



HAL
open science

Modélisation, analyse et optimisation de réseaux hybrides unicast-broadcast pour la diffusion de services multimédias linéaires et non linéaires

Pape Abdoulaye Fam

► **To cite this version:**

Pape Abdoulaye Fam. Modélisation, analyse et optimisation de réseaux hybrides unicast-broadcast pour la diffusion de services multimédias linéaires et non linéaires. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. INSA de Rennes, 2017. Français. NNT : 2017ISAR0002 . tel-01581005

HAL Id: tel-01581005

<https://theses.hal.science/tel-01581005>

Submitted on 4 Sep 2017

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

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse

UNIVERSITE
BRETAGNE
LOIRE

THESE INSA Rennes
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire
pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'INSA RENNES
Spécialité : Electronique et Télécommunications

présentée par

Pape Abdoulaye FAM

ECOLE DOCTORALE : *MATISSE*

LABORATOIRE : *IETR*

Modélisation, analyse
et optimisation
de réseaux hybrides
unicast-broadcast
pour la diffusion de
services multimédias
linéaires et non linéaires

Thèse soutenue le 09.02.2017
devant le jury composé de :

Pierre DUHAMEL

Directeur de Recherche au CNRS, Laboratoire L2S, Gif sur Yvette / Président

Catherine DOUILLARD

Professeur à Télécom Bretagne, Brest / Rapporteur

Didier LE RUYET

Professeur au CNAM, Paris / Rapporteur

Ulrich REIMERS

Professeur à l'Université Technologique de Braunschweig, Allemagne /
Examineur

Pierre BRETILLON

Ingénieur à TDF, Metz / Co-encadrant de thèse

Matthieu CRUSSIÈRE

Maître de Conférences à l'INSA de Rennes / Co-encadrant de thèse

Stéphane PAQUELET

Responsable du laboratoire Interfaces Réseaux à l'IRT b<>com,
Rennes / Co-encadrant de thèse

Jean-François HELARD

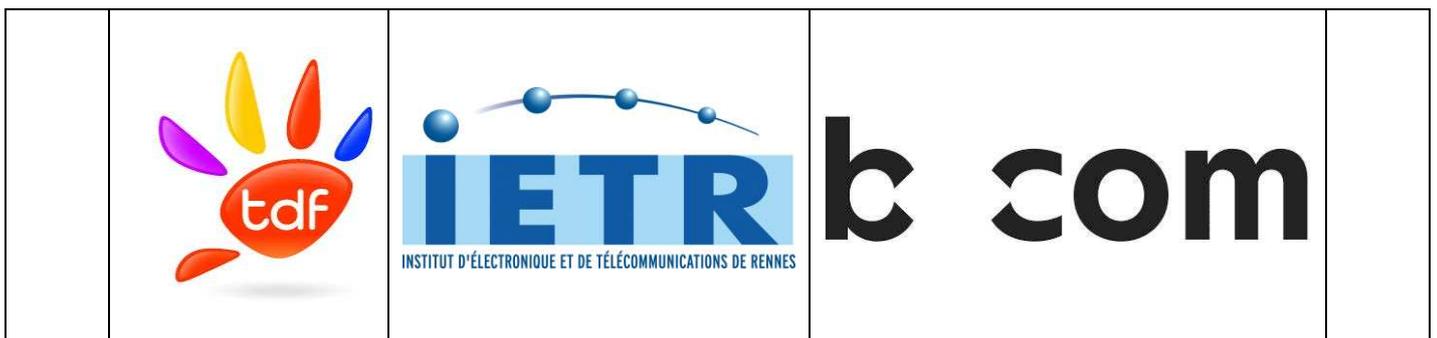
Professeur à l'INSA de Rennes / Directeur de thèse

Modélisation, analyse et optimisation de réseaux hybrides unicast-broadcast pour la diffusion de services multimédias linéaires et non-linéaires

Pape Abdoulaye FAM



En partenariat avec



À mes parents...

Xamul aay na wànte laajtewul a ka yéés.
Ne pas savoir n'est pas recommandé, mais
ne pas questionner c'est pire.

proverbe wolof

REMERCIEMENTS

Ces travaux de thèse sont le fruit d'une collaboration entre l'entreprise TDF (anciennement Télédiffusion de France), l'Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes (IETR) et l'Institut de Recherche Technologique IRT b-com. Cette thèse a été financée par TDF dans le cadre d'une convention industrielle CIFRE.

Tout d'abord, j'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Pierre Kasser pour m'avoir fait confiance et donné l'opportunité de réaliser ces travaux de thèse au sein de l'IRT b-com.

Mes remerciements s'adressent, ensuite, à Monsieur Jean-François Héland, Professeur à l'INSA de Rennes, qui m'a accompagné pendant ces trois années en tant que Directeur de thèse. Je le remercie particulièrement, pour le suivi sans faille de cette thèse, ainsi que pour nos discussions fructueuses durant ces trois dernières années.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à mes encadrants, Monsieur Matthieu Crussière, Maître de conférences à l'INSA de Rennes, Monsieur Pierre Brétillon, Ingénieur à TDF, et Monsieur Stéphane Paquelet, Responsable du laboratoire Interfaces Réseaux à l'IRT b-com. Je les remercie pour leur encadrement, leur grande disponibilité ainsi que pour leur soutien sur les plans scientifique et humain. Cette thèse a été une excellente expérience pour moi, et cela en grande partie grâce à la qualité de leur encadrement. Ainsi, une grande partie de la réussite de cette thèse leur revient également.

J'adresse ma reconnaissance à Monsieur Pierre Duhamel, Directeur de recherche au CNRS, Laboratoire L2S, Gif sur Yvette, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Je remercie Madame Catherine Douillard, Professeur à Télécom Bretagne, et Monsieur Didier Le Ruyet, Professeur au CNAM de Paris, pour avoir accepté de rapporter sur ma thèse.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Ulrich Reimers, Professeur à l'Université Technologique de Braunschweig, pour avoir accepté de juger ces travaux de thèse en tant qu'examinateur.

Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel de TDF à Metz pour m'avoir accueilli dans leurs locaux. Je pense particulièrement à Thierry Schott, Thierry Dupont et Jean-Roger Roy pour les différentes formations sur les métiers de TDF qui m'ont permis de bien démarrer la thèse.

Je souhaite également remercier l'ensemble des membres de l'IRT b-com, dont le soutien a été primordial pour mener à bien ces travaux de thèse dans d'excellentes conditions.

Je remercie particulièrement Rodolphe Legouable, le chef de projet de l'équipe Interfaces Réseaux, Michel Corriou le chef du domaine Réseaux et Sécurité, et Bertrand Guilbaud, le Directeur de l'IRT b-com, pour leur disponibilité, leur soutien et leur sympathie.

Durant cette thèse, j'ai eu à échanger avec plusieurs personnes que je tiens à remercier sincèrement. Je pense notamment à Mohamad Kanj, Mourad Larbi, Thibaud Biatek, Florian Lebeau, Imad Alawe, Jérémy Lacoche, Amine Kacete, Amélie Kerbellec Hamidreza Khaleghi, Aurélien Bouzon, Isaac Olubayo, Hanane Abassi, Andrey Fedosov, Antoine Rozé, Jean Dion, Yacine Abdellaoui, Pauline Desnos, Vincent Savaux, Patrick Savelli, Olivier Weppe, Ali Cheato, Rémi Bonnefoi, Quentin Bodinier, Lilian Delaveau, Pierre Didier, Marc Lanoiselée, Sylvain Aubin et le FC Neticoa, Ali Zeineddine, Jessen et Félicia...

Un grand merci également à mes amis et compatriotes qui m'ont aidé et soutenu durant ces trois années de thèse, Cheikh D.D, Abdou, Oumar, Mouhamadou, Daouda, Balde, Palaye, Racky, Mambodj, Maty, Sidy, Saly, Soda, Cheikh, Chérif, Dame, Samba, Serigne Diagne, Tidiane Faye, JP, Augustin, Leina, Amina, Fatma, Pape Alioune, Tidiane Ly, Fofana, Mandiaye, Ablaye...

Enfin, ces dernières lignes s'adressent à toute ma famille, à qui je dédie cette thèse. Merci à mon père et à ma mère pour tout ce qu'ils m'ont offert, et pour m'avoir toujours encouragé à suivre ma voie. Merci également à mon oncle Babacar Gueye pour tous ses conseils et son retour d'expérience.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	ix
Liste des figures	xii
Liste des tableaux	xv
Liste des notations	xix
Introduction	1
1 Réseaux de distribution des services multimédias mobiles	7
1.1 Histoire et évolution des réseaux de diffusion	8
1.1.1 La télévision analogique terrestre	8
1.1.2 La télévision numérique terrestre	9
1.1.3 Dividende numérique : attribution des bandes des 700 MHz et des 800 MHz	11
1.1.4 FoBTV/ATSC 3.0 : vers un système de diffusion mondial	12
1.2 Histoire et évolution des réseaux cellulaires	14
1.2.1 La première génération de réseaux mobiles	14
1.2.2 La deuxième génération de réseaux mobiles	14
1.2.3 La troisième génération de réseaux mobiles	15
1.2.4 La quatrième génération de réseaux mobiles	16
1.2.5 Vers la cinquième génération de réseaux mobiles	17
1.3 Systèmes d'accès radio pour la diffusion de services multimédias sur appareils mobiles	20
1.3.1 Aperçu des normes de diffusion mobiles	20
1.3.2 Aperçu de la couche physique DVB-T2	21
1.3.3 Aperçu de la couche physique LTE	26
1.3.4 Une composante de diffusion dans les réseaux cellulaires	28
1.3.5 Analyse comparative des réseaux cellulaires et de diffusion	31
1.4 Services multimédias mobiles : une tendance forte	34

1.4.1	Mode de consommation des services multimédias	34
1.4.2	Vers la coopération des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion	35
2	Coopération des réseaux de diffusion et cellulaires	37
2.1	Intérêt de la coopération des réseaux de diffusion et cellulaires	38
2.2	Analyse et synthèse des scénarios de coopération	40
2.2.1	Composantes clés des scénarios de coopération	40
2.2.2	Analyse des scénarios des scénarios de coopération	42
2.2.3	Synthèse des scénarios de coopération	46
2.3	État de la recherche sur la coopération des réseaux	49
2.4	Positionnement de la thèse	51
3	Modélisation du réseau hybride pour la diffusion de services linéaires	53
3.1	Définition et modélisation du réseau hybride	54
3.1.1	Hypothèses	55
3.1.2	Modélisation de la composante de diffusion	58
3.1.3	Modélisation de la composante cellulaire	60
3.1.4	Métriques de performance	65
3.2	Simulation du réseau hybride	67
3.2.1	Environnement de simulation du réseau hybride	69
3.2.2	Résultats de simulation du réseau hybride	70
4	Optimisation de la capacité pour la diffusion de services linéaires	75
4.1	Présentation du problème (P1)	76
4.2	Résolution analytique du problème (P1)	76
4.2.1	Résolution du problème d'optimisation sans contrainte	82
4.2.2	Prise en compte de la contrainte du taux d'accès moyen au service	87
4.3	Évaluations des performances du réseau hybride	88
4.3.1	Paramètres de configuration de la simulation	89
4.3.2	Résultats des simulations	89
5	Optimisation énergétique pour la diffusion de services linéaires	99
5.1	(P2) : Optimisation de la puissance consommée du réseau hybride	99
5.1.1	Présentation du problème (P2)	99
5.1.2	Résolution analytique du problème (P2)	100
5.1.3	Évaluation numérique de l'approche d'optimisation	101
5.2	(P3) : Optimisation de l'efficacité énergétique du réseau hybride	105
5.2.1	Présentation du problème (P3)	105
5.2.2	Résolution analytique du problème (P3)	105
5.2.3	Évaluation numérique de l'approche d'optimisation	111

6	Extension du modèle pour la diffusion de services non-linéaires	117
6.1	Structure globale du modèle de réseau hybride	118
6.1.1	Éditeur de contenus	118
6.1.2	Réseau de distribution des contenus	120
6.1.3	Utilisateurs	121
6.2	Modélisation analytique des services non linéaires	121
6.2.1	Contenus multimédias d'un service non linéaire	121
6.2.2	Réseau de distribution	122
6.3	Exemple de diffusion d'un service non linéaire	126
6.3.1	Paramètres de simulation du réseau hybride	127
6.3.2	Résultats de simulation	127
	Conclusion et perspectives	131
A	Preuve des propositions	135
A.1	Preuve de la proposition 5	136
A.2	Preuve des propositions 6 et 8	137
A.3	Preuve de la proposition 7	138
	Liste des acronymes et abréviations	139
	Bibliographie	143

