



HAL
open science

Performances des réseaux NB-IoT terrestres et satellites

Romain Barbau

► **To cite this version:**

Romain Barbau. Performances des réseaux NB-IoT terrestres et satellites. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2022. Français. NNT : 2022INPT0008 . tel-04190295

HAL Id: tel-04190295

<https://theses.hal.science/tel-04190295>

Submitted on 29 Aug 2023

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
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Informatique et Télécommunication

Présentée et soutenue par :

M. ROMAIN BARBAU

le mardi 22 février 2022

Titre :

Performances des réseaux NB-IoT terrestres et satellites

Ecole doctorale :

Mathématiques, Informatique, Télécommunications de Toulouse (MITT)

Unité de recherche :

Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT)

Directeur(s) de Thèse :

M. ANDRÉ-LUC BEYLOT

M. GENTIAN JAKLLARI

Rapporteurs :

M. FABRICE VALOIS, INSA LYON

M. THOMAS NOEL, UNIVERSITE DE STRASBOURG

Membre(s) du jury :

MME VÉRONIQUE VÈQUE, CENTRALESUPELEC GIF SUR YVETTE, Président

M. ANDRÉ-LUC BEYLOT, TOULOUSE INP, Membre

M. FRANCK ROUSSEAU, INP GRENOBLE, Membre

M. GENTIAN JAKLLARI, TOULOUSE INP, Membre

MME REJANE DALCE, INSTITUT NATIONAL UNIV. CHAMPOLLION, Membre

M. VINCENT DESLANDES, AIRBUS DEFENCE AND SPACE, Membre

"Nous sommes comme des nains assis sur des épaules de géants. Si nous voyons plus de choses et plus lointaines qu'eux, ce n'est pas à cause de la perspicacité de notre vue, ni de notre grandeur, c'est parce que nous sommes élevés par eux."

La reconnaissance de la dimension cumulative du Savoir par le maître Bernard de Chartres (XII^{ème} siècle), reprise par Isaac Newton et plus récemment par la doctrine de Google Scholar.

Mon travail est une pierre ajoutée à l'édifice scientifique sur lequel mon travail repose.
J'espère que mes contributions serviront à leur tour à l'élaboration de futures recherches.

Il ne faut jamais se laisser abattre
John F. Kennedy

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je souhaite remercier profondément mon directeur de thèse, le Professeur André-Luc Beylot, son encadrement de main de maître m'a permis d'arriver là où j'en suis aujourd'hui. Après avoir assisté à mes débuts en école d'ingénieur et remarqué mon "regard vif", il m'a orienté vers le doctorat alors que je me délectais de l'ambiance chaleureuse du Temple Bar à Dublin. Sa dévotion, sa persévérance et son implication ont rendu cette aventure exaltante et fructueuse. Un doctorat est une aventure technique mais également humaine et le soutien d'André-Luc sur les aspects techniques n'a d'égal que celui apporté moralement. Merci.

Je souhaite également remercier mon co-directeur de thèse, le Professeur Gentian Jakllari. Son expérience des grandes instances scientifiques et des attentes de la communauté ont permis de faire rayonner mon travail dans de nombreuses conférences internationales. Il a été crucial dans la formulation des idées et des résultats.

Mes remerciements vont ensuite à l'ensemble des membres du jury pour le temps passé à l'analyse de cette thèse et pour avoir été présents à ma soutenance. La qualité et la pertinence de leurs remarques et questions ont démontré leur intérêt pour ce travail et y ont apporté un éclairage fort enrichissant. Rien ne pouvait me faire plus plaisir. En particulier, je remercie Thomas Noël et Fabrice Valois d'avoir relu avec attention mon manuscrit. Merci à Véronique Vèque, Réjane Dalcé et Franck Rousseau d'avoir apporté leur expertise à mes travaux. Ce fut un honneur.

Ensuite, je souhaite remercier chaleureusement mes collègues d'Airbus Defence and Space, en commençant par mon co-directeur du monde industriel le Docteur Vincent Deslandes qui est l'instigateur de ce sujet et la personne avec qui j'ai le plus échangé au cours de ces trois dernières années. Nos conversations, autant sur le plan technique que sur le plan humain, ont permis de forger la personne que je suis aujourd'hui : "le fruit de la thèse est davantage le docteur que les contributions scientifiques" m'a-t-il souvent répété. Je tiens également à remercier Jérôme Tronc, mon presque co-directeur dont l'expertise sur les systèmes satellitaires n'est plus à démontrer. Il a su apporter un regard intéressant sur mes travaux et me faire sortir d'impasses, merci. Parmi les collègues qui ont également contribué à rendre mon aventure agréable, je peux citer la flopée de docteurs ayant traversé la même mer tumultueuse que représente le doctorat : Michaël, Jean-Gabriel, Hugo, Lyonel et Charles-Ugo. Je remercie chaleureusement ces collègues qui sont devenus mes amis : Maxime, Alexandre, Cédric et Neus. Tous ont joué un rôle dans l'élaboration de mon travail, à l'instar de Jean-Frédéric qui est co-auteur d'une de nos contributions.

Je ne peux pas oublier de remercier mes collègues du laboratoire de l'IRIT à l'ENSEEIH. À commencer par Dorin, qui fut d'abord mon encadrant de TP, puis mon ami et enfin mon collègue. Son temps d'avance m'a permis d'appréhender sereinement mon doctorat. Il y a aussi les doctorants, bientôt docteurs, avec qui j'ai partagé mon bureau Justin et Youssouf, merci pour votre soutien et votre amitié et bon courage pour la fin. Je remercie tous mes collègues doctorants Firmin, Kevin, Adrien, Mohamed, Amal et Édouard avec qui j'ai passé de précieux moments. J'ai une pensée pour Pierre-Julien avec qui je partage mes tourments depuis nos classes préparatoires à Bordeaux. Merci également aux permanents pour vos conseils : Julien, Riadh, Emmanuel, Katia et Béatrice.

Pour finir, je souhaite remercier mes proches qui ont su me soutenir et m'offrir une vie personnelle au moins aussi épanouie que son pendant professionnel. Merci à Pascal, qui a su démontrer chaque jour que l'amitié à distance était possible. Bien évidemment, merci à ma copine qui m'a supporté à chaque instant et particulièrement lors de la préparation à la soutenance. Enfin, un grand merci à ma famille et en particulier à mes chers parents et à ma chère soeur, qui ont tout mis en oeuvre pour que je réussisse et dont la présence notamment le jour de ma soutenance m'a procuré des émotions intenses - le meilleur jour de ma vie jusqu'ici.

Merci.

RÉSUMÉ

Le paradigme de l'Internet des Objets – Internet of Things (IoT) – permet à des capteurs de transmettre directement leurs données au travers des réseaux de communication. Ces communications viennent s'ajouter aux communications traditionnelles du monde des réseaux mobiles et sans fil mais avec quelques spécificités : le nombre d'équipements connectés est colossal (plusieurs dizaines de milliards d'ores et déjà), le volume de données envoyé par terminal est le plus souvent très faible, les équipements sont peu puissants et ont des contraintes en énergie particulièrement fortes. Plusieurs technologies candidates ont vu le jour parmi lesquelles celles des réseaux à faible puissance et à longue portée (LPWAN). Dans cette famille, nous nous sommes plus particulièrement focalisés sur le NarrowBand IoT (NB-IoT) issu des standards 3GPP. Nous nous sommes attachés à en analyser les performances à la fois dans le cadre de communications terrestres mais aussi dans un contexte satellitaire. Nous nous sommes focalisés sur deux critères de performance clefs de ces réseaux : la capacité en termes de terminaux par km^2 et la durée de vie des terminaux sur batterie. Nous avons développé des modèles analytiques de l'utilisation des ressources temps/fréquence en se fondant sur la théorie des files d'attente. Ils ont été étendus pour analyser consommation énergétique des communications NB-IoT. Nous avons ainsi pu évaluer la capacité et la durée de vie des terminaux dans le cadre de cellules terrestres et de cellules satellite. Pour le cas satellite, nous détaillons les adaptations nécessaires au bon fonctionnement du protocole et leur impact sur les performances des réseaux NB-IoT. Nos travaux de recherche ont montré qu'une partie des attentes vis-à-vis du NB-IoT pouvait être remplie pour les futurs réseaux 5G et ont mis en lumière des axes d'améliorations (avec des propositions de solution).

ABSTRACT

The Internet of Things (IoT) paradigm allows sensors to transmit their data directly through communication networks. These communications are in addition to the traditional communications of the mobile and wireless network world, but with a few specific features : the number of connected devices is colossal (several tens of billions already), the volume of data sent per terminal is usually very low, and the devices are not very powerful and have particularly strong energy constraints. Several candidate technologies have emerged, including low-power, long-range networks (LPWAN). Within this family, we have focused more particularly on NarrowBand IoT (NB-IoT), which is based on 3GPP standards. We have analysed its performance both in the context of terrestrial communications and in a satellite context. We focused on two key performance criteria of these networks : the capacity in terms of terminals per km² and the battery life of terminals. We have developed analytical models of time/frequency resource utilisation based on queuing theory. These were extended to analyse energy consumption of NB-IoT communications. This allowed us to evaluate the capacity and lifetime of terminals in the context of terrestrial and satellite cells. For the satellite case, we detail the adaptations required for the protocol to work properly and their impact on the performance of NB-IoT networks. Our research has shown that some of the expectations of NB-IoT can be fulfilled for future 5G networks and has highlighted areas for improvement (with proposed solutions). This thesis introduces a novel framework which can form the basis of future work on the performance evaluation of NB-IoT networks.

TABLE DES MATIÈRES

Table des figures	xvii
Liste des tableaux	xxi
Acronymes	xxiii
1 Introduction	1
2 État de l'art	7
2.1 L'Internet des Objets - Internet of Things (IoT)	7
2.1.1 Concept et ambition	7
2.1.2 Défis	8
2.1.3 Applications	8
2.2 Technologies de communication IoT cellulaires terrestres	10
2.2.1 Bandes sous licence	10
2.2.2 Bandes libres - sans licence	14
2.3 Systèmes de communication IoT par satellite	16
2.3.1 Prélude sur les types d'utilisation du satellite	16
2.3.2 Systèmes Géostationnaires - GEO	18
2.3.3 Systèmes en orbite basse - LEO	19
2.3.4 <i>New Space</i> et nanosatellites	20
2.3.5 Initiatives NarrowBand Internet of Things (NB-IoT) par satellite	21
3 Fonctionnement du NB-IoT	23
3.1 Directives de conception	23
3.1.1 Faible complexité / Faible coût	23
3.1.2 Efficacité énergétique / Durée de vie	24
3.1.3 Couverture	24
3.1.4 Capacité / Densité	25
3.1.5 Flexibilité de déploiement	25
3.2 Couches protocolaires supérieures	26
3.3 Couche PHY - Architecture des canaux	28
3.3.1 Voix descendante - Downlink (DL)	29
3.3.2 Voix montante - Uplink (UL)	32

3.4	Couche MAC - Procédures en mode repos et en mode connecté	35
3.4.1	Procédures en mode repos	35
3.4.2	Procédures en mode connecté	39
3.5	Performances du NB-IoT	42
3.6	Nos contributions sur l'étude des performances du NB-IoT	45
4	Modélisation de l'utilisation des ressources dans le NB-IoT	47
4.1	Vue d'ensemble	47
4.1.1	Positionnement et motivation	47
4.1.2	Vue d'ensemble sur le modèle d'évaluation de l'utilisation des ressources	48
4.2	Canal avec accès aléatoire	49
4.3	Canaux avec allocation de ressources	51
4.3.1	Taux d'impatience des files M/D/1/PS	52
4.3.2	Taux de congestion des files M/D/H/K	58
4.4	Détermination du nombre de tentatives et de la probabilité d'échec globale . .	63
4.4.1	Comparaison et discussion sur les modèles	64
4.5	Évaluation des performances - Capacité du NB-IoT	66
4.5.1	Définition des cellules et de la capacité	66
4.5.2	Effets des paramètres de configuration du standard	70
4.5.3	Enseignements et recommandations sur le paramétrage du NB-IoT . .	77
5	Modélisation de la consommation d'énergie dans le NB-IoT	79
5.1	Cas nominal - terminal seul dans la cellule	79
5.2	Modélisation de l'effet de la charge sur la consommation d'énergie	81
5.2.1	Motivation	81
5.2.2	Détermination des temps d'allocation	83
5.3	Calcul de la durée de vie de la batterie	87
5.4	Évaluation de performance	87
5.4.1	Méthodologie, paramétrage et validation	87
5.4.2	Étude de la durée de vie de la batterie – Cas nominal	89
5.4.3	Étude de la durée de vie de la batterie – Cas avec de la charge	90
5.5	Proposition d'une solution	93
5.5.1	Configuration du canal de contrôle et consommation d'énergie à charge élevée	93
5.5.2	Notre solution pour réduire la d'énergie lorsque la charge élevée	94
6	Impact du contexte satellite	97
6.1	Capacité des cellules dans un cadre satellitaire	97
6.1.1	Problème : taille des cellules dans un contexte satellite	98
6.1.2	Solution : Temps de garde	99
6.1.3	Impact sur la capacité des cellules	101
6.2	Durée de vie d'un terminal NB-IoT dans un contexte satellite	102

6.2.1	Problème : glissement Doppler	102
6.2.2	Solution : Positionnement GNSS	102
6.2.3	Impact sur la durée de vie des terminaux	102
6.3	Débit couche Media Access Control (MAC) envisageable pour des communi- cations par satellite	103
6.3.1	Problème : délai de propagation	103
6.3.2	Étude du changement du Block Error Rate (BLER)	104
7	Étude de systèmes satellite pour les communications NB-IoT	109
7.1	Définition des <i>scenarii</i> systèmes satellitaires	109
7.2	Performances des cellules	111
7.2.1	Performances physiques des cellules	111
7.2.2	Débit et débit agrégé couche MAC des cellules	113
7.2.3	Capacité moyenne par cellule/satellite	118
7.2.4	Durée de vie d'un terminal	118
7.3	Comparaison des constellations de satellites	119
7.3.1	Méthodologie de passage à l'échelle du globe	119
7.3.2	Étude du coût par terminal	120
7.4	Conclusion sur les systèmes de communication NB-IoT par satellite	122
	Conclusion et Perspectives	123
	Bibliographie	129
	Annexe A L'Effet Doppler	139
	Annexe B Bande étroite et capacité d'un canal	141
	Annexe C Processus Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ)	143
	Annexe D Maximum Coupling Loss (MCL)	145
	Annexe E Signal to Noise plus Interference Ratio (SINR) des cellules terrestres et BLER	147
	Annexe F Taille des communications – modèle M/D/1/PS	149
	Annexe G Angle d'élévation dans le contexte satellite	151
	Annexe H Courbes BLER UL et DL pour le NB-IoT	153
	Annexe I Tailles des Transport Blocks (TB)s DL et UL	155
	Annexe J Composition des Downlink Control Information (DCI) N0 et N1	157

TABLE DES FIGURES

1.1	Frise chronologique des technologies cellulaires Wide Area Network (WAN) utilisées pour les services IoT.	3
1.2	Positionnement des solutions de communications vis-à-vis de l'IoT	4
2.1	Vue macroscopique du découpage (slicing) des technologies 5G.	14
2.2	Illustration des trois types de communications par satellite considérées par le Third Generation Partnership Project (3GPP) dans la standardisation des Non-Terrestrial Networks (NTN)s	18
2.3	Illustration des orbites Geostationary Earth Orbit (GEO) et Low Earth Orbit (LEO), et de leurs couvertures.	20
3.1	Déploiement en mode Stand-alone de porteuses NB-IoT	26
3.2	Déploiement NB-IoT en mode In-band et Guard-band	26
3.3	Pile protocolaire du NB-IoT pour les plans Usager et Contrôle dans le cadre d'un réseau 4G.	27
3.4	Les différents types de communication NB-IoT d'un point de vue cœur de réseau.	28
3.5	Forme des symboles dans le NB-IoT	29
3.6	Organisation des sous-trames NPDCCH selon les différents modes de déploiement.	31
3.7	Organisation de la trame DL du NB-IoT (trame paire). Chaque rectangle représente un symbole s_1	32
3.8	Exemple de préambules (une répétition) dans un RAO.	33
3.9	Exemple d'une trame UL avec différents Random Access Opportunities (RAO)s et un TB Narrowband Physical Uplink Shared Channel (NPUSCH) et les différentes formes de Resource Unit (RU)s	35
3.10	Illustration du fonctionnement du Discontinuous Reception (DRX) et de l'extended Discontinuous Reception (eDRX)	37
3.11	Illustration du fonctionnement du Power Saving Mode (PSM) lorsqu'aucune donnée n'est à transmettre au cours de l'intervalle PSM	37
3.12	Établissement de la connexion NB-IoT	39
3.13	Illustration des espaces de recherche dans le Narrowband Physical Downlink Control Channel (NPDCCH) dans le cas où $R_{max} = 4$, $\alpha = \frac{1}{8}$ et $G = 4$	40
3.14	Illustration des espaces de recherche dans le NPDCCH dans le cas où $R_{max} = 2$, $\alpha = \frac{1}{16}$ et $G = 8$	41

4.1	Positionnement de nos travaux	48
4.2	Schématisation du Modèle de l'utilisation des ressources dans le NB-IoT - Files d'attentes MD1-PS.	49
4.3	Fonctionnement d'une file d'attente M/D/1/PS.	54
4.4	Comparaison du fonctionnement des files d'attentes M/D/1/PS et M/D/H/K.	56
4.5	Comparaison du taux d'impatience des modèles avec une simulation de la file M/D/1/PS avec impatience. Taux de service fixe, égal à 50	57
4.6	Schématisation du Modèle sur l'utilisation des ressources dans le NB-IoT - Files d'attentes MDHK.	58
4.7	Zoom sur une des files de la Figure 4.6. Exemple de blocs rejetés à leur arrivée dans la file	60
4.8	Comparaison du taux d'impatience des modèles avec files M/D/1/PS (approximation) et M/D/H/K. Les paramètres de la file M/D/H/K sont $P=2$, $H=12$ et le nombre B_u de bloc à devoir être servis avec succès pour que la communication soit réussie est de 6.	64
4.9	Déploiement d'un réseau NB-IoT considéré par le 3GPP	67
4.10	Taux de congestion des déploiements cellulaire A et B.	69
4.11	Évolution de la capacité de la cellule (99% de fiabilité) en fonction de la charge utile. $G = 4$	70
4.12	Charge sur les canaux lorsque la cellule atteint sa capacité maximum d'utilisation (99% de fiabilité). En fonction de la taille de la charge utile, le manque de ressource ne survient pas sur le même canal. $G = 4$	71
4.13	Évolution de la capacité de la cellule (99% de fiabilité) en fonction de la charge utile. $G = 2$	72
4.14	Charge sur les canaux lorsque la cellule atteint sa capacité maximum d'utilisation (99% de fiabilité). $G = 2$	72
4.15	Comparaison de la séquence de messages des procédures User Plane Optimization (UPO) et UP-Early Data Transmission (EDT)	74
4.16	Évolution de la capacité de la cellule en fonction de la charge utile lorsqu'EDT est utilisé. $G = 2$	74
4.17	Charge sur les canaux lorsque la cellule atteint sa capacité maximale d'utilisation (99% de fiabilité). CP-EDT et cellule A.	75
4.18	Capacité des cellules en fonction du partage des ressources UL (canaux Narrowband Physical Random Access Channel (NPRACH) et NPUSCH). Cas 32 octets et CP-EDT.	77
5.1	Modèle de la consommation énergétique du NB-IoT sans charge - Terminal seul	80
5.2	Modèle de la consommation énergétique du NB-IoT prenant compte de la charge.	82
5.3	Visualisation du processus d'allocation - files M/D/H/K	84
5.4	Arbre des probabilités de la consommation énergétique d'un terminal lors d'une tentative de communication.	86
5.5	Débit utile et probabilité d'échec lorsque la charge de la cellule augmente. . .	91

5.6	Durée de vie de la batterie et débit utile en fonction de la charge de la cellule. Scénario de trafic : une communication UL de 200 octets tous les quarts d’heure avec procédure CP-EDT.	91
5.7	Répartition de la consommation d’énergie en fonction du scénario de la Figure 5.6. Les différentes composantes sont décrites dans le modèle en section 5.1	92
6.1	Les différents délais de propagation entre User Equipment (UE) et Base Station (BS) dans le contexte satellite.	99
6.2	Effet du délai différentiel sur les canaux UL	100
6.3	Impact du délai différentiel sur la trame UL	101
6.4	Processus HARQ sans erreur avec deux seuils BLER différents. L’augmentation de la robustesse ajoute une perte de temps automatique à chaque TB, en contrepartie, elle réduit la probabilité de retransmission. Par soucis de simplicité de représentation, nous avons utilisé la répétition plutôt que de changer le Modulation and Coding Schemes (MCS) du TB. Dans la pratique, les deux techniques peuvent être combinées.	104
6.5	Impact du BLER sur la communication en cas d’erreur sur le TB de l’UE dont la communication est la moins robuste.	105
6.6	Distribution du Signal to Noise Ratio (SNR) pour la liaison montante pour le cas GEO n°5 du 3GPP [32]. Les seuils et les indices de MCS sont indiqués pour un objectif BLER de 10^{-1} et une modulation <i>multi-tone</i> de 45 kHz. Les seuils ont été déduits des figures en Annexe H	106
6.7	Délai de communication entre la première tentative de connexion et les derniers octets de charge utile envoyés, en fonction de la charge utile et du type de cellule. Données tracées pour $BLER = 10^{-1}$	106
6.8	Délai de communication en fonction de la robustesse (traduite par le BLER) et de la charge utile. La configuration pour obtenir le délai le plus court est autour d’un BLER de 10^{-2} . Une valeur d’autant plus intéressante sachant que le BLER visé en déploiement terrestre est de 10^{-1}	107
6.9	Débit couche MAC des communications en fonction de la robustesse (traduite par le BLER) et de la charge utile.	108
7.1	Disposition des faisceaux dans notre cas GEO	111
7.2	Distribution du SNR pour le DL	112
7.3	Distribution du SNR pour l’UL	113
7.4	Différents types de débit	114
7.5	Distribution débits UL en fonction des <i>scenarii</i> et de la couverture	115
7.6	Distribution débits DL en fonction des <i>scenarii</i> et de la couverture	116
7.7	Débit agrégé moyen par faisceau en fonction des <i>scenarii</i> et du choix de la largeur de la bande de transmission	117
7.8	Durée de vie de la batterie des terminaux en fonction de leur couverture et du scénario.	119

7.9	Comparaison du coût de la communication en fonction de la demande.	121
E.1	Fonction de répartition des rapports signal à bruit plus interférences (SINR) des cellules terrestres – Voie montante (UL)	147
E.2	Fonction de répartition des rapports signal à bruit plus interférences (SINR) des cellules terrestres – Voie descendante (DL)	148
F.1	Procédure de communication pour une charge utile de 300 bits.	150
G.1	Illustration de l’angle d’élévation dans un contexte satellite.	151
H.1	Courbes du taux d’erreur d’un Transport Blocks (TB) UL en fonction des conditions de couverture (SNR). Le Modulation and Coding Schemes (MCS) varie de l’indice 0 à l’indice 10 (cas d’une transmission <i>single-tone</i>)	153
H.2	Courbes du taux d’erreur d’un Transport Blocks (TB) DL en fonction des conditions de couverture (SNR). Le schéma de modulation et de codage (MCS) varie de l’indice 0 à l’indice 12.	154

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Vue d'ensemble des objectifs de performance du segment mMTC dans le cadre de la 5G.	13
2.2	Comparaison des principales technologies de communications WAN.	17
2.3	Comparaison des principaux types de solutions de communication pouvant proposer des services IoT par satellite.	22
3.1	Détermination des sauts de fréquence dans un préambule.	33
3.2	Forme des RUs du NPUSCH.	35
4.1	Récapitulatif des variables utilisées dans les modèles	65
4.2	Récapitulatif des valeurs par défaut utilisées dans notre modèle	68
4.3	Comparaison entre les résultats de notre modèle et ceux décrits dans les rapports du 3GPP	69
4.4	Configuration des RAOs du NPRACH qui permettent d'obtenir les meilleures performances en termes de capacité.	77
4.5	Capacité des cellules A et B pour des communications CP-EDT. Les configurations des cellules sont adaptées grâce à notre modèle	78
5.1	Paramètres de la consommation énergétique d'après la Release 13 [105].	88
5.2	Comparaison de la durée de vie de la batterie - Cas nominal.	89
5.3	Durée de vie de la batterie en fonction des conditions de couverture et de la procédure de communication	90
5.4	Débit utile - λ_{Δ} - et durée de vie sur batterie - L - en fonction de la configuration G du canal de contrôle et de la probabilité d'échec (avec la charge $\lambda = \frac{\lambda_{\Delta}}{1-P_{\omega}}$)	93
5.5	Les résultats obtenus qui mettent en œuvre notre proposition pour réduire la consommation d'énergie lorsque la charge augmente. Résultats concernant le CL médian	94
6.1	Impact du délai différentiel de la cellule sur les performances	101
6.2	Impact de l'utilisation du Global Positioning System (GPS) pour permettre le fonctionnement du NB-IoT dans des systèmes satellitaires LEO en fonction des conditions de couverture	103
7.1	Paramétrage du système considéré	110

7.2	Caractéristiques des terminaux	110
7.3	Caractéristiques des satellites	110
7.4	Densité EIRP considérée dans nos <i>scenarii</i>	112
7.5	Part des ressources physiques (temps-fréquence) non disponibles pour l'envoi de données utiles	116
7.6	Débit agrégé maximal par satellite selon les <i>scenarii</i>	117
7.7	Trafic dans le cadre de l'évaluation de la capacité des <i>scenarii</i> satellite	118
7.8	Densité de connexion des <i>scenarii</i> satellites envisagés en considérant le trafic du Tableau 7.7	118
7.9	Base de comparaison entre les <i>scenarii</i> satellites	120
7.10	Comparaison des <i>scenarii</i> de constellation	121
H.1	Seuils pour obtenir un BLER de 10^{-1}	154
I.1	Tailles des TBs du Narrowband Physical Downlink Shared Channel (NPDSCH) en bits en fonction de la configuration de l'indice MCS et du nombre de sous-trames (<i>sf</i>)	155
I.2	Tailles des TBs du NPUSCH (format 1) en bits en fonction de la configuration de l'indice et du nombre de Resource Unit (RU)	156
J.1	Composition du DCI N0 pour l'allocation du TB NPUSCH	158
J.2	Composition du DCI N1 pour allocation du TB NPDSCH	158
J.3	Composition du DCI N1 pour demande de connexion provenant du réseau	158

ACRONYMES

- 3GPP** Third Generation Partnership Project. xvii, 1, 2, 5, 6, 11, 12, 15, 16, 18, 23–25, 28, 29, 35, 39, 43, 44, 47, 66, 67, 69, 71, 79, 82, 88–90, 97–99, 102–106, 109, 111, 113, 114, 123–125, 135, 137
- 5G-NR** 5G-New Radio. xvii, 10, 12–14, 29, 32, 109, 111
- AL** Aggregation Level. xvii, 40, 139, 148
- AS** Access Stratum. xvii, 38
- BLER** Block Error Rate. xvii, 67, 81, 103–108, 113, 125, 137, 138, 143, 144
- BS** Base Station. xvii, 27, 29, 32–36, 38, 41–43, 45, 46, 48, 51, 56, 62, 64, 66, 72, 92, 94, 98–100, 103, 105, 133, 135
- CC** commutation de circuits. xvii, 11
- CE** *Coverage Enhancement*. xvii, 24, 33, 34, 38, 40, 45, 49–51, 55, 64, 74, 75, 94, 100, 148
- CN** *Core Network*. xvii, 35
- CP** commutation de paquets. xvii, 11
- CP** *Cyclic Prefix*. xvii, 29, 30, 55, 99, 100
- CPO** Control Plane Optimization. xvii, 26, 28, 38, 39, 43, 44, 71, 72, 77
- CR** Code Rate. xvii
- CRC** Cyclic Redundancy Check. xvii, 34, 41, 114
- CSS** Common Search Spaces. xvii, 39, 40
- DAMA** Demand Assigned Multiple Access. xvii
- DCI** Downlink Control Information. xvii, 30, 31, 34, 38, 40, 41, 48, 56, 64, 101, 133, 147, 148
- DL** Downlink. xvii, 12, 15, 16, 25, 28–32, 34, 38, 40–44, 48, 56, 64, 66, 68, 69, 71–73, 77, 81–83, 99, 105, 111, 112, 115, 116, 118, 138, 143–146
- DMRS** Demodulation Reference Signal. xvii, 34, 66
- DRX** Discontinuous Reception. xvii, 36, 37
- eDRX** extended Discontinuous Reception. xvii, 14, 24, 25, 36, 37, 44
- EDT** Early Data Transmission. xvii, 44, 71–77, 86, 87, 89, 90, 103, 123

- EIRP** Equivalent Isotropic Radiated Power. xvii, 111
- emBB** enhanced mobile BroadBand. xvii, 11, 12
- eNB** evolved Node B. xvii, 26
- EPC** *Evolved Packet Core*. xvii, 27, 28
- ESA** European Space Agency. xvii, 3, 4, 8, 21
- FCFS** First Come First Serve. xvii, 43, 58, 59, 83
- FTTH** Fiber to the Home. xvii, 15
- GEO** Geostationary Earth Orbit. xvii, 4, 18–21, 98, 101, 103–106, 109, 111, 113, 115, 116, 119–122
- gNB** next Generation Node B. xvii
- GNSS** Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites. xvii, 6, 9, 44, 46, 97, 102
- GPS** Global Positioning System. xvii, 102, 103, 118, 122
- GSM** Global System for Mobile. xvii, 10, 25, 42
- GSMA** Global System for Mobile Communications Association. xvii, 2
- HARQ** Hybrid Automatic Repeat Request. xvii, 34, 40, 41, 103, 104, 113, 133
- IoT** Internet of Things. xvii, 1–5, 7–11, 13–19, 21, 22, 24, 25, 35, 39, 49, 87, 115, 119, 122–125
- ISI** Inter-Symbol Interferences. xvii, 29, 30
- ISM** Industrial, Scientific and Medical bands. xvii, 10, 15, 16, 21
- ITU** International Telecommunication Union. xvii, 2, 11, 12, 43, 47, 67, 79
- LAN** Local Area Network. xvii, 1
- LEO** Low Earth Orbit. xvii, 4, 19–21, 44, 98, 102, 103, 109, 114–116, 118, 120–122
- LoRaWAN** Long Range Wide Area Network. xvii, 2, 7, 9, 14–16, 21, 44, 125
- LPWAN** Low Power Wide Area Networks. xvii, 2, 7–9, 11–13, 15, 23, 25, 44, 45, 82, 102, 115, 123, 124
- LTE** Long Term Evolution. xvii, 11, 12, 14, 24–27, 29, 31, 32, 34, 36, 38, 41, 43, 45, 52, 66, 71
- LTE-M** Long Term Evolution for Machines. xvii, 2, 11, 12, 14, 21, 25, 42, 44, 135
- MAC** Media Access Control. xvii, 15, 23, 26, 35, 42, 43, 45–47, 59, 66, 67, 101, 103, 105, 107, 108, 111, 113, 114
- MCL** Maximum Coupling Loss. xvii, 12, 13, 15, 24, 25, 42–44, 88, 89, 135, 139
- MCS** Modulation and Coding Schemes. xvii, 2, 29–31, 34, 41–43, 46, 55, 67, 80, 103–107, 111, 113–115, 117, 125, 139, 143–145, 148
- MF-TDMA** Multi-Frequency Time Division Multiple Access. xvii

- MIB** Master Information Block. xvii, 30, 31, 36, 80
- MME** Mobility and Management Entity. xvii, 26, 28, 39, 72
- mMTC** massive Machine Type Communications. xvii, 11–14, 23, 36, 42, 43, 45, 46, 69, 75, 77, 79, 89, 97, 102, 118, 119, 122, 123
- NAS** Non-Access Stratum. xvii, 28, 38, 39
- NB-IoT** NarrowBand Internet of Things. xvii, 2, 5–7, 11, 12, 16, 21, 23–30, 32, 34–36, 38–52, 54, 56, 58–60, 62, 64–82, 84, 86–90, 92–94, 97, 98, 101–105, 108–110, 112–114, 116, 118, 120, 122–125, 129, 131, 133, 135, 141, 143, 144
- NCCE** Narrowband Control Channel Elements. xvii, 31, 40, 55, 139, 140
- NDI** New Data Indicator. xvii, 148
- NFV** Network Function Virtualization. xvii, 12
- NIDD** Non-IP Data Delivery. xvii, 28
- NPBCH** Narrowband Physical Broadcast Channel. xvii, 30, 69, 80, 88, 94, 99, 116
- NPDCCH** Narrowband Physical Downlink Control Channel. xvii, 30, 31, 34, 36, 38–41, 45, 48, 49, 53, 55, 58, 69, 71, 80, 82, 83, 85, 88, 92–94, 102, 116, 133
- NPDSCH** Narrowband Physical Downlink Shared Channel. xvii, 31, 34, 38, 40, 42, 45, 48, 49, 53, 55, 58, 69, 71, 80, 85, 88, 139, 145, 148
- NPRACH** Narrowband Physical Random Access Channel. xvii, 32, 33, 38, 45, 48–52, 55, 69, 74–77, 79, 80, 88, 99–101, 116, 148
- NPSS** Narrowband Primary Synchronisation Signal. xvii, 30, 35, 69
- NPUSCH** Narrowband Physical Uplink Shared Channel. xvii, 32, 34, 35, 38, 40, 42, 45, 48, 49, 53, 55, 58, 69, 70, 74–77, 80, 81, 85, 86, 88, 100, 101, 133, 139, 148
- NR** Nouvelle Radio. xvii, 11, 12
- NRS** Narrowband Reference Signal. xvii, 29, 30
- NSR** Northern Sky Research. xvii
- NSSS** Narrowband Secondary Synchronisation Signal. xvii, 30, 69
- NTN** Non-Terrestrial Networks. xvii, 5, 18, 97
- OBP** On-Board Processing. xvii, 16, 18, 97, 98
- OFDM** Orthogonal Frequency Division Multiplexing. xvii, 11, 29, 30, 32, 33, 82, 102
- PA** Power Amplifier. xvii, 24, 32
- PAPR** *Peak-to-Average Power Ratio*. xvii, 24, 32
- PCID** Physical Cell Identity. xvii, 36
- PDU** Protocol Data Unit. xvii, 42
- PRB** Physical Resource Block. xvii, 25, 34, 43, 66, 69, 77, 98, 100, 116, 118

- PSM** Power Saving Mode. xvii, 24, 25, 36, 37
- PTW** Paging Time Window. xvii, 36
- QoS** Quality of Service. xvii, 10, 11, 18
- RAN** Radio Access Network. xvii, 27–29, 35
- RAO** Random Access Opportunities. xvii, 33–35, 38, 50, 59, 64, 68, 72, 74–76, 100
- RAR** Random Access Response. xvii, 38, 40
- RE** Resource Element. xvii, 32, 34
- RF** radiofréquences. xvii, 23, 24
- RSRP** Reference Signal Received Power. xvii, 36
- RU** Resource Unit. xvii, 34, 35, 55, 64, 139, 140, 146, 148
- SIoT** *Social IoT*. xvii, 7
- SC-FDMA** Single-Carrier Frequency Division Multiple Access. xvii, 24, 32
- SCEF** Service Capability Exposure Function gateway. xvii, 12, 28
- SF** Spreading Factor. xvii, 14, 15
- SGW** Serving Gateway. xvii, 26
- SIB** System Information Block. xvii, 30–33, 36
- SINR** Signal to Noise plus Interference Ratio. xvii, 67, 105, 114, 137, 138
- SNR** Signal to Noise Ratio. xvii, 15, 25, 42, 105, 106, 112, 113, 131, 143, 144
- TA** *Timing Advance*. xvii, 33, 38, 42, 99
- TAU** Tracking Area Update. xvii, 36
- TB** Transport Blocks. xvii, 24, 31, 34, 35, 41, 42, 56, 67, 72, 80, 103–105, 107, 113, 114, 143–146, 148
- TBS** Transport Block Sizes. xvii, 139
- TCP** Transmission Control Protocol. xvii, 20
- ToA** Time of Arrival. xvii, 32, 33
- UAVs** *Unmanned Aerial Vehicles*. xvii
- UE** User Equipment. xvii, 26–36, 38–42, 46, 48, 51, 54–56, 62, 64, 67, 69, 75, 77, 94, 98, 99, 103–105, 118, 119, 121, 133, 135, 139
- UL** Uplink. xvii, 12, 15, 16, 24, 25, 28–30, 32, 34, 35, 40–44, 48, 55, 56, 66, 68, 70–77, 81–83, 87, 89, 91, 98–101, 105, 113–117, 137, 143–146
- UMTS** Universal Mobile Telecommunications System. xvii
- UNB** Ultra-Narrow Band. xvii, 15
- UPO** User Plane Optimization. xvii, 26, 38, 39, 43, 68, 71, 73, 76, 77, 88–90

uRLLC ultra-Reliable and Low Latency Communications. xvii, 11, 14

USS UE-specific Search Spaces. xvii, 40

VHTS Very High Throughput Satellites. xvii, 3

VoIP Voice over IP. xvii

W-CDMA Wideband Code Division Multiple Access. xvii

WAN Wide Area Network. xvii, 1–3, 7, 9, 14–17, 21, 44, 125

WiMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access. xvii, 10

INTRODUCTION

Des décennies de progrès dans l'industrie des semi-conducteurs, au rythme de la loi de Moore, ont conduit à des dispositifs de communication miniaturisés dotés d'importantes capacités de calcul, de mémoire, de détection de l'environnement et de communication. La connexion de tous ces objets interagissant avec le monde physique dans le cyberspace représente l'Internet des Objets - Internet of Things (IoT) - et a le potentiel de bouleverser presque tous les aspects de notre société. L'agriculture [1–3], les soins médicaux [4, 5] et nos moyens de production [6] et d'automatisation [7], et la compréhension de notre environnement [8, 9] ne représentent qu'une partie de ses applications [10]. Les estimations de Cisco en 2016 [11] - 12 milliards de dispositifs connectés en 2020 - et celle d'Ericsson [12] - 18 milliards d'appareils connectés en 2022 - semblent à présent optimistes. Néanmoins le nombre d'équipements connectés ne fait que grandir, atteint 10.01 milliards en 2021 [13] et dépasse enfin la barre symbolique des abonnements cellulaires mobiles qui s'élève à 8.5 milliards en 2021 [14].

Nous pouvons diviser les technologies de communication sans fil terrestres en deux catégories. D'un côté, celles à courte portée qui sont utilisées dans les réseaux locaux (Local Area Network (LAN)) : Bluetooth, WiFi et RFID. Ce type de communication est soumis dans une moindre mesure aux contraintes en capacité (rayon d'action petit donc nombre d'objets réduits) voire en énergie car une source de puissance est souvent à proximité (téléphone mobile ou appareils directement branchés sur secteur au domicile/en entreprise). Dans nos travaux, nous nous intéressons au second type de communications sans fil, les communications à longue portée, utilisées de façon publique et dont les déploiements sont d'envergure nationale (Wide Area Network (WAN)) : un marché dominé par les technologies du Third Generation Partnership Project (3GPP) qui présente une nouvelle génération tous les 10 ans - GSM (2G) en 1991, UMTS (3G) en 2000, LTE (4G) en 2011 et la 5G en 2019. Chaque génération offre de meilleures performances en termes d'efficacité spectrale, de débit, de capacité ou de latence entre autres [15]. Parmi les services IoT ceux nécessitant une connexion WAN (agriculture, surveillance médicale, localisation etc ...) ont donc utilisé ces solutions 3GPP et plus particulièrement le GSM qui est devenu meilleur marché une fois délaissé par les communications classiques en raison du déploiement des générations suivantes (UMTS puis LTE). Cependant, cet ordre bien établi a été bouleversé par deux initiatives françaises au début des années 2010 : l'une

se nomme Sigfox et représente en 2021 le plus large réseau opérateur de service IoT de la planète avec plus de 1.3 milliard de personnes couvertes dans plus de 72 pays [16], l'autre est la solution LoRa (pour Long Range) qui résultera en la création de la LoRa Alliance (2015), une alliance d'opérateurs à but non lucratif qui promeut l'utilisation en libre d'accès (open source) du standard Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) représentant à ce jour 156 opérateurs dans 171 pays [17]. Ces deux solutions fondent une nouvelle branche des technologies WAN : Low Power Wide Area Networks (LPWAN). Les solutions LPWANs mettent en lumière les lacunes des solutions 3GPP mobiles en termes a) de coût, b) d'efficacité énergétique, c) de couverture et d) de capacité. Ainsi, Sigfox et LoRa ont permis un essor sans précédent du nombre d'objets connectés dont le taux de croissance annuel moyen a avoisiné les 26% d'après le Global System for Mobile Communications Association (GSMA) [18] au cours de la dernière décennie. À l'inverse, avec la sophistication des technologies mobiles, le coût des terminaux 3GPP n'a fait qu'augmenter ces dernières années ce qui ne permet pas la rentabilité d'une partie des applications IoT. Les téléphones mobiles sont des objets utilisés par des humains avec un accès à une source d'énergie régulière et se trouvant dans des zones habitables non loin des stations de base. Les communications peuvent donc se permettre d'être relativement gourmandes en énergie (mode connecté) et les cellules ne dépassent que rarement les quelques kilomètres de rayon (et encore moins en zone urbaine). Enfin, même si la capacité des réseaux cellulaires a augmenté, elle ne permet pas à l'heure actuelle de valider les scénarii de l'International Telecommunication Union (ITU) concernant l'IoT bas débit prévoyant le million de terminaux par km² [19].

C'est sûrement ce contexte pressant des réseaux LPWANs qui a amené le 3GPP à dévoiler deux nouvelles technologies de communication pour l'IoT dès la Release 13 en juin 2016 : le Long Term Evolution for Machines (LTE-M) et le NarrowBand Internet of Things (NB-IoT). LTE-M est une variante de LTE qui permet d'utiliser les stations de base LTE (eNodeB) telles quelles afin de fournir des services IoT : déploiement sur 1.4 MHz de largeur de bande, mode connecté allégé, ajout d'un mode endormi et répétitions pour agrandir la couverture des stations. Le LTE-M reste un type de communication haut de gamme pour certaines applications IoT : son module de communication reste complexe donc cher, le débit fourni et la largeur de bande sont élevés en comparaison avec les technologies LPWAN. Pour ces raisons, le 3GPP a développé le standard NB-IoT. Il introduit plusieurs mécanismes le rendant accessible à un large spectre d'applications IoT. En reprenant les quatre axes d'amélioration du LTE décrits plus tôt, le NB-IoT présente a) des Schémas de Modulation et de Codage – Modulation and Coding Schemes (MCS) – simplifiés qui réduisent le coût de fabrication des modules (mode half-duplex et fenêtre de corrélation croisée étroite), b) des mécanismes d'économie d'énergie, c) des transmissions à bande étroite d'où le terme de « NarrowBand » qui améliorent la couverture et rendent possible les communications par satellites, et d) une surcharge (*overhead*) protocolaire réduite autant sur le plan contrôle que sur le plan donnée [20, 21]. Notre travail se focalisera donc sur le NB-IoT qui est un protocole qui permet le déploiement de nouveaux types d'applications (notamment satellite) et dont les performances sont encore à explorer tant il diffère de ses prédécesseurs.

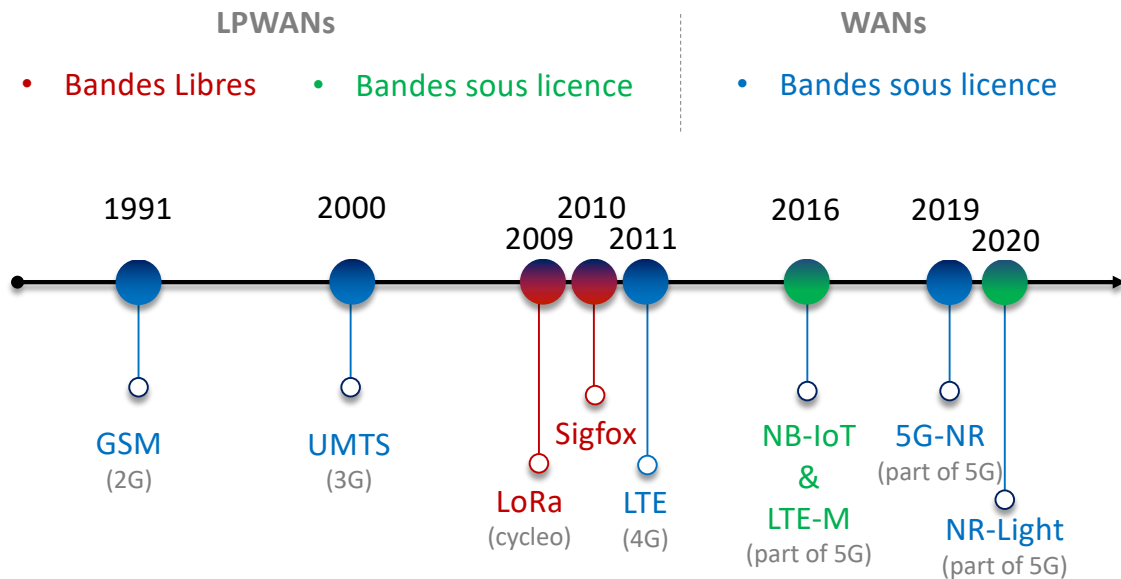


FIGURE 1.1 Frise chronologique des technologies cellulaires WAN utilisées pour les services IoT.

En parallèle, le monde du satellite a connu des évolutions majeures ces dernières années : numérisation des signaux à bord, développement de satellites à très haut débit (Very High Throughput Satellites (VHTS)), satellites flexibles, saut de faisceaux (*beam hopping*). Un des exemples les plus frappants de ces changements est sans doute la capacité de gros lanceurs, comme la fusée Ariane 5 de l'European Space Agency (ESA) et la fusée Falcon 9 de SpaceX, à lancer d'un seul tenant une cinquantaine de satellites miniaturisés appelés nano-satellites [22–24]. Ces satellites ne sont parfois pas plus grands que des boîtes à chaussure et pèsent entre 1 et 10 kg [25]. Cette technologie abaisse notablement les coûts de mise en orbite, réduit le délai de déploiement du service et offre donc des possibilités variées d'utilisation des communications spatiales. En attendant l'impact des méga-constellations (Starlink, OneWeb, Telesat), le satellite joue essentiellement les rôles de diffuseur (services TV, alarmes et services public), de relais pour les zones non atteignables par les réseaux terrestres (océans, montagnes et pôles), d'opérateur internet bas débit dans les pays émergents sans réseaux nationaux et de moyen de communication pour les opérations militaires. La possibilité de jouer un rôle majeur dans les communications IoT suscite un grand engouement auprès de la communauté satellite [26, 27]. En effet, les particularités des besoins des applications IoT avantagent les communications par satellite car :

- La grande majorité des applications IoT ne sont pas sensibles aux deux principales lacunes du monde satellite : la latence et le débit ;
- La couverture du satellite est idéale pour les objets connectés : 1) leur mobilité peut prendre des proportions que seuls des systèmes satellitaires peuvent prendre en charge : par exemple le positionnement de conteneurs traversant des pays (absence de frais de roaming) ou des océans, et 2) les objets peuvent se trouver dans des zones rurales, difficiles d'accès pour des infrastructures terrestres (forêts, montagnes, déserts, pôles) ;

- Les signaux IoT bas débit peuvent s'envisager dans des conditions extrêmes et sont donc à même d'être captés directement au niveau du satellite sans avoir besoin d'amplifier le signal. Ainsi des terminaux terrestres sur étagère à bas prix pourraient être utilisés dans un contexte satellite. Telle est l'ambition de la solution hybride Admiral LEO qui souhaite couvrir à la fois les zones reculées à l'aide de satellites Eutelsat et les zones urbaines / indoor avec la couverture Sigfox [16] et celle de la solution Lacuna Space [28] proposée par l'ESA qui utilise la technologie LoRa (voir le positionnement des solutions IoT en Figure 1.2).

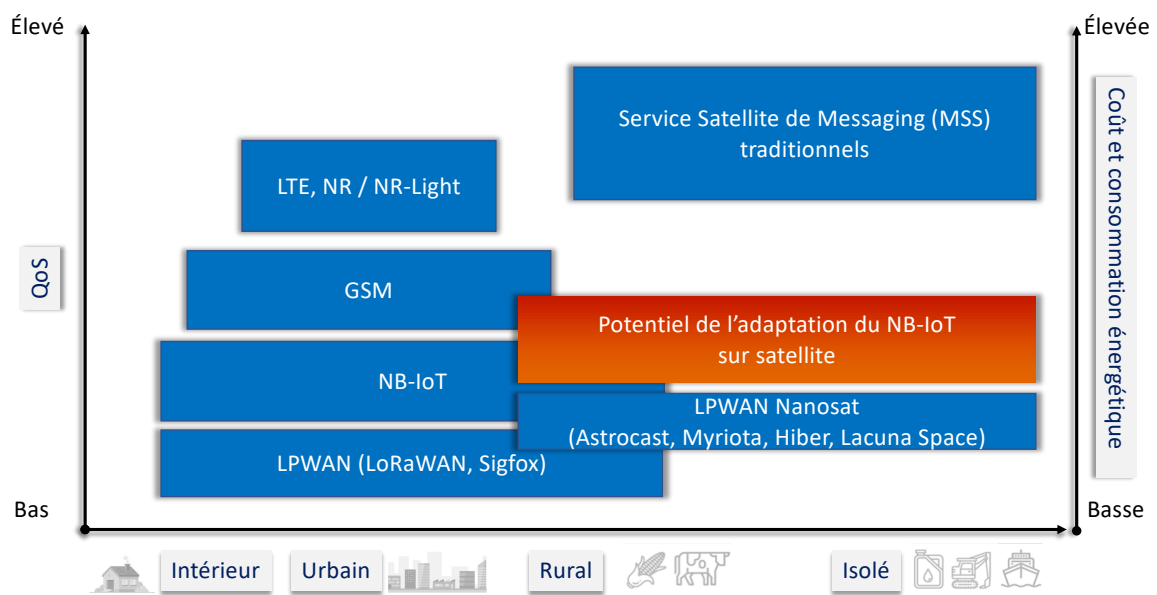


FIGURE 1.2 Positionnement des solutions de communications vis-à-vis de l'IoT

Ce monde IoT par satellite est encore en train de se former et les solutions sont très variées. Tout d'abord, des systèmes pré-existants souhaitent offrir des services pour les objets connectés, en orbite basse (Low Earth Orbit (LEO)) - Iridium, Orbcomm - et en orbite géostationnaire (Geostationary Earth Orbit (GEO)) - Inmarsat, Thuraya, Echostar - cantonnés à des applications de niche à coût élevé. Plus récemment, des systèmes majoritairement de nano-satellites dédiés à l'IoT avec leur propre technologie ont été lancés - Myriota, Fleet Space, Kineis et Astrocast - dont la technologie a été développée par Airbus [29]. À ces solutions, il faut ajouter celles provenant de l'intégration de technologies terrestres (Ligado et Sateliot). En effet, l'intégration avec un réseau terrestre pré-existant procure certains bénéfices qui dépendent du degré d'intégration [30] : au niveau du cœur de réseau pour permettre l'itinérance des abonnés, au niveau des passerelles de service (Service Gateways) pour permettre le *handover* ou au niveau du terminal pour utiliser le même module de communication que dans le monde terrestre (bon marché). Ces bénéfices doivent être nuancés par les compromis en termes de performance et de complexité résultant de l'intégration.

L'étude de l'intégration du NB-IoT au contexte satellite apparaît donc comme nécessaire et d'autant plus intéressante qu'elle concerne la ré-utilisation des infrastructures et des terminaux du plus important groupe de standardisation télécom, le 3GPP. Plus particulièrement, l'évaluation des performances du NB-IoT dans un contexte satellite est un sujet encore peu étudié. **L'objectif de cette thèse est donc de modéliser et d'étudier les performances des réseaux NB-IoT, en particulier lors de son intégration dans un contexte satellite.** Nous avons choisi d'étudier l'intégration la plus complète : la ré-utilisation d'un module de communication NB-IoT terrestre afin d'effectuer des communications directes entre un terminal et un satellite. Parmi l'éventail des performances observables, nous nous sommes concentrés sur la capacité d'une cellule NB-IoT et la durée de vie d'un terminal, deux critères clés des communications IoT sur lesquels nous détaillerons l'impact du contexte satellite dans cette thèse.

Dans le cadre de la 5^{ème} génération de technologies cellulaires, le 3GPP travaille déjà sur les défis des Non-Terrestrial Networks (NTN) qui concernent pour l'instant essentiellement des scénarii satellites, un travail regroupé et régulièrement mise à jour dans les Technical Reports 38.811 et 38.821 [31, 32]. Ils révèlent que les mécanismes envisagés pour faire face respectivement à la taille de la cellule dans un contexte satellitaire, au temps d'aller-retour avec le satellite et à l'effet Doppler (voir Annexe A) diminuent les performances du NB-IoT en termes de capacité de la cellule, de débit des communications et de durée de vie du terminal. Ces documents ont été à la base de notre travail pour l'étude des modifications nécessaires au NB-IoT pour des systèmes satellitaires. Nos contributions peuvent être résumées ainsi :

- Nous avons développé un modèle général du fonctionnement d'une cellule NB-IoT (Chapitre 4) qui rend compte à la fois de l'utilisation des ressources du canal en accès aléatoire utilisées lors de la mise en place de la connexion entre le terminal et la station de base et de l'utilisation des ressources partagées par les canaux dédiés pour l'échange des données. Ce modèle permet de calculer la capacité d'une cellule en termes de densité de connexion (une notion de référence dans le 3GPP [33, 34]). Nous sommes les premiers à calculer la diminution de la capacité d'une cellule NB-IoT due à sa taille dans un contexte satellite (section 6.1) ;
- Nous avons révélé la sensibilité des performances NB-IoT aux choix de paramétrage de la cellule permis par le protocole. Notre modèle est assez complexe pour rendre compte des tensions entre phase de collision et phase de congestion. Nous avons mis en évidence la limitation de la capacité engendrée par le poids de la signalisation dans une communication IoT (Chapitre 4). Outre la capacité de notre modèle à donner de précieux renseignements sur le fonctionnement du protocole NB-IoT, il peut aussi servir d'outil pour aider au choix des paramètres de la cellule en fonction du type de terrain ou du type de trafic envisagé ;
- Nous avons amélioré la modélisation des ressources partagées par les canaux en utilisant la théorie des files d'attente à l'échelle des communications (section 4.3.1) puis à celle des messages (section 4.3.2). Les premières rendent compte de la simultanéité du partage des ressources fréquence-temps. Les secondes permettent d'adapter le nombre de com-

- munications servies en simultané selon le paramétrage de la cellule, de rendre compte du découpage en plusieurs blocs de la communication et de l'émission sur plusieurs canaux ;
- Nous nous sommes servis de notre modèle pour calculer la durée de vie d'un terminal NB-IoT (Chapitre 5). Il permet l'évaluation de l'impact de la charge de la cellule sur la consommation énergétique. Nous avons mis en évidence un phénomène de congestion sur le canal de contrôle du lien descendant qui réduit notablement la durée de vie de la batterie ;
 - Nous avons proposé et évalué une solution pour limiter la baisse de la durée de vie du terminal due à la charge (section 5.5). Elle peut être mise en place sans ajouter d'*overhead* réseau, ni modifier le contenu des messages ou le fonctionnement du NB-IoT ;
 - Nous nous sommes servis de notre modèle pour évaluer la solution du 3GPP pour éviter les dysfonctionnements dus à l'effet Doppler dans un contexte satellite (Chapitre 6). Nous avons donc calculé la durée de vie théorique d'un terminal NB-IoT en utilisant son positionnement Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites (GNSS) ;
 - Enfin, nous proposons dans le Chapitre 7 une structure d'analyse et de comparaison des performances de systèmes satellite complets NB-IoT. Notre méthode permet de calculer les performances des signaux physiques, les performances des cellules (faisceaux satellite) jusqu'aux aspects de capacité agrégée et de coût par message.

ÉTAT DE L'ART

La première partie de cet état de l'art permet de comprendre les motivations et les enjeux de l'IoT et plus particulièrement des LPWANs (2.1). Dans les deux sections suivantes, nous donnons une vue d'ensemble des solutions IoT terrestres (2.2) puis par satellite (2.3).

2.1 L'Internet des Objets - IoT

2.1.1 Concept et ambition

Étant donné la croissance du nombre d'objets connectés d'ores et déjà déployés, il est raisonnable de dire que la vision d'un monde connecté est en train de se réaliser au fur et à mesure que les solutions IoT se diversifient (courte/longue portée, bande libre/bande sous licence, terrestre/satellite etc.). Avec l'arrivée des réseaux LPWANs - LoRaWAN, Sigfox puis NB-IoT (décrits en section 2.2) - l'utilisation de petits objets connectés à large portée est devenue possible et rentable dans de nombreux secteurs d'activités.

Connaître en temps réel les données environnementales (précipitations, ensoleillement, minéraux, déplacements de la faune) et les données relatives aux activités humaines (capteurs de présence, de détérioration, de modification) permet d'optimiser les ressources pour obtenir plus avec moins, dépenser moins et recycler plus : telle est l'une des ambitions de l'IoT. Deux notions sont les fers de lance pour concrétiser cette ambition 1) l' *Open Data* [35, 36] : rendre les données des objets publiques pour permettre l'Émergence (un concept qu'on retrouve en Neurosciences [37], en analyse des systèmes [38] ou encore en intelligence artificielle [39]) d'applications inattendues ou qui dépassent les attentes initiales et 2) le *Social IoT* (SIoT) [40, 41] : permettre l'interaction entre différents dispositifs IoT et l'établissement de relations entre eux en vue d'un objectif commun. En substance, le SIoT est une architecture orientée service où des solutions IoT hétérogènes peuvent offrir ou demander des services de façon autonome et collaborer.

Le lot de défis à surmonter pour connecter *tout* avec *tout* est volumineux (partage de la bande passante et des capacités de calcul, gestion de la sécurité des communications, équilibre entre latence et durée de vie des terminaux, entre fiabilité et capacité). Dans la prochaine

section nous nous concentrerons sur ceux des solutions LPWANs.

2.1.2 Défis

Les solutions LPWANs doivent apporter une solution de connectivité pour les objets dont les contraintes en a) coût, b) dépense énergétique, c) couverture et d) capacité sont fortes et où les contraintes en e) débit, f) latence et g) fiabilité sont plus faibles que des communications cellulaires classiques. Ces sept critères permettent de comparer les différentes solutions Tableau 2.2. Afin de préciser l'ordre de grandeur des défis de l'IoT, on peut caractériser une application IoT LPWAN par a) un revenu par appareil faible de l'ordre de la dizaine d'euros par an, b) le manque d'accès à une source d'énergie et donc la nécessité de fonctionner jusqu'à plusieurs années sur batterie, c) un isolement ou un positionnement dans une zone difficile d'accès pour le réseau classique, il est donc attendu une couverture des stations élevée et d) de nombreux terminaux : on envisage une densité avoisinant le million de terminaux par kilomètre carré.

Malgré la portée accrue des systèmes LPWAN, il est compliqué d'atteindre toutes les zones où des services IoT LPWANs sont nécessaires. Il est coûteux pour les systèmes de communications terrestres d'atteindre les zones très reculées.

L'intégration du satellite dans le monde de l'IoT pourrait donc être la clé permettant d'obtenir une solution dont la couverture est complète. Reconnaissant la possibilité d'atteindre ces zones isolées, de déployer une couverture mondiale rapidement et à bas coût (un seul satellite peu suffire), plusieurs opérateurs offrent des services IoT par satellite (voir section 2.3 et Tableau 2.3). Ces solutions par satellite pourraient être utilisées en complément des technologies LPWANs terrestres. Un défi qui peut donc être ajouté est celui de l'intégration des solutions terrestres avec le contexte satellite [30, 32]. On peut voir l'émergence de solutions qui réutilisent les technologies terrestres pour profiter de modules de communication sur étagère à bas coût. C'est le cas avec la solution Lacuna Space [28] en partenariat avec l'ESA qui utilise la technologie LoRa (section 2.2.2) et la solution hybride Admiral LEO qui permet de couvrir à la fois les zones reculées à l'aide de satellite Eutelsat et les zones urbaines / indoor avec la couverture Sigfox [16] (section 2.2.2). La Figure 1.2 illustre le potentiel de l'intégration du satellite aux solutions LPWANs terrestres.

