'avoir une efficacité spectrale meilleure que celle obtenue par les autres ordonnanceurs (RR,

CBC et RME). Par exemple pour 250 modules M2M, les ordonnanceurs CBC-M et RME-M ont une efficacité spectrale de 0.47b/s/Hz et 0.46b/s/Hz respectivement contre 0.41b/s/Hz pour l'ordonnanceur RME et 0.43b/s/Hz pour les ordonnanceurs RR et CBC.

Les deux ordonnanceurs proposés permettent d'avoir une efficacité spectrale meilleure que celle obtenue avec l'ordonnanceur RR, ceci est dû à la qualité du canal de transmission (CQI) que les deux ordonnanceur CBC-M et RME-M prennent en compte, contrairement à l'ordonnanceur RR. Basilashvili [106] montre l'impact de la qualité du canal de transmission sur l'efficacité spectrale. En effet, l'efficacité spectrale, qui est la mesure de la capacité d'un réseau sans fil, est le rapport entre le débit de données et la largeur de la bande passante. Cependant, selon le théorème de Shannon-Hartley (équation (27)), il y a une limite du nombre de données qui peuvent être transmis dans une bande passante :

$$C \approx n * B * \log_2 S/N \qquad (27)$$

Avec C : Capacité du canal (bits/s)

n : nombre d'antenne de transmission

B : largeur de la bande passante

S/N : Rapport signal sur bruit (SNR : Signal-to-Noise Ratio)

Ce théorème définit le débit maximal auquel une information peut être transmise sur un canal de communication, pour une bande de fréquence spécifiée en présence de bruit. Il montre la limite de la quantité d'informations qui peut être transmise sans erreur par unité de temps en présence du bruit.

De cette formule, on déduit que le rapport signal sur bruit, c'est à dire le rapport signal sur interférence plus bruit (SINR) pour le réseau LTE, affecte l'efficacité spectrale. En effet, le SINR, qui est un indicateur de la qualité du signal, est transmis à travers le CQI vers l'eNB. D'où vient l'impact du CQI sur l'efficacité spectrale.

En outre, en analysant la Figure 5.7, on constate que l'ordonnanceur CBC-M permet d'avoir une efficacité spectrale meilleure que celle obtenue par l'ordonnanceur CBC quand le nombre de modules M2M dépasse les 200 modules. Ceci est dû à la diversification des modules recevant des ressources radio à chaque TTI. En effet, l'ordonnanceur CBC ne distingue pas les modules M2M des modules H2H, il alloue la ressource radio au module (H2H ou M2M) ayant la meilleure qualité de canal en ce RB sans tenir compte de son type. Par conséquent, si les modules H2H ont une qualité de canaux de transmission meilleure que celle des modules M2M, ces derniers auront peu ou pas de ressources radio. En revanche, l'algorithme CBC-M fait la distinction entre les modules M2M et H2H et réserve un nombre limité de RBs aux modules H2H, le reste des RBs est alloué aux modules

M2M. Ce qui permet d'assurer la diversification des modules communicants ensemble en un instant t donné. En outre, l'ordonnanceur RME-M permet d'avoir une amélioration de l'efficacité spectrale de 23.5% par rapport à l'ordonnanceur RME, puisqu'il consiste à allouer un set de ressources radio avec une meilleure qualité de canal contrairement à l'ordonnanceur RME qui ne prend pas en considération de la qualité de canal de transmission des ressources radio adjacents à la ressource radio qui a la meilleure valeur de la métrique.