LISTE DES FIGURES

1.1	Schéma de principe d'un réseau de diffusion	8
1.2	État de déploiement des systèmes de transmission numérique de télévision terrestre dans le monde	11
1.3	Vision de la 5G	18
1.4	Aperçu des systèmes de diffusion pour les services mobiles	20
1.5	Structure de la trame DVB-T2.	23
1.6	Structure de la trame LTE (mode FDD).	27
1.7	Structure de la trame LTE (mode FDD) avec des sous-trames MBSFN.	31
1.8	Répartition du trafic de données dans les réseaux mobiles. Source : Visual Networking Index (VNI) 2016, Cisco [1].	34
2.1	Exemple de coopération entre les réseaux cellulaires et de diffusion. Les utilisateurs reçoivent les services multimédias à partir des deux réseaux.	39
2.2	Scénario S2 – <i>tower overlay</i> : Superposition des réseaux cellulaires et de diffusion pour la réduction du trafic de données dans les réseaux cellulaires.	44
2.3	Scénario S3 – <i>Dynamic Broadcast</i> : partage dynamique des ressources spectrales basé sur l'exploitation de la redondance des programmes télévisés et l'utilisation de l'espace de stockage des appareils mobiles.	45
3.1	Illustration du réseau hybride dans un scénario <i>tower overlay</i> avec une stratégie d'extension de la couverture du service.	54
3.2	Structure de l'environnement de simulation.	68
3.3	Taux d'accès moyen au service dans le réseau hybride en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service ; les résultats sont présentés pour différentes zones de couverture de la composante de diffusion.	71
3.4	Capacité moyenne de service de la composante cellulaire en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service pour une stratégie fixe d'allocation de ressources et une stratégie de type <i>round robin</i> ; pas de coopération avec le réseau de diffusion pour la transmission du service.	72

3.5	Capacité moyenne de service du réseau hybride en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service ; les résultats sont présentés pour différentes zones de couverture de la composante de diffusion.	73
4.1	Modélisation analytique du réseau hybride dans un scénario <i>tower overlay</i> avec une stratégie d'adaptation de la zone de couverture de la composante de diffusion.	77
4.2	Représentation des fonctions $y = \ln(t)$ et $y = t - s$ pour différentes valeurs du paramètre $s \geq 0$	81
4.3	Représentation de la fonction v_0 en fonction du paramètre de décision de coopération s	85
4.4	Rayon de couverture optimal r_{bc}^* de l'émetteur HPHT en fonction du paramètre de décision de coopération s pour $\gamma_0^{bc} = 0$ dB and $\gamma_0^{bc} = 10$ dB.	86
4.5	Capacité moyenne de service en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT ; résultats analytiques et de simulations pour $M = 500$ et $RB_m = 5$	90
4.6	Capacité moyenne de service en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT ; résultats analytiques et de simulations pour $M = 10000$ et $RB_m = 5$	92
4.7	Taux d'accès moyen au service en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT ; résultats théoriques et de simulations présentés pour $M = 500$ et $M = 10000$ avec $RB_m = 5$	94
4.8	Évolution du rayon de couverture optimal r_{bc}^* de l'émetteur HPHT en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service pour $\overline{RB}_m = 5$, $\overline{RB}_m = 10$ et $\overline{RB}_m = 20$.	96
4.9	Évolution de la capacité moyenne de service en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service pour $\overline{RB}_m = 5$	97
4.10	Évolution du taux d'accès moyen service en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service pour $\overline{RB}_m = 5$	97
5.1	Puissance consommée par le réseau hybride en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT pour des distances entre émetteurs LPLT de 2 km et 3 km. . .	102
5.2	Rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service avec $\overline{RB}_m = 2$ et $\overline{RB}_m = 4$; résultats présentés pour des distances entre émetteurs LPLT de 2 km et 3 km.	104
5.3	Représentation de la fonction tabulée $v_0(\theta; \alpha_{bc})$ en fonction du paramètre de décision de coopération θ pour des valeurs typiques de $\alpha_{bc} = \{2.5; 3; 3.5\}$	108
5.4	Représentation de la fonction tabulée $v_0(\theta; \alpha_{bc})$ et ses approximations du premier, deuxième et troisième ordre pour des valeurs pratiques de θ et $\alpha_{bc} \in \{2.5; 3.5\}$.	109
5.5	Représentation de la fonction tabulée $v_0(\theta_p, c_0)$ en fonction des valeurs pratiques de θ_p et c_0 pour $\alpha_{bc} = 3,5$ et $\gamma_0^{bc} = -20$ dB.	111
5.6	Évolution de l'efficacité énergétique en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT pour $M = 1000$; comparaison des deux approches d'optimisation. . . .	113

5.7	Évolution de l'efficacité énergétique en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT pour $M = 20000$; comparaison des deux approches d'optimisation.	114
5.8	Évolution du rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT (a) et de l'efficacité énergétique (b) en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service.	115
6.1	Évolution de la consommation des services multimédias de façon linéaire et non linéaire sur « grand écran » pour les pays du « EU BIG 5 » (i.e. France, Allemagne, Italie, Espagne, Royaume-Unis). Source : [31].	118
6.2	Structure globale du modèle de réseau hybride.	119
6.3	Distribution des contenus multimédias de façon non linéaire en mode carrousel dans un réseau de diffusion.	123
6.4	Évolution du temps moyen de service en fonction du nombre d'utilisateurs par cellule du réseau cellulaire pour la composante de diffusion et la composante cellulaire du réseau hybride.	128
6.5	Évolution du taux d'accès moyen au service en fonction du nombre d'utilisateurs par cellule du réseau cellulaire pour la composante de diffusion et la composante cellulaire du réseau hybride.	129

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Première et deuxième générations des systèmes de diffusion terrestre	10
1.2	Comparaison des technologies 3GPP (3rd Generation Partnership Project) de la deuxième génération de réseaux mobiles (2G) et troisième génération de réseaux mobiles (3G)	16
1.3	Exigences IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications Advanced) et les normes LTE (Long Term Evolution) et LTE-A (Long Term Evolution Advanced).	17
1.4	Description des systèmes de diffusion pour une réception mobile.	22
1.5	Paramètres de base de la couche physique DVB-T2 et du profil T2-Lite [23]	23
1.6	Paramètres de la couche physique LTE en voie descendante DL (DownLink).	27
1.7	Préfixe cyclique et espacement entre sous-porteuses en LTE.	30
1.8	Terminologie des systèmes LTE et DVB-T2.	31
1.9	Comparaison des paramètres de base des couches physiques LTE et DVB-T2.	32
2.1	Scénario S1 – Paramètres OFDM de la couche physique <i>Common PHYSical layer</i> (CPHY) sur une largeur de bande de 8 MHz (fréquence centrale : 600 MHz).	43
2.2	Classification et comparaison des principaux scénarios de coopération.	47
2.3	Avantages et inconvénients des principaux scénarios de coopération.	48
3.1	Modèle de consommation de puissance des sites de transmission LPLT et HPHT.	56
3.2	Paramètres de simulation du réseau hybride dans un scénario de type <i>tower overlay</i>	71
4.1	Paramètres de configuration de la simulation du réseau hybride dans un scénario de type <i>tower overlay</i>	90
4.2	Table de correspondance entre SNR et capacité issue du standard LTE [78, 79].	92
4.3	Évaluation du gain de coopération en termes de capacité moyenne de service et de taux d'accès moyen au service du réseau hybride dans un scénario <i>tower overlay</i>	94
5.1	Paramètres de configuration de la simulation du réseau hybride dans un scénario de type <i>tower overlay</i>	102
5.2	Paramètres de configuration de la simulation du réseau hybride dans un scénario de type <i>tower overlay</i>	113

6.1	Tableau comparatif entre les contraintes liées aux services linéaires et non linéaires.	120
6.2	Paramètres de configuration de la simulation du réseau hybride pour la diffusion d'un service non linéaire.	128

LISTE DES NOTATIONS

α	Facteur d'atténuation du signal	57
\overline{RB}_m	Nombre moyen de <i>Physical Resource Block</i> (PRB)s alloué à un utilisateur dans une cellule <i>Low Power Low Tower</i> (LPLT)	63
B^{bc}	Largeur du canal de transmission utilisé par le système de diffusion	59
M_i^{uc}	Nombre d'utilisateurs dans l'ensemble \mathcal{M}_i^{uc}	64
C^{bc}	Capacité de l'émetteur <i>High Power High Tower</i> (HPHT)	59
C_m^{bc}	Capacité d'un utilisateur situé dans la zone de couverture de l'émetteur HPHT	59
s	Paramètre de décision de coopération pour l'optimisation de la capacité moyenne de service	83
C_m^{RB}	Capacité d'un PRB alloué à un utilisateur m présent dans une cellule LPLT	61
C_{req}	Capacité minimale nécessaire pour accéder au service diffusé	55
C_s^H	Capacité de service du réseau hybride	66
C_i^{uc}	Capacité de la $i^{\text{ème}}$ cellule LPLT	64
C_m^{uc}	Capacité d'un utilisateur m dans une cellule LPLT	64
C_m	Capacité d'un utilisateur m dans la zone de service	55
Δ_p	Pente du modèle linéaire de consommation de puissance d'un émetteur	56
EE^H	Efficacité énergétique du réseau hybride	67
$\mathbb{E}[\eta_i^{uc}]$	Taux d'accès moyen d'un utilisateur m dans la $i^{\text{ème}}$ cellule LPLT	64
F_i	Taille de fichier du contenu multimédias I_i	121
γ_0	<i>signal-to-noise ratio</i> (SNR) moyen d'un utilisateur situé à la limite de couverture d'une cellule LPLT	61
γ_m	SNR moyen d'un utilisateur situé à une distance d_m de l'émetteur LPLT	60

γ_0^{bc}	SNR de réception minimum de l'émetteur HPHT pour garantir la qualité de service (QoS) ciblée.....	58
λ	Longueur d'onde du signal.....	57
L_p^{bc}	Pertes de propagation issues du bilan de liaison entre l'émetteur HPHT et les utilisateurs.....	58
L_p^{uc}	Pertes de propagation de la liaison entre un utilisateur et un émetteur LPLT.....	61
\mathcal{S}	Ensemble des contenus multimédias consommés sous formes de services non linéaires.....	121
\mathcal{M}^{bc}	Ensemble des utilisateurs présents dans la zone de couverture de l'émetteur HPHT.....	59
\mathcal{M}_i^{uc}	Ensemble des utilisateurs située dans la $i^{\text{ème}}$ cellule LPLT.....	64
$M_{i,max}^{uc}$	Nombre d'utilisateurs maximal supporté par une cellule LPLT.....	83
N_{LPLT}	Nombre d'émetteurs de type LPLT.....	54
M	Nombre d'utilisateurs dans la zone de service.....	55
M^{bc}	Nombre d'utilisateurs de l'ensemble \mathcal{M}^{bc}	59
P_{in}	Puissance consommée par un site de transmission.....	56
P_{in}^{bc}	Puissance consommée par l'émetteur HPHT.....	60
P_{in}^H	Puissance consommée par le réseau hybride.....	66
$P_{in,i}^{uc}$	Puissance consommée par le $i^{\text{ème}}$ émetteur LPLT.....	64
P_{max}	Puissance maximale de transmission d'un émetteur.....	56
p_i	Popularité associée au contenu multimédia I_i	121
P_{tx}^{bc}	Puissance moyenne de transmission de l'émetteur HPHT.....	58
P_{tx}^{uc}	Puissance de transmission d'un émetteur LPLT.....	61
B_{RB}	Largeur de bande occupée par un PRB.....	61
R_{bc}	Rayon de couverture de l'émetteur de type HPHT.....	54
ρ	Facteur d'utilisation des ressources spectrales disponibles au niveau de l'émetteur.....	56
ρ_i^{uc}	Facteur d'utilisation des ressources spectrales de la $i^{\text{ème}}$ cellule LPLT.....	65
R_{max}	Rayon de couverture maximale de l'émetteur HPHT.....	59
R_{uc}	Rayon de couverture d'un l'émetteur LPLT.....	61
η_{cible}	taux d'accès moyen au service ciblé.....	76

η_s^H	Taux d'accès moyen au service du réseau hybride	66
τ_i^H	temps moyen de service du réseau hybride pour un contenu I_i	126
$\eta_{m,i}^{uc}$	Variable binaire indiquant si l'émetteur LPLT a réussi à allouer $\overline{RB_m}$ PRB à l'utilisateur m	64
d_m	Distance entre un utilisateur m situé dans une cellule LPLT et l'émetteur LPLT	61
i	Indice de cellule LPLT	64
I_i	$i^{\text{ème}}$ contenu multimédias du service non linéaire.....	121
$L(d)$	Atténuation subie par le signal émis après avoir parcouru une distance d	57
m	Indice d'un utilisateur situé dans une cellule LPLT	61
P_0	Puissance consommée par un émetteur allumé mais qui n'émet aucun signal de données.....	56
P_n	puissance moyenne du bruit de réception des appareils mobiles	58
P_{sleep}	Puissance consommée par un émetteur en veille	56
T	Durée de disponibilité des contenus multimédias	121

INTRODUCTION

Contexte et motivations

Poussée par la numérisation de l'information et l'évolution permanente des technologies de communication, la consommation des contenus multimédias n'a cessé d'augmenter ces dernières années. Aujourd'hui, le stockage de musique et de vidéos, le partage de fichiers, les services de télévision et l'écoute de la radio, ne sont que quelques exemples de services multimédias utilisés au quotidien.