2.1.3 Applications

Les applications de l'IoT promettent des révolutions dans différents domaines. De nombreux articles de synthèse les ont recensés []. La classification sous-jacente en est tirée et nous ne donnerons plus spécifiquement des détails que pour celles pour lesquelles l'apport du satellite pourrait être envisagé. Dans cette section, nous en faisons un tour d'horizon rapide.

Agriculture

Ce sont sans doute les plus iconiques. La quantité de nourriture que produit un champ dépend d'un nombre considérable de facteurs : ensoleillement, température, apport en nutriments,

irrigation, espace, minéraux du sol. Traditionnellement, le champ est traité dans sa globalité, on fournit la même quantité de ressources à toutes les plantes et on procède à la récolte au même moment. Cela amène à un gaspillage significatif. Une des idées de l'agriculture IoT est de fournir exactement la bonne quantité de ressources à chaque parcelle du champ : on parle d'agriculture de précision [1, 42]. Cette recherche de l'optimisation a un impact économique et sert l'intérêt commun puisque la plupart des ressources utilisées par l'agriculture sont en quantité limitée – c'est le cas pour l'eau potable [2, 43].

L'imagerie est utilisée à grande échelle pour détecter les anomalies dans les champs : sécheresse, espèce parasite ou intrusion [3]. Le satellite joue un rôle majeur ; les derniers systèmes lancés annoncent des performances records (précision de 30 cm pour les satellites Pléiades Neo [44] lancés en 2021 par *Airbus Defence and Space*). Ces mêmes satellites pourraient servir de relais de communications pour les objets LPWANs.

Environnement et Faune

L'étude de certains phénomènes naturels et la compréhension des comportements animaliers ne peuvent être rendus possibles [9] que par des solutions IoT. Grâce à des dispositifs GNSS portés par des animaux, on peut étudier les tremblements de terre, les feux de forêt, et les éruptions volcaniques [8]. L'étude du monde animal s'est montrée à plusieurs reprises à l'origine du développement de nouvelles technologies (Velcro, portance des ailes d'avions etc.).

Ces dispositifs IoT doivent être légers pour ne pas gêner les animaux, autonomes en énergie et capables de communiquer dans les zones isolées (montagnes, forêt, océans, pôles). Les technologies LPWANs sont donc spécialement bien adaptées. C'est une des utilisations à succès d'un des premiers services IoT satellite français, Argos [45], utilisé entre autres pour surveiller le plan de route de certains oiseaux migrateurs ou requins [9].

Transport

Le transport de marchandises représente une grande part des applications IoT : 26% des plateformes IoT sont dédiées à ce secteur [46]. Il s'agit principalement de *tracking* GNSS [47] à la fois des moyens de transports (camions, bateaux, trains) mais aussi des marchandises. Il s'agit d'optimiser les déplacements des marchandises et d'obtenir une information quasi temps-réel sur l'état du transport. Un des défis est la gestion de l'itinérance ou *Roaming* puisqu'une grosse partie des échanges se fait entre pays - plus de 1 200 milliards d'euros de marchandises échangées en sommant importation et exportation française d'après l'Insee en 2021 [48]. Les initiatives LPWANs sont en général transnationales (voir LoRaWAN et Sigfox section 2.2.2) et adaptées à l'échange de petits paquets de données (une position GPS est encodée sur une dizaine d'octets) ce qui en fait de parfaits candidats dans ce contexte.

Les conteneurs de marchandises sont adaptés pour convenir aux bateaux, trains et camions. Ainsi le conteneur n'a pas à être ouvert, de son expéditeur à son destinataire (gain en temps et en sûreté). Le satellite est le seul moyen de permettre à ces marchandises d'être suivies au-dessus des mers. L'étude de l'intégration des technologies LPWANs dans un contexte satellitaire révèle donc un intérêt certain.

L'information récoltée par les objets connectés peut aussi servir d'information pour les habitants et faciliter la vie des personnes en situation de handicap [36].

Santé

La meilleure façon de guérir est de prévenir. En récoltant en temps-réel les différentes caractéristiques physiologiques d'une personne, des signes annonciateurs de troubles sont détectables avant même que l'individu ne s'en rende compte. Ces capteurs à but médical doivent être compacts, autonomes en énergie et connectés en permanence et en particulier hors des zones des réseaux cellulaires classiques (montagnes, forêt, sous-sol) où les secours pourraient mettre plus de temps à intervenir.

Enfin, nous pouvons citer les applications pour les villes intelligentes ou les usines du futur [6, 7] mais ces environnements sont bien servis par des moyens de communication terrestres classiques laissant peu de place aux satellites.

2.2 Technologies de communication IoT cellulaires terrestres

Le fossé entre les technologies opérant en bandes sous licence et celles opérant sur les bandes libres - Industrial, Scientific and Medical bands (ISM) - continue à subsister. D'un côté, les opérateurs ayant payé pour utiliser une largeur de bande déploient des protocoles en général complexes à forte Qualité de Service (Quality of Service (QoS)) qui utilisent au maximum leurs ressources pour maximiser le débit ou minimiser la latence [49]. Les services déployés sur les bandes sous licence sont donc plutôt haut de gamme. Par ailleurs, les technologies fonctionnant sur bandes ISM doivent partager des ressources publiques, c'est-à-dire limiter les puissances d'émission pour maintenir les interférences sous un certain seuil [50]. Le manque de garanties sur la qualité des communications en bande ISM a contraint leur utilisation pour des communications de proximité : WiFi, Bluetooth, RFID (non représentées sur la frise chronologique Figure 1.1), avant que les exigences particulièrement basses de l'IoT permettent le déploiement de réseaux cellulaires longue portée en bande ISM en rouge sur le frise Figure 1.1.

Cette partie a pour objectif de présenter les technologies de communication cellulaires terrestres utilisées pour des communications IoT (les technologies illustrées dans la Figure 1.1 à l'exception de la 5G-New Radio (5G-NR)). Nous ne considérerons pas les technologies qui ne sont plus d'actualité ou dont le déploiement est restreint (NMT-AMTS (1G), Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX), Ingenu, Sierra Wireless ...).

2.2.1 Bandes sous licence

Global System for Mobile (GSM)

La technologie GSM a été développée en Europe dans les années 1980 et a connu son premier lancement commercial en 1991. Elle conserve néanmoins la couverture de 90% de la population mondiale [12] et fait toujours partie des technologies cellulaires les plus utilisées.

Initialement conçus pour les services à commutation de circuits (CC) (appels vocaux et appels de données). Ils ont été complétés pour introduire les services de commutation de paquets (CP). Le premier service CP a été appelé General Packet Radio Service (GPRS) et a été lancé commercialement en 2000. Les utilisateurs se sont tournés depuis vers les solutions de nouvelles générations. Les communications GSM étant devenues bon marché, elles ont été le terrain de prédilection des applications IoT (utilisation du service SMS) jusqu'aux années 2010 et l'avènement des nouvelles technologies LPWANs. Malgré une bonne couverture, ce sont des solutions peu efficaces d'un point de vue énergétique.

UMTS et LTE

Les solutions 3G déployés dans les années 2000 n'ont eu que peu d'impacts sur les solutions IoT en raison des débits et des coûts inadaptés à ce contexte.

Le Long Term Evolution (LTE) implante un cœur de réseau entièrement sur IP (Internet Protocol) délaissant les CC. Il abandonne également les codes orthogonaux pour revenir à un multiplexage des utilisateurs en temps et en fréquence. La technique utilisée est l'Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), elle permet de limiter les interférences entre terminaux en conservant une notion d'orthogonalité lorsque les signaux sont synchronisés [51]. Toutes ces améliorations successives font du standard LTE une technologie de communication sans fil avec une forte QoS. Par conséquent, la majorité des objets qui l'utilisent sont à forte valeur ajoutée comme les caméras de surveillance ou les montres connectées.

LTE-M et NB-IoT

Les trois prochaines technologies font partie de la nouvelle génération de réseau de communication sans fil (5G) et il convient de la définir afin de comprendre leurs rôles dans ce nouvel éco-système. La 5G est la génération de connectivité cellulaire pour la prochaine décennie et au-delà. Elle est mise en place pour répondre aux exigences de l'IMT-2020 [52]. L'ensemble initial de spécifications techniques 5G, fondé sur LTE et une Nouvelle Radio (NR), a été finalisé début 2018 dans le cadre de la Release 15. Les premiers déploiements commerciaux ont été un peu freinés par la pandémie covid-19 et ont eu lieu fin 2020. La technologie principale est la NR, elle vise des débits jusqu'à 10 Gbit.s^{-1} , une capacité de trafic de zone de 10 Mbit.s^{-1} par mètre carré, une latence de 1 milliseconde et une mobilité jusqu'à 500 km/h en maintenant une QoS acceptable (cas d'usage des Trains à Grande Vitesse). Elle vise donc les deux segments, piliers des types de services d'après la classification de l'ITU, que sont le haut débit mobile (enhanced mobile BroadBand (emBB)) et les communication ultra-fiable contraintes en latence (ultra-Reliable and Low Latency Communications (uRLLC)). Le dernier type de service identifié par l'ITU est le massive Machine Type Communications (mMTC), qui partage les aspirations et les défis décrits dans l'introduction puis la section 2.1 sur l'IoT. Le segment mMTC a la particularité de définir des objectifs techniques précis, une définition partagée par l'ITU [52–55] et le 3GPP [56] et résumée dans le Tableau 2.1.

Le LTE-M vise à tirer bénéfice des infrastructures LTE pour agrandir le spectre des services IoT. Il utilise une largeur de bande de 1.4 MHz (la plus petite que peut spécifier un

eNodeB dans LTE), possède un débit maximum de 200 kbit.s^{-1} , met en place des mécanismes d'économie d'énergie et un mode d'opération en half-duplex (réduisant la complexité et le coût des terminaux). Il ne demande qu'une mise à jour logicielle des eNodeB ce qui réduit largement le coût des déploiements [57]. Les terminaux et leurs modules de communication sont quant à eux bien spécifiques. Toutefois, le LTE-M reste du haut de gamme en comparaison avec les autres technologies LPWANs (SigFox et LoRaWAN), voir Tableau 2.2. En ce qui concerne les exigences mMTC (Tableau 2.1), grâce aux répétitions un Maximum Coupling Loss (MCL) de 160 dB peut-être atteint avec un débit Downlink (DL) de 1400 bits.s^{-1} et Uplink (UL) de 250 bits.s^{-1} d'après le rapport technique du 3GPP [56]. L'objectif de capacité est atteint pour un trafic considérant un message utile de 50 octets UL envoyé toutes les 12 heures [34, 56].

La nouvelle interface radio et protocolaire NB-IoT (décrite dans le Chapitre 3), quant à elle, offre une rupture bien plus nette avec les technologies 3GPP pré-existantes : son but est de satisfaire a minima les exigences ITU du Tableau 2.1 et d'aller au-delà comme c'est le cas en termes de capacité où le million d'appareils par km^2 peut être envisagé (démonstré dans le Chapitre 4). Le NB-IoT a été introduit dans la Release 13 puis étendu dans la Release 14 et 15 pour prendre en charge essentiellement de plus forts débits (jusqu'à la centaine de kbit.s^{-1} [59]). Cette technologie fait partie intégrante de l'éventail des solutions 5G et la littérature y réfère souvent en tant que "5G NB-IoT" [60, 61] et pour cause : le réseau LTE n'est pas adapté au déploiement des canaux du NB-IoT sur 180 kHz et l'implantation de nouvelles fonctions réseau comme le Service Capability Exposure Function gateway (SCEF) [61], voir Figure 3.4, peuvent revenir cher aux opérateurs. En revanche, la flexibilité du réseau 5G vis-à-vis de l'utilisation des ressources (mémoire, radio et calcul), découpage en slices (tranches) de type de service 5G et la virtualisation des fonctions du réseaux (Network Function Virtualization (NFV) sont autant d'atouts permettant de déployer à moindre coût un réseau NB-IoT. Le NB-IoT, le sujet principal de ce doctorat, sera décrit plus longuement dans le Chapitre 3.

5G-NR Light

Les exigences du segment mMTC doivent permettre de satisfaire les demandes des applications LPWANs actuelles et futures. Puisque NB-IoT et LTE-M ont atteint les exigences de ce segment, il est attendu une intégration de ces technologies dans les réseaux futurs, notamment 5G.

Cependant, il existe des cas d'utilisation (montres connectées, drones pilotés à distance, grues et objets contrôlés à distance [62]) qui nécessitent une complexité moindre des dispositifs et une consommation d'énergie réduite par rapport à ce qui peut être fourni par les Releases 15 et 16 de la NR et qui, en même temps, ont des exigences plus élevées en termes de latence et de débit par rapport à ce qui peut être fourni par le NB-IoT ou le LTE-M. Le 3GPP a lancé des activités (toujours en cours) dans la Release 17 [63] sur les dispositifs fondés sur NR à capacité réduite [64, 65], ou NR-Light, afin de ré-utiliser les infrastructures, voire les terminaux eMBB classiques pour des applications moins énergivores. On peut résumer les caractéristiques du NR-Light ainsi :

- En termes de réduction de complexité : le NR-Light permet de réduire la largeur de

Critère	Description	Exigence
Couverture	Le MCL qui est visé doit dépasser de 20 dB celle de LTE estimée à 144 dB. Le MCL représente toute les pertes entre le terminal et la station de base, calculs décrits en Annexe D	164 dB MCL
Débit	Une exigence de couverture ne prend tout son sens que si elle est associée à un objectif de débit. Il est donc exigé que les technologies candidates fournissent un débit de données d'au moins 160 bits.s ⁻¹ en limite de couverture.	160 bits.s ⁻¹
Latence	Le segment mMTC est censé fournir des services tolérants aux délais. En cas de messages d'alerte, une exigence de latence de 10 secondes a été fixée.	10 s
Capacité	Prendre en charge au moins 52 547 terminaux connectés à l'intérieur d'une cellule. Ce chiffre est fondé sur l'utilisation de 40 dispositifs par foyer, prenant l'hypothèse d'une densité urbaine Londonienne fournie dans [56, 58] (densité de 1517 foyers par km ² et distance entre les sites cellulaires de 1732 m).	60 000 terminaux par km ²
Efficacité énergétique	Pour garantir un fonctionnement indépendamment de l'accès à une source d'alimentation secteur, et avec des exigences minimales sur la capacité de la batterie, il est prévu qu'une batterie de 5 watts-heure (Wh) tienne au moins 10 ans dans les situations de couverture les plus extrêmes (voir Chapitre 4).	10 ans avec 5 Wh
Complexité Coût	Une complexité faible est nécessaire pour encourager la production d'équipements en masse à moindre coût.	Module de com simple - <10\$
Fiabilité	La capacité d'un réseau est en partie reliée à la fiabilité ou taux de réussite de communication garanti par le réseau. Le segment mMTC impose une fiabilité élevée par rapport aux autres solutions IoT. Le mMTC est un compromis entre l'ultra fiabilité de la 5G-NR et le manque de garanties des technologies LPWANs en bande sans licence	99%

TABLE 2.1 Vue d'ensemble des objectifs de performance du segment mMTC dans le cadre de la 5G.

bande utilisée lors de la communication, d'utiliser un mode half-duplex et d'utiliser un terminal avec moins d'antennes (moins cher).

- Pour la consommation énergétique, le NR-Light implante l'extended Discontinuous Reception (eDRX) (sur lequel nous reviendrons) et réduit la quantité de fenêtres à démoduler dans le canal de contrôle.

À la vue de ces caractéristiques, on peut faire le parallèle entre 4G et 5G et remarquer qu'il semblerait que le NR-Light est à la 5G-NR ce qu'est le LTE-M au LTE. Il ne faut donc pas confondre le NR-Light avec une éventuelle technologie qui viserait les cas d'usage du segment uRLLC mais bien une version mMTC de la 5G-NR comme le souligne le schéma comparatif de la Figure 2.1

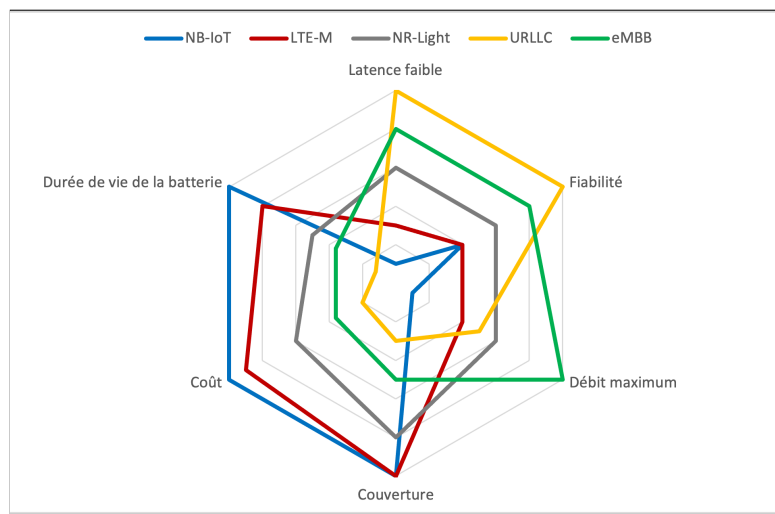


FIGURE 2.1 Vue macroscopique du découpage (slicing) des technologies 5G.

2.2.2 Bandes libres - sans licence

Réseaux LoRaWAN

LoRaWAN est un protocole de communication et une architecture système pour les terminaux IoT [66]. La pile protocolaire est constituée d'une couche applicative au-dessus des couches appelées LoRa MAC et LoRa PHY. Initialement seule la couche PHY appelée LoRa a existé (2009). Elle utilise une technique de modulation Chirp Spread Spectrum développée par la start-up française Cycleo¹ [57]. Leur succès a vite rassemblé constructeurs et entreprises de télécommunication pour former en 2012 une alliance ouverte et à but non-lucratif appelée la LoRa Alliance afin de développer le reste de la pile protocolaire. Aujourd'hui la LoRa Alliance compte près de 500 membres [17]. Il est important de noter que la technologie LoRa PHY est restée propriétaire alors que le reste de la pile protocolaire est open-source.

La couche physique LoRa étale les symboles dans une séquence de bits dont la longueur dépend du Spreading Factor (SF). Plus la séquence est courte plus le taux de codage est faible

1. Rachetée par Semtech en mai 2012.

et le débit d'information utile élevé. Ainsi, en utilisant le plus long SF possible, un MCL de 157 dB peut être atteint [67]. Les réseaux LoRaWAN ont une topologie en étoile, c'est-à-dire que les terminaux communiquent directement avec une (ou plusieurs) station(s) de base.

La couche 2 ou couche Media Access Control (MAC) est divisée en trois types de services nommés classes. Dans la classe A, la connexion est toujours instanciée par le terminal (en UL). Le terminal ouvre ensuite au moins deux fenêtres de réception permettant de recevoir de la donnée, des commandes ou l'accusé de réception de la station de base (en mode *confirmed*). Cette classe doit être obligatoirement implantée dans tous les réseaux. La classe B (pour *Beacon*) synchronise le terminal et le Serveur Réseau pour donner une référence de temps commune. Ainsi le terminal peut ouvrir des fenêtres de réception pour permettre des communications initiées par le réseau. Le paramétrage de l'espacement de ces fenêtres permet de jouer sur le compromis entre latence des communications DL et dépense d'énergie. Enfin la classe C est la classe de service qui dépense le plus d'énergie, le terminal est continuellement en train d'écouter le spectre sauf quand il émet. Ainsi ces terminaux sont joignables à tout moment ce qui réduit la latence des communications DL.

Enfin, une station est reliée au reste du réseau par la technologie choisie par le propriétaire de la station (3G/4G, Ethernet, Fiber to the Home (FTTH) ...). Elle transmet les messages reçus en IP jusqu'au Serveur Réseau puis celui-ci achemine l'information jusqu'aux Serveurs Applicatifs. En ce qui concerne la largeur de bande ISM sur laquelle opère LoRaWAN, cela dépend de la région : en Europe le canal peut faire 125 kHz ou 250 kHz et 125 kHz ou 500 kHz aux US [66].

Le débit modulable et la possibilité de choisir une classe de services sont des atouts qui jouent certainement un rôle dans la pérennité de LoRaWAN en tant que technologie LPWAN fonctionnant sur bandes ISM. Le Tableau 2.2 la compare aux autres technologies WAN.

SigFox

SigFox désigne à la fois un opérateur et la technologie de communication LPWAN dont il est le seul propriétaire. L'opérateur, créé en 2010, est l'opérateur terrestre dont la couverture est la plus étendue - 1.3 milliard de personnes, 72 pays et 5.8 millions de kilomètres carrés couverts en 2021 [16]. L'opérateur se revendique 0G (lire "zéro G"); en opposition aux technologies de plus en plus complexes du 3GPP, Sigfox prône la simplicité, le bas débit et la connectivité à bas coût.

La technologie Sigfox utilise une modulation simple D-BPSK pour l'UL et GFSK pour le DL. Une des particularités des signaux Sigfox est l'utilisation de la modulation en bande ultra étroite, Ultra-Narrow Band (UNB) [68], dont chaque transmission occupe seulement 100 Hz. L'intérêt est d'augmenter la couverture car l'énergie est concentrée sur une faible bande ce qui augmente le rapport signal à bruit (Signal to Noise Ratio (SNR)). La couverture Sigfox est estimée entre 3 et 10 km dans les scénarios urbains et entre 30 et 50 km dans des scénarios ruraux [68]. Le prix à payer est un débit faible comparé aux autres technologies de communications : 100 bits.s^{-1} pour l'UL et 600 bits.s^{-1} pour le DL. Afin de réduire l'*overhead* réseau et donc réduire la consommation énergétique, Sigfox prévoit une taille de données fixe

par message (12 octets pour l'UL et 8 octets pour le DL) et un accès au canal physique pseudo aléatoire [16].

Comme LoRaWAN, Sigfox utilise les bandes ISM pour communiquer ce qui contraint les terminaux en termes de temps d'émission journalier. Ainsi un terminal ne peut pas dépasser l'envoi de 140 messages par jour (un toutes les 10 minutes) pour un coup annuel de 14€ [69]. Par conséquent, Sigfox se positionne sur le marché de l'IoT très bas coût, faible débit et peu exigeant (e.g. capteurs dans les villes intelligentes, l'agriculture ou l'observation de l'environnement).

2.3 Systèmes de communication IoT par satellite

L'intérêt de l'utilisation des communications par satellite dans un contexte IoT a été discuté dans sa globalité dans l'introduction. Cette section a pour objectif de décrire les grandes familles de systèmes satellitaires avec leurs diverses caractéristiques et leurs contraintes. Le Tableau 2.3 compare les solutions IoT par satellite. Cette discussion est nécessaire pour étudier les possibilités d'intégration du NB-IoT dans un contexte satellite.

2.3.1 Prélude sur les types d'utilisation du satellite

Avant tout, il convient de définir le type de communication NB-IoT satellite que nous considérons dans ce travail. Dans la littérature et dans la standardisation du 3GPP [32], trois types d'utilisation du satellite sont retenus :

- *Backhauling* : le terminal a accès à une station de base terrestre qui n'est pas connectée au cœur de réseau. Le satellite agit comme un relais entre la station de base et le cœur de réseau. Ce type d'utilisation permet d'atteindre une zone d'intérêt lorsque celle-ci est hors d'atteinte des réseaux classiques. En revanche la mobilité du terminal reste limitée à la couverture des stations de base terrestre. Le backhauling a déjà été déployé pour des communications mobiles classiques GSM/UMTS/LTE [80], mais la latence introduite par le satellite et les contraintes de débit réduisent les cas d'usage. Dans le cadre IoT, où les contraintes en latence et en débit sont basses (voir Tableau 2.1), le backhauling semble être plus compétitif, comme en atteste les récentes initiatives que sont FleetSpace [81] et Hiber Global [82].
- Accès direct en mode transparent : Le terminal communique directement avec le satellite qui est utilisé comme un simple répéteur de signal. Ce dernier est traité au sol. Puisque le terminal communique directement avec le satellite, plusieurs défis sont à relever pour ré-utiliser des terminaux terrestres. L'intérêt de ce type de communication est de profiter de la couverture étendue des systèmes satellite et d'un déploiement relativement rapide et peu coûteux. Entre autre, une seule station de base (située sur le segment sol du satellite) a le potentiel de couvrir une très large zone.
- Accès direct avec traitement à bord (On-Board Processing (OBP)) : le terminal communique directement avec le satellite qui implante une partie des fonctions de la station

	PHY	2G	4G	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	LTE-M	NR-Light
Forme d'onde	GMSK + F/TDMA		OFDM + SC-FDMA	CSS + CDMA	Ultra Narrow Band	OFDM + SC-FDMA	OFDM + SC-FDMA	OFDM + SC-FDMA
Rayon	35 km		100 km	Protocole sans limites	Protocole sans limites	120 km	100 km	100 km
Couverture / Pénétration	144 dB MCL		144 dB MCL	160 dB MCL	164 dB MCL	170 dB MCL	160 dB MCL	154 dB MCL
MAC								
Débit (UL/DL)	30 kbit/s		50 Mbit/s	25 kbits (UL) par jour	13.5 kbits (UL) par jour	106 kbit/s	300 kbit/s	-
Couche MAC	30 kbit/s		100 Mbit/s			79 kbit/s	380 kbit/s	
Latence 12 octets UL	<50 ms (connecté)		<50 ms (connecté)	<2 s (non garanti)	6 s (non garanti)	<500 ms (non connecté)	<500 ms (non connecté)	<50 ms (connecté)
Latence 8 octets DL	<50 ms (connecté)		<50 ms (connecté)	Injoignable sauf en Classe C	6 s (non garanti)	<500 ms (non connecté)	<500 ms (non connecté)	<50 ms (connecté)
Capacité terminaux	-		2 880 000 [70]	100 000 [71]	310 000 [72]	1 067 000 [34]	4 900 000	2 880 000 [70]
32 octets UL - 2h	-		1.4 MHz	3 canaux de 125 kHz	192 kHz	180 kHz - UPO	1.44 MHz - UPO	1.4 MHz
Fiabilité 99%	-		-	sans ACKs	3 msg requis	voir section 3.5	-	-
Système								
Durée de vie 12 octets-12h	<10 jours		<5 jours	>10 ans [73]	>10 ans	>10 ans [74, 75]	>7.5 ans [76] (non connecté)	Devrait être idem à LTE-M
Bande de fréquence	Licenciée 200 kHz par canal		Licenciée 1.4 MHz par canal	ISM 125, 250 ou 500 kHz par canal	ISM 192 kHz	Licenciée 180 kHz par canal	Licenciée 1.4 MHz par canal	Dépend du Slicing 5G
Fiabilité	garanti 99.999 %		garanti 99.999 %	non garanti	non garanti 99.9% visé[72]	garanti 99 %	garanti 99 %	garanti 99.9 %
Coût module	10 €		30 €	15 €	8 €	15 €	30 €	>100 €
Prix abonnement	3€/mois		10€/mois	0€ si auto-déploiement 1 à 2 €/mois sinon [77]	7.2 à 16.8€/an pour 2 à 140msg/jour [69]	16 à 20€/an pour 60 Ko à 1 Mo [78]	2€/mois [79]	Dépendra du déploiement

TABLE 2.2 Comparaison des principales technologies de communications WAN.

de base. La latence est réduite de moitié et une couverture mondiale est possible sans la multitude de stations sols nécessaires dans le cas précédent. Ce gain est largement contrasté par la complexité de la charge utile du satellite qui doit être spécialement fabriquée pour des communications IoT spatiales. Ainsi le 3GPP ne souhaite pas considérer le cas OBP pour les satellites géostationnaires et privilégie le mode transparent pour les satellites à basse altitude.

Les trois types de communication par satellite décrits ci-dessus sont illustrés par la Figure 2.2.

Dans nos travaux de recherche, nous nous sommes focalisés sur l'impact d'une utilisation en accès direct en mode transparent. Les liens *Backhaul* ne présentant pas de difficultés particulières pour l'IoT (peu de contraintes de QoS) et l'OBP n'apportant de gain dans le cadre de communications IoT que pour les constellations avec peu de satellites.

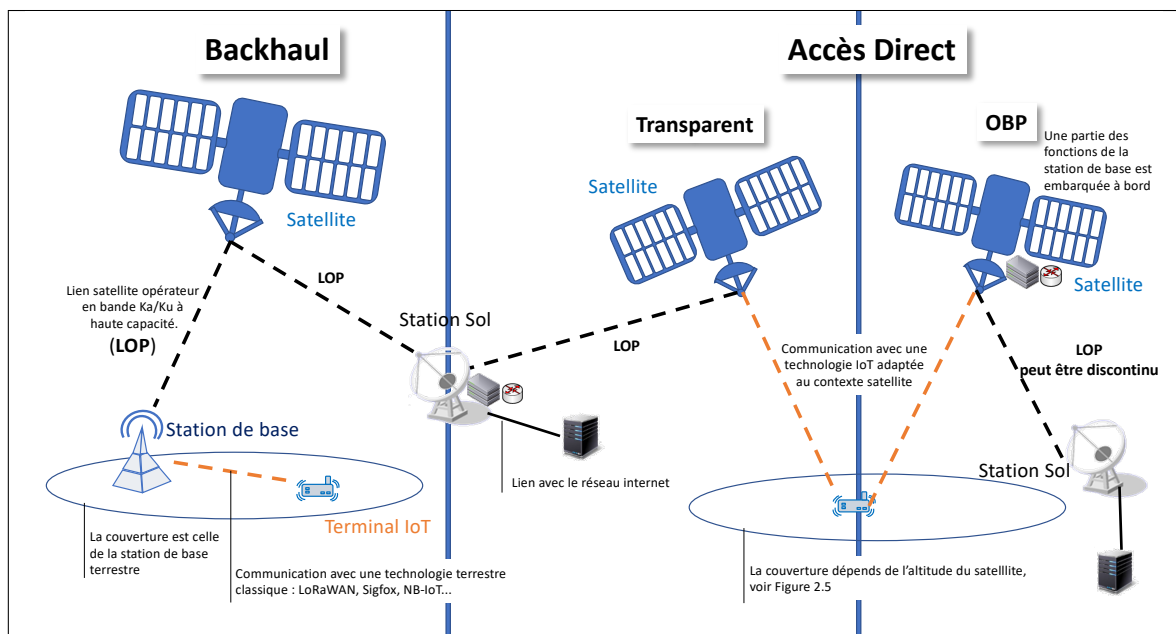


FIGURE 2.2 Illustration des trois types de communications par satellite considérées par le 3GPP dans la standardisation des NTN

2.3.2 Systèmes Géostationnaires - GEO

L'orbite des satellites géostationnaires, appelée GEO, est équatoriale, circulaire et synchrone avec la rotation de la terre. La caractéristique principale des satellites géostationnaires est qu'ils sont situés à une altitude de 35 786 km (± 5 km). Cette altitude permet à ces satellites d'apparaître en un point fixe de l'espace lorsqu'ils sont vus depuis la surface de la Terre bien que se déplaçant à 3.074 km.s^{-1} par rapport au centre de la planète.

Les satellites en orbite GEO revêtent différents avantages :

- La couverture du satellite est toujours présente du point de vue d'un terminal. La continuité de la communication avec le même satellite est assurée tant que les conditions au sol le permettent (pas de *handover*).

- Les faisceaux du satellite (un terme du monde satellite qui s'apparente aux cellules du monde terrestre) peuvent être déployés sur les zones d'intérêts. Leur couverture peut donc s'adapter au service à fournir, en prenant la forme des continents ou des routes commerciales maritimes. Il est donc possible d'optimiser la puissance énergétique rayonnée d'un satellite GEO.
- Tout comme la distance entre le terminal et la station de base, les vitesses relatives dans le monde du spatial sont supérieures d'un ou de plusieurs ordres de grandeur par rapport à celles rencontrées sur Terre. Or plus les vitesses relatives entre deux objets sont élevées, plus leurs communications subissent un effet Doppler important (décrit en annexe A).
- La source d'énergie primaire dans l'espace est celle émanant du soleil. A l'aide de panneaux photo-voltaïques, les satellites sont capables de rayonner sur de larges couvertures. L'avantage des satellites GEO est qu'ils se trouvent en permanence à l'extérieur du cône d'ombre de la terre et bénéficient donc d'un éclairage quasi-constant (72 minutes d'ombre maximum par jour en période d'équinoxe [83]).

En raison de la distance, les satellites de télécommunication en orbite GEO sont généralement de grosse taille (plusieurs tonnes) car ils ont besoin de plus de puissance et coûtent chers à mettre en orbite. Leurs durées de vie sont de l'ordre de la dizaine d'années.

Les satellites géostationnaires ont depuis toujours constitué l'essentiel du marché télécom. Le *Big Four*, composé de SES, Intelsat, Eutelsat et Telesat, captait à lui seul deux tiers des revenus du marché en 2012 d'après [84]. En rajoutant Viasat et Inmarsat, près de 80% du marché peut être considéré comme géostationnaire.

Or nous assistons à un bouleversement avec l'avènement des méga-constellations en orbite basse [85, 86]. Après que SpaceX a bouleversé le marché du lancement de satellites, c'est au tour de OneWeb (254 satellites lancés à ce jour sur 648), dont les 10 premiers prototypes ont été construits par la division *Defence and Space* d'Airbus à Toulouse, de faire du bruit côté opérateur. Le premier lancement de OneWeb en février 2019 fut vite suivi par celui de Starlink, une initiative du constructeur SpaceX, en juin 2019. Starlink compte désormais près de 1400 satellites (30 000 prévus) et offre ses premiers services depuis mars 2021. Ces deux initiatives devraient être suivies dans les prochaines années par celle de Telesat (298 satellites prévus) et Kuiper (projet d'Amazon prévoyant 3236 satellites). La tendance historique des opérateurs GEO à capter l'essentiel des revenus du marché est probablement sur le point de s'inverser au profit des satellites en orbite basse (LEO).

Il est donc primordial de considérer les systèmes en orbite LEO dans l'écosystème IoT, tant les méga-constellations prévoient une couverture globale à un coût relativement bas.

2.3.3 Systèmes en orbite basse - LEO

L'orbite terrestre basse se caractérise par une altitude se trouvant généralement entre 500 et 1500 km. Pour se maintenir à une telle altitude, le satellite doit maintenir une certaine vitesse équilibrant la force de l'apesanteur : plus le satellite est bas plus sa vitesse circulaire doit être grande (entre 3.07 km/s à 35 900 km et 7.86 km/s à 200 km).

Le satellite est donc constamment en mouvement par rapport à la surface, ce qui a) oblige les systèmes de communications à gérer la sélection du satellite et les *handovers* qui vont devenir fréquents (toutes les 2 minutes pour OneWeb), b) la couverture du satellite est plus petite, un plus grand nombre de satellites est donc requis pour fournir une couverture continue et enfin c) la vitesse relative entre le satellite et le terminal est bien plus élevée que dans le terrestre (350 km/h pour les Trains à Grande Vitesse), l'effet Doppler ne peut donc pas être négligé comme dans le cas GEO.

Ces difficultés sont compensées par des avantages :

- Une altitude basse permet de réduire la latence entre le terminal et le cœur de réseau – 32ms pour OneWeb lors des premiers tests [87] (plus faible que l'ADSL par exemple). Cette latence permet d'envisager des services Internet plus performants (les limitations du protocole Transmission Control Protocol (TCP) sur orbite GEO sont des problèmes connus [88]) et même des services en temps réel comme le jeu en ligne ou le streaming vidéo ;
- La proximité entre le terminal et le satellite facilite la communication. Cela a un impact positif sur les débits et la dépense énergétique des terminaux ;
- Cette proximité permet également d'avoir des faisceaux relativement petits sans avoir besoin d'antennes directives trop coûteuses, demande moins d'énergie et moins d'exigences du matériel (par exemple un rapport gain à bruit thermique de l'antenne (G/T) moins élevé). Par conséquent, le coût de la mise en orbite et le coût du satellite LEO sont généralement moindres que dans le cas d'un satellite GEO ;
- Enfin, cela apporte une diversité concernant la direction des communications.

La Figure 2.3 permet d'illustrer les ordres de grandeur des orbites GEO et LEO par rapport à la circonférence de la Terre.

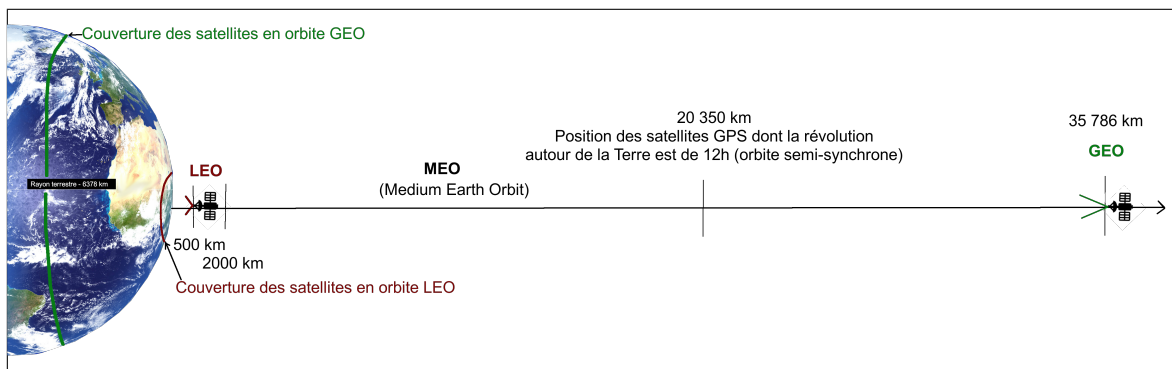


FIGURE 2.3 Illustration des orbites GEO et LEO, et de leurs couvertures.

2.3.4 *New Space* et nanosatellites

Le terme "nanosatellite" convient à un satellite dont la masse se situe entre 1 et 10 kg [89]. Grâce aux progrès constants de la miniaturisation et à l'augmentation des capacités électroniques, les nanosatellites sont de plus en plus efficaces et aptes à accomplir des missions

commerciales qui nécessitaient auparavant des petits satellites ou minisatellites [90] (entre 100 et 500 kg). Ce sont généralement des satellites en orbite basse (LEO) partageant les caractéristiques décrites dans la section précédente, mais avec la particularité d'utiliser beaucoup moins de puissance et une antenne moins efficace. Le compromis est le suivant : abaisser les coûts de production et de lancement au prix des performances du système. Un autre avantage des systèmes de nanosatellites est leur simplicité, le temps nécessaire au déploiement d'un service peut être inférieur à un an alors qu'il faudra compter en moyenne trois ans pour confectionner un satellite géostationnaire et ajouter six mois de mise en orbite.

Le contexte IoT - bas débit, peu exigeant en termes de latence mais sensible au coût - se prête bien à cette solution relativement récente (premier CubeSat lancé en juin 2003). L'engouement plus récent pour le nouveau paradigme IoT donne un second souffle au marché des nanosatellites qui voit fleurir de nombreuses solutions [24].

Au cours de mon doctorat, plusieurs solutions IoT nanosatellites ont pris leur envol et certaines sont particulièrement remarquables. Astrocast est une entreprise Suisse qui a lancé ses premiers satellites au début de 2019, elle en prévoit 20 de plus d'ici la fin 2021. Leur technologie permet de communiquer de façon bidirectionnelle et directement entre un terminal et un satellite. Elle a été développée en partenariat avec des équipes d'*Airbus Defence and Space* [29]. L'utilisation d'une transmission en bande très étroite lui permet d'obtenir une bonne réception sur orbite LEO comme GEO. De son côté, Fleet Space est une entreprise qui a conçu une gateway LoRaWAN avec un lien satellite, elle propose donc un service de backhauling pour des terminaux LoRaWAN (déjà 7 nanosatellites lancés, 140 prévus). Lacuna Space, elle, est une entreprise soutenue par l'ESA et qui propose de connecter directement les terminaux LoRaWAN avec les nanosatellites en orbite basse. Enfin Hiber est une solution propriétaire comme celle d'Astrocast mais qui utilise les bandes libres ISM à l'instar de Sigfox et LoRaWAN.

Les différentes solutions IoT par satellite actuelles sont comparées dans le Tableau 2.3.

2.3.5 Initiatives NB-IoT par satellite

Du côté des satellites GEO, Ligado souhaite déployer un réseau IoT 5G à partir des technologies NB-IoT et LTE-M. Une ambition possible puisqu'Inmarsat, en partenariat avec le constructeur de module Mediatek, a révélé que les communications avec un satellite GEO étaient possibles à la fois en voie descendante et en voie montante.

Du côté des nanosatellites (orbite basse), c'est la start up Sateliot qui semble être la plus proche de déployer un service NB-IoT.

Éventail des solutions IoT	Services MIMS historiques (non-exhaustif)			Méga Constellations		Nano Constellations - New Space		
	Inmarsat	Orbcom - OG2	Argos	StarLink	OneWeb	Astrocast	Fleet	HiBer
Performances								
Débit (UL/DL) Taille du message (Couche MAC)	464 kbit/s 464 kbit/s	4 Mbit/s 310 Mbit/s	6 octets (position GNSS) Pas de DL	29 Mbit/s 139 Mbit/s	50 Mbit/s 200 Mbit/s [91]	50 octets UL et DL	LoRaWAN voir Tableau	140 octets UL/DL
Couverture Continue	Oui	Non	Non 42 passages/jour	Oui	Oui	Non	Non	Non
Statut	Opérationnel 14 sat.	Opérationnel 12 sat.	Opérationnel 3 sat.	Opérationnel 1600 sat.	En déploiement 248/650 sat.	Opérationnel 6/80 sat.	Opérationnel 10/100 sat. + utilise OG2	Opérationnel 4/48 sat.
Orbite	GEO	LEO - 750 km -	LEO - 850 km -	LEO - 550 km -	LEO - 1200 km -	LEO - 550 km -	LEO - 570 km -	LEO - 600 km -
Bande de fréquences	Bande L 1.6 GHz	VHF 137-150 MHz	ISM 401.65 MHz	Bande Ku	Bande Ka-Ku	Bande L	Bande L	ISM 400 MHz
Type Com. et poids/taille du terminal	Accès Direct ~ 3kg [92] 38x38x3 cm	Accès Direct [93] 15x11x5 cm	Accès Direct [94] 224 g 20x3x5 cm	Backhaul ~ 5.5 kg 60x60x15 cm	-	Accès Direct <100 g 8x5x2 cm	Backhaul environ 2 kg 20x20X5 cm	Accès Direct ~ 1kg 27x27x3 cm
Coût terminal	1 299 € Hughes 9502	685 € ST-6100	100 € Balise GPS xpress	500 € Antenne/câbles	-	Varie selon quantité [95]	30 € la gateway	- Kodiak
Prix abonnement	>100€/mois	>65€/mois	30€/mois Données illimitées	~ 100€/mois	-	<3€/mois [96]	-	15 € / mois minimum

TABLE 2.3 Comparaison des principaux types de solutions de communication pouvant proposer des services IoT par satellite.

FONCTIONNEMENT DU NB-IOT

La technologie de communication sur laquelle nos travaux de recherche se sont concentrés est le NB-IoT. Nous allons à présent en décrire plus précisément les principales caractéristiques.

Dans une première partie, nous expliquons les lignes directrices de la conception du NB-IoT qui le rendent particulièrement performant en termes de a) coût, b) efficacité énergétique, c) couverture, d) capacité et e) flexibilité. Ensuite, nous détaillerons la pile protocolaire du NB-IoT en nous attardant sur la structure des canaux et leur utilisation (couche PHY) puis sur les procédures du NB-IoT (couche MAC). Les notions présentées dans toute cette section sont nécessaires à la bonne compréhension de nos modèles et des solutions que nous avons proposées.

3.1 Directives de conception

Le NB-IoT présente des directives de conception qui rendent compte de la volonté du 3GPP d'en faire une technologie LPWAN standardisée. Le NB-IoT doit a minima remplir les exigences du segment mMTC décrites dans le Tableau 2.1.

3.1.1 Faible complexité / Faible coût

La complexité et le coût des modems sont principalement liés à la complexité du traitement en bande de base, à la consommation de mémoire et aux exigences sur le matériel en matière de radiofréquences (RF). En ce qui concerne le traitement en bande de base, le NB-IoT est conçu pour permettre un traitement du récepteur à faible complexité pendant la sélection initiale de la cellule et pendant la connexion. Un terminal n'a qu'une seule séquence de synchronisation à chercher pour établir la synchronisation de base du temps et de la fréquence avec la station de base. La séquence de synchronisation a des propriétés pour minimiser l'utilisation de la mémoire (faible taux d'échantillonnage) et la complexité [97]. Le NB-IoT utilise des codes convolutifs simples (le LTE *tail-biting convolution code (TBCC)* plutôt que le turbo code de LTE [98]). De plus, le NB-IoT ne prend pas en charge les ordres de modulation trop élevés (seulement BPSK et QPSK). Enfin le mode de transmission est half-duplex.

Concernant l'utilisation de la mémoire, la fenêtre en termes de Transport Blocks (TB) a été abaissée à deux. Le terminal ne doit garder en mémoire que les valeurs des symboles des deux dernières trames (servant à la mise en place de la corrélation croisée).

Côté équipement RF, grâce au mode *half-duplex* seule une antenne émettrice-réceptrice est requise sans duplexeur¹. Ensuite, pour minimiser l'impact de la connectivité sur l'autonomie de l'appareil, deux classes de puissance de transmission peuvent être utilisées [99]. L'une correspond au niveau de puissance traditionnel des appareils mobiles LTE, soit 23 dBm (classe de puissance 3), et une nouvelle, avec une puissance de sortie moindre, à 20 dBm (classe de puissance 5). Par la suite, la version 14 du 3GPP a ajouté une classe de puissance d'émission encore plus faible, à 14 dBm (classe de puissance 6). Il est donc possible d'intégrer directement l'amplificateur de puissance (Power Amplifier (PA)) sur la puce ce qui contribue à réduire les coûts[97].

Enfin, tout comme les autres technologies 3GPP, le coût d'un terminal NB-IoT pourrait être réduit par un facteur d'échelle sur le nombre de terminaux.

3.1.2 Efficacité énergétique / Durée de vie

Dans le cas des communications IoT, la durée de vie de la batterie dépend fortement du comportement du terminal en dehors des moments d'émission et de réception de données. Le terminal passe en fait la grande majorité de sa vie en mode inactif, car la plupart des applications IoT (section 2.1.3) ne nécessitent que la transmission peu fréquente de petits messages. Or, un terminal en mode inactif doit contrôler le *paging* et effectuer des mesures de mobilité. Bien que la consommation d'énergie soit alors beaucoup plus faible qu'en mode connecté, il est possible de réaliser des économies d'énergie supplémentaires en augmentant simplement la périodicité du *paging* ou en n'obligeant pas le terminal à contrôler le *paging*. Les Releases 12 et 13 du 3GPP ont introduit la réception discontinue étendue (eDRX, voir Figure 3.10) et le mode économie d'énergie (Power Saving Mode (PSM), voir Figure 3.11) pour prendre en charge ce type de fonctionnement et optimiser la consommation d'énergie du terminal. Ces deux mécanismes d'économie d'énergie sont détaillés dans la section 3.4.

3.1.3 Couverture

L'amélioration de la couverture ou *Coverage Enhancement* (CE) dans le NB-IoT est principalement obtenue en échangeant du débit de données contre de la couverture.

Tout d'abord, des répétitions peuvent être utilisées pour garantir des communications fiables (à 99%) y compris pour des terminaux situés aux extrémités de la cellule (164 dB de MCL voir Tableau 2.1) mais avec un débit de données réduit. Aussi, le NB-IoT utilise-t-il la technologie radio Single-Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) pour l'UL où le *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR) est faible : on parle d'enveloppe quasi-constante. Ainsi, la marge de réduction de la puissance par rapport à la distorsion de l'amplificateur (PA) est plus faible [100].

1. Dispositif électronique permettant l'utilisation d'une même antenne pour l'émission et la réception du signal

Ensuite, le NB-IoT permet une transmission en bande étroite (*narrow-band*), sur une largeur de 3.75 kHz (contre au minimum 180 kHz pour LTE ou LTE-M). Cela concentre l'énergie émise par le terminal sur un unique symbole et augmente le rapport signal à bruit (SNR) au détriment du débit (un symbole à la fois plus long, voir Figure 3.5).

3.1.4 Capacité / Densité

Dans nos travaux et plus généralement dans le contexte des technologies LPWANs, on appelle capacité la mesure du nombre de terminaux pouvant être pris en charge dans une même cellule sur une largeur de bande donnée. Pour l'évaluer, on définit généralement un *traffic* (une quantité de donnée UL et DL, et un intervalle de temps entre chaque communication). Le 3GPP parle de densité de connexion [33, 34]. Puisque les terminaux IoT sont la plupart du temps inactif, les mécanismes d'économie d'énergie eDRX et PSM augmentent la capacité puisqu'ils permettent aux terminaux NB-IoT de sortir du mode connecté entre deux communications (Figures 3.10 et 3.11).

Ensuite, le NB-IoT introduit un moyen d'obtenir une transmission avec une efficacité spectrale satisfaisante en UL pour les terminaux aux extrémités des zones de couvertures. Le débit d'information envoyé sur un canal est plus tributaire du SNR que de la largeur de bande [97] (phénomène expliqué en Annexe B). Ainsi, la capacité du NB-IoT à concentrer l'énergie sur des sous-canaux de 3.75 kHz lui permet d'atteindre ces zones extrêmes (MCL de 164 dB) avec une fiabilité et une efficacité spectrale relativement bonnes.

3.1.5 Flexibilité de déploiement

Afin d'assurer une flexibilité maximale de déploiement et de se préparer à des scénarios de ré-aménagement (de la bande GSM par exemple), le NB-IoT prend en charge trois modes de fonctionnement : autonome (*stand-alone*), dans la bande (*in-band*) et dans la bande de garde (*guard-band*).

Stand-alone : Ce mode permet de déployer une porteuse NB-IoT (180 kHz de largeur en UL et DL) fonctionnant de manière autonome. L'intérêt est de ré-utiliser la bande occupée par d'autres systèmes. Alors que les porteuses NB-IoT peuvent être déployées côte à côte tous les 180 kHz sans se soucier des interférences, il faut prévoir des bandes de garde de chaque côté des porteuses aux extrémités. La Figure 3.1 montre le déploiement de deux porteuses NB-IoT en remplacement de trois porteuses GSM - une bande de garde d'au moins 100 kHz est nécessaire [56].

In-band et Guard-band : Le NB-IoT est également conçu pour pouvoir être déployé dans les réseaux LTE existants, soit en utilisant un Physical Resource Block (PRB) LTE, soit en utilisant la bande de garde LTE. Ces deux scénarios de déploiement sont respectivement appelés déploiements In-band et Guard-band. La Figure 3.2 illustre ces déploiements. Elle montre une porteuse LTE avec un certain nombre de PRBs. NB-IoT peut être déployé en utilisant un PRB LTE ou en utilisant la bande passante inutilisée dans la bande de garde.

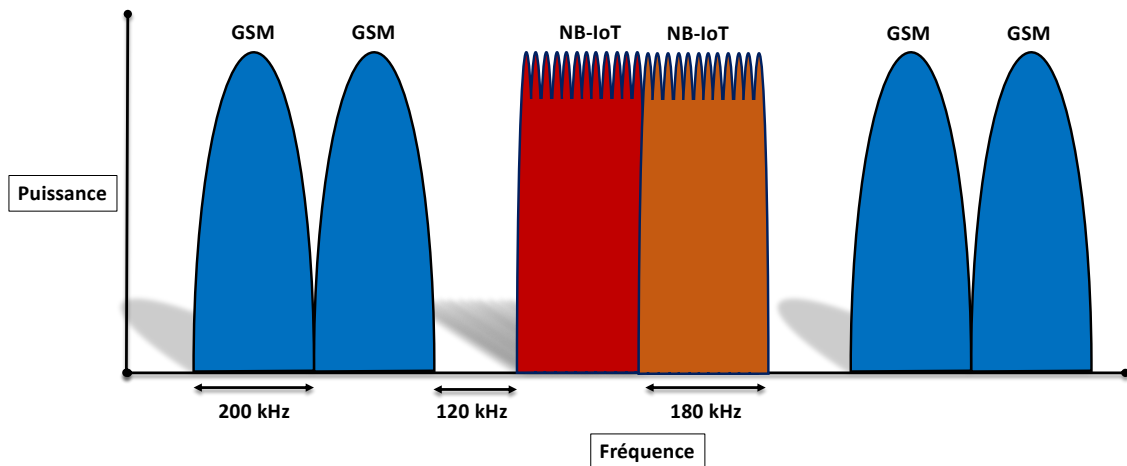


FIGURE 3.1 Déploiement en mode Stand-alone de porteuses NB-IoT

Cette bande de garde provient du fait que la largeur de bande occupée par le signal LTE représente environ 90% de la largeur de bande du canal lorsque la largeur de bande de la porteuse LTE est de 3, 5, 10, 15 ou 20 MHz [101]. Par conséquent, environ 5% de la largeur de bande du canal LTE est disponible de chaque côté comme bande de garde.

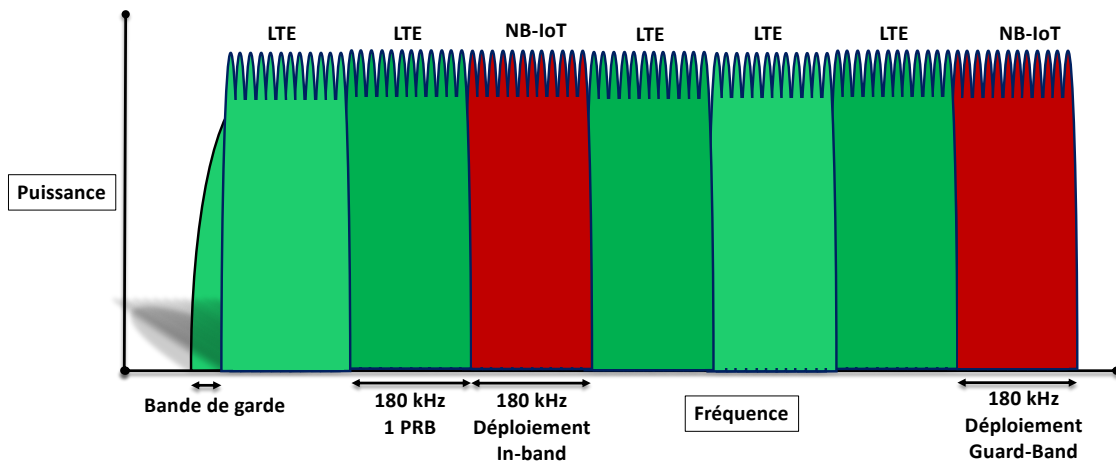


FIGURE 3.2 Déploiement NB-IoT en mode In-band et Guard-band

3.2 Couches protocolaires supérieures

Nos travaux de recherche se sont concentrés sur les performances de la couche d'accès (MAC). Cependant, afin de comprendre le vocabulaire utilisé dans les optimisations dans le plan contrôle – Control Plane Optimization (CPO) et dans le plan usager – User Plane Optimization (UPO), nous faisons ici un résumé de la pile protocolaire du NB-IoT dans le cadre d'un déploiement dans un réseau (de cœur) 4G. La Figure 3.3 montre la pile protocolaire concernant les communications entre l'User Equipment (UE), l'evolved Node B (eNB) et le Mobility and Management Entity (MME) (dans le plan contrôle) ou la Serving Gateway

(SGW) (dans le plan usager).

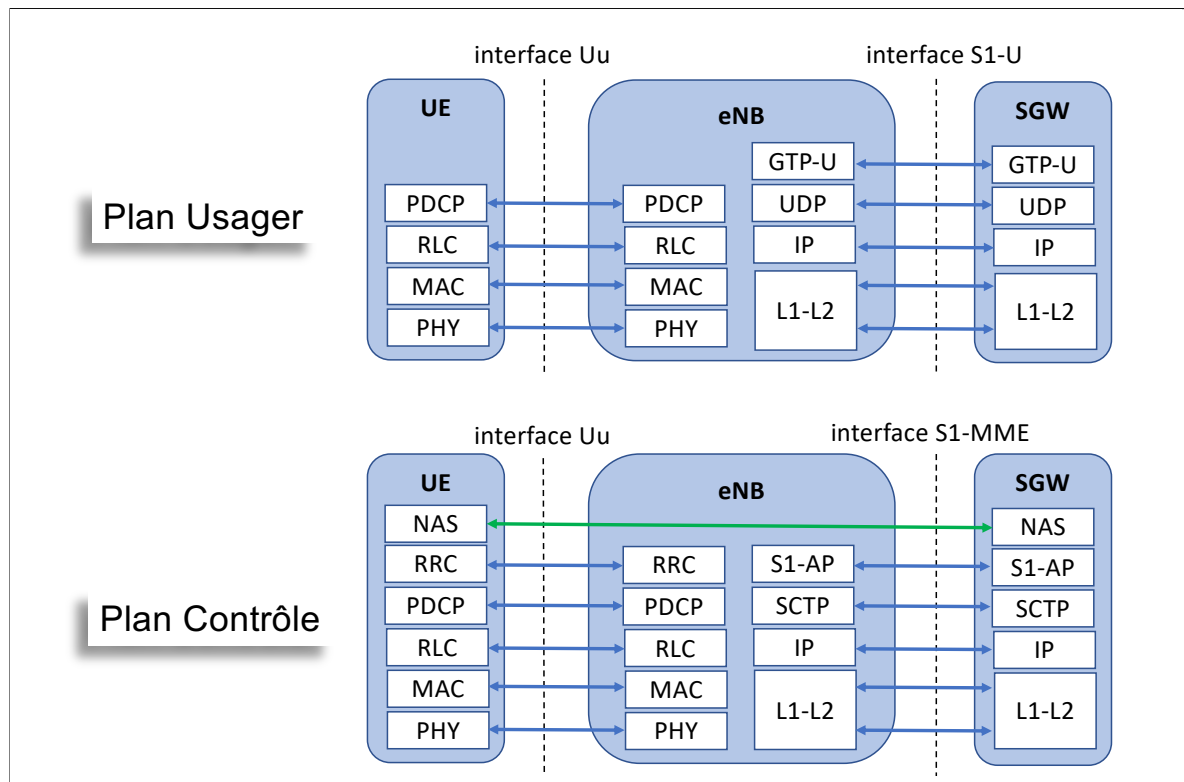


FIGURE 3.3 Pile protocolaire du NB-IoT pour les plans Usager et Contrôle dans le cadre d'un réseau 4G.

Les fonctions des différents protocoles sont les suivantes :

- RLC : *Radio Link Control*, gère le transfert de données avec trois modes différents *Acknowledged Mode (AM)*, *Unacknowledged Mode (UM)* et *Transparent Mode (TM)*. Il s'occupe donc de l'ARQ pour le mode AM et de la détection de duplications pour les modes AM et UM.
- PDCP : *Packet Data Convergence Protocol* s'occupe du chiffrement et de l'intégrité de la donnée pour les plan contrôle et usager. De plus, il compresse l'entête IP (s'il y en a une).
- RRC : *Radio Ressource Control* est utilisé entre l'UE et la Base Station (BS) pour le plan contrôle. Les opérations du RRC sont guidées par une machine à état qui définit les états dans lesquels le terminal peut se trouver (endormi, repos, connecté). En plus de la mise en place de la connexion, le RRC sert au *Broadcast*, au *paging* et à la mise en place des *radio bearers*.
- SCTP : *Stream Control Transmission Protocol* sert à transporter l'information. Il diffère des protocoles UDP et TCP par l'utilisation de chemins redondants pour améliorer la fiabilité de la communication.
- S1-AP : *S1-Application Protocol* fournit le service de signalisation entre le Radio Access Network (RAN) et l'*Evolved Packet Core (EPC)* du réseau LTE. Les auteurs de [102]

décrivent en détails ses fonctions.