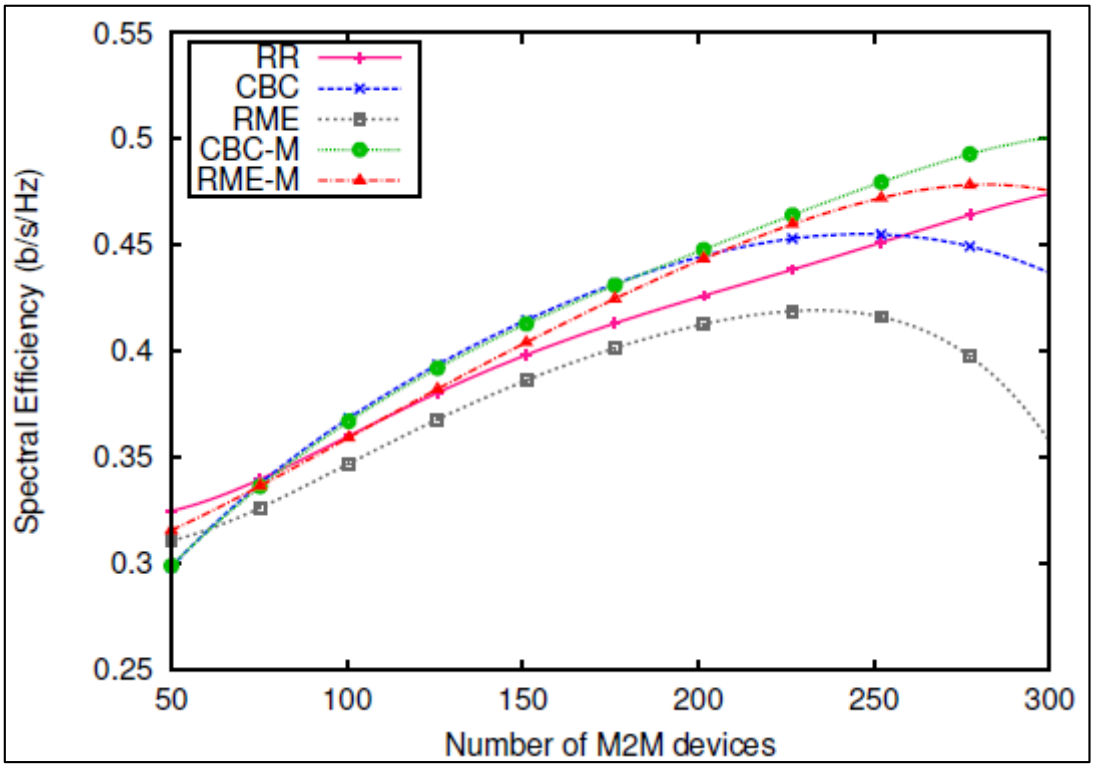


Figure 5.7. Variation de l'efficacité spectrale (b/s/Hz) en fonction du nombre de modules M2M

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, j'ai commencé par expliquer le principe d'ordonnancement en voie montante implémenté au niveau de la station de base afin d'allouer les ressources radio aux modules M2M et H2H pour leur permettre d'envoyer leurs données. J'ai détaillé par la suite mon premier algorithme, appelé Carrier-by-carrier-Modified (CBC-M) et qui consiste à allouer des RBs aux modules M2M et H2H tout en tenant compte de la qualité du canal de transmission et de la puissance de transmission maximale pour chaque module.

Cet ordonnanceur ne prend pas en considération l'exigence de délai requise par certaines applications M2M. Pour répondre à cette contrainte, mon deuxième algorithme, appelé Recursive Maximum Expansion-Modified (RME-M), prend en compte plusieurs paramètres : le délai d'attente maximal d'un paquet dans la file d'attente, la puissance de transmission et la qualité de canal.

Les deux ordonnanceurs que j'ai proposés permettent de réduire la puissance de transmission. En effet, l'ordonnanceur CBC-M permet de réduire de 14% la puissance de transmission par rapport à l'ordonnanceur Round Robin, alors que l'ordonnanceur RME-M permet de réduire cette puissance de transmission de 10% par rapport à l'ordonnanceur RR.

De plus, l'ordonnanceur RME-M permet de réduire de 40% le nombre de paquets ne satisfaisant pas la contrainte de délai par rapport à l'ordonnanceur RME.

Les deux ordonnanceurs CBC-M et MRE-M permettent d'améliorer l'efficacité spectrale par rapport aux ordonnanceurs RR, CBC et RME.

Ces résultats montrent que l'ordonnanceur CBC-M est adapté aux applications M2M qui n'ont une contrainte de délai mais qui ont une contrainte forte de consommation énergétique alors que l'ordonnanceur RME-M est adaptée pour les applications M2M qui exigent de respecter une contrainte de délai.

Chapitre 6. Conclusion générale et perspectives

6.1 Conclusion

La communication Machine-to-Machine permet de faire interaction entre des objets connectés et un centre de collecte de données. Ces communications sont de plus en plus présentes dans notre vie quotidienne. Cependant, la majorité des modules M2M sont alimentés par des batteries d'où le défi d'augmenter leur durée de vie en réduisant la consommation énergétique. Ainsi, dans ce manuscrit, j'ai abordé le problème de la consommation énergétique dans les modules M2M utilisant les technologies LTE et LTE-A.