Traditionnellement, ces services multimédias étaient consommés sous forme de programmes radios ou télévisuels depuis un poste fixe connecté à un réseau de diffusion (par exemple DVB (Digital Video Broadcasting) en Europe, Advanced Television Systems Committee (ATSC) en Amérique du nord, etc.) à l'aide d'une antenne installée sur le toit du domicile. Ces programmes reçus par le grand public pouvaient être consommés immédiatement de façon linéaire comme la télévision en direct par exemple ou de façon non linéaire comme la télévision de rattrapage ou encore la vidéo à la demande. Les services linéaires font référence aux services que les utilisateurs reçoivent passivement et pour lesquels l'instant de diffusion des contenus est prédéterminé par l'opérateur de réseaux. En revanche, pour les services non linéaires, les utilisateurs peuvent choisir les contenus qu'ils souhaitent recevoir et l'instant de consommation de ces contenus en toute liberté.

Aujourd'hui, ces services multimédias sont encore consommés sur des postes fixes connectés à un réseau de diffusion qui est généralement optimisé pour des services linéaires en réception fixe. Cependant, avec l'évolution constante des technologies du numérique associée à la forte pénétration des appareils mobiles et intelligents comme les *smartphones* et tablettes, un nouveau mode de consommation de ces services multimédias est apparu. Équipés avec des appareils mobiles plus performants (plus petits, moins chers et avec plus de fonctionnalités) et bénéficiant d'une meilleure couverture mobile à haut débit, les utilisateurs expriment de plus en plus le besoin d'être connectés à tout moment. Cette connectivité se traduit par l'évolution des usages qui aboutit à la création de nouveaux services au sein des réseaux cellulaires comme la consommation de contenus multimédias avec les appareils mobiles.

Ainsi, la consommation des services multimédias avec les appareils mobiles représentent

aujourd'hui une proportion importante du trafic de données dans les réseaux cellulaires. Selon la dernière étude Visual Networking Index (VNI) de Cisco sur l'évolution du trafic des données dans les réseaux cellulaires, le trafic de données sera multiplié par dix chaque année de 2015 à 2020 [1]. De plus, 70% de ce trafic sera constitué de contenus vidéos qui seront consommés immédiatement de façon linéaire ou en différé de façon non linéaire. Par exemple, selon un sondage sur la consommation de vidéos réalisé en 2012 au Royaume-Uni [2], 63% des personnes interrogées ont déclaré regarder des vidéos sur un appareil mobile de type *smartphone* ou tablette. 50% de ces utilisateurs mobiles préfèrent regarder ces vidéos en direct contre 40% en différé. Afin de relever les nouveaux défis liés à l'évolution des usages et services, les opérateurs de réseaux cellulaires doivent faire face à cette croissance de la consommation de données mobiles qui est annoncée comme exponentielle.

Face à l'émergence des utilisateurs mobiles et à la popularité croissante des services multimédias, l'utilisation du mode de transmission point-à-point (*unicast*) traditionnel risque de conduire à un engorgement rapide des réseaux cellulaires au détriment de la qualité de service rendu. Traditionnellement, lorsque la capacité offerte par le réseau a atteint des limites critiques, les opérateurs comptaient sur certaines solutions techniques reposant sur l'acquisition de ressources spectrales additionnelles, la densification de leurs infrastructures d'accès au réseau radio (RAN), ou encore le passage à la dernière technologie de communication mobile (par exemple LTE (Long Term Evolution)).

Cependant, même dopés avec de nouvelles ressources spectrales, les gains de performances et d'efficacité de ces solutions techniques resteront en décalage avec les exigences des futures générations de réseaux cellulaires. En effet, les principaux verrous de ces solutions sont liés à la cohabitation de nombreuses cellules voisines, la gestion des interférences co-canal que les cellules génèrent entre elles, la gestion des mécanismes de *handover*, etc. Pour toutes ces raisons, de nouvelles solutions ont été proposées pour faire face à cette évolution exponentielle de la consommation de données.

Ainsi, le déploiement des réseaux d'accès hétérogènes ou hybrides, utilisant plusieurs technologies permettant le délestage du trafic mobile de données, se présente comme une solution attractive qui offre aux opérateurs la possibilité de transférer une partie du trafic des réseaux cellulaires vers des réseaux alternatifs à bas prix. En effet, de nombreuses études ont montré, qu'un mode de transmission point-à-multipoint (*broadcast*) restait compétitif techniquement et économiquement pour l'acheminement des contenus les plus fréquemment demandés, ceci à partir d'infrastructure de réseau de diffusion existante ou hybridée. Le mode de transmission *unicast* reste quant à lui pertinent pour acheminer les contenus individualisés, à la demande.

De telles approches existent déjà avec le rapprochement des réseaux cellulaires 3GPP (3rd Generation Partnership Project) et des réseaux IEEE WiFi pour délester une partie du trafic des réseaux cellulaires dans les réseaux WiFi domestiques ou publics. Ces approches hybrides peuvent être complétées par un réseau de diffusion qui est plus adapté pour déles-

ter les services destinés à un grand nombre d'utilisateurs. De plus, avec l'introduction de la composante de diffusion eMBMS (enhanced Multimedia Broadcast Multicast Service) dans la quatrième génération de réseaux mobiles (4G), les industriels envisagent de plus en plus de faire converger les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion afin d'offrir des services multimédias riches et de qualité aux utilisateurs basés sur des méthodes de transmission efficaces et optimisées. Cette coopération ouvre ainsi des perspectives de services à valeur ajoutée pour l'utilisateur et de nouvelles sources de revenus pour les opérateurs.

Objectifs et contributions

Cette thèse porte sur la définition et l'optimisation d'un système hybride de diffusion de contenus multimédias pouvant exploiter de façon complémentaire deux infrastructures réseaux existantes et radicalement différentes, à savoir les réseaux cellulaires (basés sur la norme LTE) et les réseaux de diffusion basés sur les normes DVB-T2 (Second Generation of Digital Video Broadcasting - Terrestrial), DVB-NGH (Digital Video Broadcasting-Next Generation Handheld) ou éventuellement la composante de diffusion eMBMS de la norme LTE.

Dans un premier temps nous allons nous consacrer à la modélisation et à la simulation du réseau hybride en considérant un scénario d'extension de couverture, où les deux réseaux coopèrent pour distribuer des services linéaires aux utilisateurs mobiles. A l'aide du simulateur système développé par l'université de Vienne, nous évaluerons les performances du réseau hybride en termes de capacité, consommation de puissance et efficacité énergétique.

Dans un second temps, nous nous intéresserons à l'optimisation de la capacité, puis de la consommation énergétique et de l'efficacité énergétique du réseau hybride pour la diffusion de ces services linéaires. Sur la base du modèle hybride, nous proposerons une approche théorique, basée sur la distribution des utilisateurs, pour trouver une expression analytique de la zone de couverture optimale du réseau de diffusion tout en tenant compte de la qualité du service rendu aux utilisateurs. Les résultats théoriques seront confrontés aux résultats obtenus à l'aide du simulateur système. Nous étudierons également l'impact de la popularité du service (en termes de nombre d'utilisateurs demandant le service) sur cette zone de couverture optimale.

Enfin, dans un troisième temps, nous proposerons une extension de la modélisation du réseau hybride pour la diffusion des services non linéaires comme la vidéo à la demande, le téléchargement de fichiers, etc. Nous proposerons ainsi une formalisation du problème d'optimisation en tenant compte des contraintes liées à ces services non-linéaires, en particulier le temps d'attente et de téléchargement ainsi que la fiabilité des transmissions radios.

En résumé, l'objectif de ce travail est de modéliser l'hybridation des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion. Ce modèle permettra, d'une part d'évaluer le gain de telles approches hybrides, et d'autre part, de mettre en évidence les scénarios et stratégies de trans-

mission de contenus multimédia les plus avantageux en fonction de critères donnés dans le contexte des réseaux « 4G avancés » voire « 5G ».

Plan des travaux de thèse

Cette thèse présente les travaux sur la coopération des réseaux cellulaires et de diffusion à travers six chapitres articulés comme suit.

Le premier chapitre porte sur la présentation des réseaux cellulaires et de diffusion. Après une brève présentation de l'évolution des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion, ce premier chapitre introduit les principaux systèmes de transmission utilisés dans ces deux réseaux. Les paramètres de base des couches physiques de ces systèmes ainsi que les nouvelles technologies introduites sont présentés. Ainsi, ce premier chapitre donne un aperçu du fonctionnement de base des réseaux d'accès radio des systèmes cellulaires et de diffusion. Enfin les tendances liées à la consommation des services multimédias sont abordées dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre est consacré à la synthèse des différents scénarios de coopération des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion. Ces scénarios sont issus de différents groupes de réflexion dont l'objectif principal est d'identifier les futurs scénarios d'utilisation des ressources spectrales dédiées aux réseaux de diffusion et de proposer des stratégies efficaces de gestion des ressources afin de faire face à l'évolution de la consommation de services multimédias sur les appareils mobiles. La synthèse présentée a permis de mettre en avant l'intérêt et le potentiel de l'hybridation des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion. Ce chapitre dresse également un état des travaux de recherche sur la coopération de ces deux types de réseaux.

Le troisième chapitre porte sur la modélisation et la simulation du réseau hybride. Le réseau hybride considéré est constitué d'un réseau cellulaire composé de plusieurs émetteurs *Low Power Low Tower* (LPLT) et d'un réseau de diffusion composé d'un seul émetteur *High Power High Tower* (HPHT). Dans le cadre de cette thèse, le service multimédia proposé peut être transmis indifféremment sur l'une ou l'autre des composantes du réseau hybride. Le modèle proposé repose sur une étude statistique de certaines propriétés du réseau hybride et des utilisateurs pour évaluer les performances du réseau hybride en terme de capacité, taux d'accès au service, puissance consommée et efficacité énergétique. Les résultats des simulations menées montrent que la coopération améliore les performances du réseau pour la distribution des services multimédias.

Les chapitres 4 et 5 mettent en évidence un des points les plus importants de la thèse dans la mesure où ils traitent de l'optimisation des performances du réseau hybride pour la distribution des services multimédias de façon linéaire en utilisant le modèle analytique présenté dans le chapitre 3. L'optimisation du réseau hybride permet ainsi d'obtenir les pa-

ramètres optimaux de planification de la composante de diffusion dans un scénario de coopération entre un réseau cellulaire et un réseau de diffusion.

Le dernier chapitre présente une extension de la modélisation analytique du réseau hybride pour la distribution des services multimédias de façon non linéaire. Les contraintes liées aux services linéaires étant différentes de celles des services linéaires, nous introduisons dans ce chapitre de nouvelles métriques de performances comme le temps de transmission du service pour évaluer l'impact et l'intérêt de la coopération des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion.

Liste des publications

Revue internationale à comité de lecture

1. P. A. Fam, S. Paquelet, M. Crussière, J. F. Hélard, and P. Br etillon. Analytical derivation and optimization of a hybrid unicast-broadcast network for linear services. *IEEE Transactions on Broadcasting*, PP(99) :1–13, 2016.
2. V. Savaux and P. A. Fam. A General Modeling for Key Performance Indicators Optimization in Two-Tier Heterogeneous Networks. submitted to *IEEE Access*.

Communications internationales avec actes et à comité de lecture

1. P. A. Fam, M. Crussière, S. Paquelet, J. F. H elard, and P. Br etillon. Energy Efficiency Optimization of Hybrid Unicast-Broadcast Networks for Mobile TV Services. submitted to *IEEE International Conference on Communications 2017*.
2. P. A. Fam, S. Paquelet, M. Crussière, J. F. H elard, and P. Br etillon. Optimal capacity of hybrid unicast-broadcast networks for mobile tv services. In *2016 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, pages 1–5, June 2016.
3. P. A. Fam, S. Paquelet, M. Crussière, J. F. H elard, and P. Br etillon. On The Energy Efficiency of Hybrid Unicast-Broadcast Networks for Mobile TV Services. In *Journée Scientifique URSI-France 2016 Energie et Radiosciences*, Rennes, France, March 2016.
4. P. A. Fam, M. Crussière, J. F. Hélard, P. Br etillon, and S. Paquelet. Global throughput maximization of a hybrid unicast-broadcast network for linear services. In *2015 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pages 146–150, Aug 2015.

RÉSEAUX DE DISTRIBUTION DES SERVICES MULTIMÉDIAS MOBILES

Introduction

Un service multimédia est défini comme étant un service de données audiovisuelles regroupant des contenus multimédias de type voix, vidéos, images, audio, etc.. Ces services multimédias ont connu un grand succès auprès des utilisateurs ces dernières années, notamment avec l'arrivée des appareils mobiles intelligents comme les *smartphones* et tablettes. En effet, ces appareils mobiles offrent la possibilité aux utilisateurs de consommer ces services multimédias partout et à tout moment. À titre d'exemple, beaucoup d'utilisateurs regardent une vidéo ou les *news* sur leurs *smartphones* en attendant le bus.