- GTP-U : Les *GPRS Tunneling Protocols* sont des protocoles de transport réseaux 3GPP. La version -U est celle gérant la liaison entre le RAN et l'EPC. Les paquets transportés peuvent être IPv4, IPv6 ou *Point to Point Protocol* (PPP).
- NAS : Le Non-Access Stratum (NAS) est un ensemble de protocoles qui sont utilisés pour transmettre de la signalisation non radio entre l'utilisateur et la MME telle que la gestion de la mobilité, le *paging*, la gestion de la session et de la gestion de l'identité de l'UE.

La Figure 3.4 illustre les nouveaux modes de communications possibles grâce à l'optimisation CPO. Les messages sont envoyés à travers l'interface S1-MME et utilisent le contexte du NAS pour transmettre de la donnée IP ou Non-IP Data Delivery (NIDD). Une mise à jour logicielle doit être implantée sur les équipements du cœur de réseau pour gérer ces nouveaux types de communication. Un nouvel élément, le SCEF, doit être mis en place pour acheminer de la donnée non-IP jusqu'aux serveurs applicatifs.

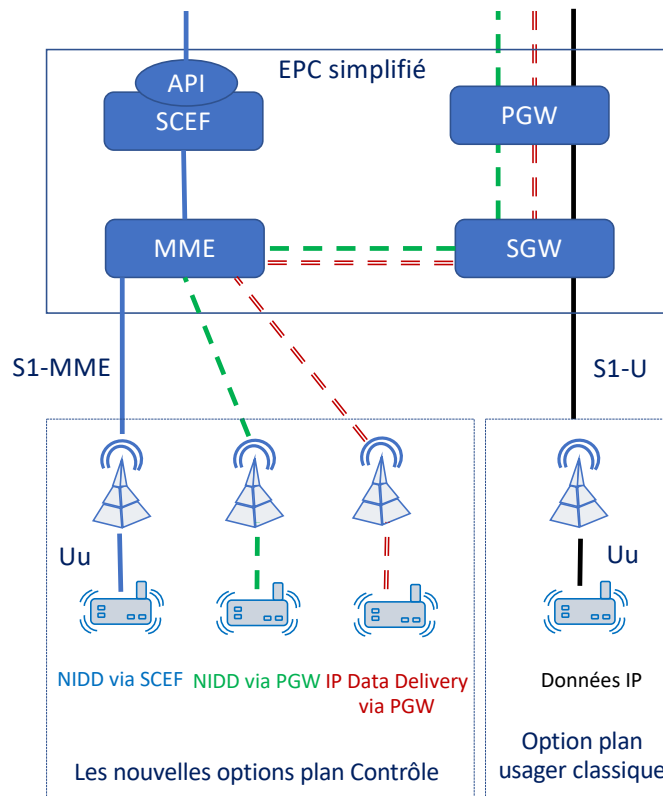


FIGURE 3.4 Les différents types de communication NB-IoT d'un point de vue cœur de réseau.

3.3 Couche PHY - Architecture des canaux

Dans cette section, la couche physique du NB-IoT est présentée. Cela concerne la description des porteuses DL et UL et des canaux physiques qui les composent. Les canaux physiques

sont les ressources utilisées sur l'interface radio (temps-fréquence) pour la transmission des informations des couches protocolaires supérieures.

Le déploiement du NB-IoT fonctionne par porteuse de 180 kHz (en DL et en UL). Chaque paire de porteuses DL/UL fonctionne indépendamment des autres. Dans cette section, nous décrivons l'architecture des canaux du RAN qui permettent la communication entre les stations de base (BS dans la nomenclature 3GPP) et les terminaux des utilisateurs (UE).

3.3.1 Voix descendante - DL

Le DL permet les communications des BSs vers les UEs. Une seule station de base est associée à une porteuse DL, c'est le seul appareil à émettre dans cette bande de 180 kHz.

Les canaux DL sont multiplexés en temps. La porteuse se découpe en trames - *frames* - de 10 ms et en sous-trames - *subframes* (*sf*) - d'1 ms. Chaque trame est composée de 10 *sf* et chaque *sf* est composée de 168 symboles de type 1, s_1 . La forme d'onde utilisée pour les symboles downlink est l'OFDM, celle de LTE et qui sera utilisée dans le cadre de la 5G-NR. Elle permet :

- D'éviter les interférences entre sous-porteuses OFDM (orthogonalité) et donc de ne pas mettre de bandes de garde,
- d'obtenir une bonne efficacité spectrale,
- d'être résistante à l'atténuation du canal (*channel fading*).

Comme montré sur la Figure 3.5, les symboles s_1 ont une largeur de 15 kHz et sept symboles sont contenus dans une demi-*sf* (0.5 ms). Dans une porteuse DL de 180 kHz, on peut donc empiler 12 sous-porteuses composées de symboles s_1 . Dans une *sf* du canal descendant on retrouve bien $12 \times 7 \times 2 = 168 s_1$. Certains symboles sont des symboles de Narrowband Reference Signal (NRS). Ils permettent d'attribuer le MCS le mieux adapté à la qualité du canal. Ils sont présents toutes les trois sous-porteuses.

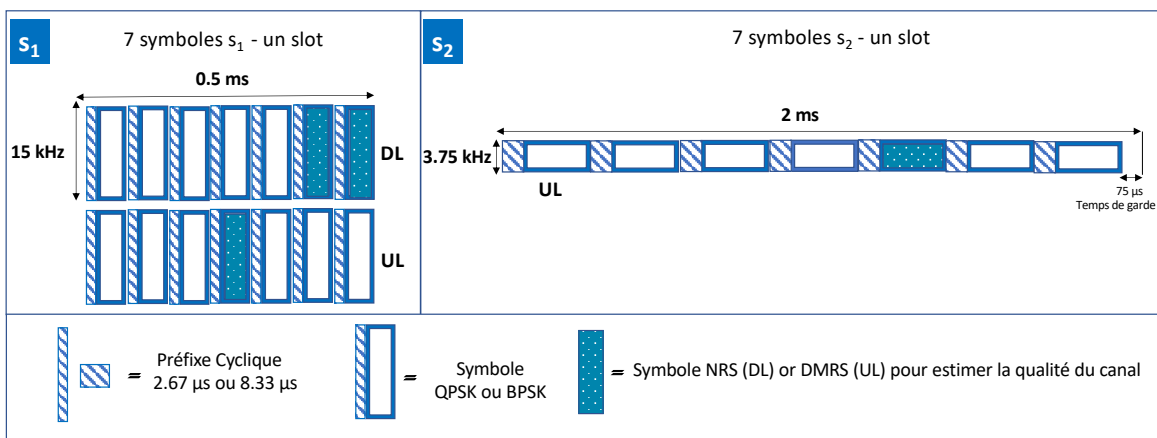


FIGURE 3.5 Forme des symboles dans le NB-IoT

On remarque qu'un préfixe cyclique (*Cyclic Prefix* (CP)) précède chaque symbole. Il permet d'éviter les interférences entre symboles – Inter-Symbol Interferences (ISI) – d'un même UE

causées par le canal de propagation. Pour préserver l'orthogonalité, la fin du symbole en cours est transmise avant chaque symbole. Tant que la durée du CP est au moins égale à la durée du canal multi-trajet, toutes les copies du symbole en cours sont reçues avant le début de la partie utile du symbole suivant, ce qui permet de se prémunir contre l'ISI.

Le DL est composé de trois canaux et de trois signaux qui sont détaillés dans l'ordre dans lequel le terminal les utilise et tous représentés dans une trame sur la Figure 3.7.

NPSS et NSSS : Après que le terminal a effectué une synchronisation grossière en temps et en fréquence lors de l'acquisition du Narrowband Primary Synchronisation Signal (NPSS), il démodule le Narrowband Secondary Synchronisation Signal (NSSS) pour connaître l'identité de la cellule et acquérir la structure de la trame. **NRS** : L'UE utilise le NRS afin d'estimer les coefficients du canal de propagation DL et d'effectuer des mesures de l'intensité et de la qualité du signal DL dans les procédures en mode repos et connecté. Les symboles NRS sont affectés à certaines sous-porteuses – *sub-carriers* (*sc*), dans les deux derniers symboles OFDM d'une sous-trame qui transporte un des trois canaux (NPBCH, NPDCCH ou NPDSCH décrits ci-dessous). Les *sc* exactes sur lesquelles le NRS est associé dépendent de l'identité de la cellule et du numéro du port d'antenne logique [97].

NPBCH : Le Narrowband Physical Broadcast Channel (NPBCH) est utilisé pour délivrer le Master Information Block (MIB) du NB-IoT, qui fournit les informations essentielles du fonctionnement de la cellule aux terminaux. Le terminal y trouve la configuration des canaux voie montante afin de pouvoir effectuer plus tard la connexion, les paramètres pour identifier les trames de contrôle et les trames de données dans le DL et enfin les informations nécessaires à l'obtention des System Information Block (SIB)-1 et SIB-2, eux aussi contenus dans le NPBCH, qui apportent des informations complémentaires comme le numéro de super-trame et les seuils de puissance d'émission.

Le NPBCH est répété toutes les 640 ms. Il occupe toujours la première *sf* de chaque trame. Afin qu'un maximum d'utilisateurs puisse le décoder, il utilise un MCS robuste et chacun de ses 8 blocs sont répétés 8 fois [97]. Le reste des *sf* sont à disposition des deux derniers canaux.

NPDCCH : Le NB-IoT propose des communications en mode connecté, cela veut dire que l'espace temps-fréquence des messages contenant de la donnée a été préalablement défini pour éviter a) de démoduler des trames inutiles du DL et b) les collisions entre UEs pour l'UL. C'est le rôle du Narrowband Physical Downlink Control Channel (NPDCCH) d'indiquer l'ordonnancement des messages de données DL et UL aux terminaux. Les terminaux doivent démoduler périodiquement les trames NPDCCH. Les paramètres qui déterminent le nombre de trames à démoduler et la période de la démodulation sont spécifiques à chaque terminal et sont décrits dans la Section 3.4.2.

Le NPDCCH comporte essentiellement trois types de messages appelés Downlink Control Information (DCI) :

- L'information relative à une attribution dans l'UL, appelée format N0. Il s'agit de 23 bits d'information comportant la ou les sous-porteuses à considérer dans l'allocation, l'instant d'émission, le nombre de ressources, le nombre de répétitions, le MCS à utiliser et des indicateurs (retransmission, numéro de *scramble*). Le format N0 est détaillé en

Annexe J.

- Le format N1 est utilisé à la fois pour l'information relative à la planification d'un message dans le DL et pour demander au terminal de mettre en place une connexion (en vue de messages provenant du réseau). Il s'agit également de 23 bits d'information comportant les mêmes informations que dans le cas N0 mais dans le cadre d'une réception du terminal. Le format N1 est détaillé en Annexe J.
- Des indicateurs de mise à jour des informations systèmes (MIB ou SIBs) ou de *paging*, appelés format N2. Ces DCIs ne sont composés que de 15 bits d'information et le premier indique s'il s'agit d'une information de mise à jour 0, ou de paging 1.

Une sous-trame NPDCCH est divisée en deux Narrowband Control Channel Elements (NCCE)s qui occupent chacun 6 sous-porteuses. Étant donné que les DCIs sont de petite taille, il est possible de n'utiliser qu'un seul NCCE pour transmettre un DCI. Si la couverture de l'UE n'est pas optimale, les deux NCCEs sont utilisés. Si la couverture ne permet toujours pas de recevoir le DCI avec une probabilité d'échec inférieur à 1%, la station de base peut utiliser jusqu'à 2048 répétitions.

NPDSCH : Enfin, toutes les trames de données envoyées aux terminaux après allocation de la ressource constituent le Narrowband Physical Downlink Shared Channel (NPDSCH). Le terminal démodule la totalité des 12 sous-porteuses DL pendant un nombre de trames indiqué dans le DCI N1. Le nombre de sous-trames allouées (entre 1 et 10) représente la taille du TB DL ; il sera répété par la station de base (entre 1 et 2048 fois) en fonction de la couverture du terminal. En utilisant le MCS indiqué dans le DCI, on peut en déduire la taille du TB du DL fourni en Annexe I.

Que ce soit pour le NPDCCH ou le NPDSCH, le déploiement in-band (voir sous-section 3.1.5) prévoit de ne pas utiliser les deux premiers symboles de chaque *sf* pour éviter les interférences avec le signal LTE. Un exemple de sous-trame NPDCCH selon le déploiement se trouve en Figure 3.6.

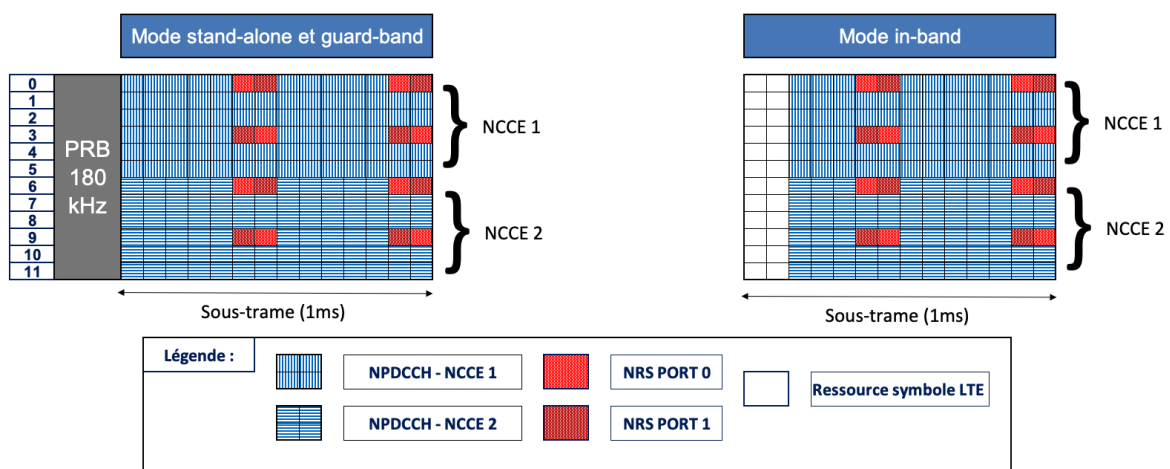


FIGURE 3.6 Organisation des sous-trames NPDCCH selon les différents modes de déploiement.

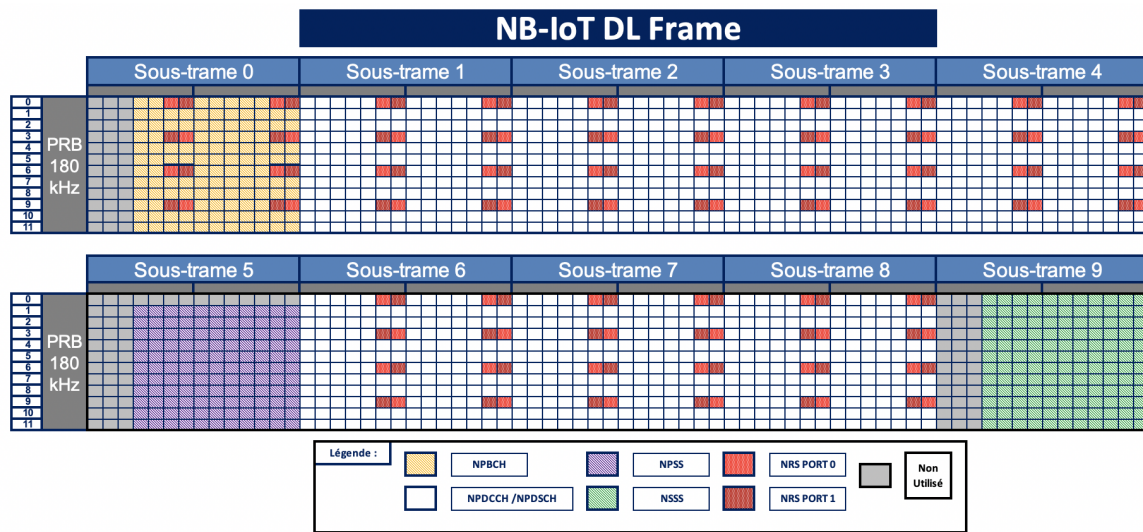


FIGURE 3.7 Organisation de la trame DL du NB-IoT (trame paire). Chaque rectangle représente un symbole s_1 .

3.3.2 Voix montante - UL

L'UL permet les communications des UEs vers les BSs. Comme plusieurs UEs sont amenés à transmettre sur la porteuse de 180 kHz, des méthodes d'accès sont nécessaires pour utiliser efficacement le support et éviter un chaos de collisions. La porteuse UL est divisée en deux canaux dont les fonctionnements vis-à-vis de l'accès sont diamétralement opposés. D'un côté, le canal pour effectuer la demande de connexion est en accès aléatoire : il s'agit du Narrowband Physical Random Access Channel (NPRACH). De l'autre, le canal pour échanger les données a des ressources qui sont allouées par la BS : il s'agit du Narrowband Physical Uplink Shared Channel (NPUSCH). Pour la répartition dans la porteuse UL entre ces deux canaux, le SIB-2 décrit la forme du NPRACH [103] et le NPUSCH constitue le reste des ressources disponibles – un exemple de répartition est illustré en Figure 3.9.

Contrairement au DL, on ne raisonne pas en termes de sous-trame mais de Resource Element (RE) puisque les canaux occupent des espaces définis en temps-fréquence. Un RE est composé de sept symboles s_1 ou s_2 comme décrit dans la Figure 3.5. Les communications UL utilisent le SC-FDMA. C'est un dérivé de l'OFDM qui possède les mêmes propriétés décrites plus tôt mais a la particularité de minimiser le facteur de crête et donc le PAPR du signal. Ce faisant, l'efficacité du terminal est augmentée car la marge de réduction de la puissance par rapport à la distorsion de l'amplificateur (PA) est plus faible. Le coût du terminal est réduit et sa durée de vie augmentée au prix d'une efficacité spectrale en deçà de l'OFDM classique. Le SC-FDMA est aussi la technologie radio utilisée dans le cadre des communications UL de LTE et de 5G-NR.

Les deux canaux qui composent l'UL sont décrits ci-après et représentés dans la Figure 3.9.

NPRACH : A l'instar du PRACH de LTE, le NPRACH est utilisé dans le NB-IoT pour ouvrir la connexion et permettre à la BS d'estimer le Time of Arrival (ToA) du signal reçu. Le ToA reflète le délai de propagation entre l'UE et la BS. Comme le SC-FDMA est du style

Numéro du premier groupe de symboles	Schéma déterministe des sauts de fréquence
0 , 2 , 4	{+1 , +6 , -1}
1 , 3 , 5	{-1 , +6 , +1}
6 , 8 , 10	{+1 , -6 , -1}
7 , 9 , 11	{-1 , -6 , +1}

TABLE 3.1 Détermination des sauts de fréquence dans un préambule.

OFDM, il est important de synchroniser les signaux de différents UEs en temps pour préserver leur orthogonalité. Ce ToA aide la BS dans la détermination du paramètre *Timing Advance* (TA) qui sert à aligner les signaux reçus depuis les différents terminaux.

Pour signifier sa volonté de mettre en place une connexion, le terminal doit envoyer un préambule dans le NPRACH. Un exemple de préambule est donné en Figure 3.8. Chaque groupe de symboles est transmis sur une sous-porteuse de 3.75 kHz différente afin de pallier un éventuel décalage en fréquence résiduel du côté terminal.

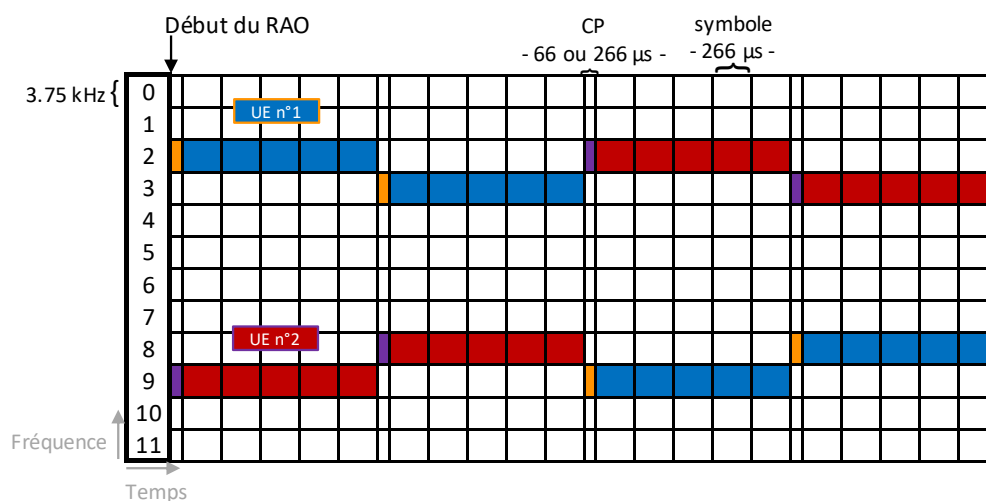


FIGURE 3.8 Exemple de préambules (une répétition) dans un RAO.

Le premier groupe de symboles est envoyé sur un numéro de sous-porteuse choisi aléatoirement par chaque UE. En revanche les groupes de symboles suivants sont prédéterminés par ce choix selon le Tableau 3.1. Ces permutations sont orthogonales, ainsi, si deux UEs n'ont pas choisi le même numéro lors du premier groupe de symboles, aucun de leurs groupes de symboles suivants ne rentreront en collision.

Enfin les occasions où les terminaux peuvent envoyer leurs préambules sont périodiques et appelées Random Access Opportunities (RAO). Afin d'augmenter la couverture de la cellule, chaque RAO requiert un nombre de répétitions de préambules. Une station définit au maximum trois types de RAOs pour trois zones de couverture - CE - différentes. Les RAOs d'un même CE sont définis dans le SIB-2 [103] par :

- Une périodicité : $\{40, 80, 160, 240, 320, 680, 1280 \text{ ou } 2560\}$ ms ;
- Un *offset* de temps par rapport à la trame UL ;
- Un *offset* en fréquence en termes de sc ;
- Un nombre de sc : $\{12, 24, 36, 48\}$;
- Un nombre maximum de tentatives pour le CE concerné : $\{3,4,5,6,7,8,10\}$;
- Un nombre de répétitions : $\{1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, \dots, 2048\}$.

Afin de savoir dans quelles RAOs émettre leurs préambules, les terminaux déterminent leur CE en fonction de la puissance du signal reçu par la BS qu'ils comparent avec des seuils fournis dans les signaux de broadcast. Un exemple d'organisation de la porteuse UL est donné en Figure 3.9

NPUSCH : le NPUSCH est utilisé pour toutes les communications UL en dehors de l'envoi des préambules, c'est-à-dire pour l'envoi des données UL, des informations de contrôle des couches protocolaires supérieures et de l'accusé de réception Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) du NPDSCH. La grosse différence avec LTE est la granularité de l'allocation de ressource. Alors qu'un UE-LTE se voit attribuer des PRBs entiers (donc 12 sous-porteuses), un UE-NB-IoT va se voir attribuer un nombre de sous-porteuses (sc) dans le PRB. Au maximum, le terminal NB-IoT pourra transmettre sur toute la largeur de la porteuse soit un PRB de 180 kHz. Une autre différence apportée par le NB-IoT est l'utilisation de sc plus fine, lui conférant son nom de **Narrowband-IoT**. La BS peut ainsi allouer des ressources dans le NPUSCH en *multi-tone* ou en *single-tone* avec une largeur de sous-porteuse Δf_{sc} de 15 kHz ou allouer des ressources en *single-tone* avec un Δf_{sc} de 3.75 kHz (symboles s_1 et s_2 de la Figure 3.5).

L'attribution des ressources dans le NPUSCH se fait par le DCI N0 du NPDCCH. Le message spécifie la largeur de bande de la transmission et une quantité de ressource en termes de Resource Unit (RU). La RU est l'unité de base pour l'allocation de ressource pour l'UL comme l'est la sous-trame pour le DL. Pour différencier les symboles utiles et les symboles du Demodulation Reference Signal (DMRS) utilisés pour l'évaluation de l'état du canal (voir Figure 3.5), la littérature utilise le terme de RE pour désigner les symboles utiles. Ainsi une RU *multi-tone* a la particularité de toujours comporter 144 REs et une RU *single-tone* 96 REs. Le tableau 3.2 permet de voir les différentes possibilités d'allocation de ressources. Plus la largeur de bande est grande, plus la durée de la RU est courte ce qui reflète l'équilibre entre débit et conditions de couverture, illustré en section 4.5.2.

Le format 2 est utilisé essentiellement pour accuser la réception d'un message DL. Cet accusé de réception ne contient pas de Cyclic Redundancy Check (CRC), il utilise un code simple à répétition. Il contient 16 fois le symbole du mot de code "0" si le message NPDSCH a été bien reçu et 16 fois le symbole du mot de code "1" sinon.

L'illustration en Figure 3.9 est un exemple d'organisation à un instant quelconque de la porteuse UL. Le TB représenté dans cette figure peut transporter entre 88 et 1000 bits selon l'indice de MCS indiqué dans le N0. Les tailles des blocs du NPUSCH sont donnés en Annexe I.

Format du RU		Largeur de bande du RU	Durée du RU	Nombre de REs par RU
Format 1	<i>multi-tone</i>	180 kHz	1 ms	144
	<i>multi-tone</i>	90 kHz	2 ms	144
	<i>multi-tone</i>	45 kHz	4 ms	144
	<i>single-tone</i>	15 kHz	8 ms	96
	<i>single-tone</i>	3.75 kHz	32 ms	96
Format 2	<i>single-tone</i>	15 kHz	2 ms	16
	<i>single-tone</i>	3.75 kHz	8 ms	16

TABLE 3.2 Forme des RUs du NPUSCH.

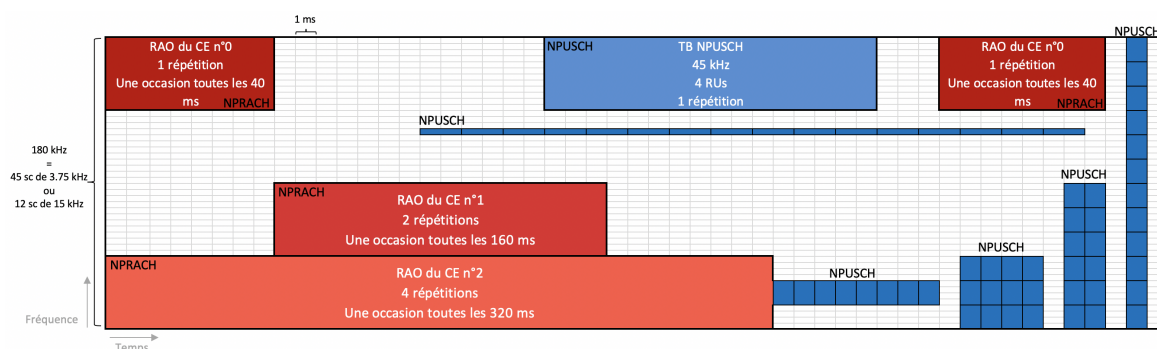


FIGURE 3.9 Exemple d'une trame UL avec différents RAOs et un TB NPUSCH et les différentes formes de RUs

3.4 Couche MAC - Procédures en mode repos et en mode connecté

Dans cette section, les procédures du NB-IoT relatives au fonctionnement de la cellule radio - concernant essentiellement les entités UE et BS - sont présentées. Dans le vocabulaire 3GPP cela revient à dire que nous nous concentrons sur les procédures du RAN plutôt que du *Core Network* (CN), et plus particulièrement à la couche protocolaire de niveau 2 : la couche MAC.

Il est attendu qu'un terminal IoT passe la plupart de son temps en mode inactif ou repos, déconnecté du réseau afin de préserver la durée de vie de sa batterie. La compréhension des procédures lorsque l'UE-NB-IoT est en mode repos est donc primordiale pour l'évaluation des performances, la sous-section suivante détaille ces procédures.

3.4.1 Procédures en mode repos

A - Sélection de la cellule et acquisition des informations du système.

Lorsqu'un terminal se réveille et souhaite émettre, il effectue les opérations suivantes :

- Recherche du NPSS pour identifier la présence d'une cellule NB-IoT ;
- Synchronisation en temps et en fréquence avec le NPSS pour identifier la fréquence porteuse et la structure des sf dans une trame ;

- Identification du Physical Cell Identity (PCID), de la super-trame à l'aide du MIB et du type de déploiement ;
- Acquisition des SIBs pour se préparer à la mise en place de la connexion.

Concernant la re-sélection de cellule, lorsqu'il est en mode repos, un terminal NB-IoT se doit de contrôler les cellules alentour. Si le terminal détecte que le signal d'une cellule voisine est plus fort en termes de Reference Signal Received Power (RSRP) que celui de sa cellule actuelle, il déclenche la procédure de re-sélection de cellule. Les terminaux en très bonne couverture cependant sont exempts de ces changements de cellule afin d'améliorer la durée de vie de leur batterie.

Au contraire, il n'y a pas de re-sélection de cellule au cours d'une communication alors que le terminal est connecté. Cela signifie que le *handover* n'est pas pris en compte dans le NB-IoT. Si la qualité du signal se détériore, un échec du lien est déclaré et le terminal quitte le mode connecté. Une fois qu'il est en mode repos, il peut à nouveau lancer la procédure de sélection de cellule et redémarrer la communication depuis le début.

B - Paging et mécanismes d'économie d'énergie.

Le *paging* se caractérise par la démodulation d'une partie des sous-frames par l'UE afin de savoir lorsque le réseau cherche à l'atteindre. Principalement, le paramétrage du *paging* joue sur le compromis entre durée de vie de batterie et latence des communications.

Dans le NB-IoT, c'est la démodulation d'une partie des sous-frames du NPDCCH, espacée par un intervalle de temps en mode endormi, qui permet le *paging*. Dans LTE, la procédure de *paging* est appelée Discontinuous Reception (DRX) et permet au plus d'espacer les moments de démodulation de 10.24 secondes. En plus du DRX, le NB-IoT implante l'eDRX qui permet d'espacer et borner les procédures DRX en introduisant la Paging Time Window (PTW). Ainsi les procédures DRX peuvent être espacées d'un intervalle allant jusqu'à 2 heures 54 minutes et 46 secondes. La Figure 3.10 illustre le fonctionnement du DRX et de l'eDRX d'un point de vue énergétique.

Enfin, NB-IoT introduit un mode de fonctionnement pour les terminaux n'ayant quasiment aucune contrainte d'accessibilité et souhaitant atteindre des durées de vie de plusieurs années (exigences mMTC du Tableau 2.1). Le PSM permet au terminal de ne se réveiller que lorsqu'il souhaite transmettre. Après avoir transmis, une fenêtre PTW peut être ouverte pour recevoir une réponse du réseau ou de la couche applicative. La durée de la procédure PSM est variable et peut s'étendre jusqu'à 413 jours [104] à l'issue de laquelle le terminal doit initier une mise à jour, le Tracking Area Update (TAU), qui permet de vérifier qu'il se trouve toujours dans la même cellule et de notifier à la BS sa disponibilité. La procédure PSM est illustrée dans la Figure 3.11

Le plupart du temps, les terminaux utilisant PSM sont endormis et ne dépensent que l'énergie nécessaire à l'activité de l'horloge temps réel qui permet de garder conscience du temps écoulé. Elle représente une dizaine de micro watts [105] et permet d'envisager des durées de vie théoriques de plusieurs dizaines d'années [74, 105].

C - Procédure d'établissement de la connexion.

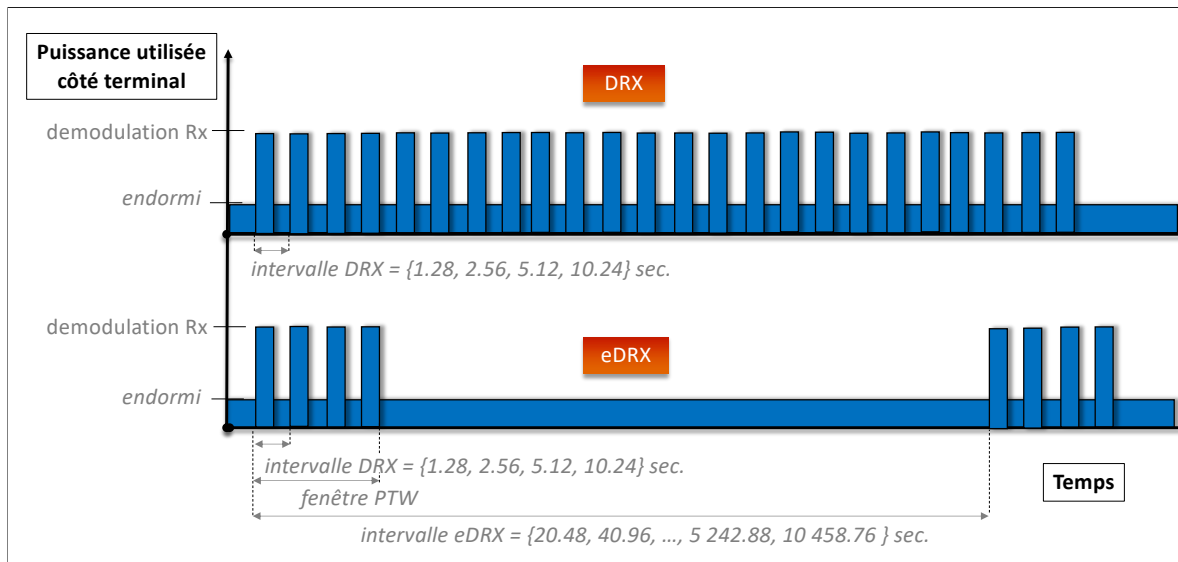


FIGURE 3.10 Illustration du fonctionnement du DRX et de l'eDRX

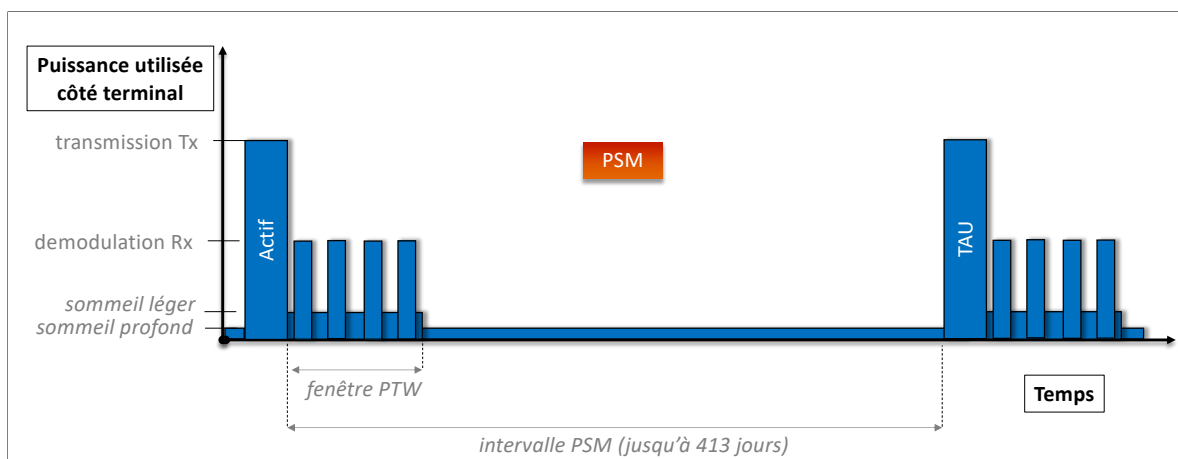


FIGURE 3.11 Illustration du fonctionnement du PSM lorsqu'aucune donnée n'est à transmettre au cours de l'intervalle PSM

La procédure d'accès aléatoire du NB-IoT est similaire à celle de LTE. On y retrouve la fameuse double poignée de main suivie du message de bonne terminaison de la procédure ce qui fait un total de cinq messages. Cependant le NB-IoT introduit deux options supplémentaires appelées Control Plane Optimization (CPO) et User Plane Optimization (UPO). Ces optimisations visent à réduire l'*overhead* réseau. Pour les comprendre, parlons de la procédure d'établissement de connexion classique :

- Message 1** : le préambule envoyé dans le canal physique NPRACH. L'UE choisit un numéro de sous-porteuse de façon aléatoire dans une des fenêtres (RAOs) correspondant à sa zone de couverture (CE).
- Message 2** : le **Random Access Response (RAR)** envoyé dans le canal physique NPDSCH. Il contient l'information du TA, l'identifiant du préambule reçu et un DCI N0 pour le message 3 (exceptionnellement hors du NPDCCH).
- Message 3** : le **RRC Connection Request** envoyé dans le canal physique NPUSCH. Il contient l'identifiant de l'UE, la qualité du canal DL et la prise en charge du *multi-tone*.
- Message 4** : le **RRC Connection Setup** envoyé dans le canal physique NPDSCH. Il permet la résolution de la contention et la configuration des sous-couches réseau (PDCP, RLC, MAC et PHY).
- Message 5** : le **RRC Connection Setup Complete** envoyé dans le canal physique NPUSCH. L'UE informe qu'il a bien reçu toutes les informations nécessaires à la mise en place de la connexion et indique s'il est capable d'utiliser l'UPO (optionnel). L'UE peut également se servir de ce message pour faire du *piggybacking* de signalisation du NAS.

À la suite de ces messages, le terminal est connecté à la station de base et de la signalisation additionnelle est nécessaire (comme dans LTE) pour établir la sécurité de l'Access Stratum (AS) et configurer les *radio bearers*. Ensuite, l'échange des données utiles peut commencer (décrit dans la prochaine sous-section). La Figure 3.12 résume les messages échangés lors de la procédure d'établissement de la connexion.

L'UPO est une optimisation qui propose d'utiliser un identifiant de reprise de connexion (*Resume ID*). La toute première procédure d'établissement de la connexion reste la même, cependant à la fin de la communication, la BS et l'UE gardent en mémoire le *Resume ID*. Pour toute communication ultérieure, l'UE transmettra cet identifiant pendant la procédure de connexion (Message 3) afin de récupérer le contexte de sécurité et les *radio bearers* précédemment établis - évitant ainsi de la signalisation supplémentaire (Figure (3.12)) entre le Message 5 et l'échange de données. Cette optimisation entraîne trois améliorations : a) elle libère des ressources car la signalisation supplémentaire entre le Message 5 et l'échange de données représente un millier de bits sur la voie descendante et plusieurs centaines sur la voie montante, b) elle raccourcit le délai de communication, et c) elle permet d'économiser l'énergie du terminal.

Le prix à payer pour la mise en place de l'UPO, réside dans le fait que la BS doit avoir un espace de stockage suffisant pour sauvegarder la configuration de tous les utilisateurs de la

	Canal ↑ = UL ↓ = DL	Messages	Taille du message en bits	
			Uplink	Downlink
Établissement de la connexion	↑ NPRACH	Message 1: Préambule	-	-
	↓ NPDCCH	N1 -Allocation Downlink	-	23
	↓ NPDSCH	Message 2: Random Access Response + N0	-	56
	↑ NPUSCH	Message 3: RRC Resume Request	59	-
	↓ NPDCCH	N1 -Allocation Downlink	-	23
	↓ NPDSCH	Message 4: RRC Connection Resume	-	304
	↓ NPDCCH	N0 -Allocation Uplink	-	23
	↑ NPUSCH	Message 5: RRC Resume Complete	128	-
Connecté	Signalisation Additionnelle		≈350	≈1050
	•	Echange de données UL et/ou DL	•	•
	•	•	•	•
	•	•	•	•
	•	•	•	•

FIGURE 3.12 Établissement de la connexion NB-IoT

cellule. La prise en charge de l'UPO par le terminal est optionnel.

La seconde optimisation introduite par le 3GPP dans le NB-IoT est obligatoire c'est le CPO. Le CPO utilise le plan de contrôle pour transmettre les paquets de données de l'UE pendant le Message 5 (53 bits possibles en *piggybacking*) ou juste après celui-ci. La donnée est encapsulée dans des messages de signalisation NAS à destination du MME avant la configuration de la sécurité et l'établissement des *radio bearers*, voir Figure 3.4. L'avantage de ce genre de transmissions est qu'elles peuvent être non-IP et donc éviter l'entête IP - 40 octets avant compression - particulièrement lourde pour des communications IoT. En contrepartie, un nouvel élément doit être ajouté côté cœur de réseau afin de gérer ces messages non-IP et les rediriger du MME vers les serveurs applicatifs comme expliqué par Cisco [106].

Nous analyserons plus finement l'intérêt de ces mécanismes dans les Chapitres 4 et 5.

3.4.2 Procédures en mode connecté

A - Démodulation du NPDCCH.

Un concept clé des communications en mode connecté est l'existence d'espace de recherche – plages temps/fréquence – dans le canal de contrôle qui doivent être obligatoirement démodulés par le terminal afin de déterminer si des allocations lui sont destinées. L'existence de ces espaces de recherche permet d'éviter l'écoute en continu du signal de la station de base ce qui réduirait considérablement la durée de vie des batteries. Dans le cadre du NB-IoT, on distingue essentiellement deux types d'espace de recherche :

- Les Common Search Spaces (CSS), utilisés lors de la procédure de mise en place de

connexion. Pour déterminer les ressources radio du RAR (Message 2), des retransmissions HARQ du Message 3 et du Message 4. Ils peuvent être destinés à plusieurs utilisateurs.

- Les UE-specific Search Spaces (USS), utilisés pour envoyer les informations concernant les allocations de ressources UL et DL, les DCIs.

Les paramètres de configuration des CSS dépendent de la zone de couverture - CE - du terminal alors que les paramètres de configuration des USS sont spécifiques à chaque terminal et mis en place une première fois lors de la signalisation additionnelle (voir Figure 3.12), ils peuvent être ensuite modifiés en fonction du changement de couverture ou de besoins des terminaux.

Seuls quatre paramètres caractérisent la configuration des espaces de recherche :

- R_{max} : le nombre maximum de répétitions possibles du NPDCCH.
On a $R_{max} \in \{1, 2, 4, \dots, 2^k, \dots, 2048\}$ [107].
- α : le décalage pour le démarrage de la fenêtre de recherche.
- G : le paramètre du ratio entre taille de fenêtre de recherche et taille des espaces de recherche. On a $G \in \{1.5, 2, 4, 8, 16, 32, 48, 64\}$ [107].
- $T = R_{max} \cdot G$: période de la recherche, résultante des paramètres précédents.

Grâce à ces éléments, le terminal connaît les sous-trames du DL qu'il se doit de démoduler. Les trames du DL sont numérotées de 0 à 1023. Le terminal doit démoduler la sous-trame $\alpha \cdot T + 1$ de la trame 0 pendant R_{max} sous-trames appartenant au NPDCCH puis recommencer toutes les fenêtres T [108]. Un exemple d'espace de recherche est fourni en Figure 3.13. Selon les conditions de couverture du terminal, le DCI est répété un nombre R de fois, inférieur à R_{max} .

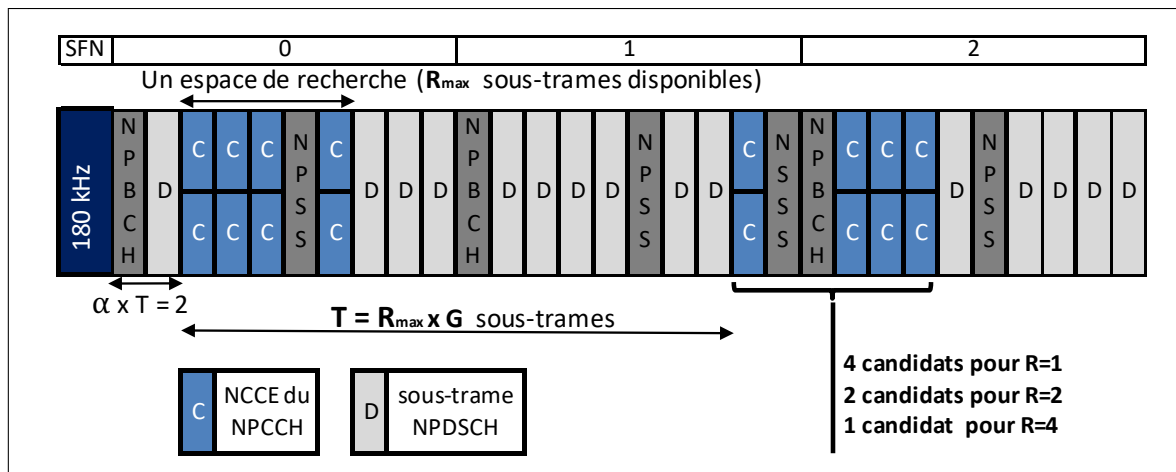


FIGURE 3.13 Illustration des espaces de recherche dans le NPDCCH dans le cas où $R_{max} = 4$, $\alpha = \frac{1}{8}$ et $G = 4$.

Pour les terminaux dans les meilleures conditions de couverture, un DCI ne peut utiliser qu'un seul NCCE, on parle d'Aggregation Level (AL) égal à 1. Il est possible de configurer un AL à 1 seulement lorsque R_{max} est inférieur ou égal à 2. Sinon, l'AL est toujours considéré à 2. Un exemple d'une telle configuration est donné en Figure 3.14.

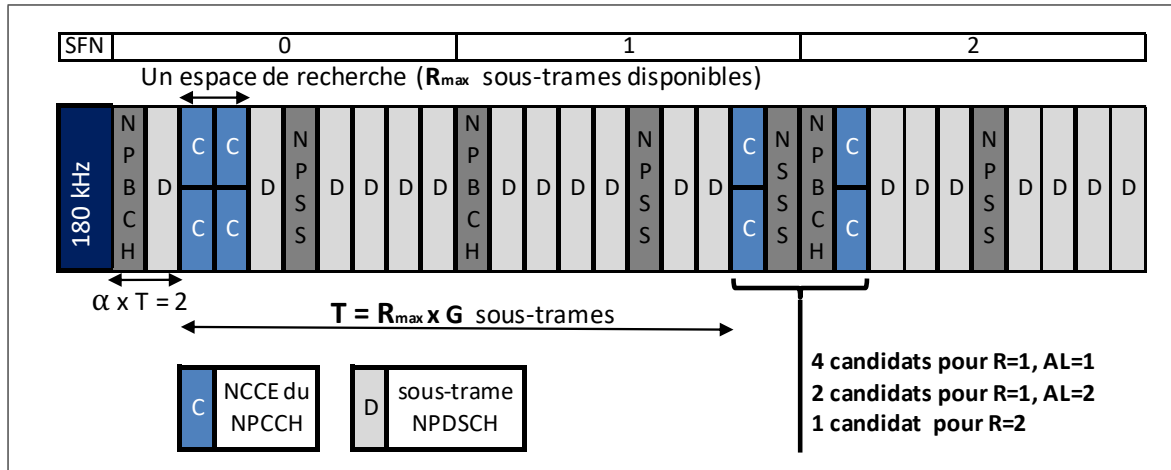


FIGURE 3.14 Illustration des espaces de recherche dans le NPDCCH dans le cas où $R_{max} = 2$, $\alpha = \frac{1}{16}$ et $G = 8$.

B - Allocation UL (NPUSCH) et DL (NPDSCH).

Dans cette section, nous décrivons le fonctionnement de la planification des transmissions UL et DL. Lorsque le réseau a besoin d'allouer des ressources à un UE, il adresse un DCI à l'UE dans l'un des espaces de recherche candidats que le dispositif démodule. La BS masque le CRC du DCI avec l'identifiant du terminal pour la communication (le $C-RNTI$). Le DCI comprend l'allocation des ressources (sous forme de TB) dans les domaines temporels et fréquentiels, le MCS et les informations nécessaires à la prise en charge de l'opération HARQ. Pour permettre que les terminaux utilisateurs soient de faible complexité, la *Release 13* adopte les principes suivants concernant le NB-IoT :

- 1 seul processus HARQ DL et 1 seul processus HARQ UL.
- Un fonctionnement en mode *half-duplex*. Il y a donc des temporisations entre chaque changement de sens de la communication pour permettre au terminal de changer sa configuration : 4 ms entre un DCI-N1 et un TB DL, 8 ms entre un DCI-N0 et un TB UL et 3 ms sont accordées au terminal après un TB UL pour recommencer à démoduler les symboles des espaces de recherche NPDCCH.
- 1000 bits au maximum peuvent être envoyés par TB (DL et UL).

La *Release 13* s'étant particulièrement focalisée sur la complexité du terminal, la *Release 14* a quant à elle permis de réhausser les débits des terminaux NB-IoT. Une nouvelle catégorie de terminaux est introduite. Ces terminaux, plus complexes, sont capables de prendre en charge deux processus HARQ simultanément ce qui permet de réduire le temps entre les temporisations entre les N0/N1 et les transmissions/réceptions UL/DL à 2 ms [97]. La *Release 14* introduit aussi des MCSs avec une efficacité spectrale plus élevée pour les terminaux en très bonne couverture, on voit donc des tailles de blocs allant jusqu'à 2536 bits (en Annexe I). Un calcul des performances de débit du NB-IoT selon les deux configurations est donné dans la section suivante. La fiabilisation repose sur le HARQ comme en LTE [109], voir Annexe C.

En Annexe J, la composition des 23 bits des DCIs N0 et N1 pour allocation des ressources

UL et DL est retranscrite.

3.5 Performances du NB-IoT

Cette dernière partie fait un tour de l'état de l'art de l'évaluation des performances du NB-IoT. Nous nous concentrons sur les critères de performance définis pour le segment mMTC du Tableau 2.1.

Couverture : La communauté scientifique a validé l'amélioration du MCL du NB-IoT de 20 dB par rapport au GSM [110, 111] grâce à l'utilisation de répétitions. Dans le meilleur des cas, doubler le nombre de répétitions permet d'augmenter le rapport signal à bruit d'un facteur 2 (3dB) puisqu'une technique de superposition-croisée est utilisée côté récepteur. Les auteurs dans [110, 112] montrent que cela reste vrai tant que le canal est cohérent, c'est-à-dire tant que la durée d'émission n'est pas trop importante. Ils donnent le SNR requis selon la configuration des TBs. Grâce à ces valeurs, il est possible de calculer le MCL (en Annexe D), on en déduit que des débits d'une centaine de bits par seconde en UL et en DL au niveau de la couche 2 peuvent être envisagés à 164 dB de MCL.

L'autre facteur permettant d'améliorer le bilan de liaison est l'introduction d'une transmission en bande étroite (3.75 kHz). Les répétitions des TBs NPUSCH sont limitées à 128 – contre 2048 répétitions pour le NPDSCH – pour éviter la surchauffe due au temps de transmission côté UE. En revanche, les communications UL peuvent utiliser la transmission en bande étroite pour atteindre un MCL de 170 dB d'après [111], soit +26 dB par rapport au GSM et un facteur 4 par rapport à LTE-M et aux exigences du segment mMTC.

De façon assez surprenante, les auteurs dans [113] parle de couverture au sens large et considèrent que les limitations relatives au MCL ont largement été dépassées dans le NB-IoT grâce aux répétitions et à l'émission en bande étroite. En revanche, ils montrent du doigt le fait que la taille de la cellule est limitée par le temps d'aller-retour entre son bord et la BS. Ils proposent une solution essentiellement logicielle pour augmenter la couverture d'une cellule NB-IoT sans changer le fonctionnement du TA (paramètre expliqué en Section 3.3.2). Ils détournent l'utilisation d'un paramètre propre à la BS qui représente le délai entre l'unité de calcul qui effectue l'allocation de la ressource et l'unité radio de la BS. Ainsi, ils déplacent virtuellement la position de l'unité radio pour permettre une couverture plus éloignée. Les auteurs ont expérimenté leur solution avec succès.

Débit : Les débits maximum atteignables par le NB-IoT au niveau de la couche 2 (MAC-Protocol Data Unit (PDU)) sont calculables à partir des tailles des TBs NPUSCH et NPDSCH et des temps nécessaires entre chaque message décrit dans la sous-section précédente. Ainsi les terminaux implantant la *Release 13* atteignent-ils des débits de 27 kbit.s^{-1} pour l'UL et 52 kbit.s^{-1} pour le DL [114] tandis que la nouvelle classe de terminaux définit dans la *Release 14* peut atteindre 106 kbit.s^{-1} pour l'UL et 79 kbit.s^{-1} pour le DL [97].

Ces valeurs ne sont atteignables que lorsque les terminaux sont dans les meilleures condi-

tions et utilisent le MCS le plus élevé. Or l'objectif vis-à-vis du segment mMTC est d'atteindre 160 bits.s^{-1} sous la condition de couverture d'un *Coupling Loss* de 164 dB. Cet objectif est atteint par le NB-IoT. Dans [111], les auteurs montrent par simulation que le NB-IoT fournit un débit DL de 2.42 kbit.s^{-1} en mode *stand-alone* et 461 bits.s^{-1} en mode *in-band*. Depuis leur valeurs, on peut déduire que le MCS utilisé est le numéro 7 (*stand-alone*) et 4 (*in-band*), utilisant respectivement, 32 et 128 répétitions. Pour l'UL, les auteurs trouvent un débit de 192 bits.s^{-1} atteint en utilisant le MCS numéro 6 et 64 répétitions avec une transmission *single-tone* sur 15 kHz.

Latence : La latence en NB-IoT est principalement due au fait que le terminal peut se trouver en mode repos, déconnecté, lorsqu'il souhaite transmettre. Les chercheurs d'Ericsson [75] ont publié en 2018, une étude de la latence en fonction du mode de la procédure de mise en place de connexion. En utilisant la procédure classique LTE, un terminal échoue à transmettre un gros message (200 octets) dans les 10 secondes lorsqu'il est en bord de couverture (MCL de 164 dB). Dans tous les autres cas d'utilisation, l'objectif des 10 secondes pour les communications (exigences mMTC) est respecté, notamment lorsque les optimisations UPO et CPO sont utilisées.

Capacité : La capacité d'une cellule en termes de nombre de terminaux par kilomètre carré, aussi appelée **densité de connexion** dans la littérature [53], est complexe à modéliser. Elle dépend du scénario de trafic envisagé, de la couverture des terminaux et de la configuration de la station de base (BS). Il est nécessaire de proposer des modèles mathématiques pour estimer la capacité car c'est un critère de performance difficile à mesurer tant il faudrait déployer de dispositifs et tester des configurations avant d'atteindre les maxima envisagés (plusieurs dizaines de milliers de terminaux par cellule). Les travaux menés par l'ITU et le 3GPP [33, 34, 53] qui définissent un cadre d'étude de la densité de connexion dans un cellule NB-IoT ont particulièrement aidé lors de la confection de notre modèle (Partie 4). Ces travaux mettent en évidence une capacité de $1\,220\,000 \text{ terminaux.km}^{-2}$ lorsque les BS sont distantes de 500 m et de $67\,800 \text{ terminaux.km}^{-2}$ pour le cas 1732 m dans le cas du déploiement d'un seul PRB par BS. Le trafic considéré est l'envoi d'un paquet UL de 50 octets toutes les deux heures. Dans tous les cas, les exigences du Tableau 2.1 sont atteintes. Le rapport [33] montre qu'un million de terminaux par km^2 peut être atteint quelles que soient les conditions en adaptant le nombre de PRBs tout en restant dans une largeur de bande raisonnable (un maximum de 1.98 MHz).

Pour la modélisation de la capacité, Madueño et al. [70] sont parmi les premiers à introduire un modèle analytique évaluant les performances de LTE. Ils rendent compte de la mise en place de la connexion et de la phase connectée de LTE comme nous le faisons pour le NB-IoT dans le Chapitre 4. En revanche, ces travaux simplifient la phase connectée en considérant des files d'attente à temps de service exponentiels avec une politique de service First Come First Serve (FCFS). Le niveau de granularité voulu avec cette modélisation n'est pas suffisamment clair selon nous et ne respecte pas bien les procédures. L'indisponibilité des ressources semble en

effet être considérée en une fois sans prise en compte de la couche MAC ni de l'ordonnancement. Nous y reviendrons largement dans les sous-sections 4.3.1 et 4.3.2.

Par ailleurs, dans [115] les auteurs mettent en place un modèle intéressant permettant de révéler (en 2017) l'intérêt de standardiser une procédure de communication encore plus efficace pour les petits paquets que le CPO². Néanmoins, cette étude ne considère pas le caractère aléatoire des arrivées de messages et donc des files d'attente et ne modélisent pas le DL, leurs résultats constituent donc une borne supérieure de la capacité du NB-IoT en UL.

Enfin, dans [116] la capacité du NB-IoT a été comparée à celle des autres technologies LPWANs. Ces travaux évaluent la robustesse des transmission LoRaWAN, Sigfox et NB-IoT au regard des collisions. Considérant une flotte de terminaux produisant au total 7 500 messages de la même taille à échanger par seconde, là où LoRaWAN et Sigfox affichent un taux d'erreur de 90% par paquet, le NB-IoT conduit à un taux de 8%. Ces travaux mettent donc en avant la supériorité du NB-IoT en termes de robustesse face aux collisions par rapport aux autres technologies LPWANs. Les auteurs expliquent cet avantage par la largeur de bande utilisée dans le NB-IoT (au maximum 180 kHz) et le temps court nécessaire pour la transmission des messages. C'est un travail qui pourrait être ré-utilisé dans le cadre de communications par satellite LEO puisque sans pré-compensation GNSS, les collisions auraient lieu sur les messages de données NB-IoT.

Durée de vie : La base du calcul de la durée de vie d'un terminal NB-IoT est le cadre d'évaluation proposé dans un rapport au 3GPP [105] dont les résultats pour des configurations relativement simples ont été publiés dans [75]. Pour des conditions de couverture de 144 dB, 154 dB et 164 dB de MCL, un terminal NB-IoT a une durée de vie estimée à 36.8, 29 et 9.2 années. Ce sont des résultats que nous avons retrouvés avec notre modèle [74]. L'intérêt de notre modèle est de prendre en compte l'impact de la densité de connexion sur la durée de vie des terminaux.

D'autres modèles de la consommation d'énergie du NB-IoT ont été proposés comme celui présenté par Andres-Maldonado et al. [117]. La force de ce modèle est d'être particulièrement précis dans la définition des paramètres de la cellule : écarts d'ordonnancement, synchronisations courtes/initiales, et surtout paramétrage de l'eDRX. Les auteurs de [118] ont développé un modèle énergétique qui fonctionne à la fois pour NB-IoT et LTE-M. Les métriques d'évaluation par rapport à la durée de vie sont intéressantes (latence, efficacité spectrale, débits de données), malheureusement la généralité du modèle limite la possibilité de le ré-utiliser pour évaluer de nouvelles procédures de communication (comme nous l'avons fait avec l'EDT dans le Chapitre 5) ou d'autres optimisations du standard. Aucun des deux modèles mentionnés ne prend en compte la charge de la cellule lors de l'estimation de la consommation d'énergie.

Les auteurs de [119] mènent des expériences sur des équipements réels. Ils montrent qu'en pratique la consommation énergétique varie d'un terminal à l'autre et d'un opérateur à l'autre. Ils montrent notamment que les paramètres de répétition du Message 3 (voir Figure 3.12) sont

2. Un intérêt se concrétisant lors de la *Release 15* avec la standardisation de l'Early Data Transmission (EDT), détaillé en section 4.5.1

particulièrement surestimés pour permettre aux terminaux ayant une très mauvaise couverture d'être reçus correctement. Ils proposent de réduire ce nombre de répétitions afin de réduire l'énergie moyenne consommée. L'inconvénient de cette technique est qu'elle augmente la probabilité d'échec sur le Message 3, ce qui déclenche une nouvelle tentative et augmente la charge sur le NPRACH. Comme cette charge augmente la consommation énergétique (démontré dans notre Chapitre 5), la méthode proposée pourrait être contre-productive. Dans le même esprit, les auteurs de [120] étudient la consommation énergétique des équipements NB-IoT qui peuvent être trouvés sur étagère. Ils constatent que la puissance d'émission varie d'un CE à l'autre et d'un opérateur à l'autre selon qu'ils privilégient la capacité de la cellule ou la durée de vie du terminal.