Au début de ce manuscrit, j'ai commencé par étudier la technologie M2M et ses caractéristiques et notamment celles qui diffèrent de la technologie Human-to-Human (H2H). Dans un second temps, j'ai présenté l'architecture des réseaux LTE et LTE-A.

J'ai étudié par la suite quelques modèles énergétiques afin d'estimer la consommation énergétique dans les modules M2M.

Afin de réduire la consommation énergétique dans les modules M2M, j'ai proposé, dans un premier temps, une approche qui est basée sur le principe de la technique de réception discontinue (DRX) en mode veille. Dans cette approche, j'ai proposé trois techniques de réduction de la consommation énergétique. La première technique, appelée Coalesced DRX en mode veille, consiste à minimiser le passage du module M2M du mode veille au mode connecté. En stockant les paquets en voie montante dans une mémoire tampon à chaque fois qu'un paquet est présent dans la file d'attente du module M2M, le module établit la connexion avec la station de base et procède à la transmission de ses données seulement si la mémoire tampon est saturée. Par exemple, pour une application dont l'intervalle de transmission entre deux paquets consécutifs est de 60s, le gain énergétique est de 80% si la mémoire tampon permet de stocker dix paquets au lieu d'un seul paquet. Cependant, la technique Coalesced DRX en mode veille ne satisfait pas les contraintes de délai pour les applications M2M. C'est pour cette raison, que la deuxième technique appelée Adaptive coalesced DRX en mode veille, prend en compte le délai de transmission maximal permis par chaque application. La technique Adaptive coalesced DRX permet de vérifier deux conditions avant de stocker les paquets dans une file d'attente; la taille de la mémoire tampon ainsi que le délai maximal pour chaque paquet différé. Ce qui permet de réduire la consommation énergétique des modules M2M tout en satisfaisant la qualité de service requise par ces applications en termes de délai de transmission. Pour un délai maximal de 600s, Cette technique permet d'avoir un gain d'énergie de 72% tout en satisfaisant la contrainte de délai.

Afin de maximiser les gains d'énergie obtenues par la technique Adaptive coalesced DRX en mode veille, la troisième technique que nous avons proposée et qui est appelée Self adaptive DRX, consiste à augmenter le cycle de paging en fonction de la taille de la mémoire tampon et du délai maximal de transmission pour chaque application. Ce qui permet d'augmenter le temps de veille du module. En effet en RRC_Idle, le module M2M se réveille périodiquement durant le paging Occasion afin de scruter les canaux PDCCH pour recevoir des notifications de paging et vérifier si le message de paging le concerne. Par conséquent, augmenter le cycle de paging signifie diminuer cette activité faite pendant le paging occasion et par conséquent diminuer la consommation énergétique.

Pour envoyer les données stockées dans la mémoire tampon, le module M2M envoie à la station de base une demande à l'eNB pour avoir les ressources radio (RBs) nécessaires. L'eNB, dans le réseau LTE, peut accepter ou refuser la demande de connexion au réseau et d'allocation de ressources radio en utilisant un algorithme d'ordonnancement en voie montante bien défini.

Dans un second temps, j'ai proposé deux algorithmes d'allocation des ressources radio (RB) pour les modules M2M et H2H qui permettent de réduire la consommation énergétique. Le premier ordonnanceur, appelé Carrier-By-Carrier-Modified (CBC-M), prend en compte la coexistence des modules M2M et H2H. En commençant par le premier RB et jusqu'à m RBs, l'algorithme CBC-M alloue la ressource radio au module H2H ayant la meilleure qualité de canal de transmission tout en respectant la contrainte de contiguïté. Le reste des ressources radio est alloué de la même manière aux modules M2M, mais avec une vérification de la puissance de transmission qui ne doit pas atteindre une valeur maximale. Ce principe d'ordonnancement permet de réduire la consommation énergétique dans les modules M2M, en réduisant la puissance de transmission de 6dBm par rapport à la puissance de transmission calculée avec l'ordonnanceur Round Robin, tout en assurant une bonne efficacité spectrale. Cependant, l'ordonnanceur CBC-M ne prend pas en compte la qualité de service requise par les modules M2M en termes de délai de transmission. De plus, les modules M2M qui ont une mauvaise qualité au niveau du canal de transmission ont peu de chance d'avoir des ressources radio afin de transmettre leurs paquets.