Pour offrir une bonne qualité de service aux utilisateurs, ces services multimédias sont rendus disponibles sur plusieurs réseaux de distribution. Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons principalement à la diffusion de ces services multimédias via les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion. Ainsi, nous commençons par présenter l'évolution de ces deux réseaux. Puis, nous abordons les différentes normes utilisées dans les réseaux de diffusion et les réseaux cellulaires et présentons les paramètres de base des systèmes de transmission pour la diffusion de ces services multimédias. Enfin, nous décrivons l'évolution de la consommation des services multimédias sur les appareils mobiles.

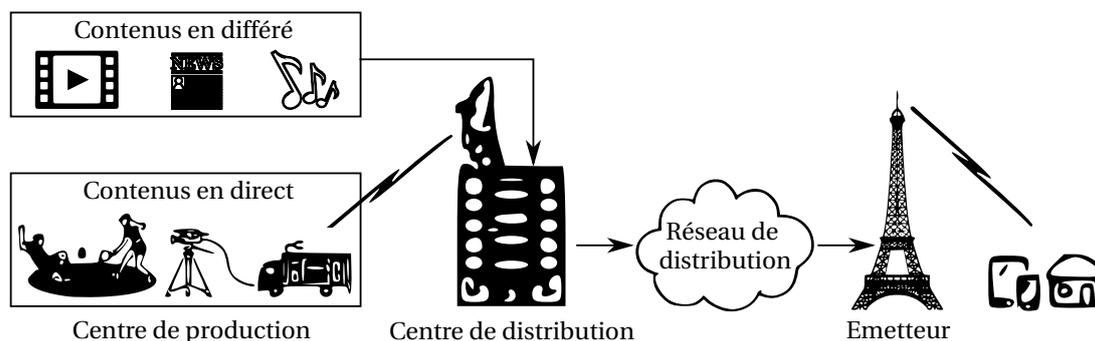


FIGURE 1.1 – Schéma de principe d'un réseau de diffusion

1.1 Histoire et évolution des réseaux de diffusion

Dans les années 1940, les services multimédias (audio et vidéo) étaient principalement consommés à travers les programmes télévisuels et radios. Ces programmes reçus par le grand public étaient diffusés par un réseau complexe d'émetteurs qui nécessite un placement des antennes de transmission en hauteur (collines, tours, etc.) afin de couvrir une zone de grande dimension et atteindre ainsi un très grand nombre d'utilisateurs. Les programmes, journaliers et composés dans les centres de production, mélangeaient soit des éléments *en direct*, c'est-à-dire des éléments créés à l'instant précis de leur diffusion, soit des éléments *en différé*, à partir de contenus déjà créés et enregistrés. Une fois créés, les premiers programmes étaient distribués par voie hertzienne terrestre comme illustré sur la figure 1.1 qui présente un schéma de principe d'un réseau de diffusion terrestre. Le réseau de diffusion est composé d'un centre de production, de plusieurs émetteurs de haute puissance et d'un réseau de communication entre le centre de production et les différents émetteurs.

Les services multimédias, notamment les programmes télévisuels et radios, seront disponibles par la suite sur d'autres supports (câble, satellite, Internet...). Cependant, dans le cadre de cette thèse nous nous intéresserons principalement aux réseaux terrestres de diffusion des services multimédias et particulièrement des programmes télévisuels.

1.1.1 La télévision analogique terrestre

Les premiers réseaux de diffusion terrestre par voie hertzienne étaient basés sur une transmission analogique. En effet, le principe de transmission des programmes télévisuels était assez simple. Les programmes télévisuels (film, reportage, émission, etc.) étaient représentés par un flux continu de données analogiques (images et sons) diffusé via un canal de transmission vers tous les utilisateurs. Ainsi, les utilisateurs recevaient le signal analogique et le visualisaient sur un poste de télévision. Les signaux correspondant à un programme té-

lévisuel étaient transmis dans les bandes *Ultra High Frequency* (UHF) et *Very High Frequency* (VHF). Ces signaux analogiques terrestres étaient de deux types, l'image et le son. Ces deux signaux étaient transmis à l'aide de deux émetteurs distincts alimentant la même antenne de transmission. Le son était transmis soit en modulation d'amplitude (A.M.), comme en France par exemple, soit en modulation de fréquence (F.M.) sur une porteuse. L'image, quant à elle, était transmise en modulation d'amplitude dite à bande résiduelle sur une porteuse principale, afin de réduire l'encombrement spectral [3]. Le codage vidéo des programmes étaient le même que le codage vidéo de la transmission. Les normes les plus importantes et les plus connues pour le codage de la vidéo analogique étaient : PAL et SECAM [4] en Europe et NTSC[5] aux États-Unis.

Aujourd'hui la télévision analogique terrestre a été remplacée par la télévision numérique terrestre. En effet, la télévision numérique terrestre est plus efficace et introduit de nombreuses améliorations.

1.1.2 La télévision numérique terrestre

Ces dernières années, les technologies des réseaux de diffusion ont subi d'importantes évolutions, introduisant de nombreuses améliorations en termes de techniques de transmission et de qualité de service (QoS). Nous pouvons citer à titre d'exemple le passage de la télévision en noir et blanc à la télévision en couleur, puis le passage à la haute (HDTV (High Definition TeleVision)) et bientôt le passage à l'ultra haute définition (UHDTV (Ultra High Definition TeleVision)). Cependant, l'évolution la plus marquante est le passage aux technologies du tout numérique.

Avec le passage à la Télévision Numérique Terrestre (TNT), reposant sur les technologies multiporteuses, il est désormais possible de mettre en œuvre des réseaux à fréquence unique. Dans un réseau monofréquence, les émetteurs voisins diffusent, de façon synchronisée, le même programme au même instant sur le même canal de transmission. En effet en analogique, lorsqu'un programme était émis sur un canal de transmission donné, il n'était pas possible de diffuser le même programme sur le même canal depuis un émetteur voisin. Il fallait donc mettre en œuvre des réseaux multifréquences. Par exemple en France, 45 canaux UHF étaient nécessaires pour la diffusion sur tout l'hexagone d'uniquement 5 programmes télévisuels en analogique.

La TNT se caractérise par le fait que les programmes (images et sons) et les données sont numérisés et ordonnés dans un flux unique. En résumé, le passage de la télévision analogique à la TNT présente de nombreux avantages :

- La réception d'un plus grand nombre de programmes télévisuels avec une meilleure qualité d'images et de sons et la possibilité de mettre en œuvre des réseaux monofréquences.
- Une meilleure gestion des fréquences de transmission.

Tableau 1.1 – Première et deuxième générations des systèmes de diffusion terrestre

Système	Technologie	Capacité ¹ (Mbps)
ATSC[7]	Mono-porteuse	6.0 – 27.5
DVB-T [7]	Multi-porteuse (OFDM)	5.0 – 31.7
ISDB-T [7]	Multi-porteuse (OFDM segmenté)	4.9 – 31.0
DTMB[7]	Mono ou multi porteuse (OFDM)	4.8 – 32.5
DVB-T2 ⁴ [8]	Multi-porteuse (OFDM)	5.4 – 50.4
ATSC 3.0 ³ [9]	Multi-porteuse (OFDM)	1 – 57 ²

¹ Largeur de bande : 8 MHz; ² Largeur de bande : 6 MHz;

³ Dernière génération des systèmes ATSC;

⁴ Seconde génération des systèmes DVB.

- La possibilité de sauvegarder les contenus diffusés (émissions, films, etc.) sur un disque dur.
- L'accès aisé à des catalogues de programmes décrivant les horaires de diffusion et les services associés.
- La programmation aisée de l'enregistrement des contenus et l'intégration aisée de nouveaux services interactifs.

Si pour la radio les transmissions numériques coexistent encore avec des transmissions analogiques, pour la télévision une transition totale de l'analogique au numérique est maintenant achevée en Europe et dans plusieurs pays dans le reste du monde [6].

Aujourd'hui, la TNT est le moyen de réception des programmes télévisuels le plus répandu dans le monde avec quatre normes de diffusion distinctes. Ces normes ont été spécifiées par quatre organisations concurrentes : Advanced Television Systems Committee (ATSC) aux états-unis, DVB (Digital Video Broadcasting) en Europe, Digital Terrestrial Multimedia Broadcast (DTMB) en Chine et Integrated Services Digital Broadcasting (ISDB) au Japon. L'Union Internationale des Télécommunications (UIT) a classé ces normes de diffusion ainsi que leurs évolutions en deux générations. Les normes de la première génération ont été regroupées dans la recommandation *ITU-R BT.1306-7* [7], et celles de la seconde génération dans la recommandation *ITU-R BT.1877-1* [8]. L'UIT définit également dans ces recommandations l'ensemble des paramètres techniques de ces systèmes de transmission (largeur de bande de transmission, schémas de modulation et de codage, etc.). Ces systèmes sont par nature flexibles et reconfigurables pour s'adapter à différentes conditions de réception des services. Le tableau 1.1 résume les différentes normes de transmission recommandées par l'UIT. L'état de déploiement de ces normes est illustré sur la figure 1.2.

Nous pouvons observer sur la figure 1.2 que les systèmes de la première génération (DVB-T (Digital Video Broadcasting-Terrestrial)) et de la seconde génération (DVB-T2) de la norme

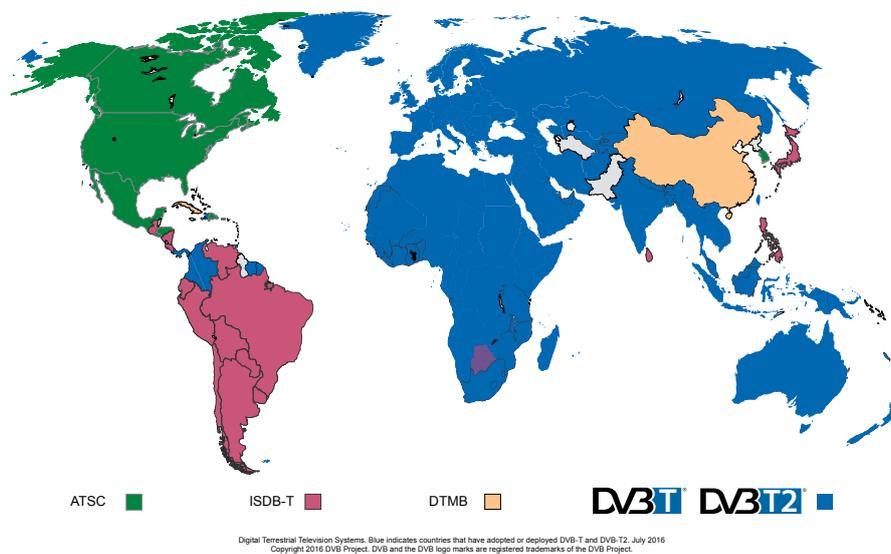


FIGURE 1.2 – État de déploiement des systèmes de transmission numérique de télévision terrestre dans le monde

DVB sont les systèmes de diffusion les plus adoptés dans le monde. Par ailleurs, la seconde génération des normes DVB (DVB-T2) est aujourd’hui l’un des systèmes de diffusion le plus avancé en termes d’efficacité et de flexibilité. Elle offre en effet une capacité plus élevée, une meilleure efficacité spectrale et énergétique comparé aux autres normes concurrentes.

Enfin, à coût équivalent, le passage à la télévision numérique permet la diffusion d’un plus grand nombre de programmes avec une meilleure qualité d’image et de son, notamment la haute et ultra haute définition. En plus d’offrir une meilleure QoS que la télévision analogique, la télévision numérique offre une meilleure gestion des ressources spectrales utilisées permettant ainsi de libérer des bandes de fréquences dans le spectre UHF. Ces bandes de fréquences libérées par la transition de l’analogique au numérique sont souvent associées au terme de *dividende numérique*.

1.1.3 Dividende numérique : attribution des bandes des 700 MHz et des 800 MHz

Le spectre UHF, en particulier la bande 470 – 862 MHz, a longtemps été utilisé par les réseaux de diffusion pour offrir en libre accès des programmes télévisuels à un grand nombre de personnes. Cependant, avec la transition vers la télévision numérique, les efforts de ré-aménagement et d’harmonisation internationale du spectre UHF, initiés à l’UIT et dans de nombreuses organisations régionales, ont conduit à une mise en œuvre rapide du dividende

numérique. Ainsi, lors de la Conférence Mondiale des Radiocommunications (CMR) qui s'est tenue en novembre 2012, une partie de ce spectre libéré, plus précisément la bande des 800 MHz (790 – 862 MHz), a été attribuée aux opérateurs de réseaux cellulaires pour le développement des futurs systèmes mobiles 3G (IMT-2000) et 4G (IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications Advanced)) et pour répondre également aux besoins en terme de capacité de ces futurs systèmes IMT-Advanced [10]. En novembre 2015 lors de la CMR-15, une partie supplémentaire des ressources spectrales dédiées à la diffusion de la télévision, en particulier la bande des 700 MHz (694 – 790 MHz), a été de nouveau attribuée aux opérateurs de réseaux cellulaires, dans l'objectif de faire face à l'explosion du trafic de données mobiles prévue d'ici 2020 [1].