Fiabilité : Avec le NB-IoT, il est question de livraison de message garantie [121] en comparaison aux technologies LPWANs évoluant en bande libre. Les seuils pour déterminer la classe de couverture (CE) reposent sur une fiabilité de détection du préambule sans erreur d'au moins 99% [97]. Avant de déclarer un échec de la communication, les terminaux tentent à nouveau leur chance un nombre N de fois (défini par la BS, de 1 à 1000). La probabilité d'échec de la mise en place de la connexion peut donc être configurée comme quasi-nulle par l'opérateur (jusqu'à 10^{-2000}). Le reste de la communication a lieu en mode connecté et n'est donc pas soumis à échec.

Ceci est vrai lorsque le terminal est seul dans la cellule. En revanche, lorsque la charge augmente il est possible d'observer des collisions sur le canal en accès aléatoire (NPRACH) et des congestions sur les autres canaux (NPDCCH, NPDSCH et NPUSCH). C'est pourquoi les performances de capacité, vues plus haut, sont définies avec une fiabilité sur l'ensemble de la communication à 99%, comme il est requis dans les exigences mMTC.

3.6 Nos contributions sur l'étude des performances du NB-IoT

Au vu de cet état de l'art, on observe que l'étude des performances des communications NB-IoT pourrait être largement raffinée. C'est cette observation qui a motivé les travaux présentés dans cette thèse. Nos contributions portent donc successivement sur :

- La **Capacité** : Nous avons produit un modèle sur l'utilisation des ressources du NB-IoT qui rend compte à la fois des collisions de la partie en accès aléatoire lors de mise en place de la connexion, et de la congestion des canaux partagés dont les ressources sont dédiées. Nos travaux s'inspirent du modèle introduit pour LTE de [70], nous nous sommes appliqués toutefois à ce que le modèle intègre la simultanéité des communications, les procédures de la couche MAC, les différentes conditions de couverture des terminaux, et bien sûr s'ajuste au paramétrage de la cellule NB-IoT (tailles des canaux, largeur des sous-porteuses, périodicité des ressources NPRACH et NPDCCH).

Grâce à notre modèle, nous avons pu étudier la capacité du NB-IoT dans des scénarii complexes et déterminer les causes de sa limitation (collisions ou congestions, canal

surchargé, mauvaise couverture...). Nous donnons les lignes directives de paramétrage de la cellule qui permettent d'obtenir une plus grande capacité en fonction des scénarii.

- La **Durée de vie** : Nous avons utilisé notre modèle sur l'utilisation des ressources du NB-IoT pour produire une modélisation de la consommation d'énergie. Nous avons d'abord validé les résultats de l'état de l'art concernant les durées de vie des terminaux lorsqu'ils sont seuls dans leur cellule. Ensuite, nous avons étudié l'impact de la charge sur la consommation énergétique. À notre connaissance, aucun travail à ce jour n'a évalué cet impact.

Ce faisant, nous avons mis en évidence un phénomène de congestion sur le canal de contrôle du lien descendant (downlink) qui réduit notablement la durée de vie de la batterie. Nous avons ensuite proposé une solution pour limiter la baisse de la durée de vie du terminal due à la charge de la cellule (section 5.5).

- La **Fiabilité** et le **Débit** : deux critères de performances qui ne représentent pas le cœur de nos contributions mais sur lesquels nous avons apporté des éclaircissements. Sur la fiabilité, nous avons montré le compromis entre collision et congestion dans le NB-IoT et illustré comment agissent ces deux types d'échec sur la fiabilité. Nos modèles permettent de calculer la capacité d'une cellule lorsqu'on souhaite un niveau de fiabilité donné (et pas uniquement les 99% précisés dans les exigences mMTC). Concernant le débit, nous avons affiné l'étude du débit de donnée (couche MAC). En effet, il n'est pas complexe de calculer le débit symbole sur le canal physique puisque la taille et le nombre de bits encodés sont donnés par la standard. En revanche, peu d'études fournissent des idées du débit atteignables une fois tous les mécanismes de la couche MAC implantés. Dans nos modèles, nous considérons la taille des ressources utilisées en fonction de la quantité de donnée à transmettre, l'ordonnancement, la mise en place de la connexion et le temps d'aller-retour entre le terminal et la BS (ce dernier étant d'autant plus important à considérer dans un contexte satellite).
- Le **NB-IoT par Satellite** : Nous avons construit nos modèles pour qu'ils puissent être utilisés dans un contexte satellite. Nous avons également contribué à l'étude des critères de performance précédents pour des communications NB-IoT par satellite. Ainsi, notre modèle tient compte de la taille des cellules particulièrement grande des scénarios satellites pour le calcul de la capacité. Il tient compte du coût énergétique du positionnement GNSS pour le calcul de la durée de vie d'un terminal. Nous avons calculé la distribution des MCS dans une cellule satellite pour maintenir la fiabilité exigée. Enfin, nous avons déterminé l'ordre de grandeur des débits atteignables sur satellite avec le NB-IoT en prenant en compte la durée aller-retour pour chaque échange de message entre l'UE et la BS.

MODÉLISATION DE L'UTILISATION DES RESSOURCES DANS LE NB-IOT

L'objectif de ce chapitre est l'étude de la capacité de NB-IoT en termes de densité de connexion, une notion définie dans les rapports de l'ITU [53, 54]. C'est la quantité maximale de terminaux pouvant se trouver dans une cellule NB-IoT selon un trafic donné (quantité de données UL/DL et intervalle entre communication) en maintenant une fiabilité moyenne de 99% sur les communications. Cela revient à calculer le nombre maximal de communications par seconde pouvant être traitées par cellule en ayant 99% de réussite.

Pour répondre à cette question, nous proposons un modèle analytique qui représente l'utilisation des ressources dans le NB-IoT. Il considère à la fois la partie mise en place de connexion (accès aléatoire) et la partie échange de données (sans contention mais sujette à la congestion) du protocole NB-IoT.

4.1 Vue d'ensemble

4.1.1 Positionnement et motivation

La modélisation des communications NB-IoT peut être découpée en trois sections majeures : modélisation des aspects systèmes (déploiement du réseau), modélisation de la couche d'accès MAC et pour finir modélisation des performances de la couche physique. Ces sections interagissent pour créer un environnement cohérent qui permet d'évaluer les performances du NB-IoT.

La Figure 4.1 détaille les fonctions principales des différentes sections nécessaires à cette évaluation de performances. Elle donne le positionnement de nos contributions. Alors que nous nous sommes principalement reposés sur les modèles fournis par le 3GPP concernant la définition du système, le déploiement des cellules et les performances de la couche physique, le cœur de nos travaux de recherche se situe sur la modélisation de la couche MAC. En effet, le fonctionnement et le paramétrage des mécanismes protocolaires d'accès ont un fort impact sur les performances du NB-IoT (le plan contrôle représente autant voir plus d'échanges de

messages que le plan donnée).

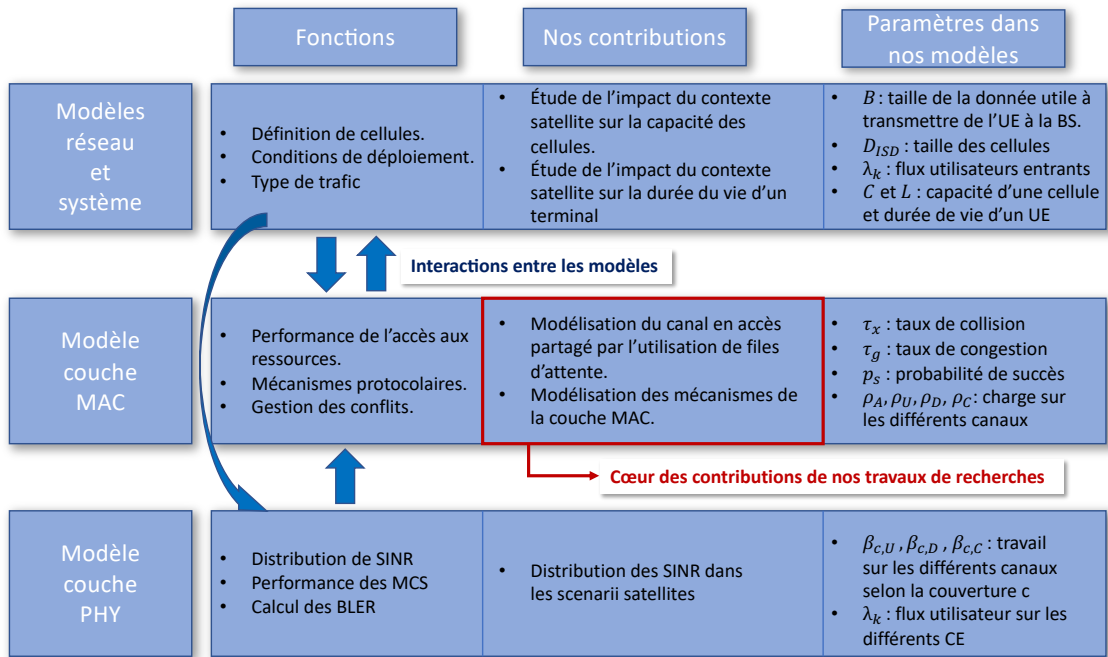


FIGURE 4.1 Positionnement de nos travaux

4.1.2 Vue d'ensemble sur le modèle d'évaluation de l'utilisation des ressources

Pour évaluer la capacité du NB-IoT, nous allons présenter le modèle à files d'attente illustré en Figure 4.2¹ puis son amélioration présentée en Figure 4.6. Rappelons que la communication dans le NB-IoT implique un processus en deux phases (voir Chapitre 3), chacune sujette à des sources d'échec.

La première phase est la mise en place de la connexion où on observe de la **contention**. Un UE doit transmettre un préambule à la BS sur le canal en accès aléatoire – NPRACH. Si une collision se produit, l'UE concerné réessayera après une période choisie aléatoirement, selon la taille du *backoff* diffusé par la BS [107]. Au total, N tentatives sur le NPRACH peuvent être effectuées pour chaque communication, l'UE déclare un échec de la communication si aucune d'entre elles ne mène à une communication réussie.

La seconde phase est la phase où on peut observer de la **congestion**. Les UEs qui transmettent leur préambule avec succès pendant la phase de contention se voient attribuer des créneaux de communication de données (allocation UL et DL selon la quantité de données à transmettre) dans chacun des trois canaux sans contention, NPDCCH, NPDSCH et NPUSCH. Toutefois, la quantité de ressources fréquence-temps de ces canaux n'est pas illimitée. La quantité de données à transmettre (NPUSCH pour l'UL ou NPDSCH pour le DL) ou de messages de contrôle à envoyer (les DCIs du NPDCCH) sur les canaux peut dépasser la

1. Tous les symboles utilisés dans ce modèle sont résumés et décrits dans le Tableau 4.1

capacité du canal, ce qui entraîne de la congestion, un délai lors de l'allocation de la ressource et dans certains cas un échec de la communication s'il est prolongé. Cet échec amène une nouvelle tentative de connexion sur le NPRACH qui est comptée dans les N tentatives totales possibles.

Par conséquent, le calcul de la probabilité de succès, p_S qui est le ratio entre le débit de communications réussies, λ_Δ , et le débit entrant, λ , nécessite de modéliser ces deux sources d'échec. Dans les deux sous-sections suivantes, nous modélisons donc les deux sources d'échec que l'on supposera indépendantes que sont les collisions dans le canal NPRACH, et les congestions dans les canaux NPUSCH, NPDSCH et NPDCCH.

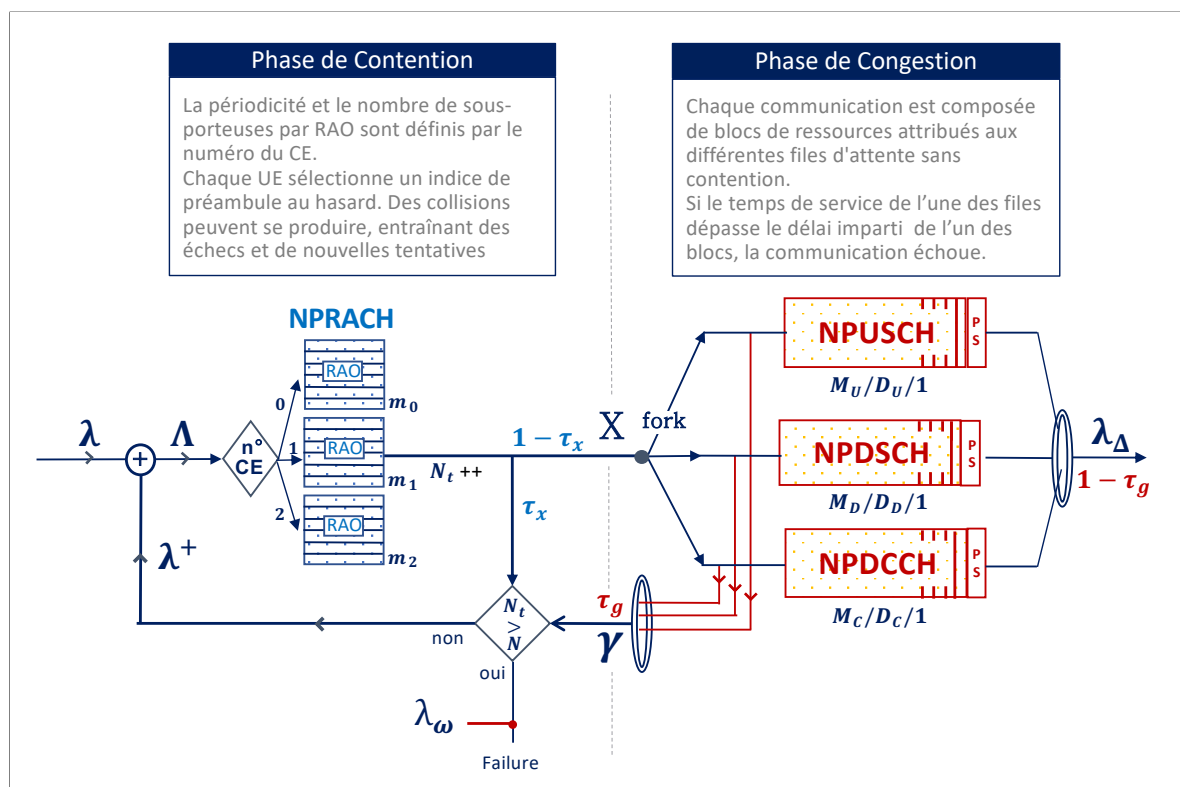


FIGURE 4.2 Schématisation du Modèle de l'utilisation des ressources dans le NB-IoT - Files d'attentes MD1-PS.

4.2 Canal avec accès aléatoire

Dans le modèle nous considérons un flux de communications arrivant dans la cellule constitué d'une superposition de flux Poissonniens² chacun caractérisé par sa zone de couverture, k . La zone de couverture représente le CE dans lequel se trouve le terminal en fonction de son *Coupling Loss* voir Tableau 4.2.

Les collisions entre utilisateurs arrivent dans le NPRACH lors de l'envoi des préambules

2. L'utilisation de flux Poissonniens pour la modélisation des nouvelles communications entrantes dans une cellule et dans les rebouclages est une hypothèse déjà présente dans les travaux d'Abramson en 1970[122] et retenue classiquement dans les réseaux d'accès en particulier IoT avec un très grand nombre d'utilisateurs.

qui initialisent la mise en place de la connexion. Le flux total, Λ , arrivant sur le NPRACH est un flux agrégé entre les nouveaux arrivants dans le système λ et ceux dont les tentatives de communications précédentes ont échoué λ^+ . Dans notre modèle, les arrivées λ sur le NPRACH sont supposées poissonniennes. En revanche, le flux λ^+ qui correspond aux rebouclages suit une loi a priori inconnue. Nous faisons donc une approximation en considérant que le flux résultant sur le RAO du CE n° k , Λ_k , est un flux poissonnien de taux :

$$\Lambda_k = \lambda_k + \lambda_k^+ \quad (4.1)$$

La probabilité de collision du CE n° k peut donc s'exprimer ainsi :

$$\tau_{x_k} = 1 - \frac{\mathbb{E}(N_{s_k})}{\mathbb{E}(N_{u_k})} \quad (4.2)$$

où N_{u_k} et N_{s_k} les variables aléatoires représentant respectivement le nombre d'utilisateurs par fenêtre d'opportunité (RAO) et le nombre de ceux qui ne sont pas en collision concernant la zone de couverture k –CE n° k (une fenêtre d'opportunité est dédiée à une zone de couverture, voir Chapitre 3). Puisque Λ_k est un flux poissonnien, la probabilité que j utilisateurs envoient un préambule dans un RAO sachant que la période des RAOs est δ_k est donnée par :

$$P(N_{u_k} = j) = \frac{(\Lambda_k \cdot \delta_k)^j}{j!} \cdot e^{-\Lambda_k \cdot \delta_k} \quad (4.3)$$

Et on a son espérance :

$$\mathbb{E}(N_{u_k}) = \Lambda_k \cdot \delta_k \quad (4.4)$$

D'après le standard, les utilisateurs choisissent aléatoirement un numéro de sous-porteuse parmi les m_k possibles. Le nombre d'utilisateurs N_{s_k} qui ne sont pas en collision est le nombre de préambules qui n'ont été choisis qu'une fois. Pour trouver ce nombre de préambules qui ne sont choisis qu'une seule fois, les auteurs de [123] proposent d'utiliser la théorie combinatoire. Puisque chaque utilisateur a la même probabilité de choisir un numéro de sous-porteuse donné, la probabilité que i utilisateurs parmi les N_{u_k} choisissent le même numéro de préambule (m_k possibles) est :

$$P_i = \binom{N_{u_k}}{i} \cdot \left(\frac{1}{m_k}\right)^i \cdot \left(1 - \frac{1}{m_k}\right)^{N_{u_k}-i}$$

P_1 représente donc la probabilité qu'une sous-porteuse ne soit choisie qu'une seule fois. Le nombre d'utilisateurs qui ne sont pas en collision est le nombre de sous-porteuses choisies qu'une seule fois, on a :

$$\mathbb{E}(N_{s_k} | N_{u_k} = j) = m_k \cdot P_1 = j \cdot \left(\frac{m_k - 1}{m_k}\right)^{j-1} \quad (4.5)$$

On peut donc calculer le nombre moyen d'utilisateurs servis avec succès par RAO :

$$\begin{aligned}
\mathbb{E}(N_{s_k}) &= \sum_{j=0}^{\infty} \mathbb{E}(N_{s_k} | N_{u_k} = j) \cdot P(N_{u_k} = j) \\
&= \sum_{j=1}^{\infty} j \cdot \left(\frac{m_k - 1}{m_k} \right)^{j-1} \frac{(\Lambda_k \delta_k)^j}{j!} \cdot e^{-\Lambda_k \delta_k} \\
&= \Lambda_k \delta_k \cdot e^{-\Lambda_k \delta_k} \sum_{j=0}^{\infty} \left(\frac{m-1}{m} \right)^j \frac{(\Lambda_k \delta_k)^j}{j!} \\
&= \Lambda_k \delta_k \cdot e^{-\frac{\Lambda_k \delta_k}{m_k}}
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Maintenant, nous pouvons en déduire la probabilité de collision concernant le CE n° k à partir des Équations 4.4 et 4.6 :

$$\tau_{x_k} = 1 - e^{-\frac{\Lambda_k \delta_k}{m_k}} \tag{4.7}$$

Il est également possible de trouver ce résultat en constatant que Λ_k est un trafic poissonnien échantillonné avec une probabilité $\frac{1}{m_k}$, on obtient donc un trafic poissonnien de taux $\frac{\Lambda_k}{m_k}$. En utilisant le même type d'arguments que pour l'étude des systèmes ALOHA discrétisés [124] – *slotted ALOHA* –, on a un trafic offert $A = \frac{\Lambda_k \delta_k}{m_k}$ d'où le résultat de l'Équation 4.7.

4.3 Canaux avec allocation de ressources

La modélisation des canaux dont les ressources sont allouées est essentielle afin de déterminer la seconde source d'échec possible pour une communication : les congestions. Celles-ci surviennent lorsque la station de base (BS) ne peut allouer les ressources demandées dans un temps imparti. Il est important de comprendre que le *timer*, qui délimite le délai de la réponse de la BS et marque l'échec de la communication, est nécessaire. En effet, plusieurs raisons peuvent expliquer la nécessité d'arrêter la communication et de remettre en place la connexion si la station ne donne plus de nouvelles :

- Il est possible que la BS ait transmis l'allocation de ressource mais que les conditions de couverture de l'UE aient changé brusquement. Il doit donc passer à nouveau par le NPRACH et calculer son CE.
- L'UE peut être sorti de la zone de couverture de la station de base. Le *handover* n'étant pas pris en compte dans le NB-IoT, la communication échoue. L'UE doit alors mettre en place la connexion sur le canal en accès aléatoire de la station la plus proche.
- La station de base peut être tombée en panne. Dans ce cas, l'UE doit chercher à remettre en place une connexion avec la station la plus proche.
- Enfin, il est possible qu'il y ait une congestion à cause du nombre de communications dans la cellule. La station de base ne peut pas allouer toutes les ressources nécessaires. Dans ce cas, essayer à nouveau de communiquer après le temps de *backoff* fait sens. Il se peut que la BS diminue le nombre maximum de tentatives N afin de limiter la charge

arrivant sur le NPRACH. Elle peut même aller jusqu'à interdire les nouvelles connexions dans la cellule le temps que les communications en cours soient libérées.

Nous avons décidé de modéliser l'utilisation des canaux par des files d'attente. Les clients représentent les communications qui arrivent pour se faire servir. Le serveur représente la station de base. Les temps de service dépendent de la taille des communications et des ressources disponibles sur les différents canaux selon le paramétrage de la cellule.

Une communication est en échec lorsque le temps de réponse du serveur (temps d'attente et temps de service) est supérieur au *timer*. Dans la littérature des files d'attente cela revient à considérer des clients impatients qui sortent de la file d'attente s'ils ne sont pas servis dans un délai donné. La *probabilité d'impatience* dans une file d'attente est donc la *probabilité de congestion* dans nos modèles.

Dans une première section, nous proposons un modèle au niveau communication (un client = une communication), niveau d'abstraction notamment utilisé pour la modélisation des liens Internet par [125]. Dans une seconde section, un modèle au niveau des blocs de la communication est présenté (un client = un bloc). Nous comparons et discutons les modèles dans la section 4.4.1.

4.3.1 Taux d'impatience des files M/D/1/PS

Dans un premier temps, nous avons décidé d'utiliser des files d'attente M/D/1/PS selon la notation de Kendall. Nous prenons une approximation poissonnienne sur le trafic d'arrivée qui correspond au trafic sortant avec succès de la partie en accès aléatoire. Pour les services, nous considérons une loi déterministe en remplaçant la variable aléatoire de la durée de service par sa grandeur moyenne, il n'y a qu'un serveur qui correspond à la capacité agrégée du système dédiée au canal de communication. Le temps de service correspondra à la somme agrégée des temps de services individuels qui composent les blocs de la communication considérée.

Alors qu'il a été reconnu que l'approche la plus logique serait d'utiliser des taux de services constants [70, 126], l'absence de solution pour déterminer la fraction de clients perdue en cas d'impatience a tourné l'attention vers des modèles plus simples, de type M/M/1. Ces modèles approchent le temps de service par une loi exponentielle et les taux d'impatience sont connus. Ainsi, les auteurs de [70] utilisent la formule de Barrer [127] dans le cadre de la modélisation de LTE.

Nous modélisons l'allocation de la ressource par une discipline de service dite de *Processor Sharing* : cela signifie que la quantité de ressource disponible par unité de temps est partagée entre tous les clients de la file d'attente de façon uniforme. Si à l'instant t , n clients sont dans la file d'attente, ils reçoivent chacun un $n^{\text{ième}}$ des ressources du serveur. La loi des temps de service et la discipline de service sont deux particularités qui rendent notre modélisation du NB-IoT unique. Elles apportent également leur lot de défis : calcul des ressources de chaque canal en fonction du paramétrage de la cellule, calcul de la charge de travail de chaque communication et principalement la détermination du taux d'impatience qui est un problème non-résolu pour les files M/D/1/PS.

Dans la littérature, les travaux pionniers de Palm (1953, puis 1957) semblent être les premiers à analyser les systèmes de files d'attente avec des clients impatientes en considérant les files d'attente M/M/c à capacité infinie et en supposant que chaque client individuel reste dans la file d'attente tant que son temps d'attente ne dépasse pas un seuil exponentiellement distribué. C'est Barrer [127] (1957) qui résolu la probabilité d'impatience dans une file M/M/1 lorsque le temps de séjour avant abandon est fixe. Takacs (1974) a étudié par la suite la file d'attente M/G/1 dans laquelle les clients ont un seuil fixe concernant leur temps de séjour.

L'utilisation d'un temps de service constant est une approximation. Néanmoins, elle est motivée par des résultats en valeur moyenne des files à discipline M/G/1/PS et leur insensibilité à la loi de la durée de service est assez ancienne. En revanche, la densité de probabilité du temps de séjour d'une file M/D/1/PS a été déterminée en 1989 par Van den Berg [128] avec Boxma et Groenendijk en se fondant sur les travaux de Takacs.

Notre souhaitons garder une modélisation avec des files M/D/1/PS. La solution des taux d'impatience pour ces files est de forme indéterminée, en revanche, la densité de probabilité du temps de séjour dans une file M/D/1/PS est connue lorsqu'on ne considère pas l'impatience des clients [128]. Notre idée est donc d'approcher le taux d'impatience par la probabilité qu'un temps de séjour dans une file M/D/1/PS sans impatience dépasse le délai d'impatience du client. Nous aurons donc affaire à une approximation puisque dans une file M/D/1/PS avec impatience, le client quitte la file exactement quand son temps de séjour excède sa patience, libérant une partie des ressources du serveur. La qualité de cette approximation est vérifiée et comparée avec le cas M/M/1 dans la section 4.3.1.

La taux d'impatience revient donc, dans notre approximation, à calculer la fonction de répartition du temps de séjour dans la file d'attente lorsque le temps de séjour vaut T_q , le temps au bout duquel un client abandonne s'il n'a pas été servi. [128] donne la transformée de Laplace de la densité de probabilité du temps de séjour, il faut donc diviser par p (transformation de Laplace d'une intégrale) pour obtenir le taux d'impatience de la file q , τ_q :

$$\tau_q = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{(X_q + p)^2 \cdot (1 - \rho) \cdot e^{-\frac{X_q + p}{D_q}}}{s \left(p^2 + X_q \cdot (X_q + 2p - \rho \cdot (X_q + p)) \cdot e^{-\frac{X_q + p}{D_q}} \right)} \right\} (T_q) \quad (4.8)$$

avec \mathcal{L}^{-1} , l'inverse de la transformée de Laplace, X_q et D_q les taux d'arrivée et de service de la file q , ρ leur rapport et T_q la valeur du temps de séjour qui déclenche l'impatience des clients dans la file q .

Dans la suite, lorsque nos calculs sont effectués avec des variables indicées avec la lettre q c'est qu'ils sont équivalents quelque soit la file d'attente que l'on considère. Quand les calculs diffèrent selon la file d'attente, nous référerons à la file NPUSCH, NPDSCH et NPDCCH avec des variables indicées par respectivement U , D et C . La Figure 4.3 illustre le fonctionnement d'une file M/D/1/PS, β_q est la capacité du serveur de la file q et $\beta_{c,q}$, la taille de la communication c sur le canal q .

Les prochaines sous-sections décrivent comment obtenir X_q , D_q et T_q afin de calculer les

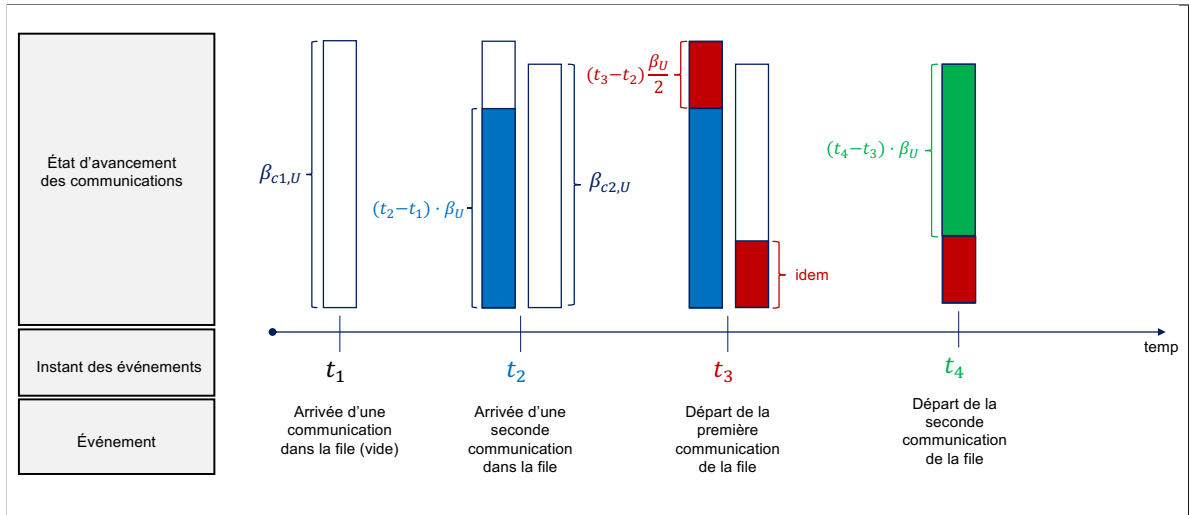


FIGURE 4.3 Fonctionnement d'une file d'attente M/D/1/PS.

probabilités d'impatience des files d'attente.

Taux d'arrivée – X_q

Chaque communication qui réussit l'accès aléatoire va se voir attribuer des ressources sur les trois canaux à accès dédiés. Ainsi, chaque communication induit une charge de travail sur chacun des trois canaux à accès dédiés. Chaque fois qu'une communication accède à la phase connectée, trois clients sont créés, un pour chacune des files à accès dédiés. Les taux d'arrivées sur les files d'attente représentant ces canaux sont donc identiques.

Nous supposons que le flux des communications qui sortent de la phase d'accès aléatoire est poissonnien de taux X . Nous avons donc :

$$X_q = X = \sum_{k=0}^2 \Lambda_k \cdot (1 - \tau_{x_k}) \quad (4.9)$$

Taux de service – D_q

Dans cette section, nous nous efforçons de calculer le taux de service ou débit moyen D_q des communications servies par la file q voir l'illustration de la Figure 4.4. Dans un premier temps, nous déterminons la taille d'une communication c sur la file q , $\beta_{c,q}$, puis dans un second, nous déterminons le débit β_q du serveur de la file q qui correspond à la capacité du canal concerné. Ces deux paramètres sont nécessaires pour calculer le taux de service de la file puisqu'on a :

$$D_q = \frac{\beta_q}{\mathbb{E}(\beta_{c,q})} \quad (4.10)$$

Taille des communications – $\beta_{c,q}$: Notons θ la taille de la charge utile en bits qu'un UE souhaite transmettre au réseau. Elle peut être envoyée selon différentes procédures de communication (nous en avons vu trois dans le Chapitre 3). Chaque procédure amène un

enchaînement de message différents et donc différentes quantités de ressources nécessaires pour terminer la communication sur chacun des canaux.

En considérant que tous les utilisateurs possèdent la même charge utile et utilise la même procédure, la taille des communications varient uniquement en fonction du MCS utilisé qui dépend des conditions de couverture. Lorsque le MCS le plus robuste ne suffit pas à garantir un seuil de fiabilité sur le message, des répétitions sont utilisées (voir Chapitre 3). Ainsi pour chaque UE, nous définissons des indices de MCS $i_{c,q}$ et des nombres de répétition $r_{c,q}$ (voir Tableau 4.2).

On additionne les tailles de tous les messages de la communication sur chaque file. Un exemple de calcul de la taille d'une communication est détaillé en Annexe F.

La taille d'une communication $\beta_{c,q}$ sur la file q est donc calculée en termes de RU pour la file U , sous-trames pour la file D et NCCEs la file C , respectivement illustrés dans les Figure 3.9, Figure 3.7 et Figure 3.13.

Débit des files – β_q : Calculons à présent le débit β_q des files, c'est-à-dire la quantité totale de ressources (RUs, sous-trames et NCCEs) disponibles par seconde sur chacun des canaux.

Pour l'UL, les ressources temps-fréquence sont partagées entre le NPRACH et le NPUSCH. Au total, ces deux canaux se partagent par seconde $Q_T = 180\,000$ Hz.s . En notant r_k le nombre de répétitions des préambules de la zone de couverture n°k – CE n°k. La quantité de ressource en Hz.s occupée par le NPRACH par seconde s'exprime ainsi :

$$Q_{RA} = \sum_{k=0}^2 \frac{m_k \cdot r_k}{\delta_k} \cdot t_p \cdot \Delta f_p \quad (4.11)$$

où t_p est la durée d'un préambule (5.6 ms ou 6.4 ms selon la taille du CP) et Δf_p est la largeur de bande occupée par un préambule.

La quantité de ressource occupée par un RU, notée Q_{RU} , est de 120 Hz.s pour le *single-tone* et de 180 Hz.s pour le *multi-tone* (voir Tableau 3.2). Ainsi le débit de la file U représentant le canal NPUSCH en nombre de RU.s⁻¹ est :

$$\beta_U = \frac{Q_T - Q_{RA}}{Q_{RU}} \quad (4.12)$$

Concernant le lien descendant, le NPDSCH et le NPDCCH se partagent 75% des sous-trames (sf), voir l'illustration d'une trame en Figure 3.7. Puisqu'il y a 1 000 sf par seconde et 2 NCCEs par sf , on a les débits pour les files D (en $sf.s^{-1}$) et C (en NCCE.s⁻¹) suivantes :

$$\begin{cases} \beta_D = 750 \cdot \frac{G-1}{G} \\ \beta_C = 1500 \cdot \frac{1}{G} \end{cases} \quad (4.13)$$

avec G le ratio entre la taille de fenêtre de recherche et la taille des espaces de recherche (voir section 3.4.2).

Nous avons ainsi déterminé tous les paramètres nécessaires au calcul des temps de service de l'Équation 4.10.

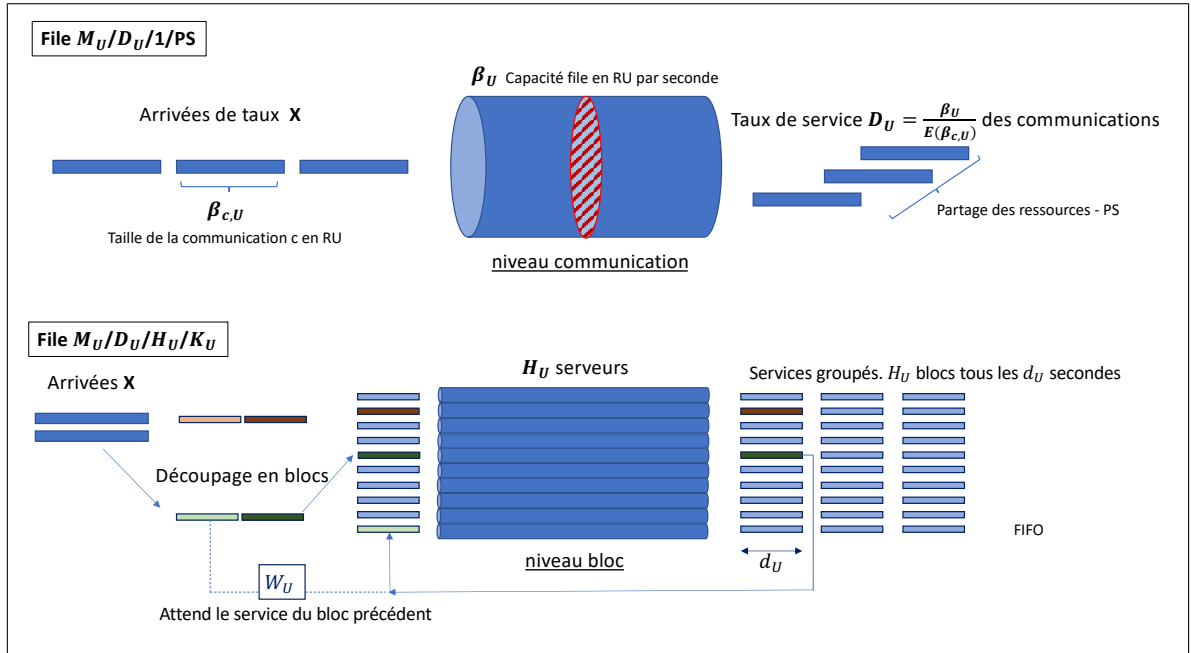


FIGURE 4.4 Comparaison du fonctionnement des files d'attentes $M/D/1/PS$ et $M/D/H/K$.

Temps d'impatience – T_q

Déterminer le temps d'impatience de la file q revient dans le cadre du NB-IoT à déterminer le temps maximal qu'attend un UE avant de considérer que la communication est en échec pour une des raisons citées en début de Section 4.3.

Le standard NB-IoT permet à la BS d'utiliser l'une des dix premières périodes de recherche pour allouer des ressources au terminal. La durée d'une période de recherche, notée pp , est illustrée en Figure 3.13. À ces dix périodes s'ajoute le délai maximum allouable dans les messages d'allocation (DCI) : 64 ms pour les TBs UL et 128 ms pour les TBs DL. Enfin, il faut multiplier ce temps d'attente par message par le nombre total de messages à envoyer sur chaque file n_q (le même pour tous les UEs si on considère la même procédure de communication et même charge utile). On a les temps d'impatience des files U , D et C suivants :

$$\begin{cases} T_U = n_U \times (10pp + 0.064) \\ T_D = n_D \times (10pp + 0.128) \\ T_C = n_C \times (10pp) \end{cases} \quad (4.14)$$

Conclusion sur le taux de congestion

Nous avons donc déterminé tous les paramètres nécessaires au calcul du taux d'impatience τ_q de la file q , décrit en Équation 4.8.

Dès lors qu'une impatience a lieu dans un des canaux, la communication est en échec. La probabilité que la communication soit réussie est donc la probabilité qu'il n'y ait d'impatience sur aucune des trois files d'attente. En pratique les messages sur les différentes files se succèdent donc lorsqu'un échec est déclaré sur l'une des files, la charge du reste de la communication disparaît des autres. Le taux d'impatience d'une file a donc un impact sur le taux d'impatience des autres files. Nous ferons cependant une approximation en considérant que ces taux sont indépendants les uns des autres. le taux de congestion τ_g d'une communication sera donc :

$$\tau_g = 1 - \prod_q (1 - \tau_q) \quad (4.15)$$

Le débit des communications subissant un échec dû à de la congestion est approché par :

$$\Upsilon \approx \tau_g \cdot X \quad (4.16)$$

Validation par comparaison avec un simulateur à événements discrets

Nous utilisons une approximation lors du calcul de l'impatience dans les files d'attente : les utilisateurs en échec ne sont pas enlevés de la file d'attente. Il convient donc de mesurer l'erreur relative engendrée par cette approximation. Nous comparons nos résultats à ceux engendrés par l'utilisation de la juste formule du calcul du taux d'impatience dans les files d'attente M/M/1 avec impatience, utilisée dans le modèle présenté en [70].

La Figure 4.5 compare les taux d'impatience en fonction de la charge pour les différentes files. Cela revient à fixer le taux de service (D pour les files M/D/1/PS et μ pour la file M/M/1) et à faire varier le nombre de communications par seconde entrant dans les files, X .

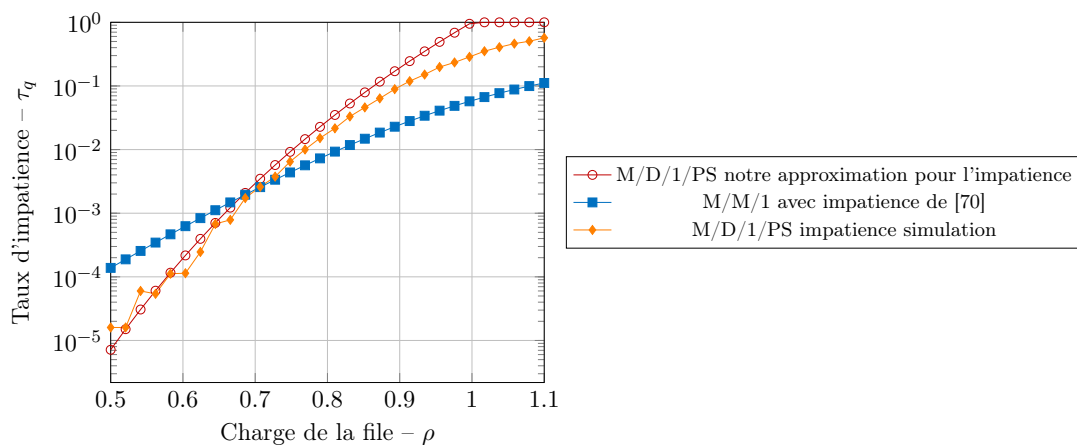


FIGURE 4.5 Comparaison du taux d'impatience des modèles avec une simulation de la file M/D/1/PS avec impatience. Taux de service fixe, égal à 50

L'approximation que nous avons faite est très performante lorsque la charge est faible et nettement meilleure qu'une file M/M/1 avec impatience. Cela s'explique par le fait qu'enlever le client de la file d'attente en cas d'impatience a peu d'impact sur le service des autres clients (peu de clients impatients). En revanche, lorsque la charge augmente, la différence entre

notre approximation et la simulation s'agrandit puisque cet impact est moins négligeable. On remarque que dans tous les cas, l'approximation que nous avons faite semble mieux rendre compte du taux d'impatience que celle de [70] qui a considéré une file M/M/1 avec impatience. Cela provient du modèle FCFS sous-jacent à la file M/M/1 qui va supposer que les clients sont servis les uns après les autres et qui ne modélise pas bien l'allocation et le partage des ressources effectués sur les différents canaux.

À la vue de cette comparaison, il nous semble donc judicieux d'utiliser une approximation du bon modèle plutôt que la formule exacte dans un modèle approché.

4.3.2 Taux de congestion des files M/D/H/K

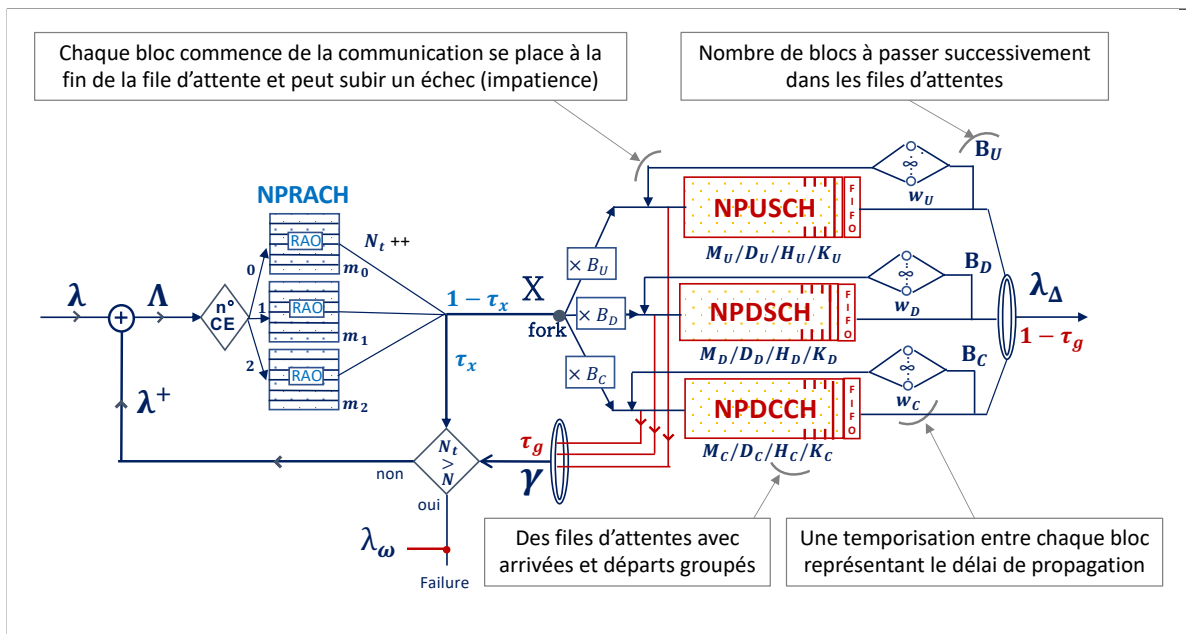


FIGURE 4.6 Schématisation du Modèle sur l'utilisation des ressources dans le NB-IoT - Files d'attentes MDHK.

Dans cette section, nous proposons un nouveau modèle pour les canaux à accès dédiés. Alors que le modèle présenté dans la section précédente est une abstraction niveau communication, nous faisons à présent une modélisation qui se place au niveau des blocs d'une communication. Quatre facteurs ont nourri notre volonté de modifier cette partie du modèle :

- Les files M/D/1/PS ne rendent pas compte de la séparation en blocs d'une communication. L'impatience peut arriver sur chacun des blocs de la communication. Ainsi, en cas d'impatience, il ne faut retirer qu'une partie de la communication des files d'attente, la première partie ayant déjà été servie. On va donc considérer un nombre de blocs à transmettre B_U , B_D et B_C , dans chacune des files représentant les canaux à accès dédiés NPUSCH, NPDSCH et NPDCCH ;
- La station de base dans une cellule NB-IoT sert un nombre limité de blocs simultanément, H , qui dépend de la configuration des canaux. Donc lorsqu'il y a plus de demandes que

de ressources disponibles, la station de base fait un *choix* en ne servant que H blocs (par exemple les H blocs arrivés en premier – FCFS). Attention, la critique du modèle M/M/1/FCFS avec impatience que nous venons de faire provient du fait que le modèle était à l'échelle des communications et donc avec l'envoi potentiel de plusieurs blocs. Or, lorsqu'on utilise les files M/D/1/PS et qu'il y a un grand nombre d'utilisateurs, la quantité de ressource est partagée de façon équivalente parmi tous les utilisateurs. Cette quantité peut donc devenir très petite en cas de congestion, aucune communication n'arrive à être servie dans les temps ce qui résulte en un débit utile nul, peu représentatif du fonctionnement réel d'une cellule ;

- Le taux de congestion des files M/D/1/PS (équation 4.15) est le même pour tous les utilisateurs de la cellule et ne rend pas compte de la superposition des trafics Poissonniens ayant des besoins différents en termes de quantité de ressources sur les canaux. Or, les conditions de couverture et la taille de la charge utile ont un impact sur la quantité de travail d'une communication et ont donc un impact sur les taux de congestion. Ainsi un modèle prenant en charge un nombre de blocs par communication permet de différencier les communications pendant la phase d'allocation. Enfin, pour obtenir une modélisation pouvant s'adapter au contexte satellite, il faut rendre compte des temps de propagation entre chaque message d'une communication. Ainsi, il faut découper la communication en plusieurs blocs (les messages) qui passent tous dans la même file d'attente – rebouclages – avec une temporisation w_q entre chaque passage. Il a été expliqué dans l'état de l'art que ces temps de propagation jouent un rôle dans les performances de débit couche réseau/transport et nous montrons son impact sur la couche MAC dans le Chapitre 6, spécifique au fonctionnement du NB-IoT.

Nous avons donc décidé de modéliser le mécanisme d'allocation des ressources dans les canaux dédiés avec des files d'attente où les clients sont les blocs de la communication. Ces blocs arrivent et sont servis de façon groupée comme illustré en Figure 4.7 et en Figure 4.4. Ces blocs arrivent de l'accès aléatoire (débit X sur les figures), les préambules correctement reçus d'un même RAO arrivent simultanément et se traduisent par un nombre de blocs (B_U , B_D , B_C) à transmettre sur les différents canaux. Enfin, le nombre de blocs pouvant être servis par une file sur chaque période est fixe, fini et dépend du paramétrage du canal dont la file est la représentation. Pour chaque communication, on n'alloue qu'un bloc à chaque passage et la communication si elle réussit passera plusieurs fois (B_U , B_D et B_C fois) par chacune des files (U , D et C).

Les temps de service sont déterministes et correspondent au temps d'émission d'un bloc. On peut donc savoir lorsqu'un bloc arrive s'il pourra être servi à temps ou non. Cela revient donc à limiter la capacité de la file d'attente à une taille K , voir Figure 4.7. Cette équivalence est correcte car les durées d'impatience sont les mêmes pour toutes les communications.

Cette description du fonctionnement des canaux correspond à des files M/D/H/K dont les départs et les arrivées sont groupés, avec un nombre de rebouclage qui correspond au nombre de blocs nécessaires pour la communication sur chaque canal. Le schéma de cette nouvelle modélisation est donné en Figure 4.6.

On suppose encore une fois que le trafic en entrée plus celui des rebouclages est poissonnien.

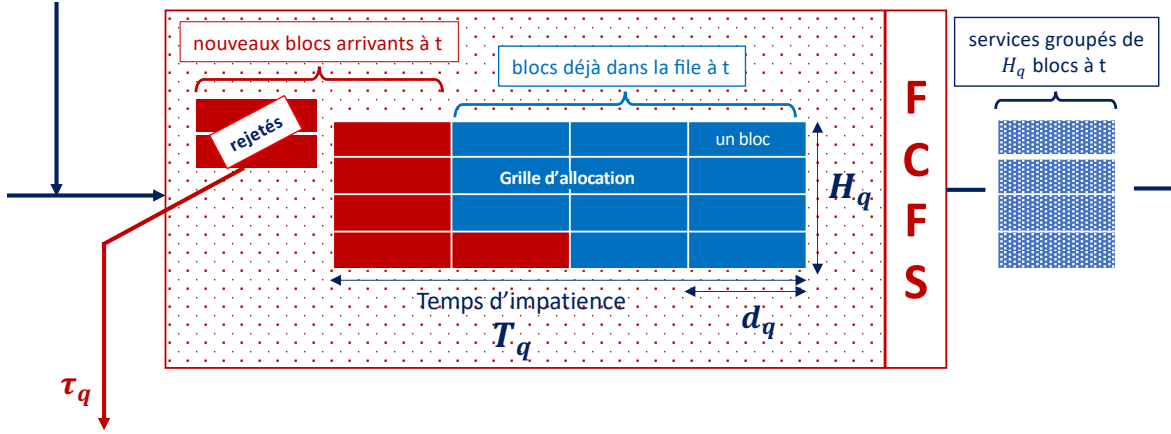


FIGURE 4.7 Zoom sur une des files de la Figure 4.6. Exemple de blocs rejetés à leur arrivée dans la file

Principe des files M/D/H/K : L'étude de la file M/D/H/K avec arrivées groupées s'effectue de la façon suivante. Nous faisons une analyse de la chaîne incluse aux instants d'allocations (juste avant l'allocation). A chaque période d'allocation de durée b , H blocs au maximum sont servis par la file (H serveurs). Lorsque de nouveaux utilisateurs arrivent dans la file, ils se rajoutent à ceux déjà présents si la taille de la file d'attente le permet. Pour modéliser l'abandon, il suffit de prendre une capacité de file d'attente K telle que :

$$K = H \cdot \left\lfloor \frac{T}{d} \right\rfloor \quad (4.17)$$

où T est la durée du délai ou *timer* relatif à l'abandon Équation 4.14. Si l'on note S_n le nombre de clients dans la file juste avant l'allocation et A_n ceux qui arrivent entre deux périodes d'allocation consécutives :

$$S_{n+1} = \text{Min} \{ (S_n - H)^+ + A_n, K \} \quad (4.18)$$

où $x^+ = \max(x, 0)$ et A_n suit une loi de Poisson. $(S_n, n \in \mathcal{N})$ est donc bien une chaîne de Markov à temps discret.

Matrice de transition et état stationnaire de la file M/D/H/K :

$$M = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & \dots & a_H & a_{H+1} & \dots & a_{K-1} & b_K \\ a_0 & a_1 & \dots & a_H & a_{H+1} & \dots & a_{K-1} & b_K \\ \vdots & & & & & & & \vdots \\ a_0 & a_1 & \dots & a_H & a_{H+1} & \dots & a_{K-1} & b_K \\ 0 & a_0 & \dots & a_{H-1} & a_H & \ddots & a_{K-2} & b_{K-1} \\ \vdots & & \ddots & & \ddots & & \ddots & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & a_{H-1} & b_H \end{bmatrix}$$

où a_n est la probabilité que n blocs arrivent dans la file durant une période d et $b_K = \sum_{k=K}^{+\infty} a_k$.

La matrice de transition est la matrice de dimension (K, K) qui donne les probabilités d'évolution conditionnelle du nombre de clients dans la file d'attente à chaque instant d'allocation.

On peut alors calculer numériquement la distribution stationnaire Π de la chaîne de Markov incluse, le vecteur noté $\Pi = (\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_K)$. Avec π_j la probabilité qu'il y ait j utilisateurs dans la file en régime permanent.

Détermination des taux de congestion : Afin de réussir la communication, chaque utilisateur va devoir être servi $B_{q,c}$ fois par la file $M_q/\beta_q/H_q/K_q$. Ce nombre représente les blocs élémentaires (même taille) de la communication c sur la file q et dépendent de la procédure de communication, de la taille de la payload et de la couverture.

Dans cette section, nous allons dans un premier temps calculer la probabilité de congestion d'un bloc dans la file d'attente. Nous allons ensuite prendre en compte le fait qu'un échec sur un bloc de la communication enlève le reste des blocs qui doivent être envoyés par la même communication. Enfin, nous déterminons le taux de congestion d'une communication concernant cette modélisation des canaux avec des files M/D/H/K.

Pour commencer, calculons le taux de congestion d'un bloc dans la file d'attente $M_q/D_q/H_q/K_q$.

Supposons qu'il y ait j clients dans cette file d'attente à un instant d'allocation donné. Tous les blocs arrivant durant la prochaine période seront servis si leur nombre ne dépassent pas un certain seuil $i_{max} : K$ (capacité de la file) $- j$ (clients déjà dans la file) $- H$ (clients servis pendant la période). Ainsi, le nombre moyen de blocs correctement servis parmi les nouveaux arrivants est :

$$\begin{aligned} n_j &= \sum_{i=1}^{i_{max}-1} i \cdot a_i + \sum_{i=i_{max}}^{\infty} i_{max} \cdot a_i \\ &= \sum_{i=1}^{i_{max}-1} i \cdot a_i + i_{max} \cdot b_{i_{max}} \end{aligned} \quad (4.19)$$

avec, $i_{max} = K_q - j - H_q$

Le taux de congestion pour un bloc, τ_q , est calculé avec l'Équation 4.20 où ρ_q est la charge

de la file.

$$\tau_q = 1 - \frac{\sum_{j=0}^{K_q} n_j \cdot \pi_j}{\rho_q \cdot H_q} \quad (4.20)$$

Au numérateur, on trouve le nombre moyen de blocs servis par période et au dénominateur le nombre moyen de blocs qui arrive par seconde.

Le flux des communications, X , qui arrive sur les files d'attente est une superposition de flux qui ont passé avec succès la phase de contention du canal en accès aléatoire. Puisque le taux de congestion d'une communication dépend du nombre de blocs de la communication, il est nécessaire de différencier les flux dans X . Pour cela, on note $\lambda_{k,c}$ les flux arrivant dans la cellule qui appartient à la zone de couverture k et dont le nombre de blocs nécessaires à la communication c est $\{B_{U,c} B_{D,c} B_{C,c}\}$ dans les trois files d'attente M/D/H/K. On a :

$$\begin{aligned} X &= \sum_{k=0}^2 \sum_c \tau_{x_k} \cdot \Lambda_{k,c} \\ &= \sum_{k=0}^2 \sum_c X_{k,c} \end{aligned} \quad (4.21)$$

avec,

$$\Lambda_{k,c} = \Lambda_{k,c} + \Lambda_{k,c}^+ \quad (4.22)$$

Cependant le nombre des blocs devant être servis par la file q résultat d'une communication du flux $X_{k,c}$ n'est pas de $B_{q,c}$. En effet, lorsqu'une congestion est déclenchée sur un des blocs d'une communication la suite de la communication est abandonnée. Ainsi, en supposant les probabilités d'impatience successive indépendantes les unes des autres, le nombre de blocs moyen $\overline{B_{q,c}}$ effectivement traité par la file q pour une communication du flux $X_{k,c}$ est :

$$\begin{aligned} \overline{B_{q,c}} &= 1 + 1 - \tau_q + (1 - \tau_q)^2 + \dots + (1 - \tau_q)^{B_{q,c}-1} \\ &= \frac{1 - (1 - \tau_q)^{B_{q,c}}}{\tau_q} \end{aligned} \quad (4.23)$$

La charge effectivement traitée dans les files d'attente est un point fixe, exprimé par l'équation :

$$\rho_q = \frac{d_q}{H_q} \cdot \sum_{k,c} (X_{k,c} \cdot \overline{B_{q,c}}) \quad (4.24)$$

Π , τ_q et ρ_q sont calculés par une méthode itérative. Nous pouvons alors calculer le taux de congestion d'une communication sur un des canaux - la probabilité que les $B_{q,c}$ blocs aient été servis avec succès. Nous faisons la même approximation que précédemment en considérant que les échecs sur les différentes files sont indépendants. Nous obtenons donc $\tau_{g_{k,c}}$, le taux de congestion du flux (k, c) :

$$\tau_{g_{k,c}} = 1 - \prod_q (1 - \tau_q)^{B_{q,c}} \quad (4.25)$$

4.4 Détermination du nombre de tentatives et de la probabilité d'échec globale

Dans cette dernière section, nous déterminons le nombre moyen de tentatives de communication par UE, nécessaire au calcul de la probabilité d'échec globale. Rappelons que si une tentative échoue, soit par collision soit par congestion, l'UE tentera à nouveau après un temps aléatoire. L'UE abandonne si le nombre de tentatives dépasse un certain nombre fixé par la BS, N .

La probabilité d'échec par tentative, $\mathcal{P}_{f_{k,c}}$, concernant le flux (k, c) est le complément de la probabilité que la communication réussisse à la fois la phase de collision et la phase de congestion que l'on va supposer indépendantes :

$$\mathcal{P}_{f_{k,c}} = 1 - (1 - \tau_{x_k}) \cdot (1 - \tau_{g_{k,c}}) \quad (4.26)$$

Dans le modèle M/D/1/PS, le taux de congestion est le même pour tous les clients donc on a $\tau_{g_{k,c}} = \tau_g$ (voir équation 4.15).

La probabilité d'échec concernant la communication, $\mathcal{P}_{\omega_{k,c}}$, est la probabilité que N tentatives échouent consécutivement et détermine le débit utile de la cellule λ_{Δ} si on les suppose indépendantes :

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{\omega_{k,c}} &= (\mathcal{P}_{f_{k,c}})^N \\ \lambda_{\Delta_{k,c}} &= \lambda_{k,c}(1 - \mathcal{P}_{\omega_{k,c}}) \\ \lambda_{\Delta} &= \sum_{k,c} \lambda_{\Delta_{k,c}} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Un aspect clé du modèle est qu'à cause des tentatives, la charge sur l'accès aléatoire, Λ , est supérieure à la charge d'arrivée, λ . Afin de calculer Λ , il est nécessaire de déterminer le nombre moyen de tentatives par communication, $N_{a_{k,c}}$, nous avons :

$$\begin{aligned} \text{probabilité d'une seule tentative} &: 1 - \mathcal{P}_{f_{k,c}} \\ \text{probabilité de deux tentatives} &: (1 - \mathcal{P}_{f_{k,c}}) \mathcal{P}_{f_{k,c}} \\ \text{probabilité de trois tentatives} &: (1 - \mathcal{P}_{f_{k,c}}) (\mathcal{P}_{f_{k,c}})^2 \\ \text{donc} & \end{aligned} \quad (4.28)$$

$$N_{a_{k,c}} = (1 - \mathcal{P}_{f_{k,c}}) \sum_{j=0}^{N-1} (j+1) (\mathcal{P}_{f_{k,c}})^j + N \cdot (\mathcal{P}_{f_{k,c}})^N$$

Finalement, nous pouvons calculer le débit arrivant sur le NPRACH en résolvant itérativement l'équation :

$$\Lambda = \sum_{k,c} \lambda_{k,c} \cdot N_{a_{k,c}} \quad (4.29)$$

Nous avons donc affaire là encore à un point fixe. Nous résolvons ce point fixe par une méthode itérative. A chaque itération Λ est mis à jour ainsi, les taux de collision et de congestion doivent être calculés à nouveau afin de sortir de nouvelles valeurs pour P_{ω} et N_a . Lorsque l'écart

entre deux valeurs successives de Λ est suffisamment faible nous considérons que le modèle a convergé produisant ainsi tous les paramètres nécessaires pour évaluer les performances de la cellule (taux d'échec global, débit utile, taux de collision et de congestion, et charge sur les différents canaux).