Pour remédier à ces problèmes, j'ai proposé une deuxième technique d'allocation de ressources radio en voie montante qui prend en compte la coexistence des modules M2M et H2H. Cet ordonnanceur, appelé Recursive Maximum Expansion Modified (RME-M), consiste à allouer en premier temps les ressources radio aux modules H2H en cherchant à chaque fois le module ayant la meilleure valeur de la métrique dans la matrice d'association H2H-RB. Le reste

des ressources radio est alloué aux modules M2M. On commence par vérifier le délai d'attente pour chaque application M2M. Les applications qui ont atteint leur délai maximal de transmission, seront prioritaires et le maximum de ressources radio leur seront alloué afin de transmettre leurs paquets de données. Le reste des ressources radio est alloué aux applications M2M dont les délais de transmission sont supérieurs au délai maximal autorisé. Pour ce faire, on recherche le module M2M ayant la meilleure valeur de la métrique dans la table d'association M2M-RB. Pour le module M2M sélectionné, on lui alloue les ressources radio adjacentes qui ont la meilleure qualité du canal de transmission. Cet ordonnanceur permet, en plus de réduire la consommation énergétique en réduisant la puissance de transmission de 5dBm et de diminuer la perte des paquets de données due au non-respect du délai de transmission.

6.2 Perspectives

Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude ouvrent différentes perspectives dont certaines sont présentées ci-dessous.

- **Autres critères d'ordonnancement**

Dans ce manuscrit, j'ai proposé un algorithme d'ordonnancement pour les modules M2M qui prend en compte la contrainte de délai lors de l'allocation des ressources radio. Il serait intéressant de combiner plusieurs qualités de services tel que le débit, le délai, la consommation énergétique lors de l'allocation dynamique de ressources radio.

- **Les technologies LTE-M et NB-IoT**

Bien que cette thèse s'appuie sur les systèmes 4G comme cas d'application, les contributions proposées peuvent être appliquées à d'autres technologies de communication. Notamment les technologies LTE-M (LTE for Machines) et NB-IoT (Narrowband Internet of Thing). Ces nouvelles technologies qui sont parus en Mai 2016 lors de la release 13, sont des dérivées de la 4G et utilisent l'infrastructure du réseau LTE. Elles ont été conçues pour répondre aux exigences des modules M2M.

- **La technologie 5G**

La technologie 5G est la nouvelle génération des réseaux cellulaires. La principale évolution par rapport à la 4G (LTE) et la 4.5G (LTE Advanced) d'aujourd'hui est qu'au-delà de l'amélioration de la vitesse de transmission des données, la technologie 5G promet d'apporter le niveau de performance nécessaire pour les modules M2M de masse.

Malgré son nom, la 5G n'est pas une amélioration des normes précédentes de télécommunication. Il s'agit plutôt d'une innovation de rupture. Parmi les différences avec les générations précédentes, on peut citer :

- l'utilisation de plusieurs bandes de fréquence, situées entre 6GHz et 300GHz, pour envoyer les données. Plus les fréquences sont hautes, plus les débits sont élevés mais la portée du signal est réduite et plus les fréquences sont basses, plus la portée du signal est élevée mais les débits de données sont moindres. Ce qui permet à satisfaire les exigences de plusieurs types d'applications.
- le déploiement d'une nouvelle génération d'antennes intelligentes; dans les technologies précédentes (1G à 4G), les antennes émettent des signaux qui se propagent à 360°, dans tous les sens. La technologie 5G, quant à elle, possède un certain nombre de petites antennes qui pointent vers différentes directions.
- une nouvelle architecture : à cause du nombre élevé de modules qui peuvent être connectés et des différentes QoS des applications qui sont diverses, l'architecture de la technologie 5G se différcie des architectures des générations précédentes. En effet, la technologie 5G se caractérise par la séparation des fonctions du plan usager de celles du plan contrôle ce qui permet une scalabilité, une évolution et un déploiement flexibles.

Alors, une étude approfondie de la technologie 5G et ses nouvelles performances sera primordiale afin d'adapter les solutions proposées dans ce manuscrit à cette nouvelle technologie.

Bibliographie

[1] iQsim, « Accueil », *iQsim*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.iqsim.com.

[2] M. Chen, « Machine-to-Machine Communications: Architectures, Standards and Applications », *KSII Trans. Internet Inf. Syst.*, 2012.

[3] D. S. Watson, M. A. Piette, O. Sezgen, N. Motegi, et L. ten Hope, « Machine to machine (M2M) technology in demand responsive commercial buildings », *Lawrence Berkeley Natl. Lab.*, août 2004.