L'attribution de la bande des 800 MHz a déjà pris effet dans de nombreux pays dans le monde. Par exemple en France, plusieurs opérateurs ont déployé leur réseau 4G dans cette bande des 800 MHz. Par contre, l'utilisation de la bande des 700 MHz ne sera possible qu'à partir de 2020, conformément au rapport Lamy [11]. En effet, cette réduction des ressources spectrales allouées aux réseaux de diffusion a poussé de nombreux acteurs de la radiodiffusion à se regrouper pour défendre ainsi la bande de radiodiffusion UHF couvrant la partie 470–694 MHz. Dans ce contexte, la commission européenne a mis en place un groupe de travail sur l'utilisation future de la bande UHF, avec comme principal objectif de parvenir à un résultat *win-win*. Ce rapport Lamy est donc le fruit de cette initiative.

1.1.4 FoBTV/ATSC 3.0 : vers un système de diffusion mondial

FoBTV. Face à la réduction des ressources spectrales disponibles et à la fragmentation du marché de la télévision numérique, plusieurs acteurs de la communauté des diffuseurs de la télévision numérique (ATSC, DVB), Association of Radio Industries and Businesses (ARIB), etc.) se sont regroupés pour former une initiative désignée sous le nom de FoBTV (Future of Broadcast Television) et créée en 2012. L'objectif principal de FoBTV est de rallier tous les acteurs de la communauté broadcast dans le monde vers une norme de diffusion unique et mondiale. Cette initiative a également pour rôle de :

- Développer le futur écosystème pour la diffusion terrestre de contenus multimédia tout en prenant en compte les aspects économiques, techniques et réglementaires.
- Spécifier les exigences de futures générations de systèmes de diffusion terrestre.
- Renforcer la collaboration entre les différents acteurs de la diffusion de la télévision numérique.
- Fournir des briques technologiques pour la spécification des futures normes de diffusion.

ATSC 3.0. Le standard ATSC 3.0 est prévu pour être l'évolution la plus récente des systèmes numériques de radiodiffusion [12, 9]. En phase avec les objectifs de FoBTV, le système ATSC

3.0 vise à devenir la norme de référence dans le domaine de la radiodiffusion. En effet, le système ATSC 3.0 est spécifié pour offrir l'un des systèmes les plus avancés et robustes et les plus efficaces dans la gestion du spectre tout en offrant les paramètres les plus flexibles possibles pour satisfaire les besoins en termes de couverture et de qualité de service des diffuseurs. Ainsi, la couche physique du système ATSC 3.0 est basée sur les dernières avancées technologiques des systèmes DVB-T2 mais elle introduit également un certain nombre de nouveautés. Nous pouvons citer par exemple, l'utilisation de nouvelles techniques de transmission comme les constellations non uniformes à deux dimensions, les techniques de multiplexage par couche, les transmissions multi-antennes MISO (Multiple Input Single Output), MIMO (Multiple Input Multiple Output), etc.. Cependant, la nouveauté la plus marquante est le remplacement de la couche transport MPEG-TS par une couche transport basée sur le protocole IP (Internet Protocol). Le passage vers une couche transport IP permet de faciliter le rapprochement entre les réseaux de diffusion et les réseaux cellulaires pour la diffusion de nouveaux services multimédias et internet.

1.2 Histoire et évolution des réseaux cellulaires

Historiquement pensés pour échanger des appels téléphoniques, les réseaux cellulaires ont évolué, ces dernières décennies, et proposent aujourd'hui une nouvelle gamme de services multimédias et internet. En effet, l'histoire des réseaux cellulaires est marquée par plusieurs générations de communications mobiles. Chaque génération successive, plus performante que les précédentes, repose sur une technologie dominante. Dans cette section, nous présentons brièvement l'évolution de ces générations. On distingue ainsi quatre générations de systèmes cellulaires : 1G, 2G, 3G et 4G.

1.2.1 La première génération de réseaux mobiles

Dans les années 1980, la première génération de réseaux mobiles (1G) offrait uniquement un service de téléphonie mobile. Basée sur des systèmes de transmissions analogiques, cette première génération présentait quelques défauts comme, l'incompatibilité des normes d'un pays à l'autre, une transmission analogique non sécurisée, l'impossibilité d'itinérance internationale (aussi appelée *roaming*) et les appareils utilisés étaient particulièrement volumineux. La 1G a été remplacée dès l'apparition d'une seconde génération plus performante utilisant une technologie numérique.

1.2.2 La deuxième génération de réseaux mobiles

Dans les années 1990, la deuxième génération de réseaux mobiles (2G) est apparue avec le GSM (Global System for Mobile communications). La technologie GSM donne accès au service de type voix en mobilité, mais aussi aux messages textes courts plus connus sous le nom de SMS (Short Message Service). Le GSM est une norme mondiale qui s'appuie sur des transmissions numériques permettant de sécuriser les communications avec du cryptage. Comparé à la 1G, le système GSM autorise l'itinérance internationale et apporte une meilleure qualité de communications et une plus grande capacité tout en réduisant le coût d'accès aux services pour l'utilisateur.

Les progrès technologiques réalisés dans la conception de circuits hyperfréquences et de dispositifs de traitement numérique du signal ont permis une réduction conséquente de la taille des terminaux, offrant ainsi une réelle mobilité. La 2G a connu ainsi un énorme succès et a permis de susciter le besoin de téléphoner en tout lieu avec la possibilité d'émettre des mini-messages. Devant ce succès, des bandes de fréquences supplémentaires ont été proposées aux opérateurs pour acheminer toutes les communications, et de nouveaux services sont aussi apparus, notamment les MMS (Multimedia Messaging Service) et les applications M2M (Machine To Machine) comme par exemple la commande de produits à approvisionner dans une machine de distribution (machine à café, etc.).

Cependant, le débit maximal de 9.6 kbps proposé par le GSM était insuffisant pour permettre un accès fluide et rapide aux services de données. De nouvelles techniques de modulations et de codages sont ainsi apparues telles que GPRS (General Packet Radio Service) et EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) dans le but d'accroître les débits offerts. Toutefois, à la fin des années 1990, les débits fournis par les réseaux 2G étaient encore trop limités pour que l'accès aux services de données soit suffisamment fluide. Cette limitation fut à l'origine de la troisième génération de réseaux mobiles.

1.2.3 La troisième génération de réseaux mobiles

La troisième génération de réseaux mobiles (3G) est caractérisée par les exigences des systèmes IMT-2000 (label donné aux systèmes 3G par l'UIT) pour permettre l'utilisation des applications vidéos sur le téléphone mobile mais aussi par la volonté des industriels de télécommunications de définir une norme au niveau mondial. Les enjeux étaient d'offrir une itinérance globale aux utilisateurs, mais également de réduire les coûts unitaires des terminaux mobiles et des équipements de réseaux grâce aux économies d'échelle. Dans cette perspective, ces entreprises, en particulier celles issues du monde du GSM se sont regroupées au sein d'un consortium désigné sous le nom de 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Créé en 1998 à l'initiative de l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute), le 3GPP a pour objectif de définir, maintenir et développer des spécifications des systèmes de communications de réseaux mobiles. Son rôle consiste également à vérifier et à assurer la compatibilité des équipements de différents constructeurs.

Cette démarche aboutit à l'élaboration de la norme UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) à la fin des années 1990. La première version de la norme est appelée Release 99. L'UMTS Release 99 utilise la technologie W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) qui repose sur une technique d'accès multiples à répartition par les codes CDMA (Code Division Multiple Access). Chaque appel est associé à un code spécifique connu de la station de base et du terminal, qui permet de le différencier des autres appels en cours sur la même porteuse. La Release 99 est limitée à un débit maximal de 384 kbps. Les objectifs de l'UMTS étaient d'accroître la capacité du système pour le service voix mais surtout d'améliorer le support des services de données. Cependant pour des applications de type navigation sur internet, consultation de vidéos sur youtube, visiophonie, ce débit maximal offert reste insuffisant.

Ainsi, l'UMTS connaît deux évolutions majeures : le HSPA (High Speed Packet Access) et le HSPA+ (High Speed Packet Access+). Ces deux évolutions ont permis d'augmenter considérablement les débits fournis dans les sens montant et descendant. Le tableau 1.2 présente une comparaison de ces technologies 3GPP de la 3G avec celles de la 2G.

L'UMTS et ses évolutions (HSPA, HSPA+) sont aujourd'hui largement déployés dans le monde. Les réseaux 3G ont ainsi rencontré un succès commercial croissant en lien avec le

Tableau 1.2 – Comparaison des technologies 3GPP de la 2G et 3G

	GSM GPRS/EDGE	UMTS Release 99	HSPA	HSPA+ Release 8
Débit de données DL	236 kbps	384 kbps	14.4 Mbps	42 Mbps
Largeur de canal	200 kHz	5 MHz	5 MHz	5 MHz
Méthodes d'accès	FDMA , TDMA	CDMA	CDMA , TDMA	CDMA , TDMA
Modulation DL	GSMK	QPSK	QPSK, 16QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM
Modulation UL	8PSK	BPSK	BPSK, QPSK	BPSK, 16QAM, QPSK
Bandes de fréquences usuelles (MHz)	900, 1800	900, 2100	900, 2100	900, 2100

développement de nouveaux services multimédias (Internet mobile, TV, vidéo, applications mobiles, etc.) mais aussi grâce à l'arrivée de nouveaux appareils mobiles (*smartphones*, clés 3G+, modules intégrés aux ordinateurs portables) favorables à ces usages.

1.2.4 La quatrième génération de réseaux mobiles

Devant cette popularité croissante des nouveaux services internet et multimédias générés par l'arrivée des nouveaux appareils mobiles, l'UIT a défini un certain nombre d'exigences pour la spécification des systèmes des futures générations IMT-Advanced. Ces exigences IMT-Advanced, en termes de largeur du canal de transmission, débits, efficacité spectrale et latence pour la quatrième génération de réseaux mobiles (4G), sont présentées au tableau 1.3.

Ainsi, le système LTE a été envisagé dès novembre 2004 comme l'évolution à long terme de l'UMTS. Les travaux sur cette nouvelle technologie ont débuté au 3GPP en janvier 2005 avec une étude de faisabilité, qui s'est conclue en septembre 2006 par la définition des grands principes de la technologie LTE. Les travaux de spécifications se sont déroulés jusqu'à décembre 2008, date de la première version de la spécification nommée LTE Release 8. Le LTE est ainsi défini dans cette Release 8 du 3GPP.

Succédant à la 3G et aux évolutions de la norme UMTS (HSPA, HSPA+), la norme LTE apparaît avant tout comme une rupture technologique.

Tout d'abord, la norme introduit une nouvelle interface radio utilisant l'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), une méthode d'accès multiple basée sur l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), qui permet d'obtenir des débits élevés en tirant partie de l'allocation des ressources par blocs de sous porteuses, en fréquence et en temps. En effet, cette allocation par blocs de ressources spectrales permet, d'une part, l'utili-

Tableau 1.3 – Exigences IMT-Advanced et les normes LTE (Long Term Evolution) et LTE-A (Long Term Evolution Advanced).

	IMT Advanced	3GPP LTE Release 8	3GPP LTE-A Release 10
Largeur de canal (MHz)	≤ 100	≤ 20	≤ 100
Débits crêtes DL/UL (Mbps)	1000 ¹ / 100 ²	300/75	1000/500
Efficacité spectrale crête⁴	DL(4 × 4/8 × 8)	15/–	16/30
	UL(2 × 2/4 × 4)	6.75	8.4/16.8 ³
Latence (ms)	Plan données	< 10	< 6
	Plan contrôle	< 100	50

¹ faible mobilité ; ² forte mobilité ; ³ mode FDD (Frequency Division Duplex) ; ⁴ en bit/s/Hz.

sation d'une large bande passante pour un utilisateur afin d'améliorer la diversité spectrale. D'autre part, elle permet également une répartition fine des fréquences, basée sur la qualité des liens radios, permettant d'exploiter la diversité multi-utilisateurs pour maximiser les capacités offertes. Par ailleurs, l'architecture du cœur de réseau existant a été modifiée pour fournir une connexion en tout IP.

Du fait du saut technologique qu'il représente, le système LTE est souvent considéré comme constituant la quatrième étape de l'évolution des réseaux d'accès mobiles, ou 4G. Cependant, selon les exigences IMT-Advanced présentées au tableau 1.3, les Releases 8 et 9 du système LTE ne remplissent pas les exigences des systèmes 4G. Par contre, la Release 10 de la norme LTE, plus connue sous le nom de LTE-A, est principalement marquée par l'adaptation du LTE afin de garantir l'ensemble des exigences IMT-Advanced. En effet, le LTE-A apporte des améliorations au LTE, notamment afin d'offrir une capacité de cellule supérieure et des débits pour chaque utilisateur plus élevés. Une synthèse accessible et commentée ainsi que les motivations de cette nouvelle technologie sont abordées dans l'ouvrage *LTE et les réseaux 4G* [13].