4.4.1 Comparaison et discussion sur les modèles

Nous avons décrit deux possibilités de modélisation de la phase d'allocation de ressources : soit par des files M/D/1/PS soit par des files M/D/H/K. La Figure 4.8 montre sur un cas quelconque le taux d'échec de ces files lorsque la charge augmente.

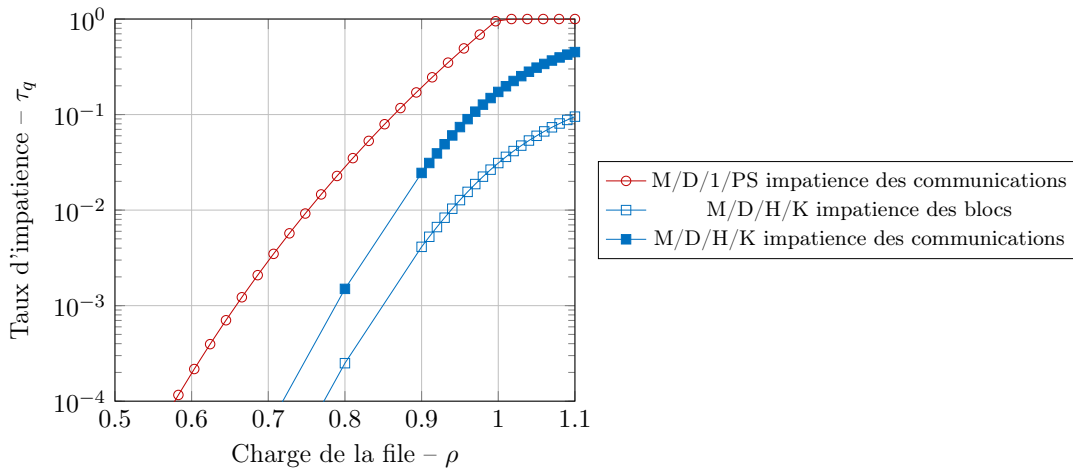


FIGURE 4.8 Comparaison du taux d'impatience des modèles avec files M/D/1/PS (approximation) et M/D/H/K. Les paramètres de la file M/D/H/K sont $P=2$, $H=12$ et le nombre B_u de bloc à devoir être servis avec succès pour que la communication soit réussie est de 6.

On remarque que la file M/D/H/K a un taux de congestion plus faible. Un résultat attendu puisqu'elle rend compte de a) un nombre fixe de blocs servis par période lorsque la file est pleine et b) la charge effective de la file est adaptée en fonction du taux d'échec. Ces attributs rendent cette modélisation plus proche du fonctionnement d'un système réel.

Néanmoins, les calculs nécessaires pour le taux d'échec de la file M/D/H/K sont plus importants que pour la file M/D/1/PS. Notamment le calcul du vecteur Π dont la taille K est la longueur de la file d'attente pouvant dépasser le millier dans le cadre du NB-IoT (voir section suivante). Le vecteur Π est unique car la chaîne est ergodique mais la résolution itérative reste longue. En revanche, le calcul du taux d'échec de la M/D/1/PS, bien qu'étant une approximation, est plus rapide (formule de l'Équation 4.8).

Dans un cas pratique, le paramétrage du protocole NB-IoT est fait par la station de base. Ce modèle pourrait donc servir à adapter les différents paramètres afin de prévenir les congestions ou d'augmenter la capacité de la cellule lorsqu'elles arrivent. S'il doit être implanté dans une station de base, il se pourrait que la capacité de calcul ou simplement le temps de prise de décision soit des facteurs qui encouragent l'utilisation du modèle M/D/1/PS plutôt que celle du modèle M/D/H/K.

Section	Variable	Unité	M ¹	Description
Section 4.1.2	N	–	⊕	Nombre de tentatives maximum autorisées par la BS pour chaque communication des UEs
	λ	com/s	⊕	Débit des nouvelles communications entrant dans la cellule NB-IoT
	λ_{Δ}	com/s	⊕	Débit des communications réussies
	p_s	–	⊕	Probabilité de succès d'une communication
Section 4.2	k	–	⊕	Numéro de la zone CE
	λ^+	com/s	⊕	Débit des communications qui ont échoué lors de leur dernière tentative
	Λ	com/s	⊕	Débit des communications total arrivant sur le canal en accès aléatoire
	τ_x	–	⊕	Taux de collision
	δ_k	–	⊕	Intervalles entre les RAOs du CE n°k
	m_k	–	⊕	Nombre de sc des RAOs du CE n°k
Section 4.3.1	X	com/s	⊕	Débit en sortie de l'accès aléatoire
	θ	bits	⊕	Taille de la charge utile.
	$\beta_{c,q}$	RU, sf ou DCI	+	Taille de la communication c dans la file d'attente q
	D_q	–	+	Taux de service de la file q
	r	–	⊕	Nombre de répétitions
	t_p	ms	⊕	Durée d'un préambule
	Δf_p	kHz	⊕	Largeur de bande du préambule
	G	–	⊕	Ratio de répartition des canaux DL
	τ_q	–	⊕	Taux de congestion sur la file q
	τ_g	–	⊕	Taux de congestion d'une communication
Υ	–	⊕	Débit des communications en congestion	
Section 4.3.2	B	–	□	Taille en nombre de blocs d'une communication sur une des files d'attente
	H	–	□	Nombre de serveurs de la file d'attente
	K	–	□	Capacité de la file d'attente
	d	s	□	Période d'allocation de la file d'attente
	i_{max}	–	□	Nombre de serveurs d'une file
Section 4.4	\mathcal{P}_f	–	⊕	Probabilité d'échec d'une tentative de communication
	\mathcal{P}_{ω}	–	⊕	Probabilité d'échec d'une communication
	N_a	–	⊕	Nombre moyen de tentatives par communication

¹ Variable utilisée dans : + le modèle M/D/1/PS, □ le modèle M/D/H/K et ⊕ les deux.

TABLE 4.1 Récapitulatif des variables utilisées dans les modèles

Ces deux modélisations sont complémentaires et traduisent le compromis entre précision et complexité. L'évaluation de performance qui clôt ce Chapitre 4 décrit nos contributions et les lignes directrices de la configuration du protocole NB-IoT, elle utilise le modèle M/D/H/K. Une partie de ces résultats a d'abord été trouvée à l'aide de notre modèle M/D/1/PS [129] qui sont confirmés ici par le modèle M/D/H/K.

4.5 Évaluation des performances - Capacité du NB-IoT

4.5.1 Définition des cellules et de la capacité

Cette section définit les modèles que nous allons utiliser pour étudier la capacité des cellules NB-IoT. Comme expliqué en début de chapitre, notre modèle permet de rendre compte du fonctionnement de la couche MAC du NB-IoT. Il reste donc à définir la modélisation du système et de la couche physique (voir Figure 4.1).

Modélisation du système NB-IoT

Nous allons considérer un déploiement sur une seule porteuse ou PRB NB-IoT de 180 kHz (en UL et en DL). La capacité obtenue sur cette porteuse pourra donc être multipliée pour obtenir des capacités sur des largeurs de bande plus grandes.

Nous allons également considérer que le déploiement se fait en mode *standalone* comme présenté dans l'état de l'art en Figure 3.2. Cela veut dire qu'on ne considère pas d'interférences avec d'éventuels systèmes alentour ni de symboles DMRS de contrôle LTE dans la trame DL (voir Figure 3.7).

Le 3GPP définit un déploiement NB-IoT par un réseau de cellules hexagonales qui remplissent le plan. Les stations sont espacées de façon à ce que ces cellules hexagonales soient des cellules de Voronoï, chaque point du plan se trouve dans la cellule dont le centre est la BS la plus proche. On illustre ce type de déploiement dans la Figure 4.9.

On a les relations suivantes entre le rayon r d'une cellule, la distance entre deux BS D_{ISD} (*Inter-Site Distance*) et l'aire d'une cellule \mathcal{A} :

$$\begin{cases} D_{ISD} = \sqrt{3} \cdot r \\ \mathcal{A} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot D_{ISD}^2 = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot r^2 \end{cases} \quad (4.30)$$

Modélisation de la couche physique

Le 3GPP considère un déploiement de cellules avec une distance entre les cellules D_{ISD} de 500 m (cellules A) et de 1732 m (cellules B). Il donne les distributions de rapport signal à bruit plus interférences – Signal to Noise plus Interference Ratio (SINR) – obtenues pour des terminaux NB-IoT concernant ces deux types de déploiement dans un environnement *UrbanMacro* (signifiant urbain sans considération de terminaux à l'intérieur de bâtiments).

Nous nous appuyerons donc sur ces distributions pour modéliser la couche physique. Les distributions de SINR sont données en Annexe E. Afin d'obtenir le MCS à utiliser dans notre

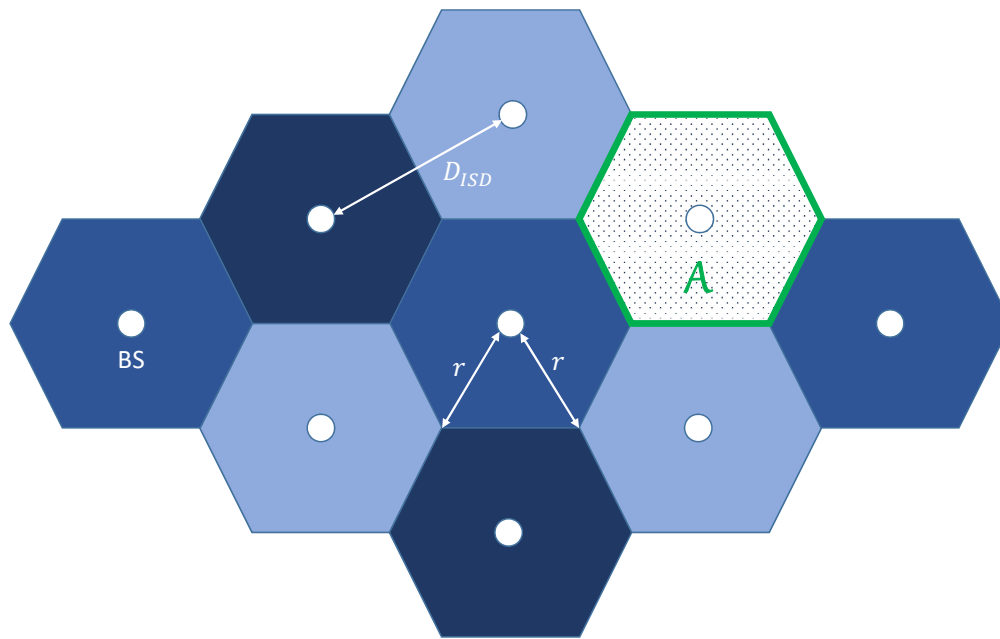


FIGURE 4.9 Déploiement d'un réseau NB-IoT considéré par le 3GPP

modèle couche MAC, nous avons besoin d'utiliser la table des Block Error Rate (BLER) (Annexe E) qui associe à un MCS un seuil de SINR à partir duquel un taux d'erreur maximal est garanti sur le message (TB) transmis ou reçu par l'UE. Le BLER est un paramètre configuré par l'opérateur qui déploie le réseau. Nous considérerons un BLER d'au moins 10^{-1} [110, 130]. [110] introduit une approche pour estimer le SINR requis en utilisant la théorie de Shannon. Dans [130] les auteurs font le lien entre SINR, BLER et MCS à travers des simulations MATLAB et un modèle d'ajustement de courbe. Enfin l'impact des répétitions a été étudié dans [131]. Nous nous sommes fondés sur ces modèles pour choisir les MCS et le nombre de répétitions à utiliser dans notre configuration (Tableau 4.2). Pour le nombre de répétitions des préambules, nous avons sélectionné une probabilité de détection d'au moins 10^{-2} d'après les travaux de [97, 132].

La Tableau 4.2 représente la configuration de la cellule par défaut utilisée dans la littérature [97, 133, 134] mais aussi dans nos travaux. On y trouve également des informations sur le trafic étudié (méthodologie ITU [53, 54]) Nous allons à présent faire varier certains de ces paramètres pour étudier les performances de la cellule en termes de capacité. Lors de nos expériences, les paramètres qui ne sont pas étudiés prennent les valeurs de ce tableau sauf mention contraire.

Méthodologie pour le calcul de la capacité

Rappelons que l'objectif de ce chapitre est l'étude de la capacité du NB-IoT en termes de densité de connexion, une notion définie dans les rapports de l'ITU [53, 54]. La densité de connexion est la quantité maximale de terminaux pouvant se trouver dans une cellule NB-IoT selon un trafic donné (quantité de données UL/DL et intervalle entre les communications) en

Paramétrage de la cellule dans le Modèle				
Largeur de Bande		180 kHz pour l'UL et pour le DL		
Mode de Déploiement		Standalone		
Niveau de Couverture		CE 0	CE 1	CE 2
Maximum Coupling Loss (MCL)		144 dB	154 dB	164 dB
Couverture	$D_{ISD} = 500$ m	37%	63%	0%
	$D_{ISD} = 1732$ m	1%	98%	1%
Répétitions	NPRACH	2	8	32
	NPDCCH	1	4	64
	NPUSCH	1	2	16
	NPDSCH	1	16	128
Bande Transmission UL		45 kHz	15 kHz	15 kHz
I_{MCS}	NPUSCH	7	4	2
	NPDSCH	4	6	4
G		4		
R_{max}		8	8	128
Configuration RAO	δ_k	160 ms	160 ms	680 ms
	m_k	12	24	12
Taille charge utile UL (θ)		50 octets		
Taille de l'accusé de réception DL		20 octets		
Intervalle entre les communications (I)		2 heures		
Procédure de communication		UPO (RRC Resume)		

TABLE 4.2 Récapitulatif des valeurs par défaut utilisées dans notre modèle

maintenant une fiabilité moyenne de 99% sur les communications. Dans notre modèle, cela revient à calculer le nombre maximal de communications par seconde pouvant être traitées par une cellule en ayant 99% de réussite.

La Figure 4.10 représente le taux d'échec moyen des cellules A et B en fonction du débit des communications. Lorsque ce taux d'échec atteint 1%, on connaît la capacité de la cellule, λ_{max} .

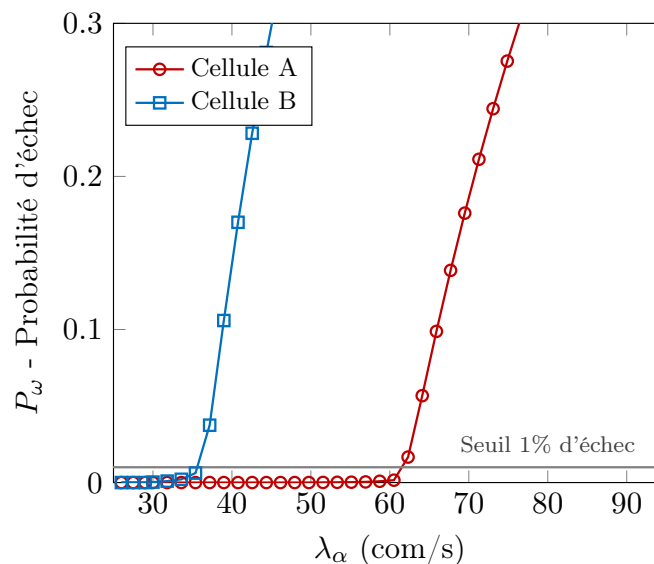


FIGURE 4.10 Taux de congestion des déploiements cellulaire A et B.

On en déduit la densité de connexion de la cellule en UE/km² en utilisant l'aire de la cellule et l'intervalle moyen entre deux communications d'un même UE. La densité de connexion de la cellule ou capacité, \mathcal{C} , vaut :

$$\mathcal{C} = \frac{\lambda_{max} \cdot I}{\mathcal{A}_{ire}} \quad (4.31)$$

Notre modèle permet donc de déterminer les densités de connexion de la cellule A et B, résumés dans le Tableau 4.3.

Densité de connexion	Notre Modèle	Notre Modèle sans overhead DL	3GPP – Non-Full Buffer System Level Simulation [33]
Cellule A	515 000	1 180 000	1 225 000
Cellule B	29 750	90 800	94 000

TABLE 4.3 Comparaison entre les résultats de notre modèle et ceux décrits dans les rapports du 3GPP

Dans le rapport du 3GPP [33] comparant les résultats du NB-IoT aux exigences du segment mMTC, les auteurs indiquent qu'ils ne considèrent pas l'*overhead* dans le DL (canal NPBCH et signaux NPSS/NSSS). Pourtant cet *overhead* correspond à 25% des ressources du DL. Dans le Tableau 4.3, nous comparons nos résultats avec ceux du 3GPP lorsque nous faisons la même approximation concernant l'*overhead* du DL. On peut donc voir que leur approximation a

un gros impact sur les performances du NB-IoT³. Nous étudions en détail les causes de la limitation de la capacité dans la suite de cette section.

Les simulations du 3GPP ne considèrent pas de flux poissonnien entrant dans la cellule ni de file d'attentes pour l'allocation de la ressource, c'est un calcul donnant la capacité optimale du système. Il est donc normal que nous soyons en dessous de leurs valeurs. De plus, la configuration du NPRACH qu'ils utilisent n'est pas donnée. Notre configuration est donnée dans le Tableau 4.2 et nous étudions la meilleure configuration possible vis-à-vis de la capacité dans la sous-section 4.5.2.

Pour les cellules de type A, les exigences du segments mMTC du Tableau 2.1 sont atteintes avec un seul PRB. En revanche, ce n'est pas le cas pour les déploiements de type B, le 3GPP propose donc de déployer le NB-IoT sur 1 980 kHz (11 PRBs).

La section suivante fait varier les paramètres de configuration de la cellule afin d'étudier le comportement du protocole NB-IoT.

4.5.2 Effets des paramètres de configuration du standard

Impact de la taille de la charge utile – θ

La quantité de ressources nécessaires sur le NPUSCH dépend de la charge utile. La Figure 4.11 donne la capacité d'une cellule en termes de nouvelles communications entrantes par seconde en fonction de la taille de la charge utile. On remarque que lorsque la taille de la charge utile diminue, la capacité augmente jusqu'à atteindre un plateau.

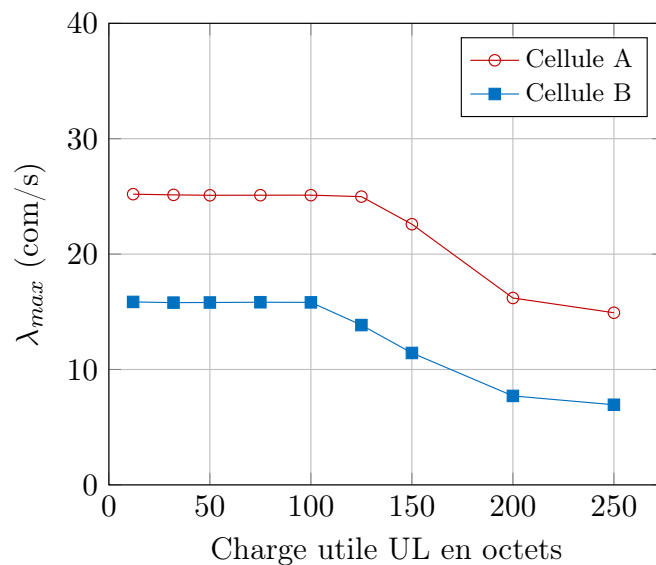


FIGURE 4.11 Évolution de la capacité de la cellule (99% de fiabilité) en fonction de la charge utile. $G = 4$

3. Cette approximation s'explique par le fait qu'un déploiement sur plusieurs PRBs permet de transmettre l'*overhead* DL sur un des PRBs appelé le PRB *anchor* tandis que les autres ne contiennent que les canaux NPDCCH et NPDSCH. Cette approximation est donc d'autant plus valable que la largeur de bande du déploiement est importante

Afin de comprendre ce phénomène, nous avons illustré en Figure 4.12 les charges ρ_q en entrée de chacun des canaux dans notre modèle. Il est possible de distinguer deux parties dans le graphique.

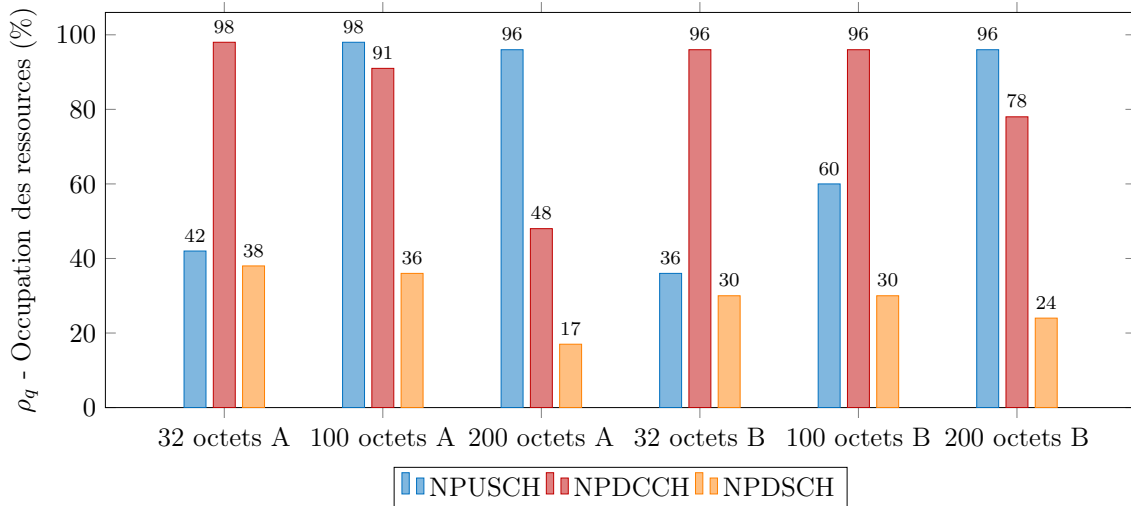


FIGURE 4.12 Charge sur les canaux lorsque la cellule atteint sa capacité maximum d'utilisation (99% de fiabilité). En fonction de la taille de la charge utile, le manque de ressource ne survient pas sur le même canal. $G = 4$

- Charges utiles importantes : égales ou supérieures à 125 octets pour les cellules A et égales ou supérieures à 100 octets pour les cellules B. Le NPUSCH limite la capacité de la cellule. C'est le canal qui est le plus touché lorsque la charge utile augmente.
- Charges utiles petites : égales ou inférieures à 100 octets pour les cellules A et égales ou inférieures à 75 octets pour les cellules B. Nous supposons que l'optimisation plan usager (UPO) est utilisée par l'ensemble des terminaux ce qui réduit l'*overhead* réseau par rapport à l'établissement de connexions classiques LTE. Nos résultats montrent qu'il subsiste toutefois une limitation due à de l'*overhead* réseau lorsque la charge utile à transmettre dans l'UL est très petite. C'est le manque de ressources dans le canal de contrôle DL (NPDCCH) qui est à l'origine de la réduction de capacité.

A la lumière de ces résultats, il semble nécessaire de configurer les différents canaux en fonction du type de trafic observé. Alors que $G = 4$ est une valeur communément utilisée pour le ratio entre plan contrôle (NPDCCH) et plan données (NPDSCH), nos résultats montrent qu'il faut utiliser une valeur plus petite (favorisant la part de NPDCCH dans la porteuse DL) lorsque les charges utiles sont petites afin d'augmenter la capacité des cellules. En effet, on observe de la marge sur le NPDSCH, ressources qui pourraient être utilisées pour permettre plus de messages de contrôle d'établissement des connexions. La Figure 4.14 montre les résultats obtenus lorsque le paramètre G est égal à 2.

L'augmentation de G permet d'augmenter la capacité. On remarque à présent qu'il n'y a plus de marge sur le canal NPDSCH et pourtant la capacité des cellules est toujours limitée par le manque de ressources sur le lien descendant. Ce phénomène est déroutant dans ce scénario particulier où il n'y a que de la charge utile sur l'UL.

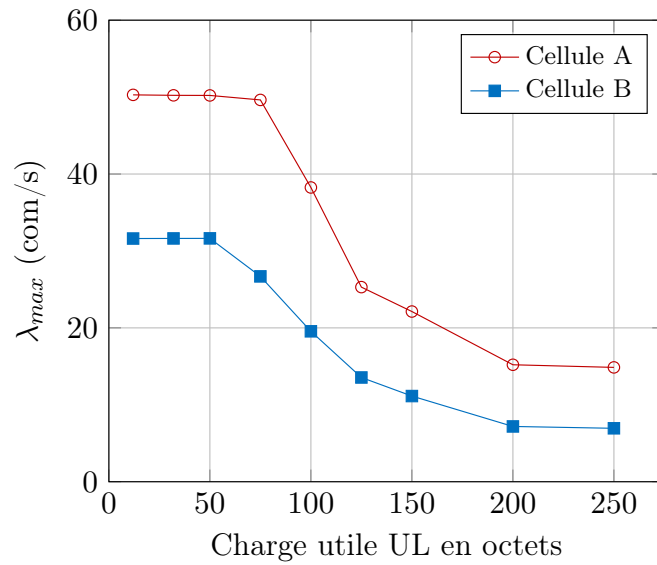


FIGURE 4.13 Évolution de la capacité de la cellule (99% de fiabilité) en fonction de la charge utile. $G = 2$

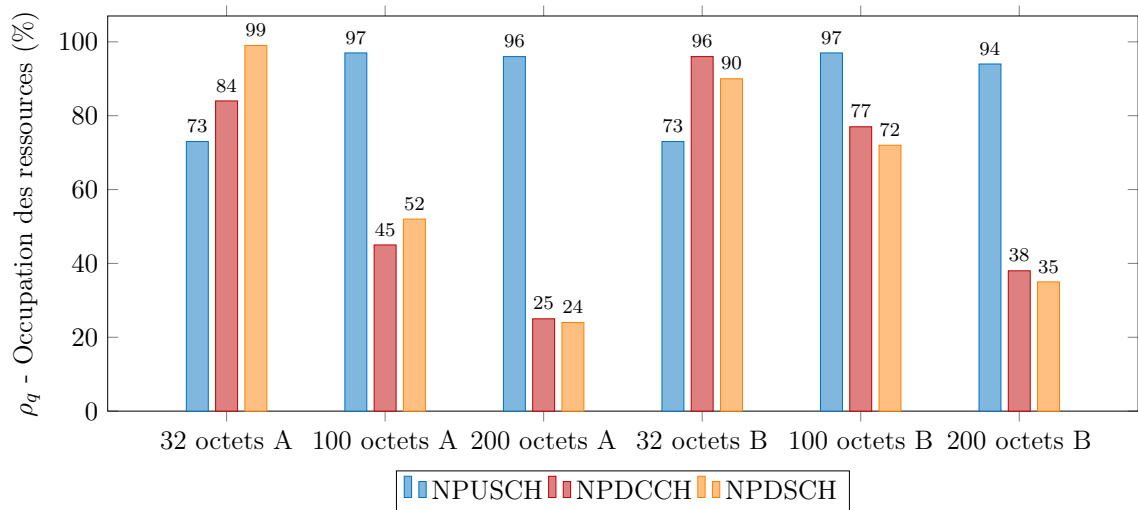


FIGURE 4.14 Charge sur les canaux lorsque la cellule atteint sa capacité maximum d'utilisation (99% de fiabilité). $G = 2$

Impact de la procédure de communication

Reconnaissant ce fait et donc le besoin de fournir une procédure de communication encore plus légère que les optimisations CPO et UPO de la Release 13, le 3GPP introduit dans la Release 15 l'Early Data Transmission (EDT) [75]. Cette procédure permet d'envoyer de la donnée utile directement dans les messages 3 et 4, respectivement pour l'UL et pour le DL. EDT peut être appliqué dans le cadre de l'optimisation plan usager (UP-EDT) comme plan contrôle (CP-EDT). Voici un bref résumé des messages de EDT conforme au rapport [105].

Messages 1 et 2 Les deux premiers messages de la procédure de communication restent inchangés. Le premier message est un préambule émis par le terminal qui permet à la station de base de savoir qu'il souhaite communiquer. Ce préambule doit être envoyé dans une fenêtre d'accès aléatoire (RAO) consacrée à EDT (informations donnée par la BS). Le second est le "Random Access Response" (RAR) qui est un message de la station de base qui alloue un TB au terminal afin qu'il puisse transmettre son message 3.

Message 3 Concernant UP-EDT, le terminal envoie un message RRC Connection Resume permettant à la station de base de récupérer les informations de sécurité et de radio bearer précédemment établies. Il joint également à ce message 3 sa donnée UL.

Concernant CP-EDT, le terminal envoie le RRC Connection Request qui transmet l'UL NAS-PDU. Le terminal utilise donc le plan contrôle pour envoyer de la donnée comme dans l'optimisation CPO. Un moyen pour récupérer la donnée dans le MME est alors nécessaire côté cœur de réseau.

Message 4 Dans les deux cas de figure, le terminal peut indiquer dans le message 3 qu'il n'a plus de données à envoyer et souhaite retourner en mode repos après le message 4. Dans le cas UP-EDT la station de base enverra un RRC Connection Release en guise de message 4. Pour CP-EDT, la station de base enverra un message de fin de connexion. Ce message 4 est l'occasion pour le réseau d'envoyer un message applicatif par exemple un accusé de réception du message 3.

EDT réduit ainsi les échanges de deux allers-retours (envoi du TB après le message 4 et message de sortie du mode connecté), ce qui raccourcit la latence du début de la communication. Dans le cas où le terminal souhaite transmettre plus de données ou rester connecté, la suite de la procédure de communication est classique : RRC Connection Setup Complete for message 5, UL and DL data and puis RRC Connection Release. Par conséquent, EDT est un mécanisme également intéressant pour la technologie 5G-NR quand on souhaite réduire la latence en début de communication pour un terminal qui n'est pas connecté.

La Figure 4.15 compare la séquence de message de UPO et de UP-EDT.

Dans notre étude, nous nous concentrons sur le gain en capacité qu'apporte EDT à travers la réduction des *overheads*. La Figure 4.16 montre la capacité de la cellule lorsque EDT est utilisé (par 100% des terminaux). D'abord, les capacités sont supérieures à celles obtenues avec la procédure UPO (Figure 4.13). Ensuite, la différence de performance entre le CP-EDT

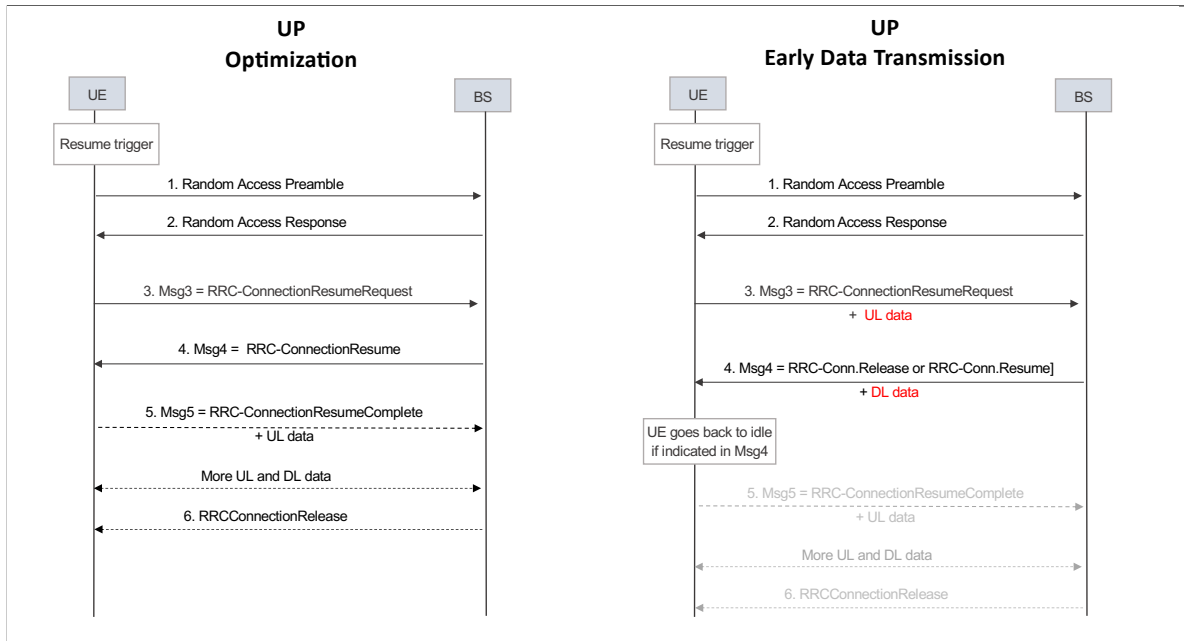
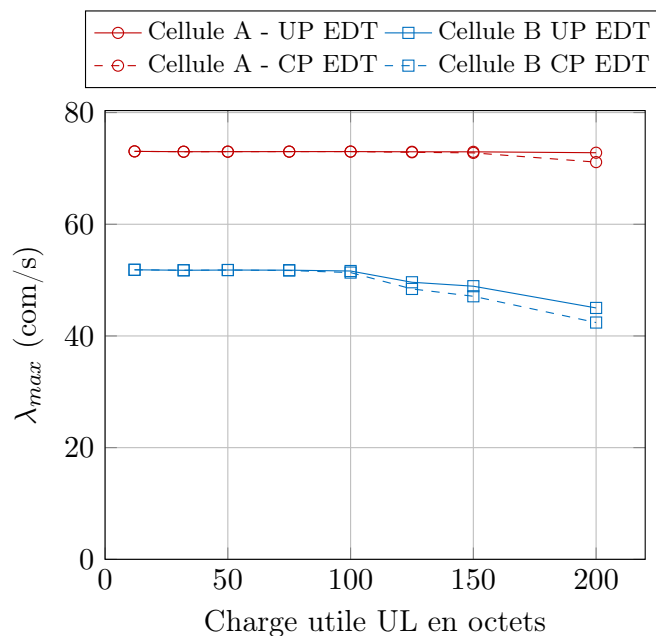


FIGURE 4.15 Comparaison de la séquence de messages des procédures UPO et UP-EDT

FIGURE 4.16 Évolution de la capacité de la cellule en fonction de la charge utile lorsqu'EDT est utilisé. $G = 2$

et l'UP-EDT est due aux différentes tailles de message indiquées dans le rapport [105] et dont on peut conclure que :

- concernant l'UL, l'*overhead* de la solution CP-EDT est supérieur de 5 octets à la solution UP-EDT.
- concernant le DL, l'*overhead* de la solution CP-EDT est inférieur de 12 octets à la solution UP-EDT.

Nos résultats en Figure 4.16 reflète ces différences sur la capacité des cellules. D'abord pour de grandes tailles de charge utile, la limitation de la capacité provient du manque de ressources dans l'UL donc l'UP-EDT a de meilleurs performances. Ensuite, on aurait pu s'attendre à ce que la capacité de CP-EDT soit supérieure à celle de UP-EDT pour de petites tailles de charge utile puisque la limitation provenait du DL (Figure 4.14), pourtant on observe en Figure 4.16 les mêmes performances.

Pour comprendre cette limitation de la capacité pour des petites charges lorsque la procédure EDT est utilisée, nous allons nous intéresser à la charge de canal en accès aléatoire, le NPRACH. A noter que les charges ρ_q en entrée des canaux avec allocation de ressources ont été définies en Équation 4.24, mais pas la charge du NPRACH. Nous la définissons par le nombre de tentatives moyennes initiales λ (avant rebouclages) par seconde en entrée du canal aléatoire divisé par le nombre moyen d'emplacements disponibles pour des préambules dans les fenêtres d'opportunité de connexion (les RAOs qui constituent le NPRACH).

Enfin, pour évaluer l'utilisation du NPRACH, il faut utiliser la théorie de l'accès aléatoire. Rappelons que le NPRACH est un processus *Slotted Aloha* et donc le canal atteint son potentiel maximum lorsqu'il est utilisé à $\frac{1}{2e} \approx 36,7\%$ [135], au-delà de cette valeur, les collisions sont contre-productives.

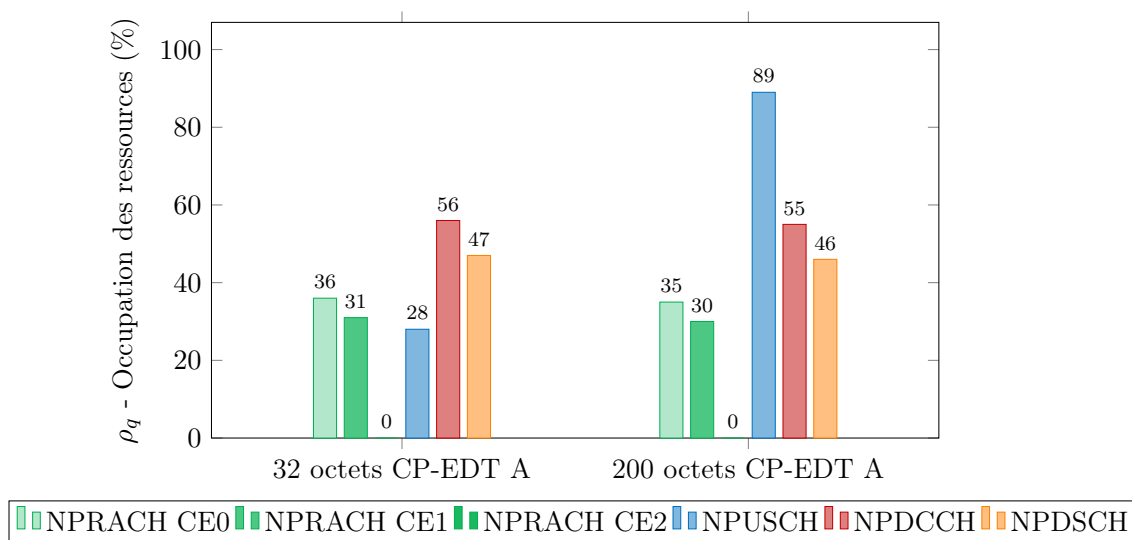


FIGURE 4.17 Charge sur les canaux lorsque la cellule atteint sa capacité maximale d'utilisation (99% de fiabilité). CP-EDT et cellule A.

La Figure 4.17 révèle que le NPRACH limite la capacité des cellules pour les petites charges utiles et que le NPUSCH limite la capacité lorsque les charges utiles sont grandes. Cela reflète

le fait que la configuration du NPRACH du Tableau 4.2 ne permet pas d'obtenir la meilleure capacité pour toutes les tailles de charge utile. La Figure 4.16 montre que les RAOs de la zone de couverture 0 – CE n°0 – sont les plus chargés dans la cellule A en utilisant la configuration de base du Tableau 4.2 ; en augmenter la taille ou la fréquence pourrait donc améliorer la capacité de la cellule. En revanche, il n'y a que très peu de terminaux (1%) dans le CE n°0 dans le cas de la cellule B. La configuration du Tableau 4.2 donne trop d'importance au CE n°0 et c'est le CE n°1 qui est surchargé.

Adapter le ratio entre les ressources dédiées à l'accès aléatoire et celles consacrées à l'envoi de données à travers la configuration des opportunités RAOs du NPRACH est donc nécessaire pour appréhender le véritable potentiel de la performance des procédures EDT en termes de capacité.

Impact du ratio UL – $\frac{NPRACH}{NPRACH+NPUSCH}$

La porteuse est divisée entre le NPRACH qui offre des **opportunités** de connexion aux UEs appelés RAOs (voir Tableau 4.2) et le NPUSCH qui permet aux UEs d'envoyer leur charge utile. Comme nous avons pu l'entrevoir lors de l'analyse précédente, en fonction des paramètres de la cellule, le ratio entre les deux canaux de l'UL peut être adapté pour obtenir une meilleure capacité. Le ratio idéal est spécifique à une procédure de communication, une couverture et une charge utile.

Nous allons nous placer dans le cas $c = 32$ octets et avec la procédure CP-EDT pour comparer les capacités que peuvent atteindre les cellules A et B lorsque EDT est utilisé. La Figure 4.18 montre les différentes valeurs du débit maximal d'entrée selon différentes configurations. Nous avons choisi de ne pas faire varier la configuration du CE n°2 puisque nos scénarios ne comptent quasiment aucun terminal dans ces conditions – inutile donc d'augmenter son nombre d'opportunités – et que la configuration de base prévoit un RAO toutes les 640 ms ce qui est plutôt espacé – inutile de les espacer encore plus et de risquer de ne plus satisfaire les contraintes en latence du segment mMTC. Nous faisons donc varier le nombre m_k de sous-porteuses disponibles par opportunité et la période δ_k des opportunités parmi les valeurs possibles (voir Chapitre 2) pour les CE n°0 et n°1.

Ces configurations sont comparées en fonction de leur ratio $R_{ul} = \frac{NPRACH}{NPRACH+NPUSCH}$. Comme les périodicités des RAOs et le nombre de sous-porteuses par RAO ne peuvent prendre qu'un nombre fini de valeurs (voir section 3.3.2), les valeurs des ratios possibles sont elles aussi finies. Trouver le ratio qui maximise les performances d'une cellule peut être obtenu grâce à notre modèle.

Nous avons entouré en vert la configuration du Tableau 4.2 qui est adaptée à la procédure de communication UPO mais qui est sous-optimale dans le cadre de communication CP-EDT et pour une charge utile de 32 octets, comme le montre la Figure 4.18. Les configurations du NPRACH donnant les meilleures performances en termes de capacité sont données dans le Tableau 4.4 (entourées en rouge pour la cellule de type A et en bleu pour la cellule de type B).

Nous avons tracé pour les cellules A et B sur la Figure 4.18, le seuil en termes de ratio R_{ul} à partir duquel le manque de ressources n'arrive plus sur le même canal. Pour les configurations

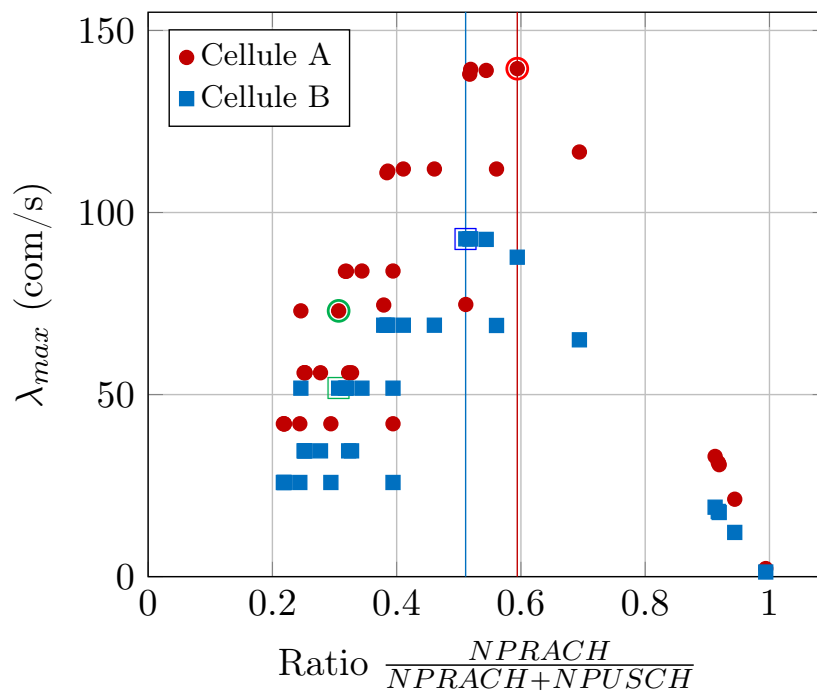


FIGURE 4.18 Capacité des cellules en fonction du partage des ressources UL (canaux NPRACH et NPUSCH). Cas 32 octets et CP-EDT.

à gauche de ce seuil, la limitation de la capacité provient du manque de place dans le NPRACH (collisions) alors que pour les points à droite, la limitation de la capacité provient du manque de place dans le NPUSCH (congestions).

Cellules	Cellule A			Cellule B		
Zone de couverture	CE 0	CE 1	CE 2	CE 0	CE 1	CE 2
m_k	48	24	12	12	24	12
δ_k	80	80	640	640	80	640

TABLE 4.4 Configuration des RAOs du NPRACH qui permettent d'obtenir les meilleures performances en termes de capacité.

En utilisant les configurations optimales pour le NPRACH pour la procédure CP-EDT, on trouve les capacités de cellules du Tableau 4.5. Grâce à l'utilisation de notre modèle, nous avons pu augmenter la capacité des cellules de type A et B d'un facteur **2.1** (voir Tableau 4.3).

4.5.3 Enseignements et recommandations sur le paramétrage du NB-IoT

Au cours de nos expériences, plusieurs enseignements ou recommandations peuvent être tirées quant au paramétrage du NB-IoT.

D'un point de vue général, le paramétrage d'une cellule joue un rôle majeur sur la capacité de la cellule. Nous avons pu le montrer plusieurs fois à travers nos résultats. Lorsque nous avons évalué l'impact du ratio de partage DL – G – sur les performances de la cellule, nous avons vu que la capacité de la cellule pouvait être doublée (Figure 4.11 puis Figure 4.13). Cela

	Cellule A	Cellule B
Trafic - θ, I	32 octets toutes les 2 heures	
Ratio DL - G	2	2
Procédure de communication	CP-EDT	
R_{ul}	59.4 %	51.2 %
λ_{max}	139.5 com/s	92.7 com/s
Capacité - Densité de Connexion	1 159 800 UEs/km ²	64 228 UEs/km ²
PRBs requis pour atteindre l'exigence mMTC	1 PRB	1 PRB

TABLE 4.5 Capacité des cellules A et B pour des communications CP-EDT. Les configurations des cellules sont adaptées grâce à notre modèle

reflète la place que prend l'*overhead* réseau dans le DL même lorsque seules des charges utiles UL sont considérées.

Ensuite, nous avons montré à quel point la procédure de communication classique du NB-IoT était lourde (Figure 4.14) même en utilisant l'optimisation introduite spécialement, l'UPO. Nous avons donc évalué la procédure de communication récemment introduite, EDT. Nous avons montré son utilité pour accroître la capacité des cellules en Figure 4.16. Même en utilisant cette procédure de communication très allégée en termes d'*overhead* réseau, la charge sur les canaux DL reste importante (Figure 4.17).

Ensuite, nous avons montré que dans le cadre de l'utilisation de communications EDT, la configuration du canal en accès aléatoire devait être adaptée car la limitation de la capacité se trouve sur l'UL. Nous avons constaté à quel point les performances de la cellule en termes de capacité étaient sensibles à ce paramétrage. En effet, utiliser la configuration optimale pour la cellule B ($D_{ISD} = 1732$ m) dans le cadre d'un déploiement de cellule A ($D_{ISD} = 500$ m) réduit de moitié la capacité des cellules (Figure 4.18).

Il nous semble donc primordial d'utiliser notre outil de modélisation afin d'adapter la configuration des cellules NB-IoT aux conditions de couverture de la cellule et au type de trafic (procédure de communication, charge utile). Le paramétrage du DL ne doit pas être négligé même dans le cas où les données utiles échangées sont essentiellement UL et plus particulièrement dans le cadre de l'utilisation de procédures de communication classiques, UPO et CPO. Enfin pour le paramétrage de l'UL, nous conseillons de privilégier une marge pour les ressources en accès aléatoire (NPRACH) plutôt qu'une marge pour les ressources en accès dédié NPUSCH – notre modèle ayant montré que les collisions pénalisent plus rapidement les performances que les congestions.

MODÉLISATION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS LE NB-IoT

L'objectif de ce chapitre est l'étude de la durée de vie des terminaux NB-IoT à travers l'étude de la consommation énergétique des communications. Nous souhaitons évaluer l'impact de la procédure de communication, de la taille de la charge utile et de la couverture afin de comparer la durée de vie des terminaux NB-IoT vis-à-vis de l'objectif du segment mMTC de l'ITU. Pour cela, nous proposons dans la première section la modélisation de la consommation énergétique lorsque le terminal est seul dans la cellule.

Ensuite, nous avons souhaité explorer un champ de l'étude de la consommation énergétique qui est encore peu étudié : l'effet de la charge sur la consommation énergétique. Dans la seconde section, nous mettons à profit notre modélisation de la capacité vue dans le chapitre précédent. Plus précisément, nous calculons les temps d'attente dans les files M/D/H/K pour évaluer l'impact d'une congestion sur la consommation d'énergie.

Pour finir, nous proposons une solution pour réduire la consommation énergétique lorsque la charge dans la cellule augmente. Nous évaluons le bénéfice sur la durée de vie des terminaux et la contre-partie sur la latence des communications.

5.1 Cas nominal - terminal seul dans la cellule

Le standard 3GPP fait généralement l'hypothèse que les effets des autres terminaux dans la cellule sont négligeables sur la consommation énergétique [75, 105]. Les collisions sur le NPRACH et les congestions sur les autres canaux sont ignorés ce qui revient à considérer que le terminal est seul dans la cellule. Nous appelons ce cas de figure, cas nominal.

On distingue deux types de dépenses d'énergie :

Obligatoire : Constantes et inévitables pour tous les terminaux (en vert sur la Figure 5.1).

Communication : Dues à la transmission ou à la réception des messages sur les différents canaux. Elles dépendent des conditions de couverture, de la taille de la charge utile et de la procédure de communication (en bleu sur la Figure 5.1).

Dans cette partie nous allons donc décrire ces deux types de dépenses énergétiques qui ont largement été étudiées [105, 117]. Nous serons ainsi capables de déterminer la durée de vie de la batterie dans le cas nominal grâce aux équations de la section 5.3.

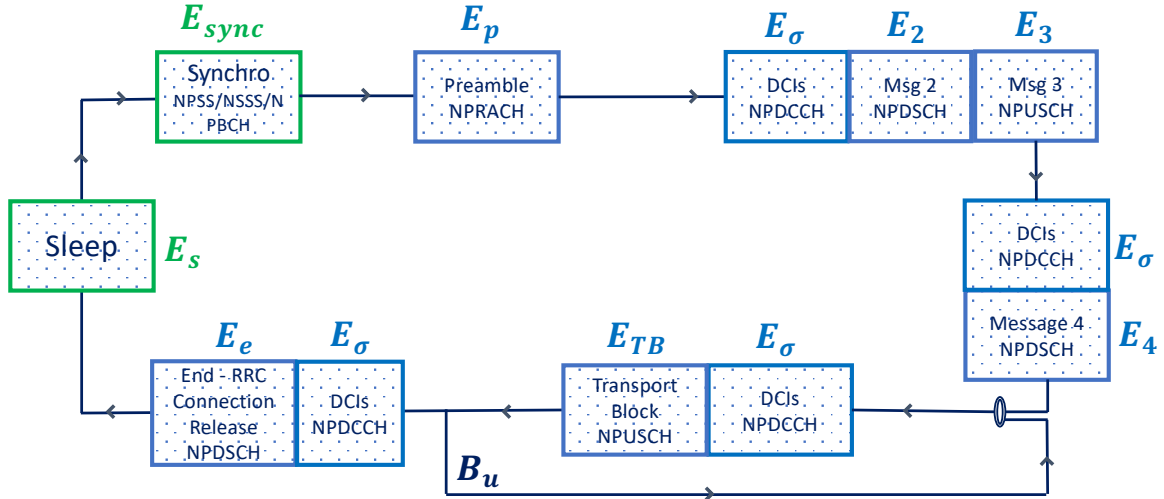


FIGURE 5.1 Modèle de la consommation énergétique du NB-IoT sans charge - Terminal seul

D'abord il y a les composantes obligatoires qui se situent en dehors de la procédure de communication. Entre deux communications, le terminal est endormi et dépense une énergie E_s égale à la durée entre les communications multipliées par la puissance utilisée dans cet état (de l'ordre du μW voir le paramètre *deep sleep* du Tableau 5.1).

Ensuite, avant l'envoi du préambule, les terminaux doivent se re-synchroniser avec la cellule en temps et en fréquence, et récupérer les informations contenues dans le MIB du NPBCCH [136]. L'énergie dépensée pendant la synchronisation E_{sync} est la multiplication du temps nécessaire à la synchronisation par la puissance nécessaire en réception P_{Rx} voir Tableau 5.1.

Ensuite il y a les dépenses liées à la communication sur les quatre autres canaux :

- E_p , la transmission des préambules sur le NPRACH ;
- E_n , E_{TB} et E_e , la transmission/réception sur le NPUSCH/NPDSCH pour le message n (mise en place de la connexion en 4 étapes), l'envoi d'un bloc de données (TB) et du message qui indique la sortie du mode connecté ;
- E_σ , la démodulation du NPDCCH.

Les terminaux ne dépensent pas tous la même énergie pour effectuer ces tâches. Comme vu dans le chapitre précédent, en fonction des conditions de couverture (répétitions et MCS), de la charge utile ou de la procédure de communication, la quantité de bits à envoyer sur chacun des canaux diffère – la quantité de ressources à transmettre de la communication c sur la file q est $\beta_{c,q}$, voir section 4.3.1.

L'énergie consommée sur chacun des quatre canaux est égale à la puissance d'émission/réception (Tableau 5.1) multipliée par le temps nécessaire pour émettre/recevoir ces messages.

La puissance de transmission maximale d'un terminal NB-IoT est de 23dBm, mais elle est nettement abaissée pour les terminaux en bonne couverture [119, 120]. En notant P la puissance avec laquelle le terminal doit transmettre pour atteindre un BLER de 10^{-1} , la puissance totale P_{Tx} dépensée par le terminal lors de la transmission sera calculée dans le modèle comme suit :

$$P_{Tx} = \frac{P}{\eta} + P_c \quad (5.1)$$

où η est l'efficacité de l'amplificateur de puissance et P_c la puissance requise pour faire fonctionner le support circuit (Tableau 5.1).

Concernant la démodulation du canal de contrôle DL dans le cas nominal, on ne considère pas de congestion. Le terminal est donc servi dès le premier espace de recherche. Le nombre de sous-trame (1 ms) à démoduler vaut donc R_{max} (Figure 3.13 et valeur du paramètre dans le Tableau 4.2).

Enfin l'énergie dépensée par tentative de communication lorsqu'un terminal est seul dans la cellule (cas nominal) est :

$$E_a = E_p + \sum_{n=1}^4 E_n + 2E_\sigma + (E_\sigma + E_{TB}) B_U + E_c \quad (5.2)$$

où B_U est le nombre de blocs nécessaires à la communication sur le canal NPUSCH en dehors du Message 3. La formule ci-dessus est valable pour des communications UL, celles que nous étudions dans nos travaux. Si la charge utile s'avère provenir du réseau, il faut utiliser le nombre B_D de blocs nécessaires dans le DL au lieu de B_U .

Nous faisons l'hypothèse que la couverture, la charge utile et la procédure de communication ne varient pas entre deux tentatives, ce qui permet d'écrire la dépense énergétique moyenne d'une communication E_c comme la quantité d'énergie dépensée lors d'une tentative E_a multipliée par le nombre de tentatives nécessaires N_a :

$$E_c = E_{sync} + N_a \cdot E_a \quad (5.3)$$

où N_a est calculé à l'aide du chapitre précédent et est égale à 1 dans le cas nominal. Cette équation peut s'entendre alors dans un cadre déterministe.

5.2 Modélisation de l'effet de la charge sur la consommation d'énergie

5.2.1 Motivation

Lorsqu'on ajoute de la charge dans la cellule, on s'expose à a) devoir effectuer plusieurs tentatives de communication et b) des temps d'attente d'allocation plus longs.

Concernant le nombre N_a de tentatives de communication, notre modélisation de la capacité des cellules NB-IoT (Chapitre 4) nous permet de le calculer. Les collisions et les congestions amènent les terminaux à effectuer plusieurs tentatives pour une même communication. En

conservant l'hypothèse précédente, l'Équation 5.3 peut encore s'appliquer en valeur moyenne.

Ensuite, la charge de la cellule augmente les délais pour l'allocation des ressources. C'est une particularité du mode connecté de devoir attendre une allocation de ressources pour savoir quand émettre. Cela a un impact sur la consommation énergétique du terminal puisqu'il ne sait pas quand l'allocation de ressources va survenir. Il doit donc démoduler toutes les opportunités NPDCCH (espaces de recherche). Dans le cadre des communications NB-IoT, l'énergie dépensée en réception ne peut pas être négligée [136, 137]. Cela est dû à la largeur de la bande à démoduler (plus large en DL qu'en UL) et à la complexité de la modulation type 3GPP – l'OFDM est complexe, comparée aux modulations qu'utilisent les autres technologies LPWANs). Il est donc probable que ce problème d'attente active soit exacerbé lorsque la charge dans la cellule augmente. Cette observation a motivé nos travaux de recherche sur l'effet de la charge sur la durée de vie des terminaux.

Aux deux types de consommation d'énergie décrites dans la section précédente, nos travaux en ajoutent donc un troisième encore peu modélisé :

Charge : Dépend de la charge dans la cellule (en rouge sur la Figure 5.2)

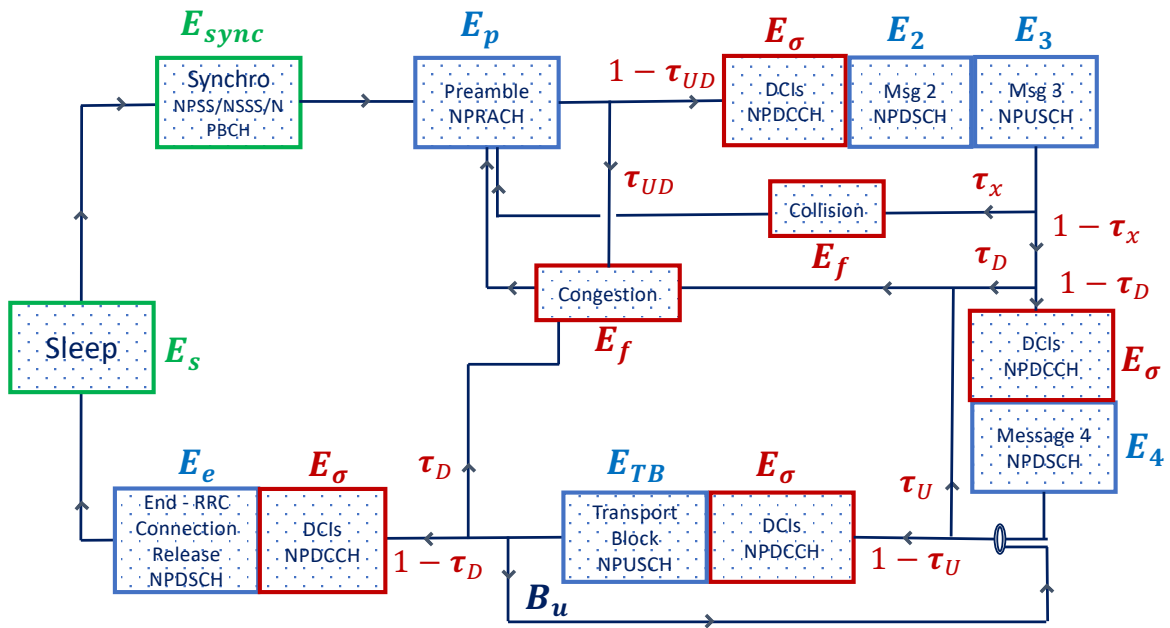


FIGURE 5.2 Modèle de la consommation énergétique du NB-IoT prenant compte de la charge.