[4] Statista, « IoT: number of connected devices worldwide 2012-2025 », *Statista*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.statista.com.

[5] Cisco, « Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022 White Paper », *Cisco*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.cisco.com.

[6] 3GPP TS 22.368, « Service requirements for Machine-Type Communications (MTC) », 2017.

[7] Y. Mehmood, C. Görg, M. Muehleisen, et A. Timm-Giel, « Mobile M2M communication architectures, upcoming challenges, applications, and future directions », *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2015, nº 1, déc. 2015.

[8] Rongduo Liu, Wei Wu, Hao Zhu, et Dacheng Yang, « M2M-Oriented QoS Categorization in Cellular Network », *Wirel. Commun. Netw. Mob. Comput. WiCOM Chine*, oct. 2011.

[9] M. Robert et P. R. Patil, « A Survey of Idle State Optimizations to Improve Power Saving for M2M Communication over LTE Networks », *Int. J. Sci. Res. Dev.*, vol. 2, nº 10, p. 413‑417, janv. 2015.

[10] L. A. M. R. de Temino, G. Berardinelli, S. Frattasi, et P. Mogensen, « Channel-aware scheduling algorithms for SC-FDMA in LTE uplink », in *2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2008, p. 1‑6.

[11] Bo Hyun Kim, Hyeong-Joon Ahn, Jin Oh Kim, Myungsik Yoo, KyuJung Cho, et DongSoo Choi, « Application of M2M technology to manufacturing systems », 2010, p. 519‑520.

[12] Ægis Systems Limited, « M2M application characteristics and their implications for spectrum », mai-2014.

[13] D. H. Kim, J. Y. Song, et S. K. Cha, « Introduction of case study for M2M intelligent machine tools », in *IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing*, 2009, p. 408‑411.

[14] Huasen Wu, Chenxi Zhu, Richard J. La, Xin Liu, et Youguang Zhang, « Fast Adaptive S-ALOHA Scheme for Event-Driven Machine-to-Machine Communications », *IEEE Veh. Technol. Conf.*, sept. 2012.

[15] A. Laya, L. Alonso, et J. Alonso-Zarate, « Is the Random Access Channel of LTE and LTE-A Suitable for M2M Communications? A Survey of Alternatives », *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 16, nº 1, p. 4‑16, déc. 2013.

[16] Shao-Yu Lien, Kwang-Cheng Chen, et Yonghua Lin, « Toward ubiquitous massive accesses in 3GPP machine-to-machine communications - IEEE Journals & Magazine », *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, nº 4, avr. 2011.

[17] ETSI TS 102 690 - V1.1.1, « Machine-to-Machine communications (M2M); Functional architecture », oct. 2011.

[18] P. K. Verma *et al.*, « Machine-to-Machine (M2M) communications: A survey », *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 66, p. 83‑105, mai 2016.

[19] Q. Song, L. Nuaymi, et X. Lagrange, « Survey of radio resource management issues and proposals for energy-efficient cellular networks that will cover billions of machines », *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2016, nº 1, déc. 2016.
[20] OECD, « Machine-to-Machine Communications: Connecting Billions of Devices », OECD Digital Economy Papers 192, janv. 2012.
[21] RUDN University, « Mathematicians model 5G mobile communications of the future », *Phys Org*, oct. 2017.
[22] K. Zheng, F. Hu, W. Wang, W. Xiang, et M. Dohler, « Radio resource allocation in LTE-advanced cellular networks with M2M communications », *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, nº 7, p. 184‑192, juill. 2012.
[23] L. M. Borges, F. J. Velez, et A. S. Lebres, « Survey on the Characterization and Classification of Wireless Sensor Network Applications », *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 16, nº 4, p. 1860‑1890, avr. 2014.
[24] J. M. Costa et G. Miao, « Context-aware Machine-to-Machine communications », in *2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2014, p. 730‑735.
[25] J. N. Al-Karaki et A. E. Kamal, « Routing techniques in wireless sensor networks: a survey », *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 11, nº 6, p. 6‑28, déc. 2004.
[26] C. Anton-Haro et M. Dohler, *Machine-to-Machine (M2M) Communications: Architecture, Performance and Applications*, 1st éd. Woodhead Publishing, Limited, 2015.
[27] Inov360, « Réseaux SIM-less, le nouvel eldorado du M2M et de l'Internet des Objets », *Inov360*, 27-janv-2014. [En ligne]. Disponible sur: https://www.inov360.com/reseaux-sim-less-le-nouvel-eldorado-du-m2m-et-de-linternet-des-objets-2/.
[28] Y. Zhang, R. Yu, S. Xie, W. Yao, Y. Xiao, et M. Guizani, « Home M2M networks: Architectures, standards, and QoS improvement », *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, nº 4, p. 44‑52, avr. 2011.
[29] J. Lee, Y. Su, et C. Shen, « A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi », in *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2007, p. 46‑51.
[30] Aloÿs Augustin, Jiazi Yi, Thomas Clausen, et William Mark Townsley, « A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things », *Sens. 2016*, sept. 2016.
[31] Sigfox, « The Global Communications Service Provider for the Internet of Things (IoT) ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.sigfox.com.
[32] « LoRa Alliance ». [En ligne]. Disponible sur: https://lora-alliance.org/.
[33] Toshiki Hayashi, « Evolved Packet Core (EPC) Network Equipment for Long Term Evolution (LTE) », *Sci Tech*, vol. 48, nº 1, p. 17‑20, janv. 2012.
[34] 3GPP TS 23.002, « Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Network architecture », mars 2016.
[35] 3GPP TS 23.401, « LTE; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access », mars 2016.
[36] F. Firmin, « The Evolved Packet Core ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.3gpp.org/.
[37] Stefania Sesia, Issam Toufik, et Matthew Baker, *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Wiley, 2009.
[38] R. Nossenson, « Long-term evolution network architecture », in *2009 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems*, 2009, p. 1‑4.