1.2.5 Vers la cinquième génération de réseaux mobiles

Alors que la 4G n'est pas encore entièrement déployée, industriels, chercheurs, gouvernements, institutions et opérateurs pensent déjà aux systèmes de demain : la cinquième génération de réseaux mobiles (5G). En effet un grand nombre d'entreprises et d'associations donnent leur vision de la 5G à travers des *white-papers* [14, 15, 16, 17]. Ces documents définissent un ensemble de challenges techniques qui nécessitent l'amélioration et l'évolution des systèmes de radiocommunication mobiles d'aujourd'hui afin de garantir les exigences



FIGURE 1.3 – Vision de la 5G

des futurs services et cas d'usages. Parmi les exigences de la 5G, nous pouvons citer :

- L'augmentation du trafic de données d'un facteur 1000.
- L'augmentation des débits par utilisateur d'un facteur 10 à 100 par rapport aux débits proposés par la 4G.
- L'augmentation du nombre d'objets connectés d'un facteur 10 à 100.
- La prolongation de la durée de vie des batteries d'un facteur 10 pour appareils à faible consommation.
- La réduction de la latence de bout-en-bout d'un facteur 5.

Comme illustré sur la Figure 1.3, les systèmes 5G visent à supporter un certain nombre de scénarios et cas d'usages aussi différents les uns des autres. Ainsi, à partir de ces exigences la 5G peut être définie comme [18] :

- Un réseau devant pouvoir répondre à une multiplicité de besoins incluant des objets et des nouveaux services (internet des objets, télédiffusion, vidéo à haute définition, réalité augmentée, etc.).
- Un réseau offrant une bonne QoS partout sur le territoire.
- Un réseau *vert* à faible émission, faible coût énergétique et à faible impact sur l'environnement.

- Une infrastructure sécurisée dans un contexte de virtualisation des fonctions réseaux.
- Un réseau mutualisé et convergent pouvant intégrer les technologies existantes 3GPP (2G, 3G et 4G) et non 3GPP (IEEE, DVB, etc.).

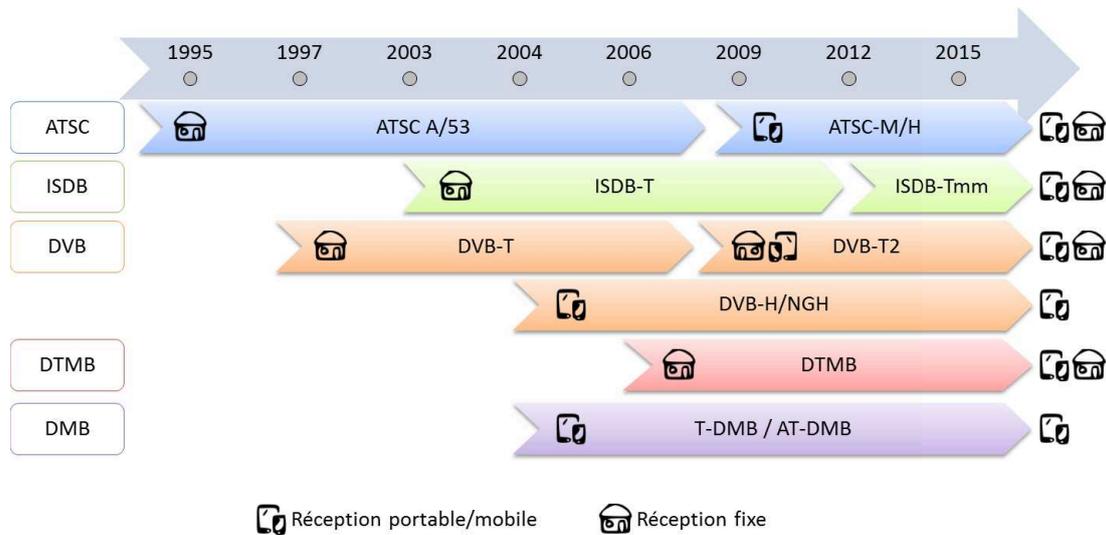


FIGURE 1.4 – Aperçu des systèmes de diffusion pour les services mobiles

1.3 Systèmes d'accès radio pour la diffusion de services multimédias sur appareils mobiles

Comme indiqué dans les sections précédentes, les réseaux de diffusion et les réseaux cellulaires n'ont cessé d'évoluer ces dernières années. Ces évolutions, basées sur les dernières avancées technologiques des systèmes de transmission, permettent non seulement de répondre aux besoins des utilisateurs qui sont de plus en plus exigeants mais aussi d'améliorer l'efficacité des réseaux existants ainsi que la qualité de service rendu. Ainsi, l'objectif de cette section est de présenter les nouvelles fonctionnalités des technologies de transmission introduites dans les réseaux de diffusion et les réseaux cellulaires pour la diffusion des services multimédias aux utilisateurs.

1.3.1 Aperçu des normes de diffusion mobiles

Initialement dédiés à la diffusion de programmes *traditionnels* sur les réseaux terrestres, les travaux de normalisation des systèmes de diffusion numérique se sont poursuivis afin de permettre la réception de ces programmes TV sur des appareils mobiles. Ainsi, l'UIT a défini des exigences et caractéristiques nécessaires pour chaque système de diffusion terrestre dans les recommandations *ITU-R BT.1833* [19] et *ITU-R BT.2016* [20]. En effet, certains systèmes présentés au tableau 1.1 à la section 1.1.2 intègrent déjà ces exigences et proposent des configurations adaptées pour une réception des services multimédias sur les appareils mobiles.

C'est le cas des systèmes ISDB-T et DVB-T2 qui offrent la possibilité de multiplexer dans le même canal de transmission des programmes télévisuels traditionnels et des services mobiles. D'autres systèmes ont été spécifiés en tenant compte de ces exigences pour les services mobiles. Nous pouvons citer par exemple les systèmes DVB-H (Digital Video Broadcasting-Handheld)/DVB-NGH (Digital Video Broadcasting-Next Generation Handheld), Digital Multimedia Broadcasting (DMB), MediaFlo et ATSC-M/H (ATSC Mobile Digital Television).

Le tableau 1.4 présente une brève description des différents systèmes de diffusion mobiles existants, et la figure 1.4 donne un aperçu de l'évolution de ces systèmes de diffusion.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéresserons à la deuxième génération de systèmes de diffusion numérique des services multimédias sur les appareils mobiles. Nous utiliserons plus précisément les paramètres du profil T2-lite de la norme DVB-T2.

1.3.2 Aperçu de la couche physique DVB-T2

La norme de transmission DVB-T2 (Second Generation of Digital Video Broadcasting - Terrestrial) [22] est l'état de l'art des systèmes de radiodiffusion. Publiée en 2009 par l'ETSI, elle succède à la norme DVB-T dont elle reprend la base tout en intégrant les dernières avancées technologiques pour offrir des performances plus élevées et une meilleure gestion des ressources spectrales. Ainsi, dans une bande de 8 MHz, le débit maximal proposé pour les services passe de 30 Mbps à 50 Mbps avec la norme DVB-T2.

Comme pour la norme DVB-T, DVB-T2 repose sur une modulation OFDM ; mais elle introduit de nouveaux paramètres et une large gamme de configurations. Les principales améliorations de la couche physique sont l'introduction des codes LDPC (Low-Density Parity-Check) et l'utilisation de tailles de FFT plus grandes (jusqu'à 32K) permettant de construire des réseaux monofréquences à très grande échelle.

Des durées de préfixes cycliques supplémentaires ont été ajoutées, notamment une durée de préfixe cyclique égale à $t_u/128$ où t_u est la durée utile du temps d'un symbole OFDM. Cette configuration permet, avec une taille de FFT de 32K, d'absorber des échos du signal émis allant jusqu'à $28 \mu s$ tout en minimisant la perte d'efficacité spectrale (inférieure à 0,8 %).

Les séquences pilotes ont été améliorées pour réduire l'*overhead* et offrir plus de flexibilité. Le codage de canal utilisé sur la couche physique combine les codes LDPC et BCH (Bose, Ray-Chaudhuri et Hocquenghem).

Par ailleurs, la norme DVB-T2 utilise plusieurs niveaux d'entrelacement (bit, cellule, temps et fréquence). Ceci permet de garantir une bonne robustesse du signal même dans de mauvaises conditions de réception. Le tableau 1.5 résume les paramètres de base de la couche physique DVB-T2 et du profil T2-Lite.

Tableau 1.4 – Description des systèmes de diffusion pour une réception mobile.

Système	Description du système
T-DMB [19]	DMB est un système de radiodiffusion numérique basé sur le système de radio numérique DAB. Le principe consiste à faire passer du contenu audiovisuel, et éventuellement des données, sur un réseau Digital Audio Broadcasting (DAB) initialement dédié à la radio numérique. Ce mode de diffusion est très robuste en mobilité de par la modulation OFDM utilisée. Il permet aussi la réception des services de radiodiffusion sur des appareils mobiles. Le T-DMB est déployé en Corée du Sud depuis 2005.
AT-DMB [20]	C'est une version améliorée du système T-DMB. Le AT-DMB est en effet deux fois plus efficace que le T-DMB. En outre, cette technologie est rétro compatible avec le T-DMB.
ATSC-M/H [19]	Il s'agit d'une version avancée du système ATSC qui est dédiée à la diffusion des services multimédias sur les appareils mobiles.
ISDB-T (1seg) [19]	C'est la norme de télévision numérique japonaise qui permet également la diffusion des programmes vers les appareils mobiles. En effet, le gouvernement japonais a alloué une partie des réseaux de diffusion de télévision numérique terrestre à l'usage de la diffusion vers des terminaux mobiles.
MediaFlo [19]	C'est une technologie propriétaire développée par Qualcomm pour fournir des services de radiodiffusion à des récepteurs mobiles. Cette technologie, basée sur la modulation OFDM, a été essentiellement déployée aux États-Unis.
DVB-H [19]	DVB-H est une déclinaison mobile du système DVB-T dédiée à la diffusion des services mobiles. La norme DVB-H est plus efficace en terme de gestion de la consommation électrique des appareils mobiles, et offre un signal de transmission plus robuste en utilisant un système d'entrelacement en temps et une taille de FFT de 4K.
DVB-NGH [21]	Basée sur la norme DVB-T2, DVB-NGH est l'évolution du DVB-H. Comparée à la norme DVB-T2, la norme DVB-NGH introduit de nouvelles fonctionnalités comme l'utilisation des techniques de transmission multi-antennes MIMO, MISO, etc.
DVB-T2-lite[19]	DVB-T2-lite est une version allégée de la norme DVB-T2. Elle permet de réduire la complexité de fabrication des récepteurs mobiles en faisant abstraction des paramètres qui ne sont pas adaptés pour une réception mobile.

1.3.2.1 Structure de la trame DVB-T2

Une nouvelle structure de trame est définie au niveau de la couche physique dans la norme DVB-T2. Cette structure est composée de *Super trames*, de *trames T2*, de *trames Future Extension Frame (FEF)* et des symboles OFDM. Une *Super trame* peut contenir jusqu'à 255 *trames T2*; cependant il est recommandé d'utiliser 2 *trames T2* par *Super trame*. La durée maximale d'une *trame T2* est de 250 ms. La figure 1.5 présente la structure de la *Super trame* DVB-T2. La *trame T2* est divisée en trois parties :

- Une partie de préambule P1 constituée d'un symbole robuste afin de permettre aux récepteurs de détecter le signal DVB-T2. C'est le premier symbole OFDM de chaque *trame T2* et *FEF*. Ce préambule P1 contient également certains paramètres de base

Tableau 1.5 – Paramètres de base de la couche physique DVB-T2 et du profil T2-Lite [23]

	DVB-T2	DVB-T2 Lite
Largeur de bande	1.7, 5, 6, 7, 8, 10 (MHz)	1.7, 5, 6, 7, 8, 10 (MHz)
Taille FFT	1K, 2K, 4K, 8K (ext), 16K (ext), 32K (ext)	2K, 4K, 8K (ext), 16K (ext)
Durée utile du temps symbole t_u (μs)	112, 224, 448, 896, 1792, 3584	224, 448, 896, 1792
Constellation	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM
FEC	LDPC + BCH	LDPC + BCH
Rendement du codage	1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6	1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 2/5, 1/3
Durée préfixe cyclique (en fonction de t_u)	1/4, 19/256, 1/8, 19/128, 1/16, 1/32, 1/128	1/4, 19/256, 1/8, 19/128, 1/16, 1/32, 1/128
Pilotes dispersées	1%, 2%, 4%, 8% de la totalité des sous porteuses	1%, 2%, 4%, 8% de la totalité des sous porteuses
Pilotes continus	0.35% de la totalité des sous porteuses	0.35% de la totalité des sous porteuses
Capacité max.	50.34 Mbps	limitée à 4 Mbps par PLP

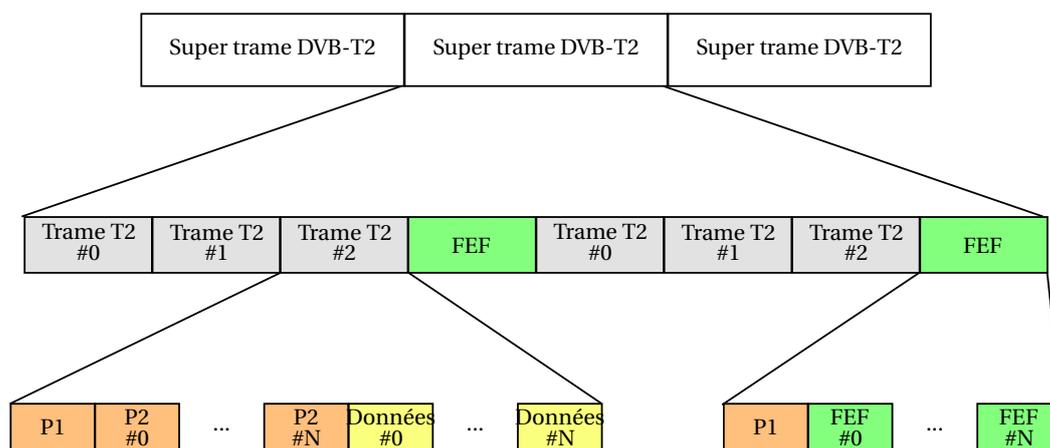


FIGURE 1.5 – Structure de la trame DVB-T2.

comme le type de trame (par exemple, *trame T2*, *trame T2-Lite*, ou éventuellement *trame NGH*).