La Figure 5.2 décrit les états de dépenses d'énergie dans le cycle de vie du terminal. Voici un exemple pour comprendre le schéma. Considérons un terminal qui souhaite transmettre un message : il se réveille de son sommeil (Sleep en vert), se synchronise et envoie un préambule. Toutes ces opérations consomment de l'énergie – E_s , E_{sync} et E_p . S'il manque de la place sur un des canaux pour transmettre l'allocation de ressources, pour le message 2 ou le message 3, la station de base ne répondra pas au préambule du terminal (probabilité τ_{UD}). Le terminal démodulera les trames de contrôle jusqu'à arriver au *timer* qui marque l'échec de la communication et retentera plus tard : il aura dépensé une énergie E_f avec une probabilité

τ_{UD} . En revanche, s'il y a de la place dans les canaux, la station de base envoie l'allocation pour le message 2 et 3, le terminal dépensera l'énergie associée à la réception et à l'émission de ces messages – E_σ , E_2 et E_3 .

S'il y a eu une collision sur le préambule (probabilité τ_x), elle est détectée par la station de base lors du message 3 (voir état de l'art). La station de base n'allouera pas le message 4 au terminal. Il a donc une probabilité τ_x de dépenser une énergie E_f . Sinon la station de base allouera le message 4 (allocation DL donc probabilité de congestion τ_D). La suite de la communication est identique à ce fonctionnement (envoi de B_U blocs dans l'UL et sortie du mode connecté). Au final, le terminal retourne dans un mode endormi (Sleep en vert) dans l'intervalle entre deux communications.

La prochaine section se concentre sur la dépense d'énergie du terminal lorsqu'il démodule le NPDCCH en présence de charge (E_f et E_σ).

5.2.2 Détermination des temps d'allocation

On peut distinguer deux types de temps d'attente pour l'allocation des ressources d'un bloc. Soit le terminal n'est finalement pas servi, il a démodulé toutes les opportunités NPDCCH sans succès et aura dépensé une énergie E_f . Soit le bloc est alloué, le terminal est servi après avoir attendu un certain nombre de périodes et aura dépensé une énergie E_σ .

Le terminal n'est pas servi lorsqu'il y a collision ou congestion. Il démodule le NPDCCH pendant 10 périodes pp définies précédemment (Figure 3.13). Pendant ce délai, il ne démodule que les trames de contrôle du DL, il n'est donc actif qu'une fraction du temps égale à $\frac{1}{G}$ et est en mode sommeil léger – *light sleep* – le reste du temps :

$$E_f = T_f \left(P_{Rx} \cdot \frac{1}{G} + P_{ts} \cdot \frac{G-1}{G} \right) \text{ où } T_f = 10pp \quad (5.4)$$

Pour calculer E_σ , il faut déterminer le délai qu'attend un terminal avant d'être servi. En modélisant le processus d'allocation comme une file d'attente M/D/H/K (modélisation du chapitre précédent), ce délai revient à déterminer le nombre de périodes que passe en moyenne un client (un bloc) dans une file d'attente avant d'être effectivement servi.

Nous allons raisonner en termes de périodes de la file q ($M_q/D_q/H_q/K_q$), comme illustrées dans la Figure 5.3.

Il est possible de déterminer la distribution de probabilité des temps d'attente si l'on connaît les valeurs des variables aléatoires :

- S , le nombre de blocs dans la file avant l'arrivée des nouveaux blocs.
- A , la taille du groupe dans lequel le bloc que l'on regarde est arrivé (on ne considère que les blocs acceptés sinon on rentre dans la deuxième catégorie des calculs, ceux des clients rejetés par congestion).

En faisant l'hypothèse que la file fonctionne en FCFS, on peut déterminer les valeurs des variables suivantes pour des valeurs de S et A données :

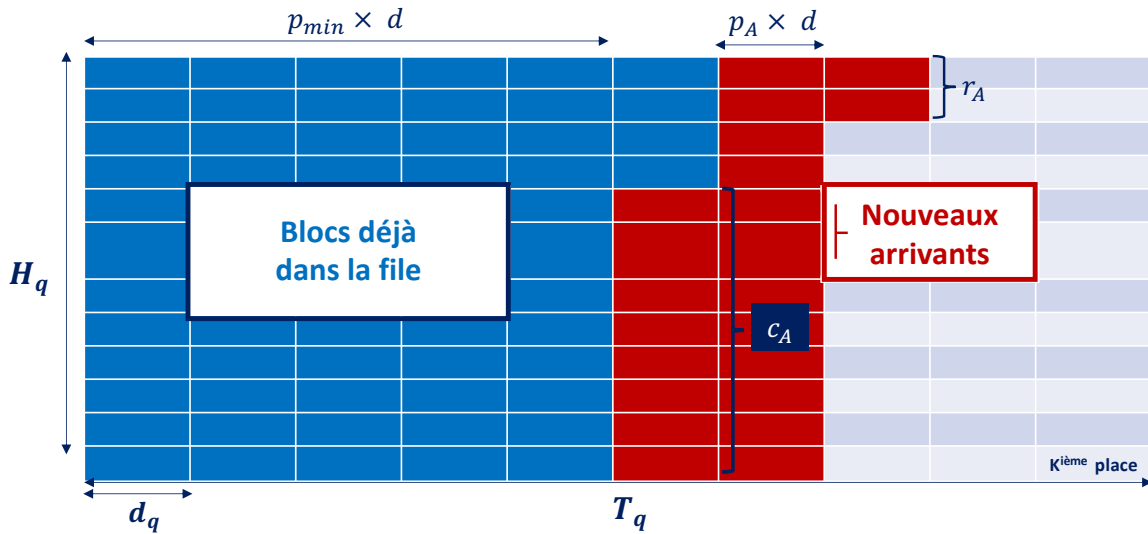


FIGURE 5.3 Visualisation du processus d'allocation - files M/D/H/K

- p_{min} , le nombre de périodes minimum que doit attendre un bloc avant d'être servi. Ces périodes sont déjà complètement occupées par des blocs déjà présents.
- c_A , le nombre de nouveaux blocs arrivant qui seront servis dans la même période que les derniers blocs déjà présents.
- p_A , le nombre de périodes complètes de nouveaux blocs arrivant que pourra servir la station de base.
- r_A , le reste de nouveaux blocs arrivant qui ne remplissent pas les H_q serveurs de la dernière période.

Pour $S = j$ et $A = i$ on obtient les réalisations suivantes :

$$\begin{aligned}
 p_{min} &= \left\lfloor \frac{j}{H_q} \right\rfloor \\
 c_A &= \min [H_q - (j - p_{min}H_q), i] \\
 p_A &= \left\lfloor \frac{i - c_A}{H_q} \right\rfloor \\
 r_A &= i - p_A \cdot H_q - c_A
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Notons W_q la somme totale de périodes attendues par les blocs d'une même arrivée groupée sur la file q . Il est possible de déterminer la réalisation $W_{q,i,j}$ de W_q lorsque $S = j$ et $A = i$. En s'appuyant sur la Figure 5.3, on a :

$$W_{q,i,j} = c_A \cdot p_{min} + H_q \sum_{k=1}^{p_A} (p_{min} + k) + r_A \cdot (p_{min} + p_A + 1) \tag{5.6}$$

Enfin, rappelons qu'une partie des blocs arrivant peut ne pas être servie si le nombre de blocs dépasse un certain seuil défini dans le chapitre précédent i_{max} (Équation 4.19). On a

$$i_{max} = K_q - j - H_q.$$

Pour finir les calculs et déterminer le nombre moyen de périodes qu'attend un bloc avant d'être servi, il faut faire attention aux arrivées groupées. Il faut en effet conditionner par la taille du groupe dans lequel le bloc observé est arrivé et diviser par le nombre moyen de blocs qui arrivent sur une période. On peut donc calculer le nombre de période $\mathbb{E}(W_q)$ qu'un bloc servi attend en moyenne dans la file q :

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(W_q) &= \frac{1}{\mathbb{E}(A)} \sum_{j=0}^{K_q} \left[\sum_{i=1}^{i_{max}-1} W_{q,i,j} \cdot a_i \sum_{i=i_{max}}^{+\infty} W_{i_{max},j} \cdot a_i \right] \cdot \pi_j \\ &= \frac{1}{\mathbb{E}(A)} \sum_{j=0}^{K_q} \left[\sum_{i=1}^{i_{max}-1} W_{q,i,j} \cdot a_i + W_{i_{max},j} \cdot b_{i_{max}} \right] \cdot \pi_j \\ \mathbb{E}(A) &= \sum_{j=0}^{K_q} \left[\sum_{i=1}^{i_{max}-1} i \cdot a_i + i_{max} \cdot b_{i_{max}} \right] \cdot \pi_j \end{aligned} \quad (5.7)$$

où $\mathbb{E}(A)$ est le nombre moyen d'utilisateurs acceptés par période et a_i, b_i et π_j sont définis dans le Chapitre 4.

Nous avons donc le temps moyen que passe un utilisateur à attendre l'allocation de la ressource lorsqu'il est servi dans la file q :

$$T_{\sigma,q} = \mathbb{E}(W_q) \cdot d_q \quad (5.8)$$

Pour réussir l'allocation d'un bloc NPUSCH, il faut aussi qu'il y ait une place dans le canal de contrôle NPDCCH (qui peut être congestionné). Les messages sur les différentes files se succèdent. En cas d'échec sur une file, la charge du reste de la communication disparaît des autres. C'est le canal surchargé qui guide la congestion. $T_\sigma = \max(T_{\sigma,U}, T_{\sigma,C})$. Nous considérerons donc que le temps d'attente est toujours le plus long sur la même file. Par conséquent selon les valeurs des paramètres, nous prendrons :

$$T_\sigma = T_{\sigma,U} \text{ ou } T_\sigma = T_{\sigma,C} \quad (5.9)$$

Pour réussir l'allocation d'un bloc NPDSCH, il faut également qu'il y ait une place dans le NPDCCH. Le temps d'attente avant l'envoi des blocs dans le NPDSCH est donc :

$$T_\sigma = T_{\sigma,D} \text{ ou } T_\sigma = T_{\sigma,C} \quad (5.10)$$

Le cas des messages 2 et 3 est particulier. Après l'envoi du préambule (message 1), le terminal démodule le NPDCCH pour l'allocation du message 2 (NPDSCH) qui doit contenir exceptionnellement les informations d'allocation pour le message 3. Le terminal ne passe donc pas par une phase de démodulation du canal de contrôle entre la réception du message 2 et l'envoi du message 3 (voir Figure 5.2). Le temps d'attente est donc celui nécessaire à

l'allocation d'un bloc sur chacun des canaux impliqués, on prendra :

$$T_\sigma = T_{\sigma,U} \text{ ou } T_\sigma = T_{\sigma,D} \text{ ou } T_\sigma = T_{\sigma,C} \quad (5.11)$$

La dépense d'énergie liée à l'attente de l'allocation dépend du ratio de temps passé à démoduler et en mode sommeil léger :

$$E_\sigma = T_\sigma \left(P_{Rx} \cdot \frac{1}{G} + P_{ts} \cdot \frac{G-1}{G} \right) \quad (5.12)$$

En suivant le modèle de la consommation énergétique du terminal de la Figure 5.2, il est possible de construire l'arbre des probabilités des dépenses énergétiques pour une tentative de communication (Figure 5.4).

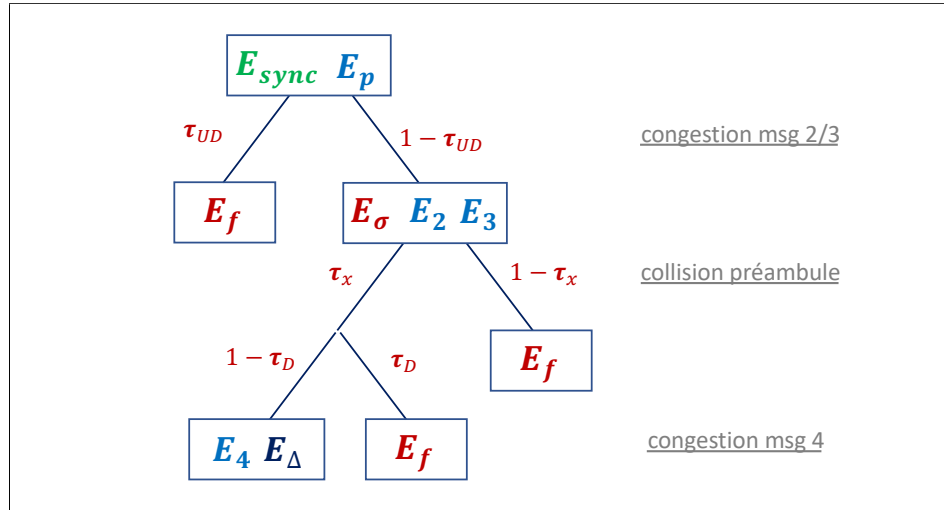


FIGURE 5.4 Arbre des probabilités de la consommation énergétique d'un terminal lors d'une tentative de communication.

L'énergie dépensée lors d'une tentative de communication E_a lorsque l'on considère la charge est alors :

$$\begin{aligned}
 E_a &= E_{sync} + E_p && \text{synchronisation et envoi de préambule} \\
 &+ \tau_{UD}(1 - \tau_x) \cdot E_f && \text{congestion(2,3) et pas de collision} \\
 &+ \tau_{UD}\tau_x \cdot E_f && \text{congestion(2,3) et collision} \\
 &+ (1 - \tau_{UD})\tau_x \cdot (E_\sigma + E_2 + E_3 + E_f) && \text{pas de congestion(2,3) et collision} \quad (5.13) \\
 &+ (1 - \tau_{UD})(1 - \tau_x) \cdot (E_\sigma + E_2 + E_3) && \text{pas de congestion(2,3) et pas de collision} \\
 &+ \tau_D \cdot E_f && \text{congestion(4)} \\
 &+ (1 - \tau_D) \cdot (E_4 + E_\Delta) && \text{pas de congestion(4)}
 \end{aligned}$$

où E_Δ est l'énergie dépensée lors de l'envoi des blocs dans le lien montant (canal NPUSCH) lorsqu'EDT n'est pas utilisé. L'envoi d'un bloc dans le NPUSCH est conditionné par le taux

de congestion d'un bloc τ_U sur la file représentant ce canal. On a E_Δ tel que :

$$E_\Delta = \sum_{j=0}^{B_u-1} [(1 - \tau_U)^j (\tau_U) \cdot (j(E_\sigma + E_{TB}) + E_f)] \quad \text{échec au } j^{\text{ième}} \text{ bloc}$$

$$+ (1 - \tau_U)^{B_u} \cdot [B_u \cdot (E_\sigma + E_{TB}) + \tau_D \cdot E_f + (1 - \tau_D) \cdot E_e] \quad \text{envoi des } B_u \text{ blocs avec succès}$$
(5.14)

5.3 Calcul de la durée de vie de la batterie

À présent que nous avons calculé la quantité moyenne d'énergie nécessaire pour une communication NB-IoT dans le cas sans et avec charge dans la cellule, il est possible de déterminer la durée de vie moyenne théorique de la batterie d'un terminal.

Il reste une inconnue à déterminer dans les Figure 5.1 et 5.2, E_s , l'énergie dépensée entre les communications, lorsque le terminal est au repos (sommeil profond). C'est la décharge naturelle de la batterie qui n'est pas négligeable dans le cas des communications IoT. Nous faisons l'approximation que l'intervalle h en heure, entre deux communications est bien plus grand que la durée d'une communication. Le temps que passe le terminal dans l'état de repos est donc de h entre chaque communication et on a :

$$E_s = h \cdot P_{ds} \quad (5.15)$$

Ainsi la durée de vie moyenne L en années d'un terminal NB-IoT est :

$$L = \frac{C}{P_{ds} + \frac{E_c}{h}} \cdot \frac{1}{24 \times 365.25} \quad (5.16)$$

où C est la capacité de la batterie en Wh donnée dans le Tableau 5.1.

5.4 Évaluation de performance

Cette section est découpée en deux parties. La première permet de valider notre modèle, la seconde permet de répondre aux questions concernant la durée de vie de la batterie non traitées dans l'état de l'art (relatives à EDT et à l'impact de la charge).

5.4.1 Méthodologie, paramétrage et validation

Méthodologie

Nous détaillons ci-après la détermination des durées de vie moyenne des terminaux dans une cellule NB-IoT à l'aide de notre modèle.

Dans une cellule, nous considérons une distribution de terminaux avec des couvertures et une taille de charge utile UL à transmettre. Nous en déduisons des flux et leurs caractéristiques (k, c) ainsi que celles des canaux $(H_q, d_q \text{ et } T_q)$. Grâce à ces informations nous pouvons calculer pour tout flux agrégé entrant λ en termes de communication par seconde, les taux de collision

Puissance consommée par le terminal		
P_{Tx} ($P = 23$ dBm) with $\eta = 45\%$	Préambule - NPRACH	500 mW (incluant 60mW de support circuit)
	Données - NPUSCH	
P_{Rx}	Contrôle - NPDCCH	80 mW
	Données - NPDSCH	
	Synchro Broadcast	
	NPBCH	
Sommeil (<i>sleep</i>)	Léger (<i>light</i>) - P_{ls}	3 mW
	Profond (<i>deep</i>) - P_{ds}	0.015 mW
Capacité de la batterie	C	5 Wh
Temps nécessaire à la synchronisation d'un terminal		
MCL 144 dB - 154 dB - 164 dB	NPSS + NSSS	154 ms - 164 ms - 364 ms
	MIB - NPBCH	10 ms - 20 ms - 240 ms

TABLE 5.1 Paramètres de la consommation énergétique d'après la Release 13 [105].

τ_x , les taux de congestion τ_g et les probabilités d'échec de la communication P_ω grâce au modèle illustré en Figure 4.6.

Ensuite, le modèle en Figure 5.2 permet de calculer la consommation d'énergie de chacun des flux de la cellule en fonction de leurs caractéristiques, de τ_x et de τ_g .

Enfin, à partir de l'intervalle I de temps entre les communications et une capacité de batterie C , on en déduit la durée de vie moyenne de la batterie (Équation 5.16) des terminaux dans la cellule en fonction de leur couverture.

Paramétrage

Le Tableau 4.2 résume les paramètres généraux de la cellule NB-IoT qui doivent être définis afin de permettre son bon fonctionnement. Pour le paramétrage de l'accès aléatoire (NPRACH) et du canal de contrôle (NPDCCH), nous nous sommes fondés sur les informations contenues dans [97], pour R_{max} et G sur les travaux de [133] et enfin pour les temps de synchronisation sur le rapport [105]. La couverture considérée dans la suite de nos travaux concerne la configuration B. Les valeurs indiquées dans le tableau sont des cas spécifiques de couverture (144 dB, 154 dB et 164 dB de MCL) qui correspondent à ceux utilisés pour la validation du modèle.

Le Tableau 5.1 donne les valeurs nécessaires au calcul de la consommation d'énergie. Ces paramètres dépendent des constructeurs et des opérateurs [119, 120]. Nous avons donc choisi d'utiliser les valeurs fournies par le 3GPP dans la Release 13 [105].

Validation

Le Tableau 5.2 compare les résultats obtenus par Ericsson dans le cadre d'une étude 3GPP [75, 105] et les nôtres. Les deux modèles de trafic étudiés sont définis dans le rapport 3GPP. Cette étude ne prend pas en compte la charge de la cellule et considère donc que le terminal est seul, le cas nominal de la section 5.1.

		Résultats du 3GPP dans [75] (années)		Nos résultats (années)		Écart entre les résultats	
Modèle de Trafic [75]	CL	UPO	UP EDT	UPO	UP EDT	UPO	UP EDT
Scenario 1	144 dB	36.8	36.4	34.7	36.0	5.7 %	1.1 %
	164 dB	9.2	12.0	7.8	12.6	15.2%	5%
Scenario 2	144 dB	29.7	31.4	26.9	30.9	9.4%	1.5%
	164 dB	2.6	3.8	2.0	3.7	23%	1.2%

TABLE 5.2 Comparaison de la durée de vie de la batterie - Cas nominal.

Nos résultats suivent ceux obtenus par le 3GPP. Notre évaluation de la procédure UPO est plus pessimiste. Cela peut s'expliquer par une différence dans le choix des overheads réseaux spécifiques à cette procédure. Concernant EDT, les valeurs exactes des overheads sont fournies dans le rapport [105] et nous observons des écarts très faibles. Notre hypothèse sur la consommation d'énergie (Équation 5.3) et notre hypothèse sur la décharge de la batterie au cours du temps (Équation 5.16) sont bien validées.

5.4.2 Étude de la durée de vie de la batterie – Cas nominal

Des questions subsistent concernant la durée de vie de la batterie d'un terminal NB-IoT dans le cas nominal pour la procédure EDT. Notre modèle permet d'y répondre.

Question 1 : Quel est l'impact du CP-EDT et de l'UP-EDT sur la durée de vie de la batterie ?

Nous considérons des terminaux dans chacune des trois zones de couvertures définies par le standard : Normale (144 MCL), Difficile (154 MCL) et Extrême (164 MCL). Les trafics considérés sont ceux du 3GPP pour le mMTC de la 5G [56] : 50 octets ou 200 octets pour la donnée UL toutes les 2h ou 24h avec un accusé de réception de 29 octets dans le DL (message 4 avec compression du header IP). L'objectif du 3GPP est d'obtenir une durée de vie supérieure à 10 ans sur chacun de ces scénarii.

Résultats

L'observation générale Tableau 5.3 est que les solutions EDT dépensent moins d'énergie que la solution UPO et que la différence entre les deux solutions EDT est minime. EDT a été imaginé pour atteindre des latences faibles et une forte densité de connexions [34]. Il se révèle également performant en termes d'énergie. Pour départager les performances des deux solutions EDT, il faut s'intéresser à l'étude de la densité de connexions qui diffère selon les overheads réseau (vus en section 4.5.2).

Le second résultat intéressant est que pour un intervalle de communication de deux heures en couverture extrême, l'objectif d'une durée de vie de 10 ans est inatteignable même avec EDT. En revanche, il peut être atteint pour un intervalle de communication de 24h si les procédures EDT sont utilisées dans le cas à 200 octets.

Battery Life (Years)					
Reporting Interval (Hours)		2		24	
DL packet size (bytes)		29			
UL packet size (bytes)		50	200	50	200
144 dB CL	UPO	27.0	19.1	36.8	35.1
	UP-EDT	30.0	25.4	37.2	36.5
	CP-EDT	30.0	25.4	37.2	36.5
154 dB CL	UPO	13.7	8.7	33.1	29.7
	UP-EDT	18.4	8.5	34.9	29.5
	CP-EDT	18.6	8.5	35	29.5
164 dB CL	UPO	2.1	1.0	15.8	9.1
	UP-EDT	4.0	1.4	22.1	11.8
	CP-EDT	3.9	1.4	22.1	11.8

TABLE 5.3 Durée de vie de la batterie en fonction des conditions de couverture et de la procédure de communication

5.4.3 Étude de la durée de vie de la batterie – Cas avec de la charge

Question 2 : Comment évolue la consommation d'énergie lorsque la charge augmente ?

Inspirés par le travail du 3GPP, nous n'avons étudié jusque là que le cas nominal, lorsque l'utilisateur est seul dans la cellule. Pourtant, considérer que le terminal sera toujours le seul à vouloir transmettre tout au long de sa vie est idéal. Comme détaillé dans le Chapitre 6, une cellule NB-IoT permet potentiellement à un grand nombre d'utilisateurs de communiquer simultanément. Lorsque la charge augmente, les taux de collision et de congestion apparaissent ce qui a un impact sur la dépense énergétique du terminal. Nous utilisons donc notre modèle pour faire la lumière sur les performances énergétiques du NB-IoT dans un environnement multi-terminaux.

Résultats

La Figure 5.5 montre l'évolution du débit utile et de la probabilité d'échec lorsque la charge dans la cellule augmente.

Dans la Figure 5.6, nous traçons la durée de vie de la batterie obtenue avec nos modèles lorsque le nombre de communications dans la cellule augmente. La cellule considérée est la cellule B décrite dans la section 4.5.1.

Tout d'abord, nous remarquons que l'autonomie de la batterie est réduite lorsque la charge augmente et que, par conséquent, les valeurs calculées lorsque la cellule est vide dans Tableau 5.3 peuvent être remises en question dans un scénario réel. Il serait bienvenu de spécifier la charge dans les évaluations de l'autonomie des batteries NB-IoT.

La Figure 5.6 met en évidence deux régimes de fonctionnement aux performances distinctes :

(I) Les nouvelles tentatives sont essentiellement dues aux collisions. Lorsque nous augmen-

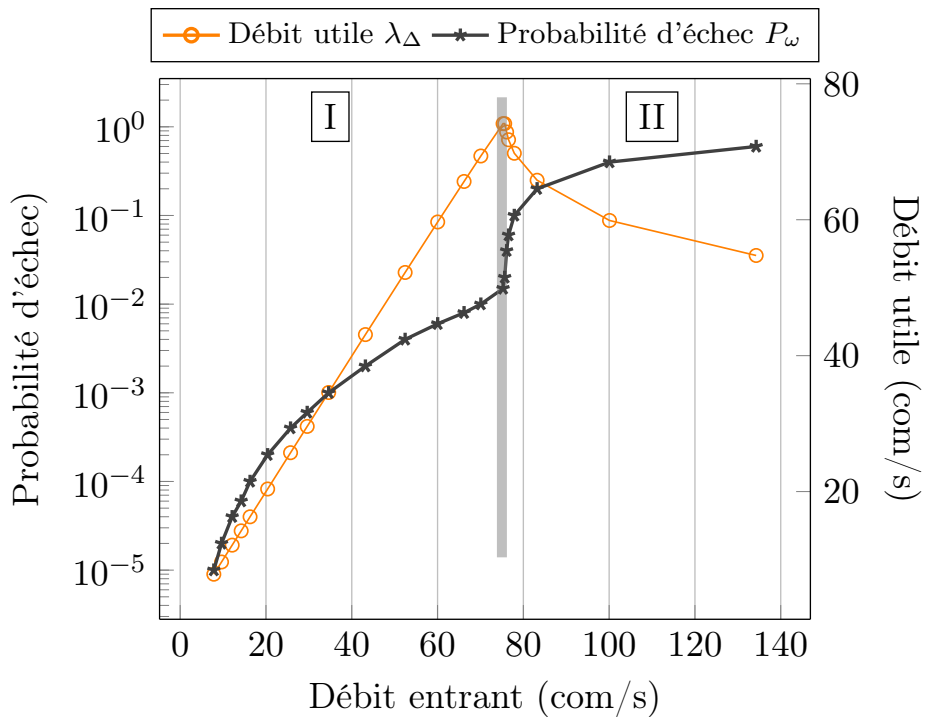


FIGURE 5.5 Débit utile et probabilité d'échec lorsque la charge de la cellule augmente.

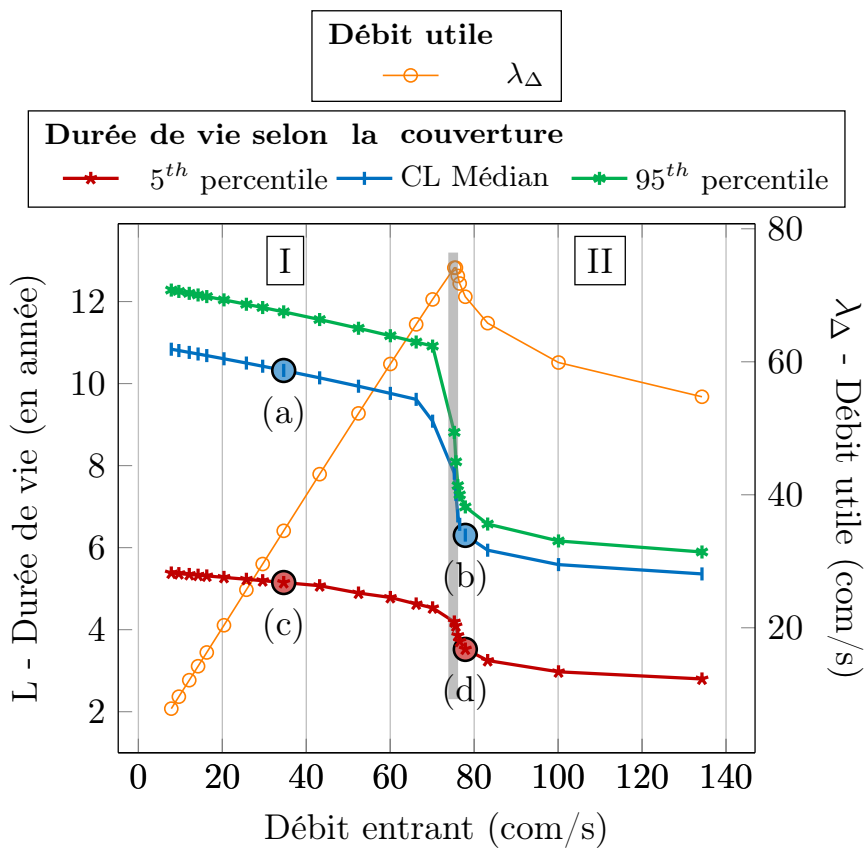


FIGURE 5.6 Durée de vie de la batterie et débit utile en fonction de la charge de la cellule. Scénario de trafic : une communication UL de 200 octets tous les quarts d'heure avec procédure CP-EDT.

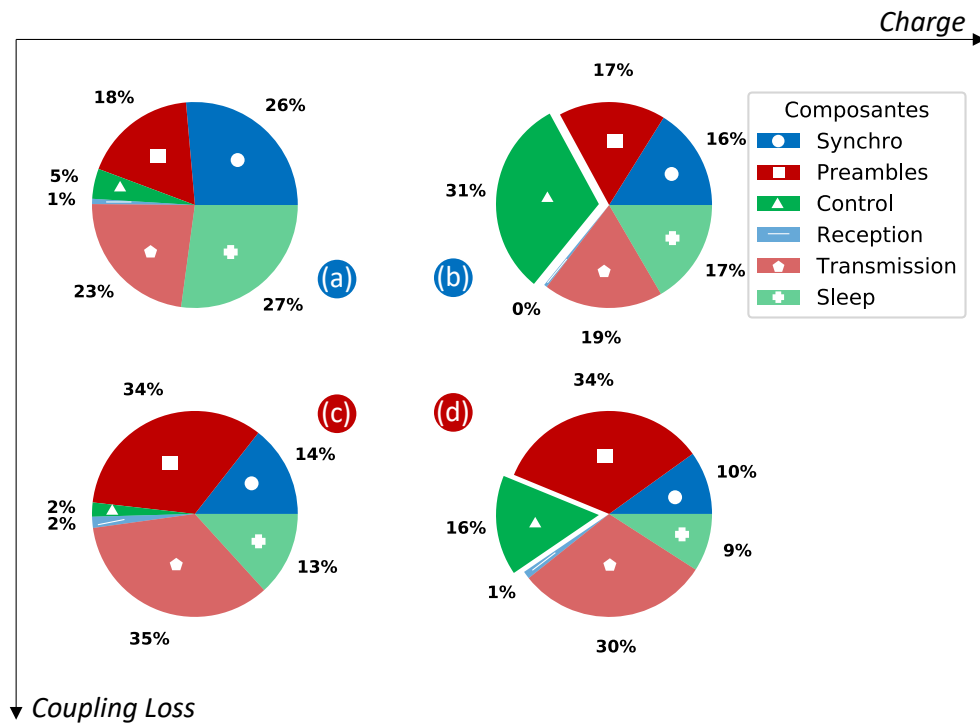


FIGURE 5.7 Répartition de la consommation d'énergie en fonction du scénario de la Figure 5.6. Les différentes composantes sont décrites dans le modèle en section 5.1

tons le débit entrant, la capacité de la cellule augmente. Les collisions augmentent également, ce qui réduit la durée de vie de la batterie.

(II) Lorsque la charge augmente, les canaux de données deviennent congestionnés, ce qui entraîne une augmentation significative de la consommation d'énergie. Pour identifier les raisons sous-jacentes de ce comportement, nous présentons dans la Figure 5.7 une analyse fine des dépenses énergétiques des terminaux. De façon assez inattendue, nous découvrons que l'augmentation importante de la consommation d'énergie sous des charges élevées est due à la démodulation du canal de contrôle. Une analyse minutieuse du NB-IoT révèle qu'au fur et à mesure que la charge augmente et que les *buffers* de la BS se remplissent, la BS prend de plus en plus de temps à allouer des ressources. Pendant ce temps, le terminal doit démoduler toutes les trames NPDCCH, ce qui augmente inutilement sa consommation d'énergie.

Ensuite, la Figure 5.7 permet de comprendre le comportement du NB-IoT à travers la répartition de la consommation énergétique d'un terminal entre les différentes phases identifiées dans la section 5.1. Les points de fonctionnement (a), (b) (c) et (d) sont représentés sur la Figure 5.6.

Ces diagrammes circulaires montrent que le phénomène (II) est présent quelle que soit la couverture du terminal, (b) vs (d), même s'il a un impact relativement moindre sur les terminaux en mauvaise condition de couverture puisque chaque transmission est coûteuse en énergie.

Dans les deux sections suivantes, nous utilisons notre modèle pour explorer des approches

pour réduire la consommation d'énergie dans des scenarii de forte charge qui ne nécessitent pas de modification du standard.

5.5 Proposition d'une solution

Question 3 : Est-il possible de réduire la consommation énergétique sans modifier la procédure de communication du NB-IoT ?

5.5.1 Configuration du canal de contrôle et consommation d'énergie à charge élevée

Comme le montre la section 5.2.2 et en particulier l'équation 5.12, le paramètre G dictant la répartition entre les canaux de contrôle et de données sur la liaison descendante joue un rôle dans la consommation d'énergie. Par conséquent, nous explorons la possibilité de réduire la consommation d'énergie en utilisant ce paramètre.

Probabilité d'échec	Performances	G		
		2	4	8
$P_\omega = 10^{-3}$	λ_Δ (com/s)	34.37	34.37	34.37
	L (années)	28.30	28.52	28.63
$P_\omega = 10^{-2}$	λ_Δ (com/s)	48.75	71.72	44.50
	L (années)	25.25	27.23	27.48
$P_\omega = 10^{-1}$	λ_Δ (com/s)	50.05	77.70	45.01
	L (années)	23.65	23.77	24.42

TABLE 5.4 Débit utile - λ_Δ - et durée de vie sur batterie - L - en fonction de la configuration G du canal de contrôle et de la probabilité d'échec (avec la charge $\lambda = \frac{\lambda_\Delta}{1-P_\omega}$)

Résultats

Le Tableau 5.4 montre les performances en termes de durée de vie et de capacité pour différentes configurations. Lorsque G est augmenté, on élargit la période T entre les espaces de recherche (sous-trames de contrôle), voir Figure 3.13. Ainsi, pour un temps d'attente donné, le terminal démodule moins de sous-trames de contrôle avant d'allouer la ressource, ce qui, intuitivement, devrait réduire la consommation d'énergie. Les données montrent toutefois un gain marginal en termes d'autonomie de la batterie. Cela est dû au fait que lorsque les *buffers* sont pleins, le temps d'attente est proche du maximum (10 périodes NPDCCH). Quel que soit l'espacement entre les opportunités NPDCCH, les terminaux démoduleront les 10 espaces de recherche.

Il n'y a donc pas d'impact significatif lorsqu'on agrandit la période des espaces de recherche. Le paramétrage de G n'est pas une solution lorsque la charge augmente pour réduire la consommation énergétique.

5.5.2 Notre solution pour réduire la d'énergie lorsque la charge élevée

L'expérience précédente nous a appris qu'il ne fallait pas réduire le nombre d'espaces de recherche par seconde. Pourtant, on souhaite réduire le nombre d'espaces de recherche démodulés par le terminal lorsque la charge est élevée afin de diminuer sa consommation d'énergie.

La solution que nous proposons ne demande pas au terminal de démoduler toutes les trames de contrôle – le comportement par défaut conduisant à l'effondrement de la durée de vie de la batterie – mais seulement une sur M , M étant un paramètre d'entrée.

Si l'idée est intuitivement simple, le défi consiste à la mettre en œuvre à partir du message 2. La difficulté vient du fait que la BS doit savoir les opportunités NPDCCH que l'UE démodulera, bien qu'elle ne dispose d'aucune information a priori. Nous résolvons ce problème en exploitant l'indice k de la sous-porteuse sur laquelle le terminal envoie son préambule – l'un des seuls éléments d'information que la BS et l'UE possèdent à ce moment-là. Nous proposons que la BS et l'UE conviennent que les espaces de recherche à démoduler par l'UE seront de $k + nM$ avec $n \in \mathbb{N}$. Le paramètre M peut être diffusé dans le NPBCH, de sorte que le terminal le connaisse avant d'initier la communication. Par conséquent, les équations permettant de calculer la consommation d'énergie du terminal pendant la démodulation du NPDCCH (Équations 5.12) deviennent :

$$\begin{aligned} E_f &= T_f \cdot P_{Rx} \left(P_{Rx} \cdot \frac{1}{M \cdot G} + P_{ls} \cdot \frac{M \cdot G - 1}{M \cdot G} \right) \\ E_\sigma &= T_\sigma \left(P_{Rx} \cdot \frac{1}{M \cdot G} + P_{ls} \cdot \frac{M \cdot G - 1}{M \cdot G} \right) \end{aligned} \quad (5.17)$$

Résultats

P_ω	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
Énergie relative économisée par communication avec $M=4$	2.7 %	6.3 %	18.4 %
Durée de vie avec $M=4$ en années	10.53	9.54	7.45
Durée de vie version classique en années	10.32	9.08	6.30
Supplément de latence - l	48 ms		

TABLE 5.5 Les résultats obtenus qui mettent en œuvre notre proposition pour réduire la consommation d'énergie lorsque la charge augmente. Résultats concernant le CL médian

Le Tableau 5.5 montre la performance de notre solution dans le scénario des Figures 5.6 et 5.7 pour $M = 4$. Les résultats montrent que l'efficacité de notre solution augmente avec la charge. L'avantage de notre solution par rapport à celle étudiée précédemment est qu'elle devrait modifier dans une moindre mesure la capacité de la cellule puisque la quantité d'espaces de recherche NPDCCH reste inchangée. En revanche, la ségrégation des ressources pourrait faire descendre les performances lors de l'allocation. Enfin, notre solution aura un impact sur

le délai de communication puisque chaque allocation sera retardée d'en moyenne l ms :

$$l = M \times \frac{R_{max} \times G}{2} \quad (5.18)$$

Nous avons calculé le retard moyen induit lors de chaque allocation par notre solution dans le cas d'une couverture médiane CE 1 (sans charge) dans le Tableau 5.5.

Notre solution répond donc à un problème de consommation d'énergie identifié dans ce travail lorsque la cellule est chargée. Cette proposition est d'autant plus intéressante que (a) les paramètres de la cellule déjà présents se sont révélés inefficaces (section 5.5.1) et (b) la procédure de communication n'a pas besoin d'être modifiée.

IMPACT DU CONTEXTE SATELLITE

Le standard NB-IoT a été introduit par le 3GPP pour répondre aux exigences de la 5G pour le segment mMTC grâce à des classes de couverture, des répétitions, des sous-porteuses plus étroites, des optimisations protocolaires et des mécanismes d'économie d'énergie. Reconnaisant la capacité des systèmes satellitaires à offrir une large couverture et à permettre le déploiement dans plusieurs pays, le 3GPP envisage l'utilisation des technologies 5G pour dans des réseaux non-terrestres – Non-Terrestrial Networks (NTN). Cependant, si nos travaux de recherches, présentés dans les deux chapitres précédents, ont montré la capacité du NB-IoT à répondre aux attentes en termes de densité de connexion et durée de vie, ces questions restent ouvertes pour le contexte satellitaire.

Dans ce chapitre, nous considérons les mécanismes nécessaires à l'adaptation de NB-IoT au contexte satellite. Notre travail est fondé sur les rapports techniques TR.38 811 [31] et TR.38 821 [32] du 3GPP qui ont étudié les modifications nécessaires au fonctionnement de la technologie 5G-NR dans un contexte satellitaire.

Pour notre étude des performances du NB-IoT dans un contexte satellitaire nous avons porté notre attention sur trois critères.

- La densité de connexion ou capacité des cellules NB-IoT dans un contexte satellitaire. Il s'agit d'étudier l'impact de la taille de la cellule sur le fonctionnement du NB-IoT.
- La durée de vie d'un terminal dans un contexte satellitaire. Cette fois-ci, l'effort porte sur l'impact de l'utilisation d'une méthode de positionnement GNSS sur la consommation énergétique.
- Les débits envisageables pour des communications par satellite. On étudie enfin l'impact du délai sur le fonctionnement du NB-IoT.

6.1 Capacité des cellules dans un cadre satellitaire

Avant d'étudier la capacité des cellules, il faut définir ce que nous considérons être une cellule dans le cadre particulier des communications par satellite. En effet, la station de base peut être considérée à bord du satellite (OBP), elle peut se trouver au sol derrière une *gateway*

qui communique avec un ou plusieurs satellites, enfin, les fonctions de la station de base peuvent être réparties entre le segment au sol et le segment en vol. Dans tous les cas de figure, nous considérerons qu'une cellule est un faisceau satellite. Le nombre de faisceaux par satellite varie, de quelques-uns pour le cas LEO nano-satellite, quelques dizaines pour le cas LEO micro-satellite à plusieurs centaines pour les satellites GEO [32].

Un faisceau satellite est obtenu en utilisant une antenne au niveau du satellite ou un équivalent (réseau de *feeders*). Les faisceaux interfèrent entre eux dès qu'ils utilisent une même bande de fréquence. Nous considérons le fonctionnement théorique d'un faisceau satellite qui déploie un seul PRB NB-IoT. Nous évaluerons le cas multi-satellite et le déploiement sur une plus grande bande dans le chapitre suivant.

6.1.1 Problème : taille des cellules dans un contexte satellite

Dans le cas terrestre, la cellule se déploie dans un rayon de 40 km autour de la station de base. Le temps de propagation est donc inférieur à la milliseconde. Pour le satellite, il faut tenir compte d'un délai de propagation de plusieurs dizaines de millisecondes pour le cas LEO et de 250 ms pour le cas GEO avec BS au sol.

Les problèmes causés par ce délai supplémentaire peuvent être résolus en augmentant les temporisations des différentes couches protocolaires [32]. Cependant, les faisceaux satellites sont plus larges entraînant des délais intracellulaires ou délai différentiels (voir Figure 6.1) pouvant dépasser les millisecondes (jusqu'à 10 ms pour le cas géostationnaire). Cela amène à une désynchronisation entre les terminaux d'un même faisceau et donc à des collisions entre les canaux de l'UL. Ce problème peut être résolu en ajoutant des temps de garde et en augmentant la durée des préfixes cycliques – solution présentée dans la prochaine section – au détriment des performances du système.

Le cas du signal traité à bord (OBP) est considéré comme de second plan par le 3GPP tant le degré de complexité est importante pour un gain relativement marginal. Nous allons donc nous placer dans le cas où les fonctions de la BS sont traitées au sol. Par simplicité, nous considérons que la station de base est confondue avec la *gateway* satellite et donc sans délai de propagation ni pertes de données. Dans ce contexte, les délais de propagation et délais différentiels sont illustrés dans la Figure 6.1. Les UEs et le satellite communiquent à l'aide de l'interface radio NB-IoT. Le satellite relaie les signaux bruts (généralement par transposition à des fréquences plus élevées) vers/depuis la *Gateway* au sol sans aucun traitement sur les messages. C'est la BS au sol qui effectue le traitement des signaux et des messages. On définit le point de référence dans une cellule comme le point au sol sous couverture du faisceau considéré qui est le plus proche du satellite. À partir de la Figure 6.1, nous pouvons définir le délai d_{01} de propagation minimum entre le satellite et la cellule, le délai d_{02} entre le satellite et la *gateway* et d_{1x} celui entre le satellite et le terminal x . Nous obtenons les équations suivantes :

$$\begin{cases} \text{Délai minimum entre la station et un UE, } D_{min} = \frac{2 \cdot (d_{01} + d_{02})}{c} \\ \text{Délai différentiel spécifique à l'UE } x, D_{dif_x} = \frac{2 \cdot (d_{1x} - d_{01})}{c} \\ \text{Délai entre l'UE } x \text{ et la BS (contexte satellite), } D = D_{min} + D_{dif_x} \end{cases} \quad (6.1)$$

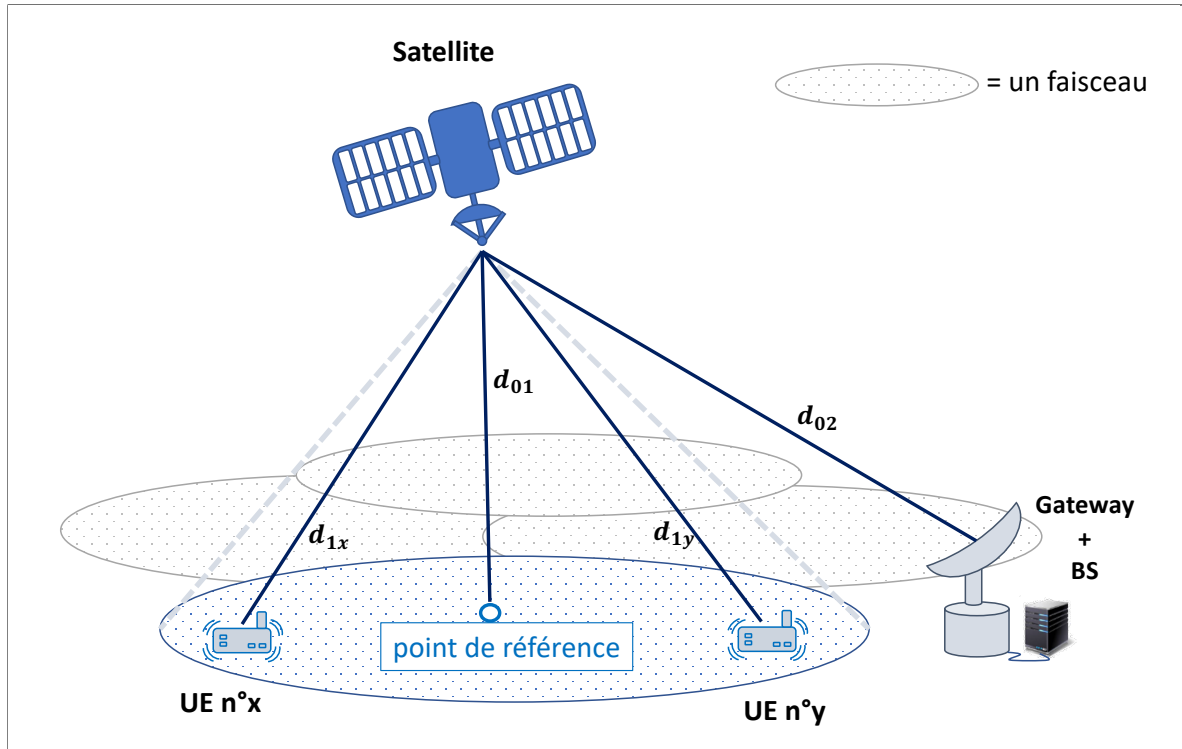


FIGURE 6.1 Les différents délais de propagation entre UE et BS dans le contexte satellitaire.

Dans le contexte des technologies cellulaires 3GPP, la station de base compense le délai de propagation par ce qu'on appelle un *Timing Advance* (TA). Ils sont spécifiques à chaque UE et leur permettent d'être synchronisés lorsqu'ils émettent ou écoutent des signaux décalés dans le temps en voie UL ou DL. La valeur du TA est transmise par la BS dans le Message 2 d'après l'estimation faite à partir du préambule reçu [138, 139]. En général, le TA terrestre est inférieur à 1 ms - le rayon maximal de la cellule à prendre en compte pour NB-IoT est de 40 km¹. Dans le cadre du satellite, on considère qu'un délai de référence D_{min} est transmis à tous les UEs via le NPBCH. En revanche, le délai différentiel dans une cellule satellite peut atteindre 10,3 ms [32] (pour un faisceau dont l'empreinte a un diamètre de 3 500 km).

La réception des préambules du NPRACH avant la mise en place du TA dans le contexte satellite pose un souci majeur. Afin de ré-utiliser les équipements et le protocole terrestre, l'intégration de temps de garde semble être la solution privilégiée par le 3GPP (cadre du 5G-NR sur satellite [32]).

6.1.2 Solution : Temps de garde

Lorsque le terminal se réveille, il ne connaît pas sa distance avec la BS. Les préambules permettent à la BS de déterminer le temps de propagation. La BS transmet ensuite le TA aux UEs dans sa réponse (Message 2). Lors de l'envoi des préambules, les UEs supposent qu'ils se trouvent au point de référence avec le TA minimum associé diffusé par la BS (nul dans le

1. La Release 15 permet un rayon de cellule allant jusqu'à 120 km grâce à l'utilisation de préambules de 1.25 kHz et de CP de 0.8 ms (266μs préfixe cyclique dans le préambule [140])

réseau terrestre), D_{min} dans l'équation 6.1.

Le problème dans le cas du satellite est que le retard différentiel à l'intérieur d'un seul faisceau est suffisamment important pour que les préambules empiètent sur les ressources allouées aux NPUSCH qui suivent les RAOs, voir la figure 6.2. La solution envisagée dans le rapport technique [32] consiste à utiliser des temps de garde pour éviter d'allouer les ressources du NPUSCH qui suivent les RAOs du NPRACH. Ce temps de garde dépend de la taille de la cellule et correspond au retard différentiel maximal.

Il est également nécessaire d'augmenter la taille du CP des préambules, qui doit être au moins égale au délai différentiel maximal afin de garantir l'orthogonalité des transmissions de préambules sur différentes sous-porteuses [132]. Ainsi, chaque RAO du CE n°k est prolongée de Δ_k ms (Équation 6.2).

$$\Delta_k = \Delta + \Delta \cdot 4 \cdot r_{A,k} \quad (6.2)$$

où Δ est le retard différentiel maximal dans le faisceau, 4 le nombre de CP par répétition de préambule et $r_{A,k}$ le nombre de répétitions pour du CE n°k.

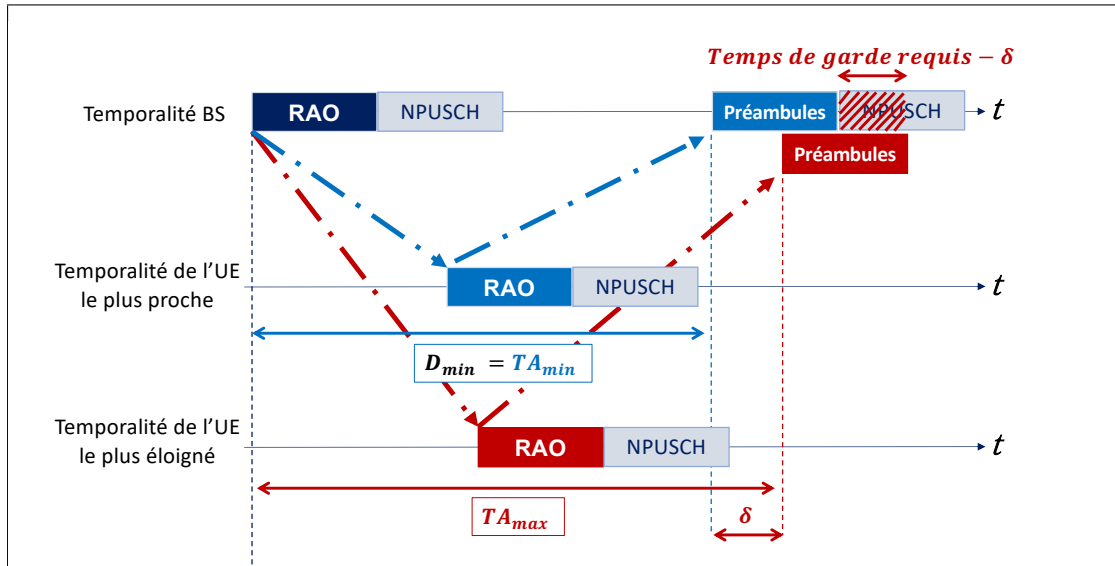


FIGURE 6.2 Effet du délai différentiel sur les canaux UL

Dans le contexte satellite, la trame de la liaison montante reçue par la BS est donc affectée par l'effet du délai différentiel comme le montre la Figure 6.3 (la trame UL dans un contexte a été illustrée dans notre état de l'art en Figure 3.9). On y voit les ressources temps-fréquence perdues (en orange) à cause du temps de garde requis après chaque RAO.

Le ratio R_{loss} des ressources de l'UL perdues en raison du délai différentiel est alors :

$$R_{loss} = \sum_{k=0}^3 \frac{3.75 \cdot m_k}{180} \cdot \frac{\Delta_k}{\delta_k} \quad (6.3)$$

où 3,75 est la largeur de la sous-porteuse de préambule (kHz), m_k le nombre de sous-porteuses (nombre de préambules possibles), 180 la largeur du PRB en kHz, δ_k la période du CE n°k, et Δ_k son extension due au retard différentiel tel que calculé dans l'équation 6.2. Dans la section

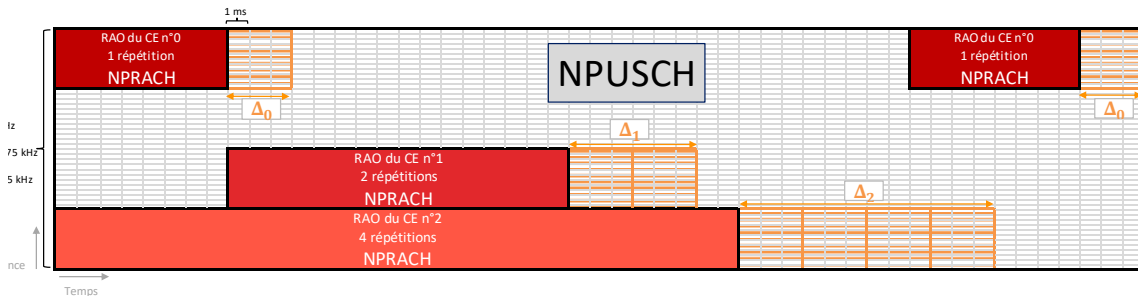


FIGURE 6.3 Impact du délai différentiel sur la trame UL

suivante, nous observons la variation de la capacité de la cellule en fonction de la taille du faisceau satellite.

6.1.3 Impact sur la capacité des cellules

Les bandes de garde dans la porteuse réduisent la quantité de ressources temps-fréquence disponibles pour le NPUSCH. Il semble donc intéressant d'utiliser notre modèle sur la capacité du NB-IoT présenté en Chapitre 4 en intégrant différents temps de garde correspondant à différentes tailles de cellules satellite.

Une même taille de cellule (ou empreinte du faisceau au sol) n'est pas synonyme de même délai différentiel. En effet, il dépend également de l'angle d'élévation α avec lequel le terminal aperçoit le satellite. Pour un satellite GEO, une cellule au niveau de l'équateur ($\alpha = 90^\circ$) apparaît plus aplatie qu'une cellule proche des pôles. Nous fixons $\alpha = 37^\circ$, un paramétrage qui correspond à un positionnement au centre de la France (pour un satellite GEO, voir Annexe G).

Enfin, pour nous aider à mieux appréhender l'impact du contexte spatial sur les communications NB-IoT, nous avons implanté un outil de simulation à événements discrets de la couche MAC en python. Ce simulateur simule l'accès aléatoire et l'allocation des ressources avec les paramètres exacts disponibles dans les messages de contrôle d'allocation (DCIs).

Taille de la cellule en km	< 100	500	1000	3500
Délai différentiel - δ	< $267\mu s$	$4ms$	$7ms$	$10ms$
Réduction théorique obtenu avec le modèle	\emptyset	12.5%	21.8%	31.2%
Débit utile couche MAC dans le NPUSCH obtenu par simulation. ($kbit.s^{-1}$)	177.6	154.3	138.6	114.0
Réduction obtenue par simulation	\emptyset	12.9%	22.3%	33.8%

TABLE 6.1 Impact du délai différentiel de la cellule sur les performances

Les ressources supplémentaires prises par le NPRACH réduisent la capacité de la cellule selon le Tableau 6.1. À partir de l'Équation 6.3, nous obtenons une perte linéaire par rapport au temps de garde. Cependant, nos simulations révèlent que la perte de débit relative au temps de garde est plus élevée que prévue. Ceci est dû à un effet boule de neige : l'allocation

des ressources est optimisée pour une segmentation de puissance de deux, car a) la période d'allocation des ressources est un multiple de deux² et b) le paramètre du délai pour l'allocation après un espace de recherche NPDCCH prend une valeur dans $\{8,16,32,64\}$ ms.

Ces résultats montrent que la taille des cellules satellite a un impact de premier plan sur les performances (jusqu'à 30% de perte de capacité) et doivent être considérée lors de l'évaluation et la conception des systèmes satellitaires.

6.2 Durée de vie d'un terminal NB-IoT dans un contexte satellite

6.2.1 Problème : glissement Doppler

Les satellites LEO décrits dans le chapitre de l'état de l'art sont aussi appelés satellites défilants ou *passing-by satellites*. En effet, du point de vue d'un terminal, ces satellites apparaissent à un point à l'horizon et défilent jusqu'à un autre point de l'horizon (à une vitesse entre 5 et 7 km/s). Pour ces satellites défilants, la synchronisation des fréquences est un vrai problème. Non seulement a) le décalage Doppler (voir Annexe A) est beaucoup plus important que dans les réseaux terrestres, mais aussi b) le décalage Doppler passe du positif au négatif au fur et à mesure que le satellite défile. Afin d'éviter les collisions entre les signaux et de garantir la synchronisation OFDM, une solution envisagée par le 3GPP consiste à utiliser le positionnement GNSS ainsi que les éphémérides des satellites. De cette façon, le décalage Doppler peut être pré-compensé du côté du terminal.

Dans notre travail, le positionnement GNSS est considéré comme obligatoire pour les systèmes de satellites LEO.

6.2.2 Solution : Positionnement GNSS

Parmi les solutions GNSS, nous avons choisi d'étudier la durée de vie d'un terminal NB-IoT avec un positionnement Global Positioning System (GPS). Il est particulièrement peu onéreux et convient donc aux applications LPWANs. Les terminaux s'éteignent entre deux communications successives. Nous supposons donc que a) les terminaux n'auront besoin de récupérer leur position qu'au début de chaque communication et qu' b) une seule fois car la communication est suffisamment courte pour négliger l'impact de la mobilité du terminal. Selon [141], un module GPS a besoin de six secondes pour obtenir une position après un démarrage à froid. Les mesures de ces mêmes auteurs dévoile une consommation d'énergie quasi-constante égale à 425 mW pendant ces six secondes.

6.2.3 Impact sur la durée de vie des terminaux

Les résultats du Tableau 6.2 montrent que l'utilisation du GPS est pénalisante pour la durée de vie des terminaux, bien plus que les conditions de couverture. L'exigence mMTC

2. La période du NPDCCH, T , est calculée de telle sorte que $T = G \cdot \max(N_{rep})$ en ms selon [140]- Le tableau 4.2 présente les paramètres pour nos simulations.

Durée de vie (années)					
Intervalle des messages (heures)		2		24	
Taille de la payload DL (octets)		29			
Taille de la payload UL (octets)		50	200	50	200
144 dB CL	CP-EDT	1.53	1.52	7.63	7.60
154 dB CL	CP-EDT	1.47	1.43	7.39	7.21
164 dB CL	CP-EDT	1.16	0.98	6.06	5.19

TABLE 6.2 Impact de l'utilisation du GPS pour permettre le fonctionnement du NB-IoT dans des systèmes satellitaires LEO en fonction des conditions de couverture

concernant la durée de vie d'un terminal (10 ans) n'est atteinte dans aucun des scenarii.

6.3 Débit couche MAC envisageable pour des communications par satellite

Intéressons-nous au débit couche MAC du NB-IoT.