[39] 3 GPP TS 36.300, « Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) », V13.2.0, janv. 2016.
[40] Yannick Bouguen, Eric Harduoin, Alain Maloberti, et François-Xavier Wolff, *LTE et les réseaux 4G*. 2012.
[41] Alcatel Lucent, « The LTE Network Architecture ».
[42] 3GPP TS 24.301, « Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS); Stage 3 ».
[43] 3GPP TS 36.201, « Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE physical layer; General description . », mars 2016.
[44] 3GPP TS 36.321, « Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification », avr. 2016.
[45] 3GPP TS 36.322, « Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification », mars-2016. .
[46] 3GPP TS 36.323, « Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification », avr. 2016.
[47] 3GPP TS 36.331, « Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification », avr. 2016.
[48] Frédéric Launay, « Bearer EPS ». [En ligne]. Disponible sur: http://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/2015/05/08/bearer-eps/.
[49] Assia Mounir, Anas Bennani, Anouar Loukil, Hasnae Guennouni, et Yasser Khamilichi, « 3GPP Long Term Evolution ». .
[50] 3 GPP TS 136.213, « Physical layer procedures », 2016.
[51] J. Huang, F. Qian, A. Gerber, Z. M. Mao, S. Sen, et O. Spatscheck, « A close examination of performance and power characteristics of 4G LTE networks », *MobiSys 12 Proc. 10th Int. Conf. Mob. Syst. Appl. Serv.*, p. 225‑238, 2012.
[52] AT&T, « Comparing LTE and 3G Energy Consumption ». [En ligne]. Disponible sur: https://developer.att.com/video-optimizer/docs/best-practices/comparing-lte-and-3g-energy-consumption.
[53] T. Tirronen, A. Larmo, J. Sachs, B. Lindoff, et N. Wiberg, « Machine-to-machine communication with long-term evolution with reduced device energy consumption », *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 24, nº 4, p. 413‑426, juin 2013.
[54] A. R. Jensen, M. Lauridsen, P. Mogensen, T. B. Sørensen, et P. Jensen, « LTE UE Power Consumption Model: For System Level Energy and Performance Optimization », in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2012, p. 1‑5.
[55] Suresh Krishnan, « Connecting sensors to LTE ».
[56] M. Lauridsen, P. Mogensen, et L. Noel, « Empirical LTE Smartphone Power Model with DRX Operation for System Level Simulations », 2013, p. 1‑6.
[57] James Birchall, Kevin Morris, et Mark Beach, « M2M communications over LTE - evaluating energy consumption models », *Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf.*, juin 2017.
[58] Mads Lauridsen, « Power-Consumption Measurements for LTE User Equipment », 2014.
[59] B. Dusza, C. Ide, et C. Wietfeld, « Utilizing unused network capacity for battery lifetime extension of LTE devices », in *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Ottawa, ON, Canada, 2012, p. 6298‑6302.
[60] Frédéric Launay, « Mécanisme DRX en mode connecté et en mode idle. Extension à l'eDRX et au PSM ». [En ligne]. Disponible sur: http://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/2016/11/04/paging-et-mecanisme-psmdrx/.