- Une partie de préambule P2 qui porte la signalisation (L1) décrivant le contenu et la structure de la *trame T2*. Un ou plusieurs préambules P2 sont insérés juste après le préambule P1. Le nombre de préambules P2 dépend de la taille de la FFT choisie.
- Des symboles de données qui contiennent les services DVB-T2.

1.3.2.2 Réseaux monofréquences ou Single Frequency Network (SFN)

La norme DVB-T2 offre la possibilité d'utiliser les réseaux à fréquence unique *Single Frequency Network* (SFN). Un réseau SFN est un réseau dont deux ou plusieurs émetteurs fonctionnent sur la même fréquence pour diffuser les mêmes données dans une zone géographique donnée. Pour éviter les interférences, les signaux transmis par chaque émetteur appartenant au réseau SFN doivent être synchronisés avec précision.

La norme DVB-T2 permet également l'utilisation des techniques multi-antennes basées sur les codes Alamouti. Le principal avantage provenant de l'utilisation des techniques MISO dans un contexte SFN est la réduction des dégradations en terme de puissance minimale à l'entrée du récepteur, tandis que des dégradations plus sévères peuvent être observées dans le cas SISO (Single Input Single Output)-SFN. Ces dégradations sont généralement causées par des phénomènes d'évanouissements dans le canal de transmission.

1.3.2.3 Physical Layer Pipe (PLP)

Une des grandes nouveautés introduites dans la norme DVB-T2 est l'organisation des services en *Physical Layer Pipe* (PLP). Ce concept, hérité de la norme DVB-S2, permet de traiter chaque flux de données (typiquement des contenus audio et vidéo) dans un conteneur indépendant appelé PLP. Chaque PLP peut avoir sa propre configuration adaptée au cas d'usage ciblé.

Les PLPs permettent de diffuser des services de natures différentes dans un même canal de transmission. Par exemple, il est possible de diffuser des services en HD pour une réception fixe et des services en SD pour une réception mobile, ceci à partir du même signal diffusé via le même canal de transmission. Le canal de transmission DVB-T2 peut contenir un seul PLP (mode A) ou plusieurs PLP (mode B) [23, 22]. En outre, le système DVB-T2 autorise un nombre maximum de 255 PLP dans un canal de transmission.

Ce concept de PLP est comparable à la modulation hiérarchique existant en DVB-T (ce qui est équivalent à deux PLP, par exemple), mais avec une flexibilité et une robustesse plus étendues.

1.3.2.4 Future Extension Frame (FEF)

La norme DVB-T2 permet de transmettre dans le même canal des trames du système DVB-T2 avec d'autres types de technologies grâce au concept des FEFs. L'utilisation des *trames FEF* est optionnelle, et dans le cas où elles sont utilisées, chaque *Super trame* doit commencer par une *trame T2* et se terminer par une *trame FEF* comme présenté sur la figure 1.5. Le nombre maximum de *trames FEF* dans une *Super trame* est fixé à 255. Ceci correspond à une *trame FEF* après chaque *trame T2*. Par exemple, dans la *Super trame* présentée sur la figure 1.5, on retrouve une *trame FEF* tous les trois *trames T2*. Les *trames T2* et les *trames FEFs* sont multiplexées dans le temps. Lorsque les *trames FEFs* sont transmises, les récepteurs des *trames T2* ignorent le signal reçu. Ainsi l'utilisation des *trames FEFs* n'affecte pas la réception du signal DVB-T2. Cependant les *trames FEFs* doivent respecter les deux conditions suivantes :

- chaque *trame FEF* doit toujours commencer par un préambule P1.
- La position et la durée des *trames FEFs* doivent être signalées dans la signalisation (L1) dans les *trames T2*.

Comme pour les *trames T2*, la durée maximale des *trames FEFs* est de 250 ms. Cependant pour les modes T2-Lite et DVB-NGH, cette durée est étendue jusqu'à 1 s [24]. Les récepteurs DVB-T2 ne sont pas censés décoder les *trames FEFs*. Ils doivent tout simplement détecter et gérer ces trames de telle sorte que la réception des *trames T2* ne soit pas perturbée.

1.3.2.5 DVB-T2-Lite et DVB-NGH

DVB-T2-Lite. Ajoutée à la norme DVB-T2 [22] en juin 2011 à l'annexe I, DVB-T2-Lite est un sous-ensemble de la norme DVB-T2 dédié à la diffusion des services multimédias sur les appareils mobiles. Le signal T2-Lite peut soit être transmis sous la forme d'un signal DVB-T2 classique, c'est-à-dire dans un PLP, soit sous la forme d'un signal T2-Lite indépendant comme pour les *trames FEFs*.

DVB-NGH. Concernant la norme DVB-NGH [21], il s'agit d'une évolution de la norme DVB-H dédiée à la diffusion de services multimédias sur les appareils mobiles. La norme DVB-NGH reprend les fonctionnalités de bases de la norme DVB-T2 tout en introduisant de nouvelles améliorations comme l'utilisation des constellations non-uniformes, des constellations tournées, des modulations hiérarchiques et des techniques de transmission multi-antennes MIMO. Comme pour le profil DVB-T2-Lite, le signal DVB-NGH peut être transmis sous forme classique ou sous la forme d'un signal NGH indépendant comme pour les *trames FEFs*.

1.3.3 Aperçu de la couche physique LTE

Les évolutions technologiques apportées par les nouvelles générations de réseaux cellulaires (voir section 1.2) ont permis aux opérateurs d'offrir une meilleure qualité d'expérience (QoE) utilisateur grâce au très haut débit qui facilite l'utilisation des services multimédias et internet. Ce très haut débit facilite également l'introduction de nouveaux services dans les réseaux cellulaires comme la télévision en haute définition HDTV, en direct ou en différé sur les appareils mobiles (tablettes, *smartphones*, etc.). Ainsi, nous présentons dans cette section certains principes de bases de l'interface radio du système LTE qui est l'une des normes les plus récentes et avancées en termes de technologie dans le domaine des réseaux mobiles. En effet le système LTE permet d'atteindre des débits très élevés de données et de minimiser la latence tout en permettant une exploitation plus flexible des ressources spectrales grâce au choix de la largeur de bande occupée par le signal. Par exemple les débits atteints, dans une bande de 20 MHz, sont de l'ordre de 50 Mbps dans le sens montant UL (UpLink) et 100 Mbps dans le sens descendant DL (DownLink). Par rapport à l'UMTS, la couche physique du LTE introduit l'OFDMA en remplacement de l'accès multiple à répartition par codes (CDMA). L'OFDMA est une méthode d'accès multiple basée sur l'OFDM, permettant d'exploiter l'orthogonalité fréquentielle des sous-porteuses. Cette méthode permet également d'allouer des blocs de sous-porteuses en temps et en fréquence aux utilisateurs.

1.3.3.1 Structure de la trame LTE

Dans le système LTE [25], le partage entre voie montante et voie descendante se fait soit dans le domaine fréquentiel en mode FDD, soit dans le domaine temporel en mode TDD (Time Division Duplex). Les transmissions en voie descendante (DL) sont organisées en trames radios à la fois pour les modes TDD et FDD. La durée d'une trame radio est de 10 ms. La figure 1.6 présente la structure de la trame radio pour le mode FDD. Comme illustrée sur la figure 1.6, chaque trame radio est divisée, dans le domaine temporel, en dix sous-trames de 1 ms qui sont composées de deux slots de 0.5 ms. Chaque slot comprend un nombre de symboles OFDM qui dépend du type de préfixe cyclique utilisé. Le préfixe cyclique est inséré au début de chaque symbole OFDM et permet de lutter contre l'interférence entre symboles. Il existe deux types de préfixe cyclique dans le système LTE [26] : le type *normal* et le type *étendu*. La durée de ces préfixes cycliques varie en fonction des applications et services ciblés. Dans le domaine fréquentiel, chaque slot est organisé en blocs de ressources élémentaires *Physical Resource Block* (PRB). Un bloc de ressources élémentaires PRB est composé de 12 sous-porteuses espacées de 15 kHz occupant donc une bande de 180 kHz et de 7 symboles OFDM. Le nombre de PRBs dépend de la largeur de bande du canal de transmission comme indiqué au tableau 1.6 qui présente les paramètres de base de la couche physique LTE.

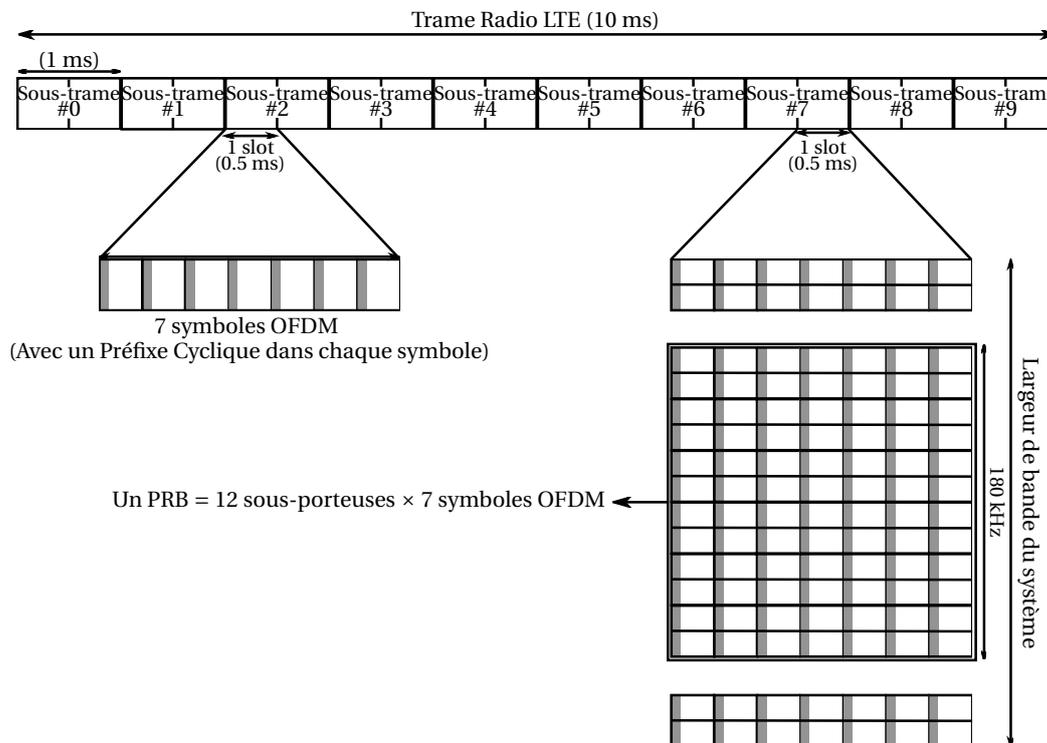


FIGURE 1.6 – Structure de la trame LTE (mode FDD).

Tableau 1.6 – Paramètres de la couche physique LTE en voie descendante DL.

Largueur de bande (MHz)	1.5	2.5	5	10	15	20
Espacement entre sous-porteuses (kHz)	15					
Durée utile t_u du temps symbole (μs)	66.7					
Fréquence échantillonnage (MHz)	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72
Taille FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Sous-porteuses occupées	76	151	301	601	901	1201
Sous-porteuses de garde	52	105	211	423	635	847
Nombre de PRBs	6	12	25	50	75	100
Largueur de bande occupée (MHz)	1.140	2.265	4.515	9.015	13.515	18.015
Efficacité utilisation bande allouée	77.1%	90%	90%	90%	90%	90%
Durée trame radio (ms)	10					
Durée sous-trame (ms)	1					
Nombre de symbole OFDM/sous-trame	$7^1/ 6^2$					

¹ Préfixe cyclique *normal*; ² Préfixe cyclique *étendu*.