6.3.1 Problème : délai de propagation

Dans un contexte terrestre, le débit au niveau de la couche MAC est calculé en fonction du MCS utilisé et des temps de transition entre mode transmetteur et récepteur comme expliqué dans l'état de l'art (Chapitre 2). Puisqu'une temporisation minimum supérieure à la milliseconde est introduite entre chaque message d'une même communication, **le délai de propagation n'a aucun impact sur le débit du NB-IoT dans un contexte terrestre.**

Dans le cadre du satellite, les temps de propagation entre les UE et la BS (D_{min} de l'Équation 6.1) sont plus grands que ces temporisations minimum – entre 6 ms pour les satellites LEO les plus bas et 250 ms pour les satellites GEO – et ont un effet sur le débit de la communication. En effet, afin de réduire la complexité des terminaux, diminuer leur coût et diminuer leur consommation énergétique le 3GPP a réduit la taille de la fenêtre de transmission des TB à 1 d'après la Release 13 [60, 97]. C'est la fenêtre du processus HARQ détaillé en Annexe C.

Ainsi, la BS doit attendre de recevoir le TB $n^{\circ}N$ avant de transmettre l'allocation du TB $n^{\circ}N + 1$. Le débit de la communication est alors réduit dans le cadre du satellite. Cependant un compromis intéressant fait son apparition, lorsque la station de base est incapable de décoder le bloc $n^{\circ}N$, l'ensemble de la communication est retardée de deux aller-retours (voir Figure 6.5). Il y a donc un intérêt à avoir une communication robuste. Alors que dans le terrestre, le compromis entre retransmission du bloc et robustesse de la communication résulte en un BLER (erreur en réception du bloc couche MAC) de 10^{-1} , le contexte satellite pourrait nécessiter un équilibre différent.

En effet, les deux solutions pour rendre la communication plus robuste sont a) de choisir un indice MCS moins élevé ou b) d'utiliser des répétitions de TB. Dans les deux cas, la durée de la transmission du message augmente. Les Figures 6.4 et 6.5 illustrent le compromis entre robustesse et retransmissions.

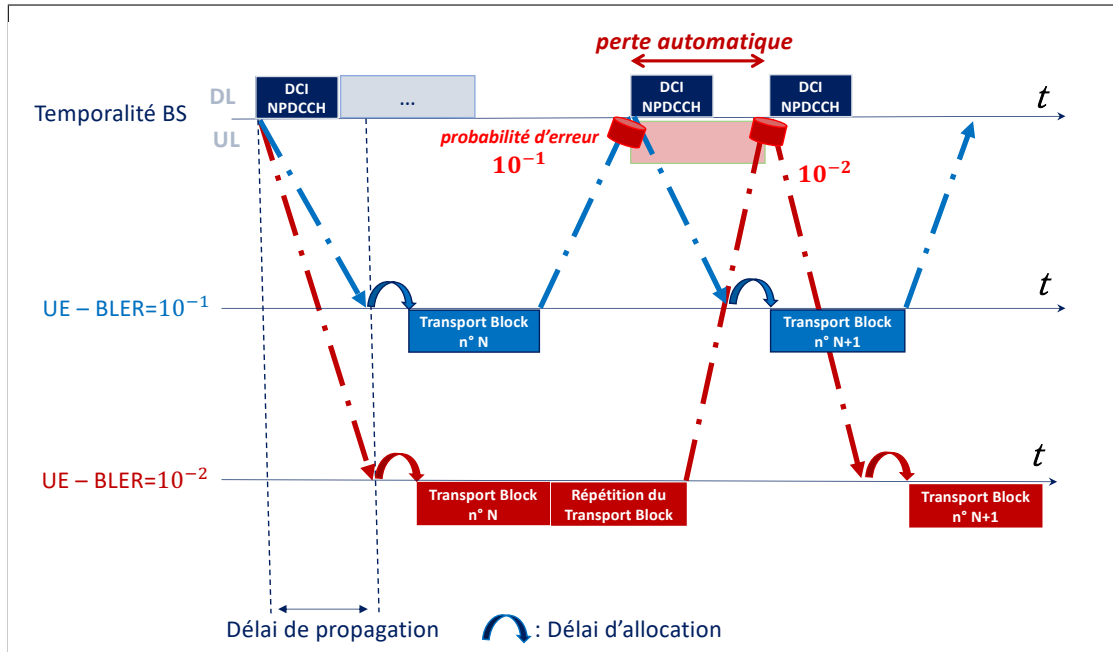


FIGURE 6.4 Processus HARQ sans erreur avec deux seuils BLER différents. L'augmentation de la robustesse ajoute une perte de temps automatique à chaque TB, en contrepartie, elle réduit la probabilité de retransmission. Par soucis de simplicité de représentation, nous avons utilisé la répétition plutôt que de changer le MCS du TB. Dans la pratique, les deux techniques peuvent être combinées.

Les deux figures comparent l'ordonnancement et le délai des messages pour des terminaux s'ayant vu attribuer des BLER différents. La Figure 6.4 montre l'ajout automatique en termes de délai lorsque qu'une communication plus robuste est utilisée. La Figure 6.5 illustre le cas d'une erreur sur le TB reçu.

Afin d'étudier le potentiel nouvel équilibre entre robustesse et retransmission concernant les communications spatiales NB-IoT, nous faisons varier le BLER des UEs dans la prochaine section.

6.3.2 Étude du changement du BLER

Tout d'abord, définissons la cellule (faisceau satellite) considérée. Pour cela, nous allons nous appuyer sur le rapport technique TR 38.821 du 3GPP [32] qui définit les différents types de systèmes satellitaires à envisager dans le cadre de l'intégration des technologies 3GPP au spatial. Nous allons nous placer dans le cas n°5 :

- Satellite GEO ;
- Angle d'élévation du faisceau central : $\alpha = 45^\circ$;
- *Handheld* UEs (Antenne Omni-directionnelle) ;

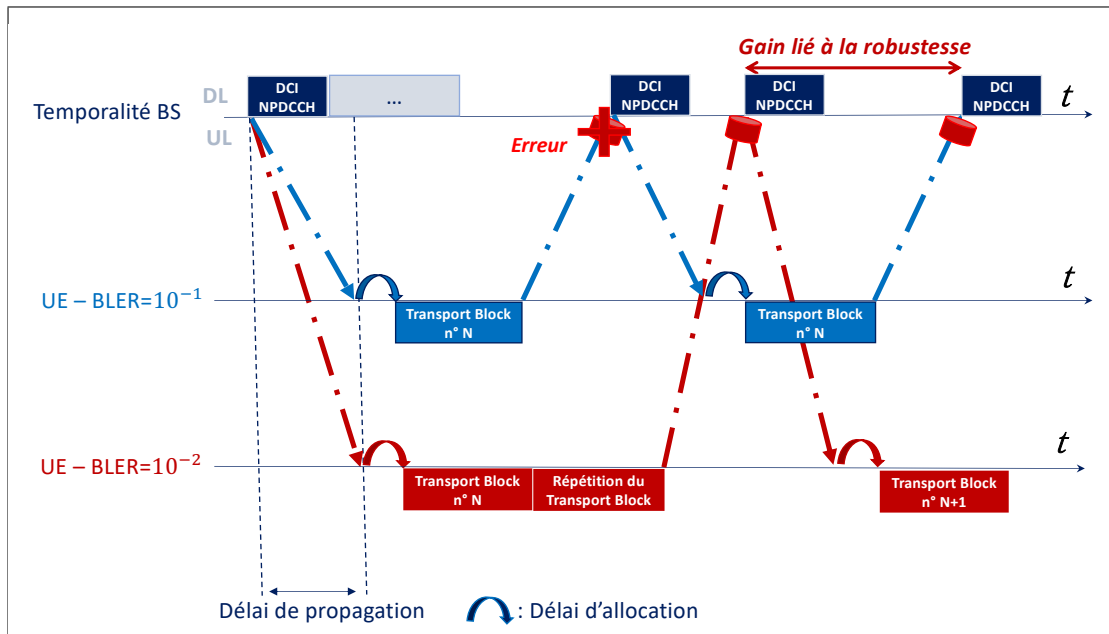


FIGURE 6.5 Impact du BLER sur la communication en cas d'erreur sur le TB de l'UE dont la communication est la moins robuste.

- Bande S (2-4 GHz) ;
- Facteur de réutilisation de fréquence égal à trois (peu d'interférences).

Les distributions de couverture sont définies dans le rapport technique à travers des rapports signal à bruit plus interférences (SINR).

Pour étudier l'effet de différents seuils BLER sur les performances de la cellule, nous avons besoin de leurs valeurs en fonction du SINR. Elles peuvent être trouvées dans la littérature et sont assez similaires aux valeurs LTE pour la modulation QPSK : [142, 143]. Les courbes BLER du NB-IoT pour l'UL et DL sont données en Annexe H. Afin de prendre en compte l'effet des répétitions, nous considérons que chaque fois que le nombre de répétitions double, le SNR reçu double également, soit un gain de 3dB pour un petit nombre de répétitions. Dans la littérature [110, 112], il a été montré que cette hypothèse est d'autant plus vraie que le nombre de répétitions est petit : plus le temps de transmission est court plus la combinaison des symboles à la réception est cohérente.

La Figure 6.6 a combiné les distributions SINR du rapport technique et les courbes BLER pour adapter les indices MCS à la distribution de couverture de la cellule. Ces MCS visent un seuil BLER de 10^{-1} . Il est intéressant de voir que les conditions de couverture sont suffisamment bonnes pour ne pas avoir besoin de répétitions alors que nous avons considéré un cas satellite géostationnaire (altitude de 35 786 km)³.

La Figure 6.7 montre le délai de la communication en fonction du type de cellule et de la taille de la charge utile. Le cas GEO rend compte des temps de propagation du satellite. En effet, à chaque nouveau TB, un nouvel aller-retour entre l'UE et la BS est requis, une

3. Les caractéristiques du 3GPP sont assez optimistes, nous en avons choisi d'autres lors de notre comparaison de scénarii satellitaires du Chapitre 7

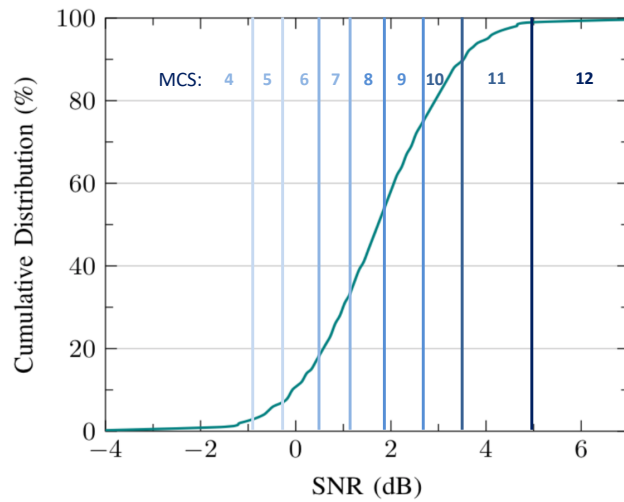


FIGURE 6.6 Distribution du SNR pour la liaison montante pour le cas GEO n°5 du 3GPP [32]. Les seuils et les indices de MCS sont indiqués pour un objectif BLER de 10^{-1} et une modulation *multi-tone* de 45 kHz. Les seuils ont été déduits des figures en Annexe H

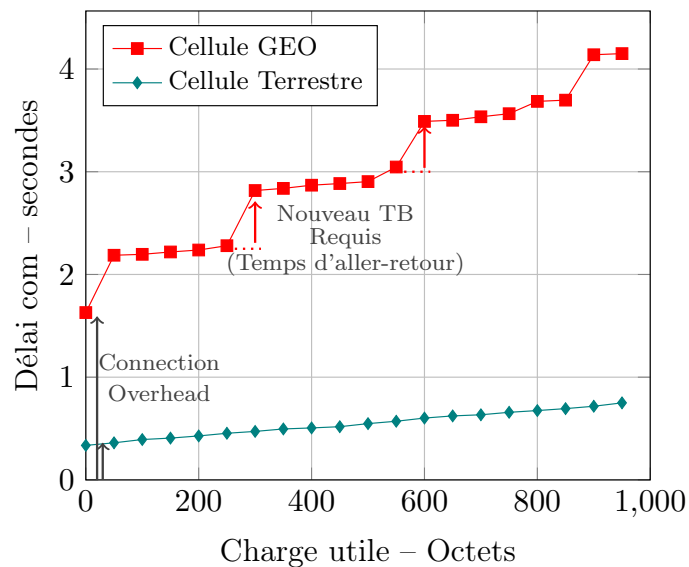


FIGURE 6.7 Délai de communication entre la première tentative de connexion et les derniers octets de charge utile envoyés, en fonction de la charge utile et du type de cellule. Données tracées pour $BLER = 10^{-1}$.

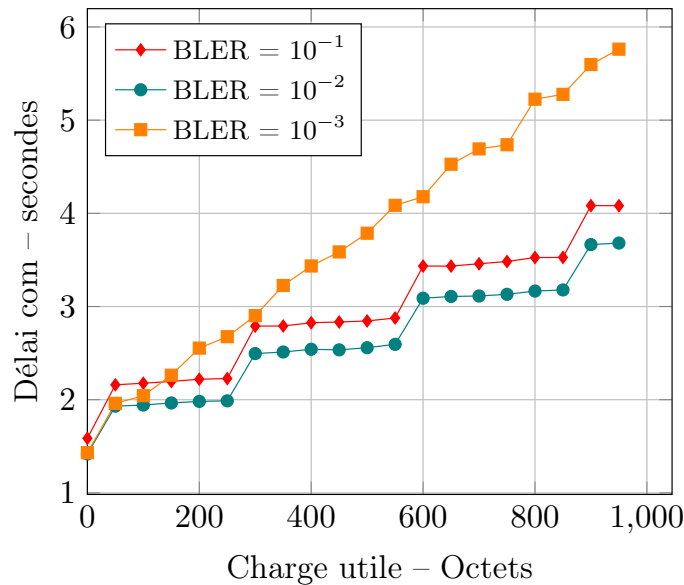


FIGURE 6.8 Délai de communication en fonction de la robustesse (traduite par le BLER) et de la charge utile. La configuration pour obtenir le délai le plus court est autour d'un BLER de 10^{-2} . Une valeur d'autant plus intéressante sachant que le BLER visé en déploiement terrestre est de 10^{-1} .

marche est visible sur la figure. Entre chaque marche, on trouve un palier qui représente les communications possédant le même nombre de messages à envoyer. La taille des TBs est augmentée jusqu'à son maximum avant d'avoir besoin d'un nouveau bloc de transport. La pente d'un palier rend compte des conditions de couverture. Plus les conditions sont difficiles plus la pente est inclinée.

On remarque que l'ajout d'un nouvel échange de message dans le cadre de communications terrestres n'a quasiment aucun impact sur le délai de la communication (les paliers ne peuvent pas être distingués sur la Figure 6.7).

La Figure 6.8 révèle un phénomène très intéressant. Pendant plusieurs décennies, les standards cellulaires ont utilisé un taux d'erreur de bloc de 10^{-1} qui optimise le délai dans un environnement terrestre. Cependant, l'équilibre entre la robustesse et les retransmissions est différent d'après nos résultats dans un environnement satellite (en particulier géostationnaire). Les temps de propagation extrêmes encouragent la réduction des retransmissions au profit des répétitions ou d'un MCS plus robuste. Nous avons donc trouvé un moyen permettant de réduire en moyenne le délai de communication de 10% avec une configuration BLER de 10^{-2} . En outre, l'utilisation d'un seuil à 10^{-3} dégrade les performances.

Ce gain en délai se traduit en pratique par un gain en débit. Nous avons tracé dans la Figure 6.9 les débits correspondant aux résultats de la figure précédente. Lorsque la taille de la charge utile augmente, l'impact de la mise en place de la communication s'atténue, le débit augmente et tend vers un maximum, propre à chaque valeur de BLER. Il est possible de remarquer que le débit diminue toutefois à chaque fois qu'un nouvel aller-retour doit être utilisé pour transporter la charge utile.

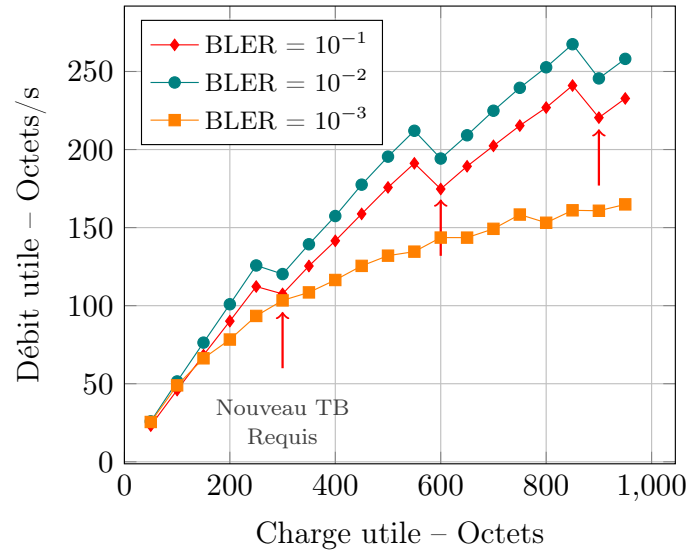


FIGURE 6.9 Débit couche MAC des communications en fonction de la robustesse (traduite par le BLER) et de la charge utile.

Nos travaux ont permis de démontrer que le taux d'erreur d'un bloc couche MAC (BLER) qui permet d'obtenir le débit optimal dans le contexte satellite est inférieur à celui recommandé dans la spécification du standard NB-IoT.

ÉTUDE DE SYSTÈMES SATELLITE POUR LES COMMUNICATIONS NB-IOT

Comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, les systèmes satellite sont hétérogènes (altitude, puissance, coûts de production, complexité). Le standard 3GPP évalue des *scenarii* [31, 32] en considérant les performances d'un seul satellite.

Nous définissons puis évaluons trois *scenarii* de déploiement d'une constellation. Ils comportent des paramètres en plus de ceux présents dans les rapports du 3GPP, tels que sur le nombre de faisceaux par satellite, la puissance totale du satellite, le nombre de satellites et l'angle minimum d'élévation. Nous prenons en compte les impacts du contexte satellite décrits dans le chapitre précédent. En outre, nous considérons le cas nanosatellite, délaissé dans les rapports 3GPP car jugé trop peu performant pour des communications 5G-NR mais que nous estimons de premier plan pour le NB-IoT.

7.1 Définition des *scenarii* systèmes satellitaires

Nous allons considérer un cas géostationnaire – GEO, un cas basse altitude – LEO et un cas basse altitude composé de nanosatellites – Nano.

Nous divisons chaque scénario système en trois parties :

- Paramétrage système – Tableau 7.1
- Caractéristiques des terminaux – Tableau 7.2
- Caractéristiques des satellites – Tableau 7.3

Les deux premiers tableaux sont communs aux trois *scenarii* et le dernier tableau regroupe les différences entre les *scenarii*. Lors de notre analyse globale, le Tableau 7.9 donnera les caractéristiques des constellations retenues.

La Figure 7.1 illustre le déploiement des faisceaux et donne leur angle d'élévation dans l'exemple du scénario GEO.

1. Schéma de gain de l'antenne considérée en fonction de sa taille d'après [31]
2. Respectivement 10, 5 et 0 couches (*tiers*) de faisceau comme défini dans [32]

Caractéristique	Valeur
Fréquence centrale DL / UL	2 GHz / 2 GHz
Largeur de bande DL / UL	15 MHz / 15 MHz
Facteur de ré-utilisation de fréquence	3 couleurs

TABLE 7.1 Paramétrage du système considéré

Caractéristique	Valeur
Gain Antenne Rx et Tx	0.0 dBi
Gain Pattern	Omnidirectionnel
T0	290 K
Noise Figure	7 dB
Puissance de transmission	200mW (23 dBm)
Consommation réception	80 mW
Consommation sommeil léger	3 mW
Consommation sommeil profond	0.015 mW
Consommation module GPS	425 mW [141]
Capacité de batterie	5 Wh
Répartition dans la couverture	Homogène

TABLE 7.2 Caractéristiques des terminaux

Caractéristique	GEO	LEO	Nano
Altitude	35 786 km	1 200 km	600 km
Taille d'antenne équivalente	10 m	1 m	9 cm
Gain Antenne Tx	45.5 dBi	24 dBi	12 dBi
G/T	14 dB/K	-4.9 dB/K	-18 dB/K
Puissance Radio-Fréquence (RF)	2.5 kW	250 W	10 W
Masse	5000 kg	400 kg	10 kg
Gain Pattern	Bessel ¹	Bessel ¹	Bessel ¹
Largeur de faisceau à 3dB (diamètre)	0.8829°	9.822°	117.7°
Scintillation	2.2 dB	2.2 dB	2.2 dB
Dégradation Atmosphérique	0.1 dB	0.1 dB	0.1 dB
Angle d'élévation du faisceau central	90°	90°	90°
Angle minimum d'élévation	21.5°	29.0°	20.5°
Rayon minimal des faisceaux	275 km	103 km	805 km
Rayon maximal des faisceaux	605 km	255 km	805 km
Nombre de faisceaux par satellite ²	331	91	1
Couverture en km^2 (satellite)	1.37×10^8	6.78×10^6	2.03×10^6
Délai différentiel maximum	3.25 ms	1.22 ms	1.44 ms

TABLE 7.3 Caractéristiques des satellites

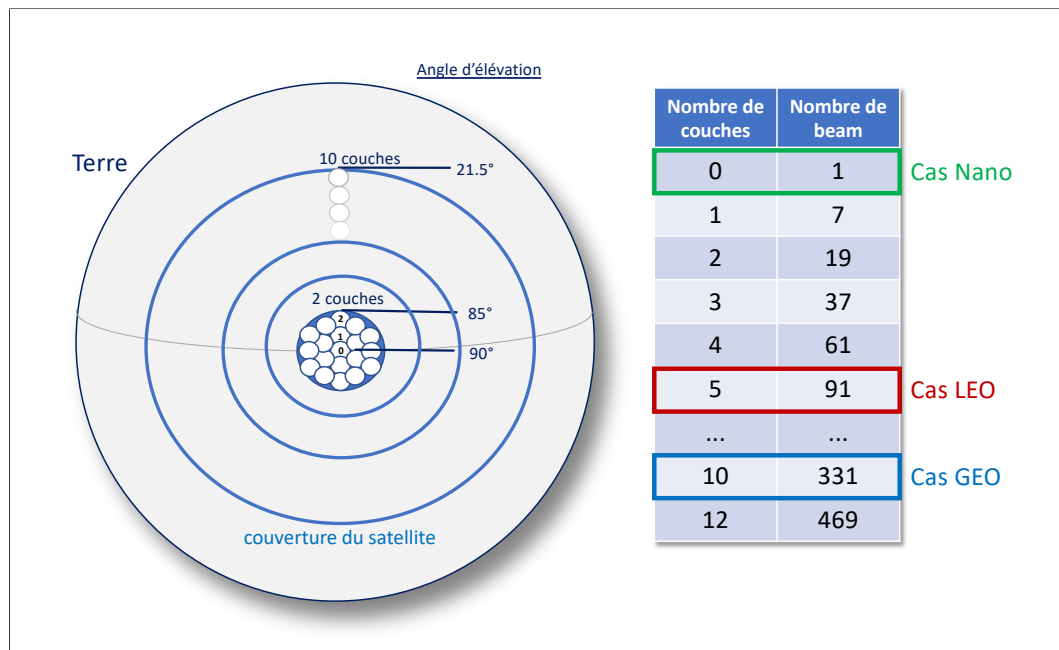


FIGURE 7.1 Disposition des faisceaux dans notre cas GEO

7.2 Performances des cellules

Dans cette section, nous allons d'abord calculer les conditions de couverture (performances physiques). Nous déterminerons alors le débit agrégé par satellite (couche MAC), puis la densité de connexion et la durée de vie des terminaux à l'aide des modèles introduits dans nos travaux (Chapitres 4 et 5).

7.2.1 Performances physiques des cellules

Nos distributions de conditions de couverture satellite sont conformes à la méthodologie proposée par le 3GPP dans le cadre 5G-NR [32]. Nous avons calculé les bilans de liaison et les interférences à partir des caractéristiques du Tableau 7.3. L'évanouissement est ajouté en fonction de l'angle d'élevation, conformément à [32]. Les terminaux sans visibilité directe ne sont pas pris en compte dans ce travail.

Voie descendante (DL)

Nous avons considéré une puissance isotropique rayonnée équivalente, Equivalent Isotropic Radiated Power (EIRP), qui est la même pour tous les faisceaux. Cette répartition de la puissance est logique avec notre hypothèse de répartition homogène des terminaux sous la couverture. Nous pouvons donc déduire la densité de puissance à partir des caractéristiques (puissance, nombre de faisceaux et bande de fréquence) des satellites dans le Tableau 7.4.

La Figure 7.2 montre la distribution de couverture DL (tous faisceaux confondus) pour nos trois *scenarii*.

Les seuils des schémas de modulation et de codage (MCS) sont choisis afin d'obtenir

Cas	GEO	LEO	Nano
Densité EIRP	47.3 dBW/MHz	21.4 dBW/MHz	15.0 dBW/MHz

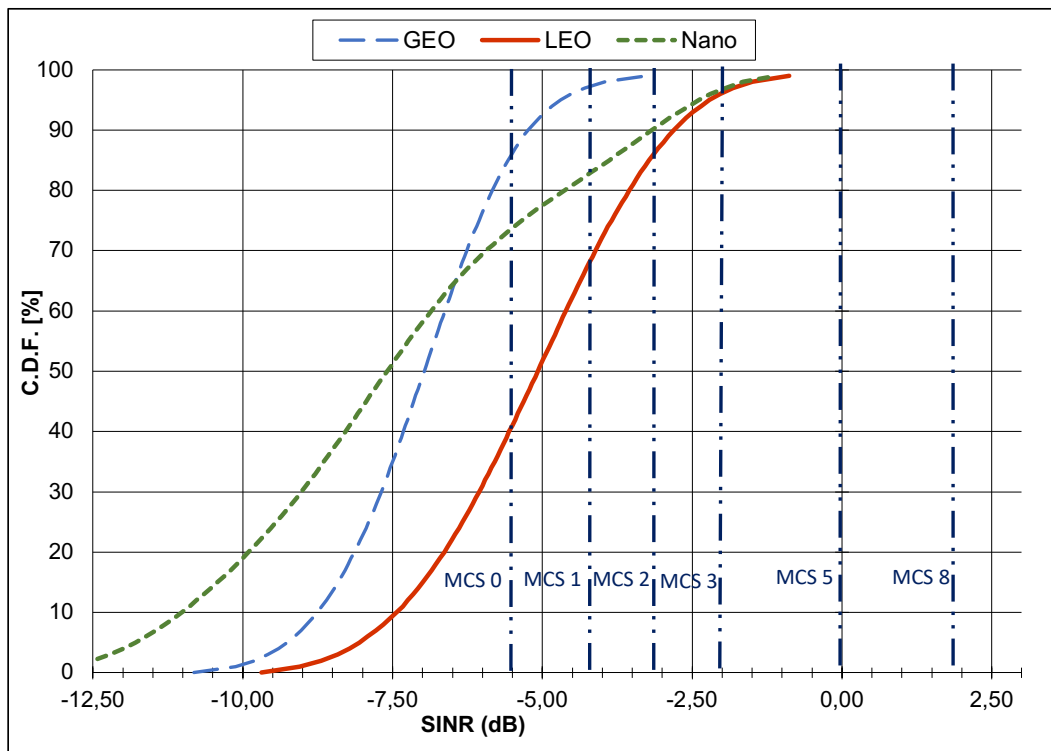
TABLE 7.4 Densité EIRP considérée dans nos *scenarii*

FIGURE 7.2 Distribution du SNR pour le DL

un BLER de 10^{-1} comme spécifié dans la norme. Nous observons qu'une grande partie des terminaux ne peuvent pas atteindre le seuil du MCS le plus bas. Dans ce cas, la norme permet aux utilisateurs d'utiliser des répétitions afin d'atteindre le BLER requis [110], ce qui diminue le débit (voir section suivante).

Voie montante (UL)

Le NB-IoT autorise cinq largeurs de bande pour la transmission UL (180 kHz, 90 kHz, 45 kHz, 15 kHz et 3.75 kHz). La station de base choisit celle que le terminal doit utiliser en fonction de sa couverture. Pour les distributions de couverture UL de la Figure 7.3, nous avons considéré le cas *multi-tone* de 90 kHz et le cas *single-tone* de 15 kHz.

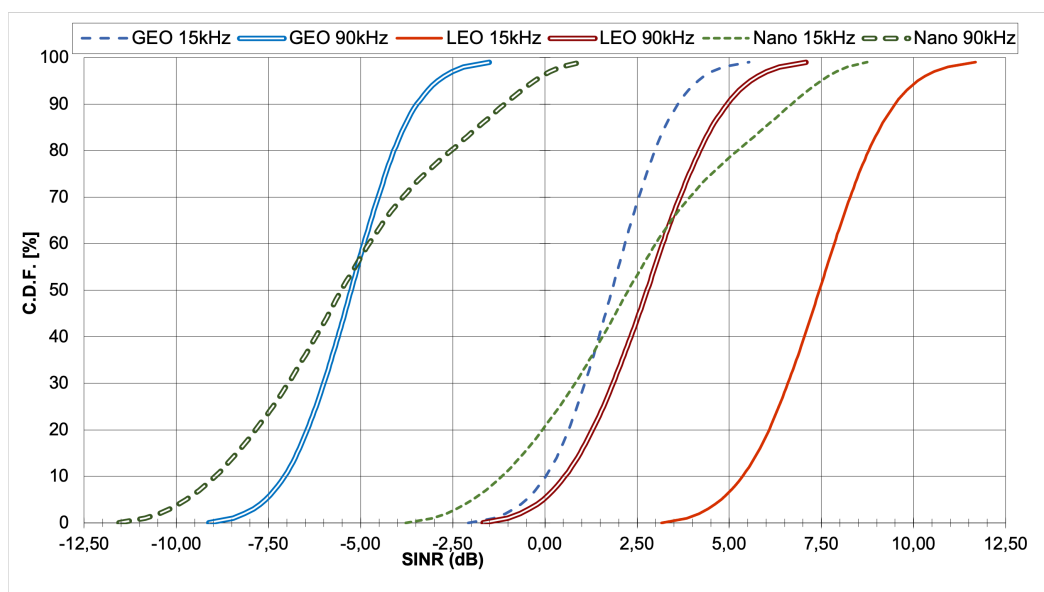


FIGURE 7.3 Distribution du SNR pour l'UL

7.2.2 Débit et débit agrégé couche MAC des cellules

Dans cette sous-section, nous évaluons les systèmes satellitaires en termes de débit par utilisateur et de débit agrégé du satellite.

Débit utilisateur maximal

Pour évaluer le débit par utilisateur, il est nécessaire de définir le niveau auquel nous souhaitons nous placer. La Figure 7.4 montre les distributions des débits atteignables pour l'UL dans le cas GEO avec une transmission sur 15 kHz. Les débits représentés par la figure sont déduits de la distribution de couverture calculée précédemment, on y voit deux types de débits : le débit physique et le débit au niveau du bloc de transport (TB) couche MAC. Ce dernier ne tient ici compte ni de la mise en place de la connexion ni de la limitation due à la taille de la fenêtre du processus HARQ (le 3GPP propose, en effet, d'augmenter cette taille dans le contexte satellite [32]).

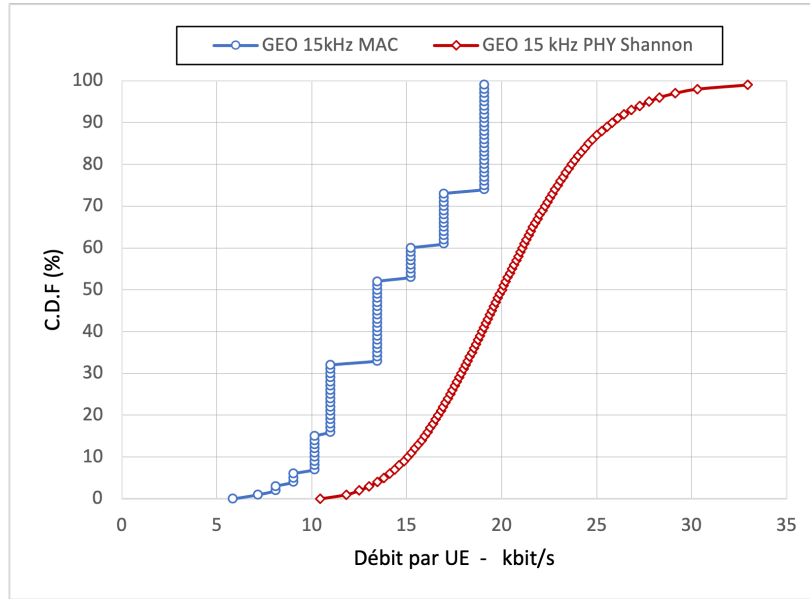


FIGURE 7.4 Différents types de débit

Pour le débit couche physique, nous avons considéré le théorème de Shannon qui se traduit dans notre cas par l'Équation 7.1.

$$D = B_w \times \log_2 \left(1 + 10^{\frac{SINR}{10}} \right) \quad (7.1)$$

où D est le débit théorique maximal en bit/s, B_w la largeur de la bande du canal d'émission en Hz et $SINR$ le rapport signal à bruit plus interférences (supposé constant sur tout le canal). C'est une limite supérieure qui est à la portée de ce que les MCS du 3GPP peuvent atteindre (en débit instantané couche physique).

En revanche, il y a une différence entre ce qui est techniquement réalisable et le débit réel que le protocole peut offrir pour transmettre de la charge utile. La différence entre les deux courbes s'explique par le fait que a) le nombre de MCS est limité (11 pour le *single-tone*, 14 pour le *multi-tone*), b) le terminal ne peut pas transmettre en continu, un TB a une taille finie (voir Tableau I.2), c) le module du terminal NB-IoT doit changer de mode (transmission/réception) à chaque nouvelle allocation de ressources (il y a une temporisation minimale) et d) le CRC doit être ajouté à chaque TB. Dans la suite de ce travail, nous considérons le débit au niveau MAC.

La Figure 7.5 montre le 5^{ème} percentile, la médiane et le 95^{ème} percentile de la distribution des débits UL par terminal en fonction de la largeur de bande de transmission et du scénario. Dans cette sous-section, nous n'avons pas considéré de procédure de communication particulière, les débits sont les maxima pouvant être atteints lorsque les terminaux sont connectés. Comme le montrent la Figure 7.2 et le Tableau H.1 en annexe, les SINR obtenus avec une largeur de bande de transmission de 15 kHz pour les cas LEO et Nano sont trop élevés pour une utilisation efficace avec les MCSs disponibles dans le NB-IoT. Une largeur de bande de transmission plus large peut être envisagée pour améliorer le débit (voir la Figure 7.5). En ce qui concerne

le cas GEO, l'utilisation d'une large bande passante de transmission nécessite de recourir à des répétitions pour atteindre les seuils MCS. Par conséquent, le débit UL augmente à peine lorsque la largeur de bande augmente et, comme nous le verrons pas la suite (Figure 7.7), ces répétitions abaissent l'efficacité spectrale et par conséquent réduisent le débit agrégé du faisceau.

Un point intéressant à observer est le fait que les débits médians dans les cas GEO et Nano ne dépassent pas les 20 kbit/s. Cela a un impact sur le type de services qui peut être fourni par ces systèmes. Cependant, pour les communications IoT, il n'est probablement pas nécessaire d'avoir un débit aussi élevé et, comme nous pouvons le voir sur la figure, 95% des utilisateurs GEO pourront atteindre 10 kbit/s et 95% des utilisateurs Nano pourront atteindre 5 kbit/s dans ces *scenarii*, ce qui est dans la norme des performances des technologies LPWANs. Nous notons également que la moitié des utilisateurs du scénario LEO ont atteint la limite supérieure de débit permise par le standard. Il serait donc possible d'envisager une transmission à 180 kHz pour améliorer le débit des utilisateurs dont les conditions de couverture sont excellentes. La centaine de kbit/s peut-être envisagée pour ces utilisateurs.

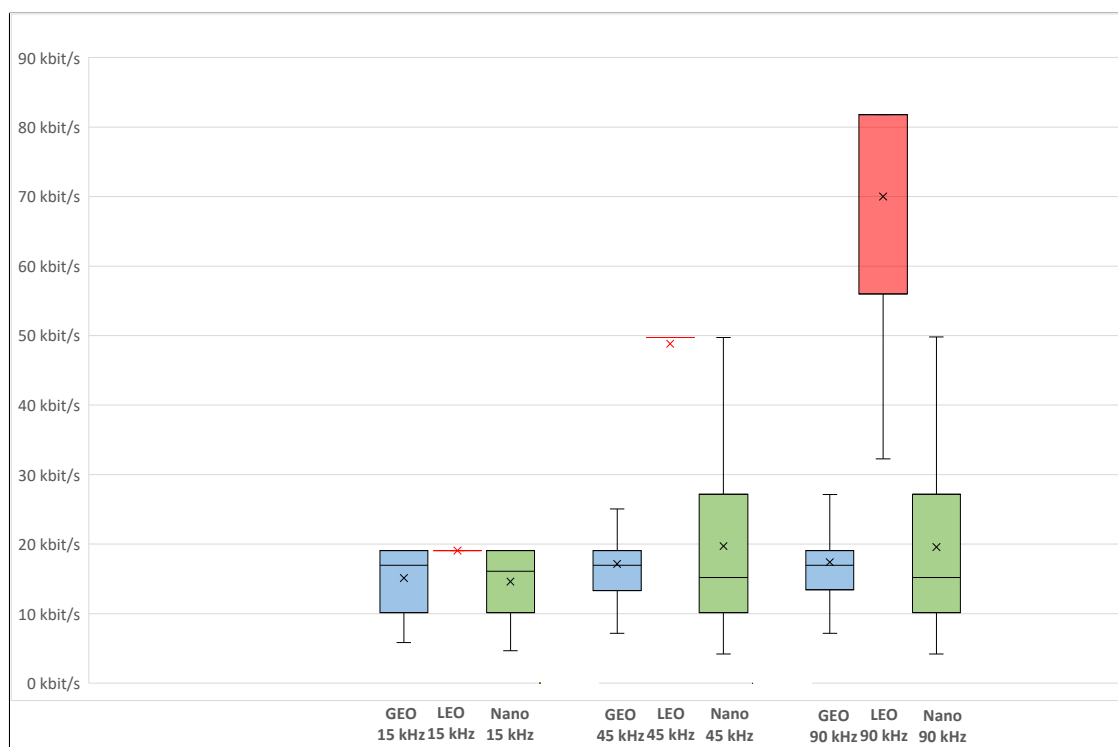


FIGURE 7.5 Distribution débits UL en fonction des *scenarii* et de la couverture

La Figure 7.6 montre le débit maximal DL des différents *scenarii*. Les faisceaux du satellite LEO sont les plus performants, suivis des faisceaux GEO puis de l'unique faisceau Nano (avec la plus mauvaise médiane mais le meilleur débit au centre du faisceau). Ces valeurs sont fortement liées au nombre de faisceaux choisi dans le tableau des caractéristiques du satellite. Par exemple, l'ajout de faisceaux pour le cas LEO diminuerait le débit par utilisateur (car on répartit la puissance RF) mais augmenterait le débit global. En outre, nous remarquons que

les débits descendants et montants des cas GEO et LEO sont équilibrés. C'est une bonne chose pour le NB-IoT, car il a été établi dans le Chapitre 4 que même pour les communications dont la charge utile est essentiellement UL, l'*overhead* de contrôle dans le DL est significatif.

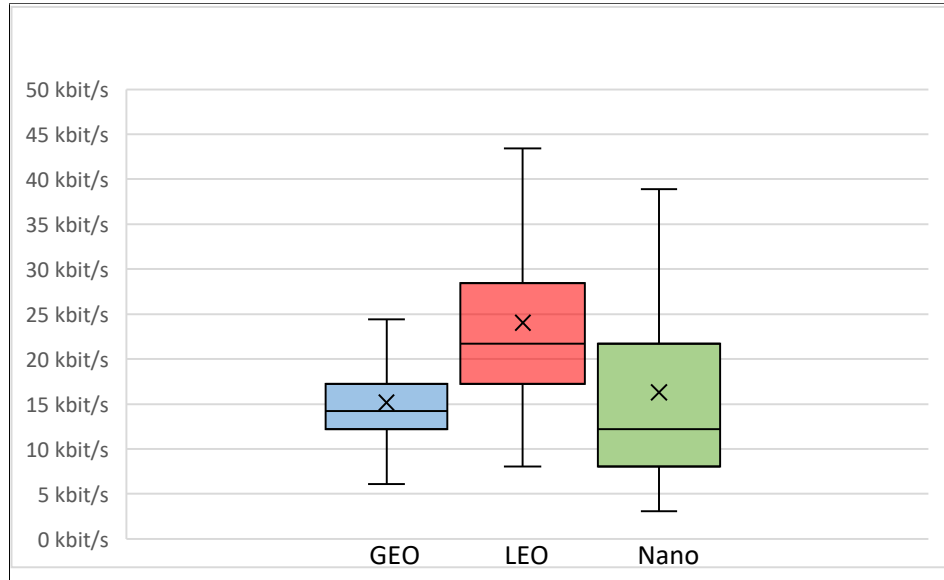


FIGURE 7.6 Distribution débits DL en fonction des *scenarii* et de la couverture

Débit agrégé moyen par cellule

Notre but est d'estimer les débits UL et DL. Pour cela nous avons besoin de connaître le débit par cellule (nous calculons une moyenne sur l'ensemble des cellules). Il est obtenu en sous-divisant la bande de la porteuse (PRB) en fonction de la largeur de la transmission pour obtenir le nombre d'utilisateurs simultanés (2 pour 90 kHz, 12 pour 15 kHz). Ensuite, la largeur de bande dans notre scénario est de 5 MHz par cellule (voir Tableau 7.1), il faut donc considérer 27 PRB de 180 kHz par cellule.

Le Tableau 7.5 rend compte de la part des ressources temps-fréquence dans le DL et le UL indisponibles pour envoyer de la donnée utile. Elle est constante en DL selon les *scenarii*. En UL, elle dépend entre autres des temps de garde introduits dans le précédent chapitre (Chapitre 6) pour pallier le problème du délai différentiel (valeurs dans le Tableau 7.3).

	GEO	LEO	Nano
DL (NPDCCH + NPBCH)	44%	44%	44%
UL (NPRACH)	35.5%	28.9%	29.6%

TABLE 7.5 Part des ressources physiques (temps-fréquence) non disponibles pour l'envoi de données utiles

La Figure 7.7 révèle un fait intéressant : si l'augmentation de la largeur de la bande de transmission UL permet aux utilisateurs d'obtenir un meilleur débit (Figure 7.5), elle est préjudiciable aux performances globales. En effet, l'utilisation d'une bande passante de

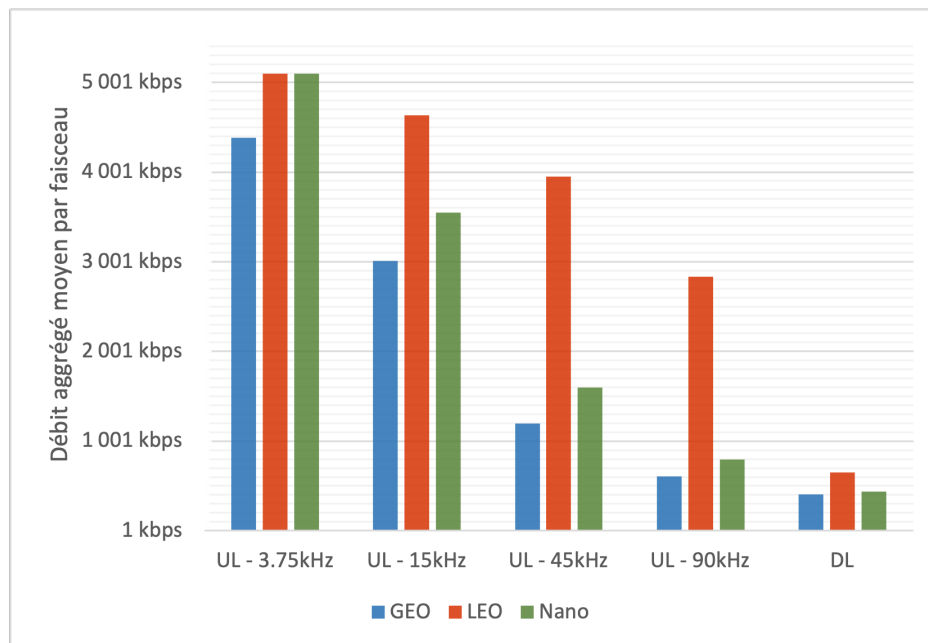


FIGURE 7.7 Débit agrégé moyen par faisceau en fonction des *scenarii* et du choix de la largeur de la bande de transmission

transmission plus étroite permet d'utiliser un MCS plus élevé et donc d'augmenter l'efficacité spectrale. Ainsi, l'utilisation d'une transmission *single-tone* de 3.75 kHz est plus efficace. En revanche, elle limite le débit utilisateur à 5.24 kbit/s. Ce compromis est clairement mis en évidence quand on compare la Figure 7.5 et la Figure 7.7. En revanche, l'utilisation d'une bande plus étroite allonge la transmission (simple proportionnalité), ce qui peut nuire à la durée de vie de la batterie.

Débit agrégé maximal par satellite

Pour obtenir le débit agrégé maximal par satellite, on multiplie les résultats précédents par le nombre de cellules. En effet, les résultats de la section précédente sont une moyenne sur tous les faisceaux de chaque satellite. Le Tableau 7.6 montre les débits agrégés maximaux atteignables par satellite selon les *scenarii*.

	GEO	LEO	Nano
DL	135 Mbit/s	59 Mbit/s	440 kbit/s
UL - 3.75kHz	1 450 Mbit/s	439 Mbit/s	4.7 Mbit/s

TABLE 7.6 Débit agrégé maximal par satellite selon les *scenarii*

Dans le Tableau 7.6, nous avons considéré des transmissions sur 3.75 kHz pour obtenir la borne haute du débit atteignable en UL. Comme cela a été illustré précédemment, cela veut dire qu'il faut faire une concession sur le débit au niveau de l'utilisateur (au maximum 5.24 kbit/s).

7.2.3 Capacité moyenne par cellule/satellite

Dans cette étude des performances, nous n'avons jusqu'à présent pas utilisé nos modèles. Nous avons fait une analyse haut niveau qui ne considère pas de scénario de trafic. Nous allons à présent étudier la capacité de ces *scenarii* satellites en termes de densité de connexion à l'aide du modèle introduit dans le Chapitre 4.

Tout d'abord, le Tableau 7.7 définit le trafic considéré dans notre évaluation de la capacité dans les *scenarii* satellites.

θ – Charge utile UL / DL	32 octets / 0 octets
I – Intervalle entre les communications	2h
Procédure de communication	UP-EDT

TABLE 7.7 Trafic dans le cadre de l'évaluation de la capacité des *scenarii* satellite

La première ligne du Tableau 7.8 donne le nombre moyen de communications par seconde pouvant être traitées dans un PRB (180 kHz) avec une fiabilité de 99% d'après notre modèle – ce nombre est noté λ_{max} dans le Chapitre 4. On obtient ainsi le nombre de terminaux pouvant se trouver sous la couverture d'un satellite sachant que nous considérons 27 PRBs par cellule et plusieurs cellules selon le scénario. La capacité en termes de densité de connexion peut enfin être calculée (dernière ligne).

Performances	GEO	LEO	Nano
λ_{max} – com/s par PRB (moyenné sur les cellules)	41.76	73.43	34.98
Nombre maximal de terminaux par satellite	2.68×10^9	1.29×10^9	6.80×10^6
Capacité – Densité de connexion (UEs/km ²)	19.5	191	3.34

TABLE 7.8 Densité de connexion des *scenarii* satellites envisagés en considérant le trafic du Tableau 7.7

De nos résultats, plusieurs observations peuvent être faites :

Observation 1 : Dans les trois *scenarii* satellites considérés, le lien DL limite la capacité.

Observation 2 : Les densités de connexion sont largement en-deçà des attentes du segment 5G-mMTC (10^6 , voir Tableau 2.1). Le NB-IoT par satellite ne pourra pas répondre à la demande en connexion prévue sans soutien de réseaux terrestres.

7.2.4 Durée de vie d'un terminal

Nous utilisons notre modèle présenté en Chapitre 5 pour calculer les durées de vie des terminaux sur batterie présentées dans la Figure 7.8.

De nos résultats, plusieurs observations peuvent être faites :

Observation 1 : L'utilisation du GPS est très pénalisante (satellites en orbites basses LEO ou Nano). Dans ces deux cas, il n'est pas possible pour les terminaux d'atteindre l'exigence mMTC des 10 ans.

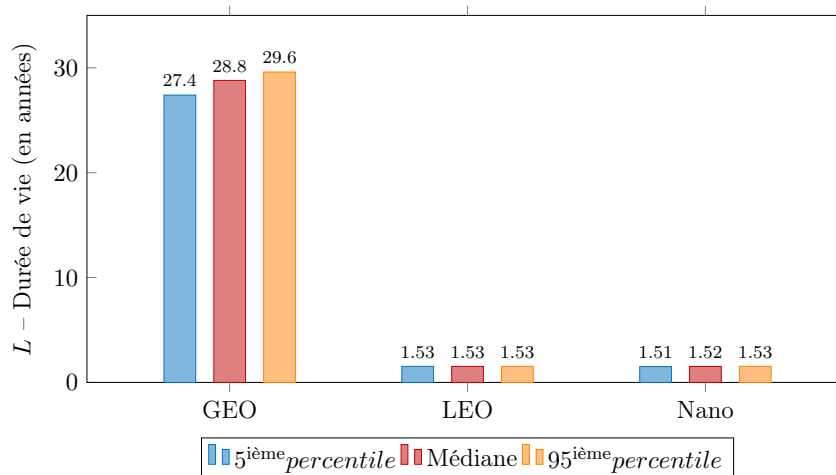


FIGURE 7.8 Durée de vie de la batterie des terminaux en fonction de leur couverture et du scénario.

Observation 2 : Dans le cas GEO, la couverture est suffisamment bonne pour permettre à la grande majorité des terminaux de dépasser l'exigence mMTC. C'est d'autant plus étonnant que l'UE est très loin du satellite. La transmission bande étroite et la grande antenne du satellite permettent de recevoir la puissance de signal au niveau de ce qui est attendu dans le terrestre (voir Figure 7.3).

Observation 3 : Contrairement à la distribution des durées de vie dans les cellules terrestres, il n'y a pas de grandes disparités entre la consommation en bord de cellule et au centre dans le contexte satellite.

7.3 Comparaison des constellations de satellites

La comparaison est divisée en deux parties. La première détaille notre méthodologie et les paramètres que nous utiliserons pour pondérer l'efficacité des déploiements des systèmes complets. La seconde partie est composée des résultats et de notre analyse. Le critère principal que nous souhaitons étudier est le coût par communication.

7.3.1 Méthodologie de passage à l'échelle du globe

Afin de comparer les différents *scenarii*, définissons le nombre de satellites à déployer. Pour une couverture globale des zones habitées, pour les systèmes GEO, la seule option est d'utiliser 3 satellites GEO. Pour les systèmes en orbite basse, il peut y avoir soit a) une couverture continue, soit b) une couverture éparse entraînant une rétention des communications (les terminaux attendent le passage du satellite). La deuxième option n'est pas adaptée à tous les types de services mais peut être envisagée pour les services IoT qui ont en général moins d'exigences vis-à-vis de la latence. Nous allons donc définir deux sous-cas pour ces *scenarii* : un cas de couverture complète et un cas de couverture éparse.

Nous avons étudié le débit de nos cellules satellite, leur capacité et la durée de vie des terminaux selon leur couverture dans la section précédente. Nous allons étudier à présent un critère qui peut sembler le moins technique mais qui est pourtant un des plus gros moteurs lorsqu'il faut faire un choix entre différentes solutions techniques : la rentabilité. À montants investis équivalents, quel système est le plus performant ? La difficulté est de définir le coût correct de chaque satellite, alors que dans chacune des trois catégories ils peuvent varier du simple au double en fonction de la taille du satellite, de sa puissance, de sa durée de vie etc.... Les coûts que nous considérons sont cohérents avec les systèmes satellitaires décrits dans ce document. Un ordre de grandeur approximatif du coût par satellite pour chaque système est donné dans le Tableau 7.9.

Paramètre	GEO	LEO	Nano
Coût du segment satellite [144, 145]	300 M€	8 M€	150 k€
Coût du lancement - €/kg	10 000	3 000	3 000
Durée de vie en années [146, 147]	15	7	5
Taux d'utilisation	80 %	25 %	25 %

TABLE 7.9 Base de comparaison entre les *scenarii* satellites

Enfin, pour que les déploiements soient considérés dans leur globalité, deux autres paramètres doivent être pris en compte : la durée de vie des satellites et leur taux d'utilisation. Tout d'abord, les systèmes n'ont pas la même espérance de vie. Les satellites GEO durent généralement plus longtemps que les LEO, notamment en raison d'un cycle de batterie moins long et d'une protection électronique plus importante. Pour le deuxième critère, les satellites en orbite basse ne passent pas toujours au-dessus de zones de service (comme les océans ou les pôles), leur capacité ne peut donc pas être utilisée à tout moment. De leur côté, les satellites GEO ne sont pas en mouvement et peuvent adapter la position des cellules aux formes des continents et de la demande. C'est pourquoi nous allons considérer un ratio d'utilisation par scénario tenant compte de la perte de capacité due à la distribution des utilisateurs et au chevauchement des faisceaux. Le Tableau 7.9 résume nos hypothèses relatives à la durée de vie et au taux d'utilisation.

Les valeurs prises dans le Tableau 7.9 reflètent notre connaissance de la situation actuelle sur le marché des satellites. Notre travail fournit une méthodologie solide pour comparer les systèmes satellitaires NB-IoT et chacun est libre d'intégrer les valeurs spécifiques de ses *scenarii* système pour tirer ses propres conclusions.

7.3.2 Étude du coût par terminal

La comparaison présentée dans le Tableau 7.10 révèle plusieurs résultats intéressants. Tout d'abord, le scénario LEO à couverture complète fournit la plus grande capacité en termes de communications par seconde, et cela en tenant compte d'une grande quantité de capacité perdue en raison d'un taux d'utilisation particulièrement bas comparé à la constellation GEO. En revanche, la couverture complète LEO s'avère la plus coûteuse, bien que plus rentable par communication. L'utilisation d'un système LEO épars peut être une solution appropriée car

Critère	GEO	LEO complet	LEO épars	Nano complet	Nano épars
Nombres de satellites	3	144	24	220	12
Coût constellation par an	70 M€	189 M€	15.7 M€	5.72 M€	640 k€
Nombre de terminaux	6.45×10^9	4.68×10^{10}	3.90×10^9	3.74×10^8	4.08×10^7
Coût par message (€)	2.45×10^{-6}	9.23×10^{-7}		3.48×10^{-6}	

TABLE 7.10 Comparaison des *scenarii* de constellation

il réduit le coût global du système tout en conservant son efficacité par rapport au coût par message.

Ensuite, les constellations Nano sont les solutions les moins onéreuses à mettre en place et constituent un bon point de départ lorsque le nombre de communications à traiter par le système est faible (voir par la suite la Figure 7.9).

Enfin une constellation GEO offre une solution intéressante, plus efficace que le Nano en termes de coût par message, moins onéreuse qu'une constellation LEO complète. En outre son plus grand atout a été démontré dans la section précédente : la durée de vie d'un UE est largement supérieure.

Enfin, il ne faut pas oublier que ces coûts ne sont valables que si la demande correspond à la capacité de l'ensemble de la constellation. C'est pourquoi tant de solutions Nano sont lancées. Elles sont plus rentables lorsque le pic de communications par seconde approche les quelques milliers. La Figure 7.9 met en lumière cet effet d'échelle.

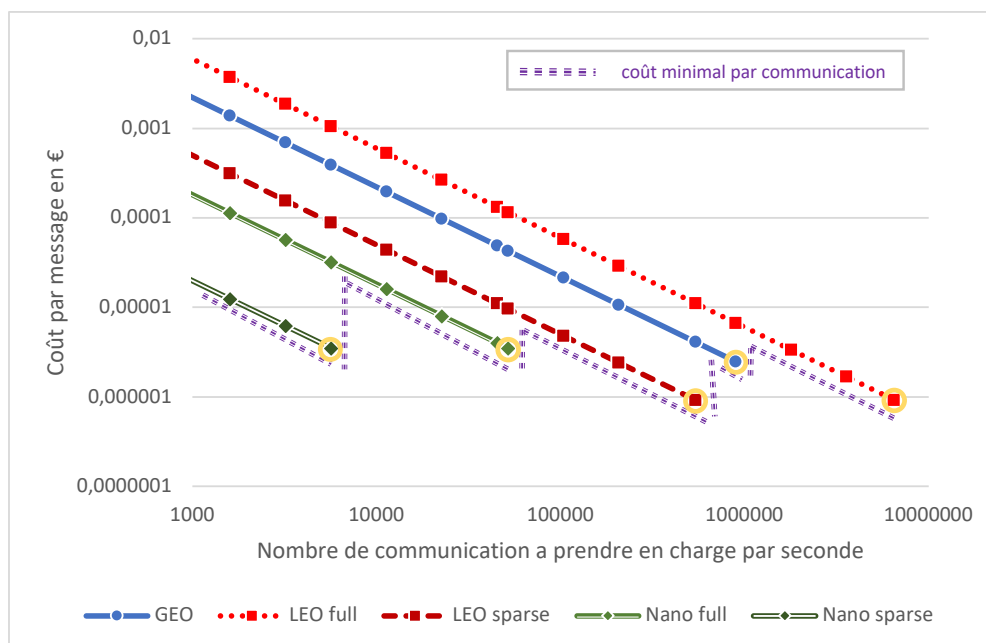


FIGURE 7.9 Comparaison du coût de la communication en fonction de la demande.

Pour un petit nombre de communications, les nanosatellites sont moins chers, ce qui compense leurs faibles performances. Il semble préférable d'utiliser une constellation Nano

éparse jusqu'à 5 600 communications par seconde, puis un système Nano complet jusqu'à 52 000 communications par seconde, puis un système LEO éparse jusqu'à 541 000 communications par seconde, puis le système GEO jusqu'à 900 000 communications par seconde et, enfin, la plus grande capacité est atteinte avec un système LEO à couverture complète qui permet de gérer jusqu'à 6.5 millions de communications par seconde.

7.4 Conclusion sur les systèmes de communication NB-IoT par satellite

Dans ce chapitre, nous avons démontré que les communications NB-IoT par satellite sont possibles. Les répétitions et l'émission en bande étroite particulière au NB-IoT permettent de conserver un bilan de liaison suffisant.

Aucun des trois *scenarii* satellite étudiés ne permet d'atteindre l'exigence mMTC vis-à-vis de la densité de connexion, en cause, la taille des cellules dans le cadre satellite. Côté dépense énergétique, l'utilisation nécessaire du GPS dans les *scenarii* en orbite basse plombe la durée de vie sur batterie. Nos travaux permettent de souligner que seuls les *scenarii* avec satellites géostationnaires sont capables d'atteindre l'exigence mMTC pour la durée de vie sur batterie.

Aussi, nous avons pu étudier différents *scenarii* pour le déploiement de constellation. La possibilité laissée aux utilisateurs de se déconnecter pour un long moment dans le protocole NB-IoT permet de considérer des constellations éparsees, moins onéreuses et donc plus adaptées aux services IoT. Nous avons montré qu'en fonction du nombre total de terminaux, on peut déterminer le type de constellation la plus efficace pour répondre à la demande.