[61] T. Tirronen, A. Larmo, J. Sachs, B. Lindoff, et N. Wiberg, « Reducing Energy Consumption of LTE Devices for Machine-to-Machine Communication », *Globecom Workshop GC Wkshps 2012 IEEE*, p. 1650‑1656, déc. 2012.
[62] 3GPP TR 36.331, « Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 13) », mars-2016. .
[63] 3GPP TR 36.321, « Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) Protocol Specification (release 13) », déc-2015. .
[64] « All about Wired and Wireless Technology ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.simpletechpost.com/2015/.
[65] S. C. Jha, A. T. Koc, et R. Vannithamby, « Device power saving mechanisms for low cost MTC over LTE networks », in *2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, 2014, p. 412‑417.
[66] S. C. Jha, A. T. Koc, M. Gupta, et R. Vannithamby, « Power Saving mechanisms for M2M communication over LTE networks », présenté à First International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 2013, p. 102‑106.
[67] L. Tang, H. Y. Shi, et Q. B. Chen, « Self-adaptive power saving mechanism for M2M », présenté à Wireless, Mobile and Multimedia Networks (ICWMMN 2013), 5th IET International Conference on, 258apr. J.-C., p. 18‑23.
[68] Jia-Ming Liang, Jen-Jee Chen, Hung-Hsin Cheng, et Yu-Chee Tseng, « An Energy-Efficient Sleep Scheduling With QoS Consideration in 3GPP LTE-Advanced Networks for Internet of Things », *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, vol. 3, nº 1, mars 2013.
[69] Shyamal Ramachandran, « System and method of improving standby time in m2m devices », WO2014026106 A1, 13-févr-2014.
[70] M. A. Mehaseb, Y. Gadallah, et A. Elhamy, « Classification of LTE Uplink Scheduling Techniques: An M2M Perspective », *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 18, nº 2, p. 1310‑1335, nov. 2015.
[71] F. Ghandour, M. Frikha, et S. Tabbane, « A fair and power saving uplink scheduling scheme for 3GPP LTE systems », in *2011 International Conference on the Network of the Future*, 2011, p. 6‑9.
[72] 3GPP GP-100892, « RACH Capacity Evaluation for MTC », *TSG GERAN 46*, 2010.
[73] K. Zheng, S. Ou, J. Alonso-Zarate, M. Dohler, F. Liu, et H. Zhu, « Challenges of massive access in highly dense LTE-advanced networks with machine-to-machine communications », *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 21, nº 3, p. 12‑18, juin 2014.
[74] Bhaskara V. Batchu et Sharad Shahi, « Power consumption improvement for certain M2M devices », U.S. Patent 8874164 B2, oct-2014.
[75] Y. Jeong, M. Kim, M. Y. Chung, T.-J. Lee, et H. Choo, « Frequency-Domain Packet Scheduling for Low PAPR in 3 GPP LTE Uplink », *Int. J. Smart Home*, vol. 7, janv. 2013.
[76] R. Huang, H. Li, et S. Mohanty, « Reducing power consumption for m2m communications in wireless networks », EP2684302A2, 15-janv-2014.
[77] A. Aijaz et A. H. Aghvami, « On Radio Resource Allocation in LTE Networks with Machine-to-Machine Communications », in *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2013, p. 1‑5.
[78] M. Ouaissa et A. Rhattoy, « QoS hybrid uplink scheduler based on service type for M2M communications in LTE networks », *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 14, nº 3, p. 1460, juin 2019.
[79] Ahmed Elhamy et Yasser Gadallah, « BAT: A Balanced Alternating Technique for M2M Uplink Scheduling over LTE - IEEE Conference Publication », in *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Glasgow, UK, 2015.