Enfin, le déploiement d'une constellation GEO ou LEO uniquement pour le NB-IoT semble onéreux si la demande n'est pas élevée (proche du million de communications par seconde). Cependant, elles sont en général lancées pour couvrir plusieurs types de services et dans un scénario pratique, trois satellites GEO ou 144 satellites LEO ne seraient pas déployés pour un seul service IoT sur une bande de 15 MHz.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion

Le paradigme de l'IoT a bouleversé le monde des télécommunications. Les technologies traditionnelles du monde des réseaux mobiles et sans fil ont montré des difficultés à répondre efficacement aux spécificités des communications IoT (nombre de terminaux, faible volume de données, équipements avec une grande espérance de vie mais contraints en énergie). Plusieurs technologies candidates ont vu le jour parmi lesquelles les réseaux à faible puissance et à longue portée (LPWAN). Dans cette famille, nous nous sommes focalisés sur le NB-IoT issu des standards 3GPP. Les nombreuses particularités de ce protocole (bande étroite, répétitions, mécanismes d'économies d'énergie, optimisation de la connexion) en font le candidat favori pour répondre aux exigences des futurs réseaux 5G. C'est dans ce contexte que l'évaluation de leurs performances est cruciale.

Dans nos travaux, nous nous sommes focalisés sur deux critères de performance clés des réseaux IoT : la capacité en termes de terminaux par km^2 et la durée de vie des terminaux sur batterie. Dans une première partie, nous avons développé des modèles analytiques de l'utilisation des ressources temps/fréquence en nous fondant sur la théorie des files d'attente. Ces modèles permettent d'étudier le fonctionnement du NB-IoT et notamment de révéler comment le protocole réagit lorsque la charge de la cellule augmente. Nous avons montré le coût des échanges protocolaires lors de la mise en place de la connexion dans la limitation de la capacité des réseaux NB-IoT et avons évalué l'intérêt d'utiliser la procédure EDT introduite dans la Release 15 (2018). Elle permet d'atteindre l'exigence 5G-mMTC en termes de densité de connexion (1 million terminaux/ km^2).

Nous avons ensuite étendu ces modèles pour analyser la consommation énergétique des communications NB-IoT. Ils nous ont permis de valider une partie des scénarii du segment 5G-mMTC et de montrer que les terminaux dans les conditions de couverture extrêmes n'atteignent pas une durée de vie de 10 ans. Le couplage de notre modèle énergétique avec le modèle d'utilisation des ressources nous a permis d'approfondir l'analyse de la durée de vie du terminal en fonction de la charge. Ce faisant, nous avons découvert un effet de bord sur canal de contrôle sur le lien descendant qui engendre une consommation d'énergie importante lorsque la charge de la cellule augmente. Enfin, nous avons proposé une solution pour pallier ce problème et évalué son impact sur les autres critères de performance (capacité et latence).

Pour le cas satellite, nous avons détaillé les adaptations nécessaires au bon fonctionnement

du protocole et leur impact sur les performances des réseaux NB-IoT. Nos travaux ont montré qu'une partie des attentes vis-à-vis du NB-IoT pouvait être remplie pour les futurs réseaux 5G et ont mis en lumière des axes d'amélioration (avec des propositions de solution).

Après avoir étudié les défis du cadre des réseaux terrestres, nous avons détaillé ceux qui apparaissent parallèlement dans le cadre des communications par satellite. Les évolutions majeures de ces dernières années dans le domaine spatial permettent d'envisager des communications directes entre terminaux et satellites. Or la couverture étendue des satellites et leur facilité d'établir des communications qui traversent les frontières sont des aspects qui intéressent particulièrement le monde des réseaux IoT. L'étude de l'intégration du NB-IoT au contexte satellite apparaît donc comme nécessaire et d'autant plus intéressante qu'elle concerne la ré-utilisation des infrastructures et des terminaux du 3GPP. Nous avons ainsi décrit les adaptations nécessaires au protocole NB-IoT pour permettre son utilisation dans ce cadre particulier. Puis, nous avons montré l'impact du contexte spatial dans la modélisation de la capacité et de la consommation énergétique.

En adaptant nos modèles, nous avons étudié des scénarii de déploiement de réseaux NB-IoT sous forme de constellations de satellites variées : géostationnaire, orbite basse et nanosatellite. Nos travaux permettent de comparer ces différents types de déploiement et donnent les lignes directrices de conception de réseaux NB-IoT spatiaux.

La bataille entre opérateurs IoT, qu'ils soient terrestres ou satellite est à ses débuts. Parmi la centaine de solutions lancées dans le contexte spatial [24], celles qui verront le jour seront celles qui auront su produire une technologie s'adaptant à ce dernier. Notre travail est une contribution significative qui permet l'amélioration des performances des réseaux NB-IoT tant dans la conception de ces systèmes que dans leur dimensionnement.

Perspectives

Nos travaux couvrent un large spectre d'études (terrestre/satellite, capacité/durée de vie, modèle des collisions/modèles des congestions, cellule/constellation), il est donc possible d'envisager des perspectives d'amélioration. Nous allons classifier ces perspectives en deux catégories, i) les champs d'études envisageables avec nos modèles ou qui nécessitent des améliorations pour étudier des sujets encore hors d'atteinte avec nos travaux actuels et ii) les modélisations nécessaires pour le futur des communications IoT spatiales qui pourraient se joindre à celles développées dans nos travaux.

Tout d'abord, nos modèles permettent de rendre compte de l'utilisation des ressources de la couche PHY/MAC dans le NB-IoT. Voici des pistes de recherches envisageables.

A l'aide de nos modèles, nous pouvons considérer une distribution des charges utiles plutôt qu'un trafic homogène. Il pourrait également être utile de considérer des tailles de cellules plus importantes pour le cas terrestre afin de comparer les performances aux autres technologies LPWAN. Enfin, un mécanisme de contrôle de charge lorsque la charge de la cellule devient trop importante pourrait être utilisé pour garantir une bonne fiabilité (à travers le nombre de tentatives).

La deuxième partie des perspectives pourrait être consacrée à l'amélioration de nos modèles. On pourrait ainsi incorporer du BLER, sujet d'autant plus intéressant que nos expériences ont montré l'utilité de modifier les seuils de BLER dans le cadre des communications par satellite. Enfin, il pourrait être également intéressant de prendre en compte l'imperfection des algorithmes d'allocation des ressources temps/fréquence dans la modélisation des files d'attente (problème NP-complet).

Par ailleurs, nos travaux nous ont permis d'entrevoir d'autres sujets d'études pertinents dans le cadre des communications IoT et en particulier les communications spatiales.

Tout d'abord, l'hybridation satellite/terrestre peut être envisagée. Un même terminal NB-IoT pourrait accéder aux réseaux terrestres et satellite. C'est la suite logique de l'adaptation. Des problèmes classiques apparaissent alors : *handovers*, priorité, partage de fréquence. Il serait important de les revisiter dans ce contexte. Ensuite, un grand nombre de technologies IoT sont à l'heure actuelle en phase de déploiement et leur co-existence est un sujet à étudier. Plus particulièrement, parmi les technologies en bande libre, LoRaWAN est celle qui est la plus largement étudiée dans le domaine spatial (notamment à Airbus). Il faudrait approfondir et reprendre des études d'interconnexion et d'interopérabilité de ces réseaux. Par exemple, la question d'une architecture réseau spécifique ou générique à tous les services IoT se pose. Par ailleurs, comme nous l'avons montré dans cette thèse, les constellations sont rentables si un grand nombre de terminaux les utilisent. Le sujet des satellites avec traitement à bord est donc intéressant pour permettre une couverture mondiale dès la mise en orbite du premier satellite (stockage des messages à bord). La problématique est d'autant plus complexe quand il s'agit d'une technologie 3GPP (le satellite doit embarquer une partie du cœur de réseau). Pour finir, le NB-IoT permet d'atteindre des zones de couverture extrême (grâce à sa transmission bande étroite, ses répétitions et ses MCS). Il est donc envisagé d'y avoir recours dans le cadre des communications spatiales aux conditions inhabituelles, en particulier des communications que la plupart des technologies terrestres ne sont pas capables d'assurer. C'est le cas pour les communications entre satellite – Inter-Satellite Links (ISL) – et pour les réseaux de capteurs dans les futures bases sur la Lune ou Mars.

PUBLICATIONS

Conférences internationales

- R. Barbau, V. Deslandes, G. Jakllari, J. Tronc, J.-F. Chouteau, and A.-L. Beylot, “Nb-iot over geo satellite: Performance analysis,” in *IEEE 10th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 16th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC 2020)*, pp. 1–8, 2020
- R. Barbau, V. Deslandes, G. Jakllari, J. Tronc, and A.-L. Beylot, “An analytical model for assessing the performance of nb-iot,” in *IEEE International Conference on Communications (ICC 2021)*, pp. 1–6, 2021
- R. Barbau, V. Deslandes, G. Jakllari, and A.-L. Beylot, “An analytical model for evaluating the interplay between capacity and energy efficiency in nb-iot,” in *IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN 2021)*, pp. 1–9, 2021
- R. Barbau, V. Deslandes, G. Jakllari, and A.-L. Beylot, “Performance evaluation of different 5g nb-iot satellite systems,” in *38th International Communication and Satellite Systems Conference and 26th Ka Broadband Communication Conference (ICSSC/Ka Conf 2021)*, pp. 1–8, 2021

BIBLIOGRAPHIE

- [1] K. A. Patil and N. R. Kale, "A model for smart agriculture using iot," in *2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC)*, pp. 543–545, 2016.
- [2] Z. Yan and H. Gang, "Design of intelligent water metering system for agricultural water based on nb-iot," in *2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, pp. 1665–1669, 2019.
- [3] A.-J. Garcia-Sanchez, F. Garcia-Sanchez, and J. Garcia-Haro, "Wireless sensor network deployment for integrating video-surveillance and data-monitoring in precision agriculture over distributed crops," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 75, no. 2, pp. 288–303, 2011.
- [4] W. Manatarinat, S. Poomrittigul, and P. Tantatsanawong, "Narrowband-internet of things (nb-iot) system for elderly healthcare services," in *2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, pp. 1–4, 2019.
- [5] T. Gao, D. Greenspan, M. Welsh, R. Juang, and A. Alm, "Vital signs monitoring and patient tracking over a wireless network," in *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, pp. 102–105, 2005.
- [6] B. Chen, J. Wan, L. Shu, P. Li, M. Mukherjee, and B. Yin, "Smart factory of industry 4.0 : Key technologies, application case, and challenges," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 6505–6519, 2018.
- [7] J. Costa, D. Araújo, D. R. C. Silva, M. B. Nogueira, and M. C. Rodrigues, "Home automation architecture based on iot technologies," in *2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT*, pp. 63–67, 2018.
- [8] W.-Z. Song, R. Huang, M. Xu, B. Shirazi, and R. LaHusen, "Design and deployment of sensor network for real-time high-fidelity volcano monitoring," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 21, no. 11, pp. 1658–1674, 2010.
- [9] L. Grasset, "L'internet des animaux du futur," September 2021. https://www.youtube.com/watch?v=rwAKMs_54pI, accessed : 09-09-2021.
- [10] C.-Y. Chong and S. Kumar, "Sensor networks : evolution, opportunities, and challenges," *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 8, pp. 1247–1256, 2003.
- [11] Cisco, "The zettabyte era : Trends and analysis, cisco white paper," 2016.
- [12] Ericsson, "Ericsson mobility report," May 2016.
- [13] A. Holst, "Number of internet of things (iot) connected devices worldwide from 2019 to 2030," August 2021. <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>, accessed : 08-09-2021.

- [14] Telegeography, "Cellular subscribers to hit 9 billion in 2026," April 2020. <https://blog.telegeography.com/cellular-subscribers-to-hit-9-billion-in-2026>, accessed : 08-09-2021.
- [15] P. Lescuyer and T. Lucidarme, *Evolved Packet System (EPS) : The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS*. Wiley Publishing, 2008.
- [16] "Sigfox's website – main page." <https://www.sigfox.com>. accessed : 2021-08-23.
- [17] "Lorawan alliance's website – main page." <https://lora-alliance.org>. accessed : 2021-08-23.
- [18] authored by GSMA Intelligence, "Cellular m2m forecasts and assumptions : 2010–2020," September 2014.
- [19] ITU, "Framework and overall objectives of the future development of imt for 2020 and beyond," September 2015.
- [20] R. Ratasuk, N. Mangalvedhe, Y. Zhang, M. Robert, and J. Koskinen, "Overview of narrowband iot in lte rel-13," in *2016 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, pp. 1–7, 2016.
- [21] A. Høglund, X. Lin, O. Liberg, A. Behravan, E. A. Yavuz, M. Van Der Zee, Y. Sui, T. Tirronen, A. Ratilainen, and D. Eriksson, "Overview of 3gpp release 14 enhanced nb-iot," *IEEE Network*, vol. 31, no. 6, pp. 16–22, 2017.
- [22] "Esa's website – main page." <https://www.arianespace.com>. accessed : 2021-08-24.
- [23] "SpaceX's website – main page." <https://www.spacex.com>. accessed : 2021-08-24.
- [24] "Satellite markets' article : Is 2021 the year smallsat iot take off?." <http://satellitemarkets.com/news-analysis/2021-year-smallsat-iot-takes>. Accessed : 2021-09-01.
- [25] J. Tristanchó, "Implementation of a femto-satellite and a mini-launcher", master's thesis, universitat politècnica de catalunya," 05 2010.
- [26] "Inmarsat's website : Inmarsat-actility deliver worlds first global lorawan iot network empowering business applications." <https://www.inmarsat.com/en/news/latest-news/enterprise/2017>. accessed : 2021-08-24.
- [27] M. Janine E., "Design world's website : Why the internet of things won't survive without satellite." <https://www.designworldonline.com/why-the-internet-of-things-iot-wont-survive-without-satellite>. accessed : 2021-08-24.
- [28] "Lacuna space's website – main page." <https://lacuna.space>. accessed : 2021-08-24.
- [29] "Airbus's publication about unit." <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2021/05/Delivering-Internet-of-Things-IoT-services-worldwide.html>. accessed : 2021-08-24.
- [30] V. Deslandes, "Analyse et optimisation du partage de spectre dans les systèmes mobiles intégrés satellite et terrestres." <https://oatao.univ-toulouse.fr/8301/>, June 2012.
- [31] 3GPP, "Technical specification group radio access network ; study on new radio (nr) to support non-terrestrial networks(release 15)," September 2019.
- [32] 3GPP, "Technical specification group radio access network ; solutions for new radio (nr) to support non-terrestrial networks (ntn) (release 16)," January 2020.

- [33] 3GPP, “Tr-37.910. study on self evaluation towards imt-2020 submission,” October 2019.
- [34] 3GPP, “Connectiondensity - urbanmacro-mmmtc.” https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.910/, 2017. accessed 03/09/2021.
- [35] B. Ahlgren, M. Hidell, and E. C.-H. Ngai, “Internet of things for smart cities : Interoperability and open data,” *IEEE Internet Computing*, vol. 20, no. 6, pp. 52–56, 2016.
- [36] J.-E. Kim, M. Bessho, N. Koshizuka, and K. Sakamura, “Enhancing public transit accessibility for the visually impaired using iot and open data infrastructures,” in *Proceedings of the First International Conference on IoT in Urban Space*, p. 80–86, ICST, 2014.
- [37] B. A. Olshausen and D. J. Field, “Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images,” 1996.
- [38] M. Beckenkamp, “The herd moves ? emergence and self-organization in collective actors,” 2006.
- [39] G. International Seminar, Dagstuhl Castle, “Embodied artificial intelligence,” 2003.
- [40] L. Atzori, A. Iera, G. Morabito, and M. Nitti, “The social internet of things (siot) – when social networks meet the internet of things : Concept, architecture and network characterization,” *Computer Networks*, vol. 56, no. 16, pp. 3594–3608, 2012.
- [41] B. Afzal, M. Umair, G. Asadullah Shah, and E. Ahmed, “Enabling iot platforms for social iot applications : Vision, feature mapping, and challenges,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 92, pp. 718–731, 2019.
- [42] V. Saiz-Rubio and F. Rovira-Más, “From smart farming towards agriculture 5.0 : A review on crop data management,” *MDPI - Agronomy Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 1–6, 2020.
- [43] P. Bamurigire, A. Vodacek, A. Valko, and S. Rutabayiro Ngoga, “Simulation of internet of things water management for efficient rice irrigation in rwanda,” *MDPI - Agriculture Journal*, vol. 10, no. 10, pp. 1–6, 2020.
- [44] Airbus, “Pléiades neo trusted intelligence,” August 2021. <https://www.intelligence-airbusds.com/imagery/constellation/pleiades-neo>, accessed : 09-09-2021.
- [45] Argos, “Main webpage.” <https://www.argos-system.org/fr>, accessed : 09-09-2021.
- [46] C. Garcia-Montero, “Marché de l’iot en france : tous les chiffres,” May 2021. <https://www.journaldunet.fr>, accessed : 09-09-2021.
- [47] R. S. Cabrera and A. P. de la Cruz, “Public transport vehicle tracking service for intermediate cities of developing countries, based on its architecture using internet of things (iot),” in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 2784–2789, 2018.
- [48] Insee, “Tableaux de l’économie française,” February 2018. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3303545?sommaire=3353488>, accessed : 09-09-2021.
- [49] J. Huang, F. Qian, A. Gerber, Z. M. Mao, S. Sen, and O. Spatscheck, “A close examination of performance and power characteristics of 4g lte networks,” in *10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys ’12*, p. 225–238, ACM, 2012.

- [50] A. Millot, *Etude d'un réseau de capteurs environnementaux en bande ISM*. Theses, Université d'Orléans, June 2010.
- [51] S. B. Weinstein, "The history of orthogonal frequency-division multiplexing [history of communications]," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 11, pp. 26–35, 2009.
- [52] ITU-R, "Imt vision – framework and overall objectives of the future development of imt for 2020 and beyond," September 2015.
- [53] ITU, "Minimum requirements related to technical performance for imt-2020 radio interface(s)," November 2017.
- [54] ITU, "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for imt-2020," October 2017.
- [55] ITU, "The general development trends of iot," December 2017.
- [56] 3GPP, "Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput internet of things," October 2016.
- [57] D. Hanes, G. Salgueiro, P. Grossetete, R. Barton, and J. Henry, *IoT Fundamentals : Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things*. Cisco Press, 2017.
- [58] 3GPP, "Study on provision of low-cost machine-type communications (mtc) user equipment (ues) based on lte," June 2013.
- [59] 3GPP, "Architecture description, 3gpp std," December 2017.
- [60] H. Fattah, *5G LTE Narrowband Internet of Things (NB-IoT)*. CRC Press, 2019.
- [61] P. Nicopolitidis, P. Salva-Garcia, J. M. Alcaraz-Calero, Q. Wang, J. B. Bernabe, and A. Skarmeta, "5g nb-iot : Efficient network traffic filtering for multitenant iot cellular networks," vol. Hindawi - Security and Communication Networks, December 2018.
- [62] 3G4G, "Beginners : Introduction to nr-light a.k.a. nr-lite." <https://www.youtube.com/watch?v=mFaBw6hGV4w>, accessed : 19-10-2021.
- [63] 3GPP, "3gpp's website for release 17." <https://www.3gpp.org/release-17>. Accessed : 2021-09-02.
- [64] Ericsson, "Work item : New sid on support of reduced-complexity nr-light devices," December 2019.
- [65] G. W. Pro, "5g nr light in release 17." <https://www.5gworldpro.com/5g-knowledge/5g-nr-light-in-release-17.html>". accessed : 2021-09-01.
- [66] LoRa-Alliance, "What is lorawan ? a technical overview of lora and lorawan.." <https://loro-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>, accessed : 03-09-2021.
- [67] M. Lauridsen, H. Nguyen, B. Vejlgaard, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, and M. Sorensen, "Coverage comparison of gprs, nb-iot, lora, and sigfox in a 7800 km² area," in *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1–5, 2017.
- [68] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands : the rising stars in the iot and smart city scenarios," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 60–67, 2016.
- [69] Sigfox, "Sigfox's subscription plan webpage," March 2019. <https://buy.sigfox.com/buy/offers/FR>, accessed : 07-09-2021.

- [70] G. C. Madueño, J. J. Nielsen, D. M. Kim, N. K. Pratas, C. Stefanovic, and P. Popovski, "Assessment of LTE Wireless Access for Monitoring of Energy Distribution in the Smart Grid," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, pp. 675–688, March 2016.
- [71] S. Böcker, C. Arendt, P. Jörke, and C. Wietfeld, "Lpwan in the context of 5g : Capability of lorawan to contribute to mmtc," in *IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT 2019)*, pp. 737–742, 2019.
- [72] Sigfox, "White paper sigfox - présentation technique de sigfox." <https://lms.fun-mooc.fr>, accessed : 05-10-2021.
- [73] L. Casals, B. Mir, R. Vidal, and C. Gomez, "Modeling the energy performance of lorawan," *Sensors*, vol. 17, no. 10, 2017.
- [74] R. Barbau, V. Deslandes, G. Jakllari, and A.-L. Beylot, "An analytical model for evaluating the interplay between capacity and energy efficiency in nb-iot," in *IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN 2021)*, pp. 1–9, 2021.
- [75] A. Høglund, D. P. Van, T. Tirronen, O. Liberg, Y. Sui, and E. A. Yavuz, "3gpp release 15 early data transmission," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 90–96, 2018.
- [76] A. Sørensen, H. Wang, M. J. Remy, N. Kjettrup, R. B. Sørensen, J. J. Nielsen, P. Popovsky, and G. C. Madueño, "A modelling and experimental framework for battery lifetime estimation in nb-iot and lte-m," in *IEEE Internet of Things Journal*, pp. 1–12, 2021.
- [77] Orange, "Iot connect low power." <https://developer.orange.com/od-uploads/Offre-tarifaire-IoT-Connect-Low-Power-octobre-2018.pdf>, accessed : 05-10-2021.
- [78] Vodafone, "Nb-iot prepaid subscription." <https://pycom.io/product/vodafone-nb-iot-prepaid-subscription>, accessed : 05-10-2021.
- [79] AT&T, "At&t share plan." <https://marketplace.att.com/products/iot-share-plan-lte-na>, accessed : 05-10-2021.
- [80] ND-SatCom, "Cellular backhauling over satellite : The smart way to do it," December 2016. White Paper.
- [81] Fleet-Space. <https://fleetspace.com>. accessed : 2021-09-02.
- [82] Hiber-Global. <https://hiber.global>, accessed : 2021-09-02.
- [83] CapComEspace, "La mécanique spatiale." http://www.capcomespace.net/dossiers/astronautique/mecanique_spatiale_3.htm, accessed : 06-09-2021.
- [84] Northern Sky Research (NSR), "New NSR report finds regional satellite operator revenue growth far outpaced the big four in 2012," October 2013.
- [85] Capital-Agence-France-Presse, "Oneweb déploie 40% de ses satellites et se pose en candidat sérieux à starlink," July 2021.
- [86] Les-Echos, "Satellites : la bataille des orbites," March 2015. <https://www.lesechos.fr/2015/03/satellites-la-bataille-des-orbites-201817>.
- [87] D. Katie and OneWeb, "Oneweb demonstrates network capabilities to u.s. government," March 2019.

- [88] C. Partridge and T. Shepard, "Tcp/ip performance over satellite links," *IEEE Network*, vol. 11, no. 5, pp. 44–49, 1997.
- [89] J. Tristancho, "Implementation of a femto-satellite and a mini-launcher." Master Thesis.
- [90] S. R. Tsitas and J. Kingston, "6u cubesat commercial applications," *Aeronautical Journal*, vol. 116, pp. 189–198, 02 2012.
- [91] SpaceItBridge, "Oneweb talks." <https://www.spaceitbridge.com/oneweb-talks-satellite-broadband-speeds-constellation-configs.htm>, accessed : 07-10-2021.
- [92] "France satellite about inmarsat's terminal." <https://www.francesatellite.com/inmarsat/hughes9502.html>, accessed : 07-10-2021.
- [93] "France satellite about orbcomm's terminal." <http://www.francesatellite.com/orbcomm/orbcomm-st-9100.html>, accessed : 07-10-2021.
- [94] CampbellSci, "St-21 terminal specifications." <https://www.campbellsci.com/st-21>, accessed : 07-10-2021.
- [95] Astrocast, "Products on asrtocast's website." <https://www.astrocast.com/products>, accessed : 07-10-2021.
- [96] FlowBank. <https://www.flowbank.com/en/research/the-swiss-series-astrocast-is-doing-big-things-with-small-satellites>, accessed : 07-10-2021.
- [97] O. Liberg, *Cellular Internet of Things*. Academic Press, september 2017. with the contribution of M.Sundberg, E.Wang, J.Bergman, J.Sachs.
- [98] 3GPP, "Technical specification group radio access network; evolved universal terrestrial radio access (e-utra); multiplexing and channel coding (release 16)," June 2021.
- [99] GSMA, "NB-IoT Deployment Guide To Basic Feature Set Requirements," June 2019.
- [100] R. Yogi, "Design of a power amplifier for nb-iot." Master's thesis department of electrical and information technology faculty of engineering, Lund University.
- [101] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Sköld, *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Academic Press, 2011.
- [102] 4G-5G-world, "S1 application protocol." <http://4g5gworld.com/specification/s1-application-protocol-s1ap>, accessed : 08-10-2021.
- [103] 3GPP, "Technical specification group radio access network; evolved universal terrestrial radio access (e-utra); physical layer procedures (release 15)," March 2019.
- [104] 3GPP, "Mobile radio interface layer 3 specification; core network protocols," Dec 2017.
- [105] Ericsson, "Evaluation for early data transmissions - r2-1713058," 2017.
- [106] Cisco, "Small data over nas, s11-u and sgi interfaces." Cisco's Report.
- [107] 3GPP, "Technical specification group radio access network; evolved universal terrestrial radio access (e-utra); radio resource control (rrc); protocol specification (release 16)," June 2021.
- [108] M. Kanj, V. Savaux, and M. Le Guen, "A Tutorial on NB-IoT Physical Layer Design," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, pp. 1–37, 2020.

- [109] K. C. Beh, S. Armour, and A. Doufexi, "Joint time-frequency domain proportional fair scheduler with harq for 3gpp lte systems," in *2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference*, pp. 1–5, 2008.
- [110] P. Andres-Maldonado, P. Ameigeiras, J. Prados-Garzon, J. Navarro-Ortiz, and J. M. Lopez-Soler, "An analytical performance evaluation framework for nb-iot," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 4, pp. 7232–7240, 2019.
- [111] A. Adhikary, X. Lin, and Y.-P. E. Wang, "Performance evaluation of nb-iot coverage," in *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pp. 1–5, 2016.
- [112] P. Andres-Maldonado, P. Ameigeiras, J. Prados-Garzon, J. J. Ramos-Munoz, J. Navarro-Ortiz, and J. M. Lopez-Soler, "Analytic analysis of narrowband iot coverage enhancement approaches," in *2018 Global Internet of Things Summit (GIoTS)*, pp. 1–6, 2018.
- [113] S. Ha, H. Seo, Y. Moon, D. Lee, and J. Jeong, "A novel solution for nb-iot cell coverage expansion," in *2018 Global Internet of Things Summit (GIoTS)*, pp. 1–5, 2018.
- [114] Actutem, "Comment déterminer le débit maximal de données d'une transmission nb-iot." <https://www.actutem.com>, accessed : 2021-09-02.
- [115] S.-M. Oh and J. Shin, "An efficient small data transmission scheme in the 3gpp nb-iot system," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 3, pp. 660–663, 2017.
- [116] H. Mroue, A. Nasser, S. Hamrioui, B. Parrein, E. Motta-Cruz, and G. Rouyer, "Mac layer-based evaluation of iot technologies : Lora, sigfox and nb-iot," in *2018 IEEE Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM)*, pp. 1–5, 2018.
- [117] P. Andres-Maldonado, M. Lauridsen, P. Ameigeiras, and J. M. Lopez-Soler, "Analytical modeling and experimental validation of nb-iot device energy consumption," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 5691–5701, 2019.
- [118] P. Jörke, R. Falkenberg, and C. Wietfeld, "Power consumption analysis of nb-iot and emtc in challenging smart city environments," in *IEEE Globecom Workshops 2018*, pp. 1–6, 2018.
- [119] D. Yang, X. Zhang, X. Huang, L. Shen, J. Huang, X. Chang, and G. Xing, "Understanding power consumption of nb-iot in the wild : Tool and large-scale measurement," in *ACM - Mobicom*, pp. 1–10, 2020.
- [120] F. Michelinakis, A. S. Al-Selwi, M. Capuzzo, A. Zanella, K. Mahmood, and A. Elmokashfi, "Dissecting energy consumption of nb-iot devices empirically," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 1224–1242, 2021.
- [121] B. Martinez, F. Adelantado, A. Bartoli, and X. Vilajosana, "Exploring the performance boundaries of nb-iot," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 5702–5712, 2019.
- [122] N. M. Abramson, "The aloha system — another alternative for computer communications," in *AFIPS : Fall Joint Computer Conference*, pp. 281–285, 1970.
- [123] B. G. Martiradonna S, Piro G, "On the evaluation of the nb-iot random access procedure in monitoring infrastructures," in *MDPI - Special Issue Next Generation Communication Technologies for Sensor and Ad-Hoc Networks*, pp. 1–25, 2019.
- [124] M. Rubinstein, "Accès aléatoire à un média partagé." Online, accessed : 27-10-2021.
- [125] L. Massoulie and J. Roberts, "Bandwidth sharing : objectives and algorithms," in *IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM '99)*, vol. 3, pp. 1395–1403 vol.3, 1999.

- [126] A. G. D. Kok and H. G. Tijms, "A queueing system with impatient customers," *Journal of Applied Probability*, vol. 22, no. 3, pp. 688–696, 1985.
- [127] D. Y. Barrer, "Queueing with impatient customers and ordered service," in *Operations Research Vol. 5, No. 5*, pp. 650–656, 1957.
- [128] W. G. J.L. van den Berg, O.J. Boxma, "Sojourn times in the m/g/1 queue with deterministic feedback," in *Journal of Applied Probability Vol. 21, No. 2 (1984)*, pp. 360–378, no. 5, 1989.
- [129] R. Barbau, V. Deslandes, G. Jakllari, J. Tronc, and A.-L. Beylot, "An analytical model for assessing the performance of nb-iot," in *IEEE International Conference on Communications (ICC 2021)*, pp. 1–6, 2021.
- [130] S. Ravi, P. Zand, M. El Soussi, and M. Nabi, "Evaluation, modeling and optimization of coverage enhancement methods of nb-iot," in *IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2019)*, pp. 1–7, Sep. 2019.
- [131] L. Feltrin, M. Condoluci, T. Mahmoodi, M. Dohler, and R. Verdone, "Nb-iot : Performance estimation and optimal configuration," in *IEEE 24th European Wireless Conference*, pp. 1–6, May 2018.
- [132] X. Lin, A. Adhikary, and Y. . Eric Wang, "Random access preamble design and detection for 3gpp narrowband iot systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 5, pp. 640–643, Dec 2016.
- [133] C. Huang, S. Tseng, P. Lin, and Y. Kawamoto, "Radio resource scheduling for narrowband internet of things systems : A performance study," *IEEE Network*, vol. 33, no. 3, pp. 108–115, 2019.
- [134] M. Medhat, K. Elshafey, and A. Rashed, "Evaluation of optimum nprach performance in nb-iot systems," *International Journal of Computer Networks and Applications*, vol. 6, p. 55, 08 2019.
- [135] A. Tanenbaum, *Computer Networks*. Prentice Hall, 1989.
- [136] M. Lukic, S. Sobot, I. Mezei, D. Vukobratovic, and D. Danilovic, "In-depth real-world evaluation of nb-iot module energy consumption," in *IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT 2020)*, pp. 261–265, 2020.
- [137] Actility, "Market segmentation for lpwan technologies," 2019.
- [138] Q. Wu, P. Wu, W. Wen, T. Yang, and M. Xia, "An efficient nprach receiver design for nb-iot systems," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 10, pp. 10418–10426, 2020.
- [139] S. Cho, H. Kim, and G. Jo, "Determination of optimum threshold values for nprach preamble detection in nb-iot systems," in *IEEE 10th International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN 2018)*, pp. 616–618, 2018.
- [140] 3GPP, "Technical specification group radio access network ; evolved universal terrestrial radio access (e-utra) ; physical channels and modulation (release 15)," June 2019.
- [141] K. Nawarathne, R. Ball, F. Pereira, F. Zhao, A. Rahardjo, C. Zegras, M. Ben-Akiva, and C. Pereira, "Trade-off between smartphone battery life and stop detection accuracy," in *10th International Conference on Transport Survey Methods*, pp. 1–8, 12 2014.
- [142] M. El Soussi, P. Zand, F. Pasveer, and G. Dolmans, "Evaluating the performance of emtc and nb-iot for smart city applications," in *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–7, 2018.

- [143] L. Ding, F. Tong, Z. Chen, and Z. Liu, "A novel mcs selection criterion for voip in lte," in *IEEE 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (Wicom 2011)*, pp. 1–4, Sep. 2011.
- [144] L. Vance and A. Mense, "Value analysis for orbital debris removal," *Advances in Space Research*, vol. 52, pp. 685–695, 08 2013.
- [145] J. Wertz and W. Larson, "Cost modeling, space mission analysis and design." (3rd edition of Space Mission Library 1999), pp.791-802.
- [146] "Nsr's report on life expanctancy for geo." <https://www.nsr.com/satellite-eol-not-one-size-fits-all/>. accessed : 2021-11-23.
- [147] "Starlink's lifespan." <https://www.nasaspaceflight.com/2021/01/spacex-launch-first-starlink-mission-2021/>. accessed : 2021-11-23.
- [148] R. Barbau, V. Deslandes, G. Jakllari, J. Tronc, J.-F. Chouteau, and A.-L. Beylot, "Nb-iot over geo satellite : Performance analysis," in *IEEE 10th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 16th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC 2020)*, pp. 1–8, 2020.
- [149] R. Barbau, V. Deslandes, G. Jakllari, and A.-L. Beylot, "Performance evaluation of different 5g nb-iot satellite systems," in *38th International Communication and Satellite Systems Conference and 26th Ka Broadband Communication Conference (ICSSC/Ka Conf 2021)*, pp. 1–8, 2021.
- [150] C. Shannon, "Communication in the presence of noise," *Proceedings of the Institute of Radio Engineers* 37, pp. 10–21, 1949.
- [151] 3GPP, "Technical specification group radio access network ; study on provision of low-cost machine-type communications (mtc) user equipments (ues) based on lte (release 11)," June 2013.
- [152] O. Liberg, J. Bergman, A. Höglund, T. Khan, G. A. Medina-Acosta, H. Rydén, A. Ratilainen, D. Sandberg, Y. Sui, T. Tirronen, and Y. P. E. Wang, "Narrowband internet of things 5g performance," in *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, pp. 1–5, 2019.

L'EFFET DOPPLER

L'effet Doppler, ou effet Doppler-Fizeau, est le décalage de fréquence d'une onde (mécanique, acoustique, électromagnétique ou d'une autre nature) observé entre les mesures à l'émission et à la réception, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps. Si on désigne de façon générale ce phénomène physique sous le nom d'effet Doppler, le nom d'« effet Doppler-Fizeau » est réservé aux ondes électromagnétiques.

Source : Wikipedia (vérifié le 3 septembre 2021)

Dans le cadre de nos travaux sur le NB-IoT, nous avons donc eu affaire à l'effet Doppler-Fizeau. La célérité de l'onde est celle de la lumière c qui dépend de la nature du milieu mais pas du référentiel. Lorsque la vitesse de l'onde est beaucoup plus grande que la vitesse relative entre l'émetteur et le récepteur, on a :

$$f_r = \frac{c - v_r}{c - v_e} f_e = \frac{1 - \frac{v_r}{c}}{1 - \frac{v_e}{c}} \approx f_e \left(1 - \frac{v_r}{c}\right) \left(1 + \frac{v_e}{c}\right) \quad (\text{A.1})$$

où f et v sont les vitesses et fréquences relatives à l'émetteur (e) et le récepteur (r). En faisant une approximation au premier ordre, on obtient :

$$f_r = f_e \left(1 + \frac{\Delta v}{c}\right) \quad (\text{A.2})$$

où Δv est la vitesse relative entre l'émetteur et le récepteur.

Les effets Doppler rencontrés dans le contexte des communications par satellite sont particulièrement élevés – un satellite peut atteindre une vitesse d'une dizaine de km/s par rapport à un observateur terrestre. Ainsi, en prenant $f_e = 2$ GHz, on obtient jusqu'à 67 kHz de décalage pour les satellites défilants les plus bas.

BANDE ÉTROITE ET CAPACITÉ D'UN CANAL

Le théorème de Shannon sur la capacité des canaux [150] établit une relation entre la largeur de bande, la puissance et la capacité dans un canal à bruit blanc gaussien additif, sous la forme suivante :

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 W} \right) \quad (\text{B.1})$$

où C est la capacité du canal (bits/s), S est la puissance du signal souhaité reçu, N est la puissance du bruit, qui est déterminée par le produit de la largeur de bande du bruit (W) et de la densité spectrale de puissance du bruit unilatéral (N_0). Dans une situation extrême de limitation de la couverture, $\frac{S}{N} \ll 1$. En utilisant l'approximation $\ln(1+x) \approx x$, pour $x \ll 1$, on peut montrer que la capacité du canal en régime de très faible rapport signal-puissance (SNR) est de :

$$C = \frac{S}{N_0} \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 W} \right) \quad (\text{B.2})$$

Dans ce régime, la dépendance vis-à-vis de la largeur de bande disparaît et, par conséquent, la capacité du canal, en termes de bits par seconde, est uniquement déterminée par le rapport entre S et N_0 . Ainsi, en théorie, la couverture pour un débit donné C_r ne dépend que du niveau de puissance du signal reçu et non de la largeur de bande du signal. Cela implique que, pour des raisons d'efficacité spectrale, il est avantageux d'allouer une petite largeur de bande pour les dispositifs en mauvaise couverture.

La technologie radio utilisée par la voie montante du NB-IoT comprend diverses options de largeur de bande. Alors qu'une transmission à large bande passante (par exemple 180 kHz) est avantageuse pour les terminaux en bonne couverture, les transmissions à petite bande passante sont plus efficaces du point de vue spectral du système pour desservir les terminaux en mauvaise couverture. Ce phénomène est illustré par les résultats du Chapitre 7 sur le débit des terminaux dans un contexte satellite.

PROCESSUS HARQ

L'Hybrid Automatic Repeat reQuest (HARQ) est une technique qui permet la transmission fiable de données sur un canal de communication qui peut engendrer des erreurs de transmission. HARQ combine les principes de la retransmission, Automatic Repeat Request (ARQ), et de la correction d'erreurs, Forward Error Correction. En termes d'ARQ, elle s'apparente à un *send and wait* ; la fidélisation ne portant que sur une seule trame. Elle est présente dans des systèmes mobiles depuis les années 2000 sur les systèmes HSDPA.

Cela signifie que lorsqu'un message d'une communication n'est pas reçu correctement et qu'il n'est pas possible de résoudre les erreurs (contrôle d'erreur en échec), le message est retransmis. La séquence des symboles reçus est sauvegardée afin de pouvoir la comparer avec la séquence de la nouvelle transmission et augmenter la capacité de correction du côté récepteur.

Ainsi pour la voie montante du NB-IoT, on peut décrire la procédure HARQ de la façon suivante :

- BS vers UE : envoi d'une allocation de ressource (DCI) dans le canal de contrôle (NPDCCH).
- UE vers BS : transmission du bloc dans le NPUSCH.
- Deux choses peuvent survenir :

Cas 1 : la BS a réussi à décoder le message, elle termine le processus de réception du NPUSCH (pas de transmission d'accusé de réception).

Cas 2 : la BS n'a pas réussi à décoder le message. Elle envoie un DCI pour une retransmission (bit de retransmission activé).

Note : Si l'UE ne reçoit pas l'ordre de retransmission, il suppose que le message a été correctement reçu par la BS (c'est pourquoi les allocations de ressources sont généralement envoyées avec un taux d'erreur cible très bas $< 10^{-2}$).

MCL

Le MCL est défini comme la perte totale maximale du canal entre les ports d'antenne de l'UE et de la BS à laquelle le service de données peut encore être fourni. En pratique, cela inclut les gains d'antenne, le *path loss*, le *shadowing* et toute autre dégradation. Plus le MCL est élevé, plus la liaison est robuste.

Selon le 3GPP [151], le MCL pour LTE-M est de 155,7 dB alors que celui de NB-IoT est de 164 dB. On a :

$$MCL = P_{Tx} \cdot (\text{SINR} + 10\log_{10}(kTB) + N_f) \quad (\text{D.1})$$

où la puissance de sortie est P_{Tx} , le rapport signal à bruit plus interférences minimum requis est le SINR, la largeur de bande du signal est B , le *Noise Factor* reçu est N_f , k la constante de Boltzmann et T la température ambiante de 290 Kelvin.

Les travaux de [152] détaillent les calculs du MCL pour le lien montant et le lien descendant du NB-IoT.

SINR DES CELLULES TERRESTRES ET BLER

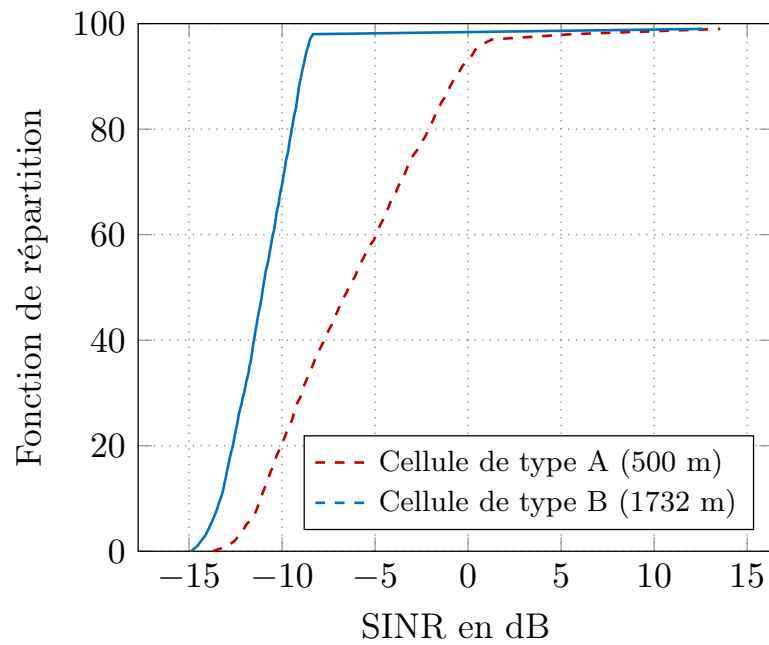


FIGURE E.1 Fonction de répartition des rapports signal à bruit plus interférences (SINR) des cellules terrestres – Voie montante (UL)

Répartition des conditions de couverture utilisées dans notre évaluation de performances des cellules terrestres, d'après les documents du rapport technique du 3GPP [33].

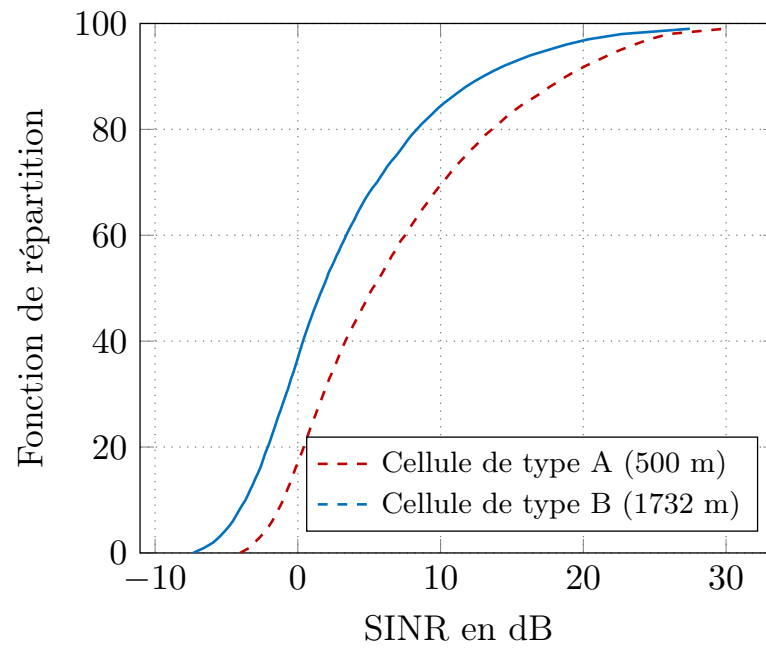


FIGURE E.2 Fonction de répartition des rapports signal à bruit plus interférences (SINR) des cellules terrestres – Voie descendante (DL)

TAILLE DES COMMUNICATIONS – MODÈLE M/D/1/PS

Soit une communication c , on souhaite calculer la taille des clients induits sur chacune des trois files avec allocation de ressources.

On note $\mathcal{E}_{c,q}$ l'ensemble des nombres de bits par message à transmettre sur la file q , on peut déduire la quantité de ressource nécessaires sur chacun des canaux pour une communication :

$$\begin{cases} \beta_{c,U} = \sum_{b \in \mathcal{E}_{c,U}} \mathcal{F}_{RU}(i_U, b) \cdot r_U \\ \beta_{c,D} = \sum_{b \in \mathcal{E}_{c,D}} \mathcal{F}_{sf}(i_D, b) \cdot r_D \\ \beta_{c,C} = \sum_{b \in \mathcal{E}_{c,C}} AL \cdot r_C \end{cases} \quad (\text{F.1})$$

où \mathcal{F}_{RU} est la fonction définie sur $\{\llbracket 0, 10 \rrbracket, \mathbb{N}\} \rightarrow \mathbb{N}^*$ qui associe à un couple – indice MCS , nombre de bits – le nombre de RUs minimum qui permet d'envoyer ce nombre de bits avec l'utilisation de ce MCS. Le Tableau I.2 des Transport Block Sizes (TBS) du NPUSCH est donc utilisé. Pour exemple, on a $\mathcal{F}_{RU}(4, 300) = 5$. \mathcal{F}_{sf} est la fonction équivalente pour le NPDSCH et indique un nombre de sous-frames (sf , voir Tableau I.1). Enfin l'AL a été décrit en section 3.4.2 et vaut 1 ou 2 NCCE.

On rappelle que pour chaque UE, nous définissons des indices de MCS $i_{c,q}$ et des nombres de répétition $r_{c,q}$.

Exemple : D'après l'illustration de la procédure de communication en Figure F.1, on a les ensembles de taille de messages suivants :

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{c,U} = \{59, 128, 308\} \\ \mathcal{E}_{c,D} = \{56, 96, 120\} \\ \mathcal{E}_{c,C} = \{23, 23, 23, 23\} \end{cases} \quad (\text{F.2})$$

En considérant un terminal dans la deuxième zone de couverture (MCL=154 dB dans le Tableau 4.2, on a $i_{c,U} = 4$, $i_{c,D} = 6$, $r_{c,U} = 2$, $r_{c,D} = 8$ et $r_{c,C} = 8$. On en déduit la taille de la

	Canal ↑ = UL ↓ = DL	Messages	Taille du message en bits	
			Uplink	Downlink
Etablissement de la connexion	↑ NPRACH	Message 1: Préambule	-	-
	↓ NPDCCH	N1 -Allocation Downlink	-	23 - DCI
	↓ NPDSCH	Message 2: Random Access Response + N0	-	56
	↑ NPUSCH	Message 3: RRC Resume Request	59	-
	↓ NPDCCH	N1 -Allocation Downlink	-	23 - DCI
	↓ NPDSCH	Message 4: RRC Connection Resume	-	96
	↓ NPDCCH	N0 -Allocation Uplink	-	23 - DCI
	↑ NPUSCH	Message 5: RRC Resume Complete	128	-
		Pas de Signalisation Aditionnelle (UPO)	-	-
Connecté	↓ NPDCCH	N0 -Allocation Uplink	.	23 - DCI
	↑ NPUSCH	Transport Block Uplink	8 + 300	.
	↓ NPDCCH	N1 -Allocation Downlink	-	23 - DCI
	↓ NPDSCH	Message 4: RRC Connection Release	-	120

FIGURE F.1 Procédure de communication pour une charge utile de 300 bits.

communication sur les différentes files :

$$\begin{cases} \beta_{c,U} = (2 + 3 + 5) \cdot 2 = 20 \text{ RUs} \\ \beta_{c,D} = (1 + 2 + 2) \cdot 8 = 40 \text{ sf} \\ \beta_{c,C} = (1 + 1 + 1 + 1 + 1) \cdot 8 = 16 \text{ NCCEs} \end{cases} \quad (\text{F.3})$$

ANGLE D'ÉLEVATION DANS LE CONTEXTE SATELLITE

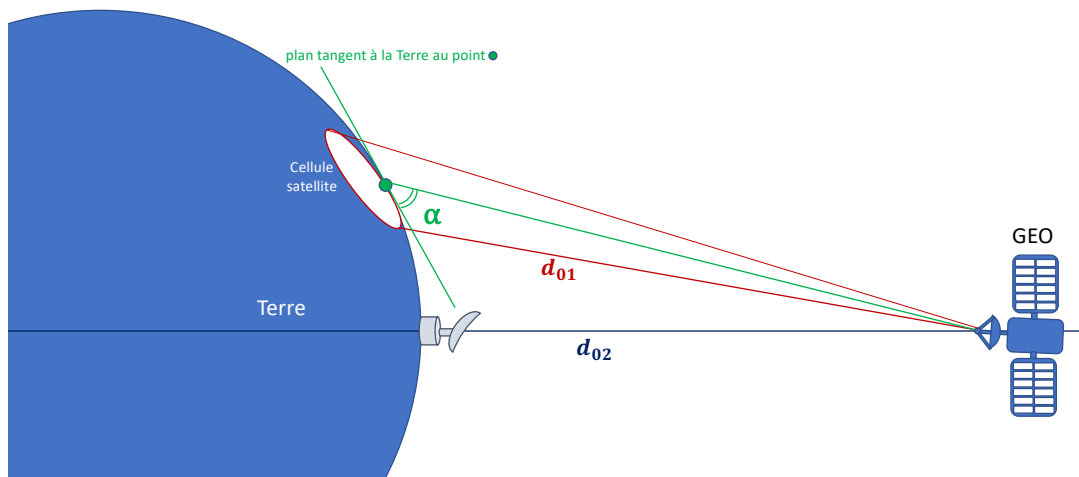


FIGURE G.1 Illustration de l'angle d'élévation dans un contexte satellite.

Sur la Figure G.1 l'angle d'élévation α est illustré. C'est l'angle avec lequel le terminal observe le satellite dans le référentiel du terminal. Le paramètre α est utilisé pour déterminer l'atténuation – *shadowing* – du signal transmis vers ou reçu depuis le satellite [31]. Il permet également de déterminer la puissance reçue par l'antenne du satellite en fonction de sa forme de gain [31].

La figure ci-dessous illustre également la distance d_{01} minimale entre le satellite et la cellule au sol. Le point au sol correspondant à cette distance minimale n'est pas obligatoirement situé au centre de la cellule comme illustré ici. La distance d_{01} est utilisée dans le calcul du temps de garde nécessaire au bon fonctionnement d'une cellule NB-IoT dans un contexte satellite (Équation 6.1).

COURBES BLER UL ET DL POUR LE NB-IoT

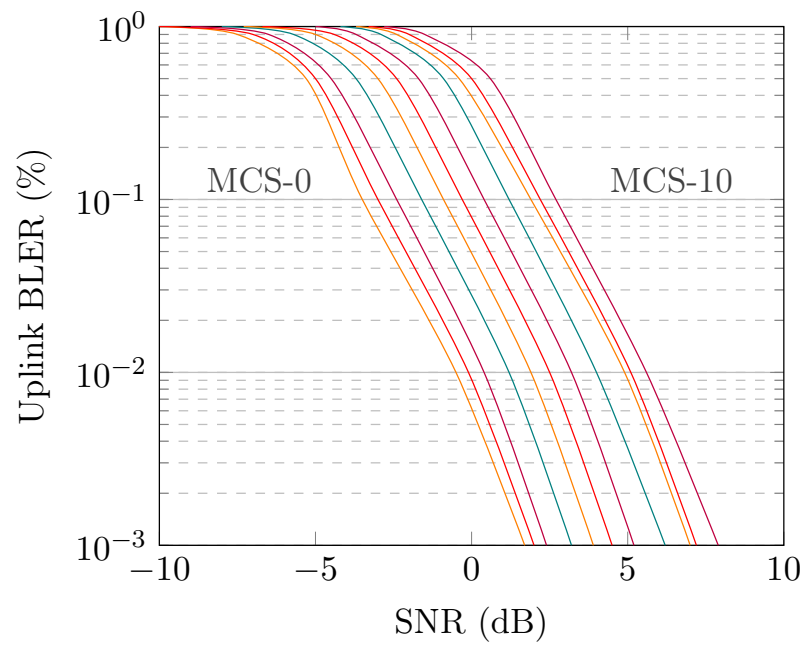


FIGURE H.1 Courbes du taux d'erreur d'un Transport Blocks (TB) UL en fonction des conditions de couverture (SNR). Le Modulation and Coding Schemes (MCS) varie de l'indice 0 à l'indice 10 (cas d'une transmission *single-tone*)

MCS	<i>single-tone</i>	<i>multi-tone</i>
0	-3.5 dB	-4.5 dB
1	-3.0 dB	-4.0 dB
2	-2.4 dB	-3.5 dB
3	-1.6 dB	-2.8 dB
4	-0.9 dB	-2.2 dB
5	-0.3 dB	-1.5 dB
6	0.4 dB	-0.95 dB
7	1.2 dB	-0.4 dB
8	1.9 dB	0.0 dB
9	2.2 dB	0.5 dB
10	2.7 dB	1.0 dB
11	-none-	1.7 dB
12	-none-	2.2 dB
13	-none-	2.7 dB

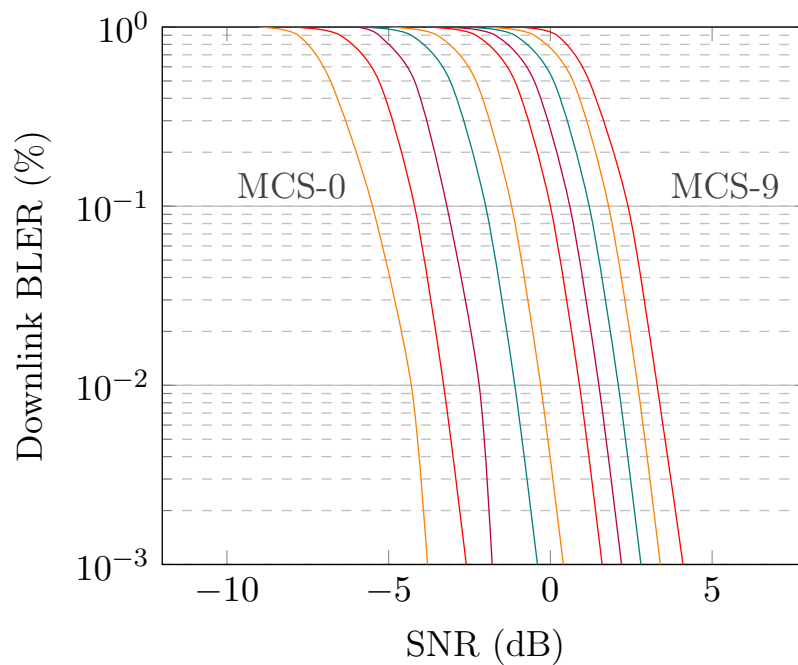
TABLE H.1 Seuils pour obtenir un BLER de 10^{-1} 

FIGURE H.2 Courbes du taux d'erreur d'un Transport Blocks (TB) DL en fonction des conditions de couverture (SNR). Le schéma de modulation et de codage (MCS) varie de l'indice 0 à l'indice 12.

TAILLES DES TBS DL ET UL

Indices des tailles - MCS -	Nombre de sous-trames NPDSCH							
	1	2	3	4	5	6	8	10
0	16	32	56	88	120	152	208	256
1	24	56	88	144	176	208	256	344
2	32	72	144	176	208	256	328	424
3	40	104	176	208	256	328	440	528
4	56	120	298	256	328	408	552	680
5	72	144	224	328	424	504	680	872
6	88	176	256	392	504	600	808	1032
7	104	224	328	472	584	680	968	1124
8	120	256	392	536	680	808	1096	1352
9	136	296	456	616	776	936	1256	1544
10	144	328	504	680	872	1032	1384	1736
11	176	376	584	776	1000	1192	1608	2024
12	208	440	680	904	1128	1352	1800	2280
13	224	488	744	1128	1256	1544	2024	2536

TABLE I.1 Tailles des TBS du NPDSCH en **bits** en fonction de la configuration de l'indice MCS et du nombre de sous-trames (sf)

Indice des tailles - MCS -	Nombre de RUs alloué(s) dans le TB							
	1	2	3	4	5	6	8	10
0	16	32	56	88	120	152	208	256
1	24	56	88	144	176	208	256	344
2	32	72	144	176	208	256	328	424
3	40	104	176	208	256	328	440	568
4	56	120	208	256	328	408	552	696
5	72	144	224	328	424	504	680	872
6	88	176	256	392	504	600	808	1000
7	104	224	328	472	584	712	1000	1224
8	120	256	392	536	680	880	1096	1384
9	136	296	456	616	776	936	1256	1544
10	144	328	504	680	872	1000	1384	1736
11	176	376	584	776	1000	1192	1608	2024
12	208	440	680	1000	1128	1352	1800	2280
13	224	488	744	1128	1256	1544	2024	2536

TABLE I.2 Tailles des TBs du NPUSCH (format 1) en **bits** en fonction de la configuration de l'indice et du nombre de Resource Unit (RU)

ANNEXE J

COMPOSITION DES DCI N0 ET N1

Information	Taille (bits)	Valeurs possibles
Drapeau N0 ou N1	1	DCI N0 ou DCI N1
Sous-porteuse	6	La largeur de bande du TB et les sous-porteuses associées.
Délai avant allocation	2	8, 16, 32 ou 64 ms
Nombre de répétitions DCI	2	$\frac{R_{max}}{8}$, $\frac{R_{max}}{4}$, $\frac{R_{max}}{2}$, R_{max} contient l'AL si $R_{max} \leq 2$
Nombre de RUs	3	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 ou 10
Nombre de répétitions NPUSCH	3	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 ou 128
MCS	4	De 0 à 13 représentant les indices du Tableau I.2
Version de redondance	1	0 ou 2, voir Annexe C
New Data Indicator (NDI)	1	Accusé de réception pour transmettre ou non le même TB.

TABLE J.1 Composition du DCI N0 pour l'allocation du TB NPUSCH

Information	Taille (bits)	Valeurs possibles
Drapeau N0 ou N1	1	DCI N0 ou DCI N1
Demande de connexion venant du NPDCCH	1	Si le DCI est utilisé pour de l'allocation NPDSCH ou pour une mise en place de connexion
Délai avant allocation (en plus des 4 ms obligatoires)	3	0, 4, 8, ... , 128 ms ($R_{max} < 128$) 0, 16, 32, ... , 1024 ms (sinon)
Nombre de répétitions DCI	2	$\frac{R_{max}}{8}$, $\frac{R_{max}}{4}$, $\frac{R_{max}}{2}$, R_{max} contient l'AL si $R_{max} \leq 2$
Nombre de sous-trames	3	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 ou 10 sf NPDSCH
Nombre de répétitions NPDSCH	4	1, 2, 4, 8, 16, ... , 1024, 1536 ou 2048
MCS	4	De 0 à 13 représentant les indices du Tableau I.1
Version de redondance	1	0 ou 2, voir Annexe C
Ressources allouées pour l'accusé de réception l'HARQ	4	Format 2 NPUSCH : 3.75 ou 15 kHz avec délai + numéro de sous-porteuse

TABLE J.2 Composition du DCI N1 pour allocation du TB NPDSCH

Information	Taille (bits)	Valeurs possibles
Drapeau N0 ou N1	1	DCI N0 ou DCI N1
Demande de connexion venant du NPDCCH	1	Si le DCI est utilisé pour de l'allocation NPDSCH ou pour une mise en place de connexion
Nombre de répétitions NPRACH	2	Selon la configuration des CE n°1, CE n°2 et CE n°3
Indication des sous-porteuse NPRACH	6	De 0 à 47.
-	13	Le reste des bits du N1 sont mis à 1

TABLE J.3 Composition du DCI N1 pour demande de connexion provenant du réseau