[80] J. Brown et J. Y. Khan, « A Predictive Resource Allocation Algorithm in the LTE Uplink for Event Based M2M Applications », *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 14, nº 12, p. 2433‑2446, déc. 2015.
[81] Sergey Andreev *et al.*, « Efficient small data access for machine-type communications in LTE », *IEEE Int. Conf. Commun. ICC*, nov. 2013.
[82] A. Azari et G. Miao, « Energy efficient MAC for cellular-based M2M communications », in *2014 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, 2014, p. 128‑132.
[83] « Riverbed ». [En ligne]. Disponible sur: http://fr.riverbed.com.
[84] « ns-3 ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.nsnam.org/.
[85] G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, F. Capozzi, et P. Camarda, « Simulating LTE Cellular Systems: An Open-Source Framework », *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, nº 2, p. 498‑513, févr. 2011.
[86] Sergio Herrerìa-Alonso, « LteSimulator: a Java simulator for LTE traffic », *GitHub*, févr-2015. [En ligne]. Disponible sur: https://github.com/sherreria/LteSimulator.
[87] 3GPP TS 36.888, « Study on provision of low-cost Machine-Type Communications (MTC) User Equipments (UEs) based on LTE ».
[88] N. Nikaein *et al.*, « Simple Traffic Modeling Framework for Machine Type Communication », in *ISWCS 2013; The Tenth International Symposium on Wireless Communication Systems*, 2013, p. 1‑5.
[89] K. Taleb, S. B. Rejeb, N. Agoulmine, et Z. Choukair, « A Novel RACH Mechanism for Massive Access of Differentiated M2M Services in 5G/HetNets », in *5th International Workshop on ADVANCEs in ICT Infrastructures and Services (ADVANCE 2017)*, Evry, France, 2017.
[90] 3GPP, « TR 37.868 Study on RAN Improvements for Machine-type Communications ». .
[91] Junxian Huang, Feng Qian, Alexandre Gerber, Z. Morley Mao, Subhabrata Sen, et Oliver Spatscheck, « A Close Examination of Performance and Power Characteristics of 4G LTE Networks ».
[92] LTE University, « RRC connection Release ». .
[93] M. Kalil, A. Shami, et A. Al-Dweik, « QoS-Aware Power-Efficient Scheduler for LTE Uplink », *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 14, nº 8, p. 1672‑1685, août 2015.
[94] 3GPP TS 36.306, « Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities ». .
[95] S.- Lee, I. Pefkianakis, A. Meyerson, S. Xu, et S. Lu, « Proportional Fair Frequency-Domain Packet Scheduling for 3GPP LTE Uplink », in *IEEE INFOCOM 2009*, 2009, p. 2611‑2615.
[96] A. Hassebo, M. Obidat, et M. Ali, « Four LTE uplink scheduling algorithms performance metrics: Delay, throughput, and fairness tradeoff », in *2017 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, Bilbao, 2017, p. 300‑305.
[97] S. Bt Ismail, D. Bt Mohd Ali, et N. Ya'acob, « Performance Analysis of Uplink Scheduling Algorithms in LTE Networks », *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 9, nº 2, p. 373, févr. 2018.
[98] M. D. Abrignani, L. Giupponi, A. Lodi, et R. Verdone, « Scheduling M2M traffic over LTE uplink of a dense small cell network », *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2018, nº 1, déc. 2018.
[99] R. Khdhir, K. Mnif, L. Kamoun, et L. Nuaymi, « New scheduling algorithm for Uplink LTE system », in *The 2014 International Symposium on Networks, Computers and Communications*, Hammamet, Tunisia, 2014, p. 1‑5.

[100] R. D. Trivedi et M. C. Patel, « Comparison of Different Scheduling Algorithm for LTE », 2014.

[101] T. Pötsch, S. N. K. K. Marwat, Y. Zaki, et C. Gorg, « Influence of future M2M communication on the LTE system », in *6th Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, 2013, p. 1‑4.

[102] M. Salah, N. A. Ali, A.-E. Taha, et H. Hassanein, « Evaluating Uplink Schedulers in LTE in Mixed Traffic Environments », in *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kyoto, Japan, 2011, p. 1‑5.

[103] 3GPP, « Analysis on Traffic Model and Characteristics for mtc and Text Proposal », : Dresden, Saxony, Germany, 2012.

[104] A. M. Maia, D. Vieira, M. F. de Castro, et Y. Ghamri-Doudane, « Comparative performance study of LTE uplink schedulers for M2M communication », in *2014 IFIP Wireless Days (WD)*, 2014, p. 1‑4.

[105] M. Lauridsen, A. R. Jensen, et P. Mogensen, « Reducing LTE Uplink Transmission Energy by Allocating Resources », in *2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2011, p. 1‑5.

[106] Grigol Basilashvili, « Study of Spectral Efficiency for LTE Network », *Am. Sci. Res. J. Eng. Technol. Sci. ASRJETS*, vol. 29, nº 1, p. 21‑32, mars 2017.