1.3.3.2 Allocation de ressources et adaptation de lien

L'allocation de ressources en LTE s'effectue à la fois dans les dimensions temporelle et fréquentielle. Les ressources radio en voie descendante et voie montante se présentent sous la forme d'une grille temps-fréquence comme illustré sur la figure 1.6. La plus petite unité de ressource fréquentielle pouvant être allouée à un utilisateur par l'ordonnanceur au niveau de la station de base est un PRB. Les ressources s'allouent par paires de PRB, les PRBs d'une paire étant alloués dans deux slots consécutifs d'une même sous-trame. Rappelons que le nombre de PRBs dans la dimension fréquentielle dépend de la largeur de bande du canal de transmission comme indiqué dans le tableau 1.6. En fonction de la complexité utilisée dans l'ordonnanceur et des informations de canal disponibles, l'OFDMA permet d'allouer les PRBs disponibles aux utilisateurs de plusieurs façons. Par exemple, l'allocation d'une large bande passante pour un utilisateur permet d'augmenter la diversité spectrale, tandis qu'une allocation fine des PRBs, basée sur la qualité du lien radio, permet d'exploiter la diversité multi-utilisateurs afin de maximiser les débits fournis. Le niveau de protection apporté à l'information transmise dans un canal radio est déterminé par une modulation et un rendement de codage (Code Rate) qui constituent un schéma de modulation et de codage, désigné sous le nom de MCS (Modulation and Coding Scheme). Plus l'efficacité spectrale des données transmises est haute et plus la protection des bits est faible, donc plus la qualité du lien radio doit être bonne pour assurer une bonne réception des données. L'adaptation de lien consiste à adapter le débit instantané de la transmission à la qualité du lien radio. Ceci revient à décider du schéma de modulation et de codage MCS à allouer à l'utilisateur pour chaque transmission, aussi bien en voie montante qu'en voie descendante. Cette opération est effectuée par l'ordonnanceur, et à chaque sous-trame durant laquelle l'utilisateur est servi [13].

1.3.4 Une composante de diffusion dans les réseaux cellulaires

Traditionnellement, les réseaux cellulaires ont été pensés et optimisés pour la transmission en mode *unicast* de services destinés à un seul utilisateur. Cependant, lorsqu'il s'agit de diffuser des services multimédias mobiles, comme la télévision mobile à de nombreux utilisateurs, un mode de transmission *broadcast* est plus approprié. Ainsi, face à la popularité des services multimédias au sein des réseaux cellulaires, le 3GPP a décidé d'introduire une composante de diffusion dans les réseaux cellulaires.

1.3.4.1 Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS)

Le MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service) est une fonctionnalité qui définit une composante de diffusion dans les réseaux cellulaires permettant d'optimiser la transmission des services multimédias mobiles et populaires comme la télévision mobile à tous

les utilisateurs. Les spécifications techniques du MBMS ont été introduites pour la première fois dans les réseaux 3G avec la Release 6 de l'UMTS. Par rapport aux technologies de diffusion mobiles DVB-H, DMB et ISDB (voir section 1.3.1), le MBMS offre des avantages certains :

- La possibilité d'utiliser la même infrastructure réseau et les mêmes ressources spectrales pour la transmission des services en *unicast* et *broadcast (multicast)*.
- L'interaction avec l'utilisateur par voie de retour.

Ainsi, le MBMS permet d'absorber certains pics de trafic sur des services multimédias mobiles populaires ; cependant, les débits très bas (entre 32 et 64 kbps) offerts par cette fonctionnalité ne permettent pas de garantir une bonne qualité de service pour des applications de type télévision sur mobiles.

1.3.4.2 eMBMS : une version améliorée du MBMS

L'eMBMS (enhanced Multimedia Broadcast Multicast Service), défini dans les Releases 8 et 9 du système LTE, est une évolution de la composante de diffusion MBMS. La grande nouveauté de l'eMBMS et la plus importante est l'utilisation des réseaux de diffusion à fréquence unique MBSFN (Multicast Broadcast Single Frequency Network), ce qui permet d'améliorer les performances de la composante de diffusion en termes de qualité de la couverture réseau, d'efficacité spectrale et énergétique. En effet, dans un réseau MBSFN, plusieurs émetteurs sont synchronisés en temps et transmettent, sur la même fréquence, les mêmes informations à tous les utilisateurs. Ces émetteurs forment ainsi une zone dite MBSFN. La norme LTE définit un maximum de 256 zones MBSFN dans un réseau cellulaire. De plus, un émetteur peut appartenir à plusieurs zones MBSFN. Les signaux résultants des différents émetteurs sont combinés de manière constructive pour améliorer la qualité du signal en réception. En outre, les avantages des réseaux MBSFN sont :

- L'augmentation de la qualité du signal reçu, surtout en bordure de couverture d'un émetteur.
- La réduction des interférences entre les cellules voisines.
- L'exploitation des signaux multi-trajets qui offre une diversité supplémentaire contre les effets d'évanouissement du canal de transmission.

Rappelons que dans les systèmes basés sur l'OFDM, un préfixe cycle est inséré en en-tête de chaque symbole OFDM afin d'éviter que la partie utile de chaque symbole OFDM ne soit affectée par l'interférence entre symboles et ainsi préserver l'orthogonalité entre les sous-porteuses. La durée de ce préfixe cyclique joue un rôle important dans le dimensionnement des zones MBSFN. Le système LTE prévoit deux types de préfixe cyclique : *normal* et *étendu*. Le tableau 1.7 présente ces différents types et configurations de préfixe cyclique ainsi que le nombre de symboles OFDM par sous-trame et l'espacement entre les sous-porteuses OFDM pour chaque sous-trame de la norme LTE. Les types de préfixe cyclique *normal* et *exten-*

Tableau 1.7 – Préfixe cyclique et espacement entre sous-porteuses en LTE.

Préfixe Cyclique (CP)	Durée CP (μs)	Espacement sous-porteuses	Nombre de sous-porteuses	Nombre de symboles OFDM
<i>Normal</i>	5.2 ¹ /4.69 ²	15 kHz	12	7
<i>Étendu</i>	16.7	15 kHz	12	6
<i>Étendu</i> ³	33.3	7.5 kHz	24	3

¹ Pour le premier symbole OFDM ; ² pour les autres symboles ;

³ Configuration pour la composante de diffusion eMBMS.

ded peuvent être utilisés pour des transmissions en mode *unicast* traditionnel. Cependant la norme LTE recommande l'utilisation du préfixe cyclique *normal* pour les transmissions *unicast*. Le type *extended* est réservé pour la fonctionnalité eMBMS car il utilise des durées de préfixe cyclique plus longues permettant ainsi d'offrir une zone MBSFN plus large (5 km avec un espacement entre porteuses de 15 kHz et 10 km pour un espacement entre porteuses de 7.5 kHz).

1.3.4.3 Allocation de ressources

Dans un système de diffusion classique, toutes les ressources spectrales sont allouées à tous les utilisateurs. Cependant lorsque la fonctionnalité eMBMS est utilisée, les ressources spectrales disponibles sont partagées dans le temps avec des transmissions de données *unicast* et eMBMS. En effet sur les dix sous-trames composant la trame radio LTE (FDD), un maximum de six sous-trames peuvent être allouées pour des transmissions de données eMBMS. Les quatre sous-trames restantes sont uniquement réservées pour des transmissions de données *unicast* car elles contiennent des informations de synchronisation et de *paging* nécessaires pour la découverte des services. La figure 1.7 montre les différentes sous-trames éligibles à une transmission en mode eMBMS. Grâce au multiplexage temporel des données *unicast* et eMBMS, les utilisateurs peuvent recevoir de manière simultanée des services radiodiffusés et des services individualisés. Ceci permet d'introduire des services radiodiffusés interactifs ainsi que des modes de transmission de données hybrides avec une allocation dynamique des ressources spectrales entre la composante de diffusion et les transmissions en mode *unicast* des réseaux cellulaires. La norme LTE a également prévu la possibilité d'utiliser des ressources dédiées, comme dans les systèmes de diffusion classiques, pour la fonctionnalité eMBMS. Dans ce cas toutes les sous-trames de la trame radio LTE sont allouées à tous les utilisateurs pour des transmissions de données eMBMS.

Il est important de noter que lorsque la composante de diffusion est utilisée, les techniques d'adaptation de lien qui permettent d'ajuster les paramètres de modulation et de codage en fonction de la qualité du lien radio de chaque utilisateur ne pourront pas être uti-

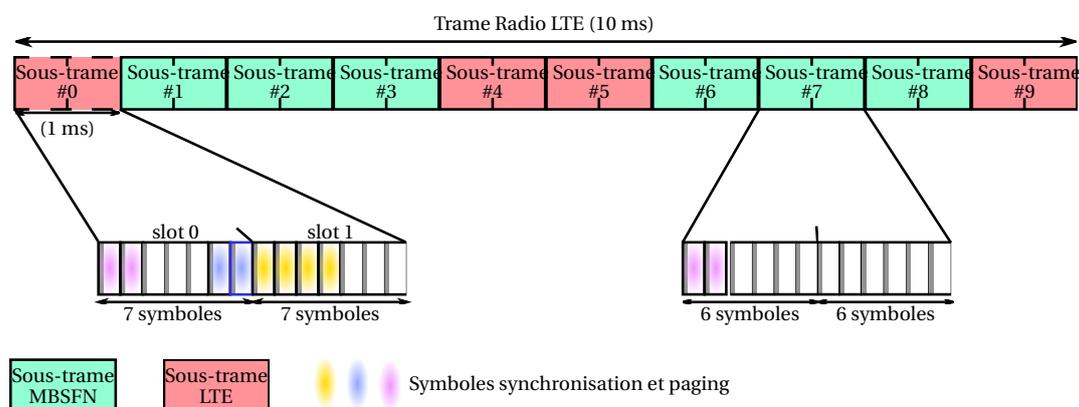


FIGURE 1.7 – Structure de la trame LTE (mode FDD) avec des sous-trames MBSFN.

Tableau 1.8 – Terminologie des systèmes LTE et DVB-T2.

LTE	DVB
Élément de ressource (RE)	Cellule OFDM
Bloc de ressources (RB)	Sub-slice
MBSFN	Single Frequency Network (SFN)
eNodeB (LPLT)	Émetteur (HPHT)
Signaux de référence (RS)	Séquence pilotes
Préfixe cyclique	Intervalle de Garde
Downlink Control Information (DCI)	Signalisation L1

lisées pour la transmission de données eMBMS. En effet dans un système de diffusion, les paramètres de modulations et de codage (MCS) sont identiques pour tous les utilisateurs. Le choix du MCS est donc fait en prenant le pire cas possible, c'est-à-dire en prenant comme référence l'utilisateur qui a la plus mauvaise qualité de lien radio.

1.3.5 Analyse comparative des réseaux cellulaires et de diffusion

Les systèmes LTE et DVB, utilisés respectivement par les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion, mettent en œuvre quelques unes des techniques de transmission les plus avancées de l'état de l'art des systèmes de télécommunications. Ces deux systèmes utilisent la modulation OFDM, mais les termes utilisés pour désigner les paramètres de configuration de l'OFDM sont parfois différents. Le tableau 1.8 présente quelques équivalences dans les terminologies utilisées par les deux systèmes LTE et DVB.

Malgré le choix identique de la modulation OFDM, les réseaux de diffusion sont très dif-

Tableau 1.9 – Comparaison des paramètres de base des couches physiques LTE et DVB-T2.

	LTE	DVB-T2
Modulation	OFDM	OFDM
Espacement sous-porteuses	7.5, 15 kHz	0.28 to 8.9kHz
Durée préfixe cyclique	4.69 to 33.3 μs	7 to 532 μs
Efficacité spectrale	0.15 to 5.55 bps/Hz	0.99 to 6.65 bps/Hz
Infrastructure	LPLT ¹	HPHT ²
FEC	Turbo code	LDPC + BCH

¹ *Low Power Low Tower* (LPLT) ;

² *High Power High Tower* (HPHT).

férents des réseaux cellulaires. Une grande partie des différences entre ces deux réseaux résulte des contraintes liées aux usages et services initialement ciblés. En effet, les réseaux de diffusion existants sont essentiellement optimisés pour la diffusion de services de télévision à un grand nombre d'utilisateurs majoritairement fixes situés sur une zone de grande dimension. Contrairement aux réseaux de diffusion, les réseaux cellulaires ont été initialement conçus pour la transmission de services *point-à-point* individualisés à des utilisateurs en situation de mobilité et localisés dans une zone plus petite. Ces différences en terme d'usages et services se traduisent par des choix d'infrastructures et paramètres différents comme illustré dans le tableau 1.9 qui présente une comparaison des systèmes LTE et DVB.

Une autre différence entre les deux systèmes est la présence d'une voie montante pour les systèmes des réseaux cellulaires tandis que les réseaux de diffusion ne disposent que d'une voie descendante par nature. La norme DVB-RCT, proposant une voie de retour pour les réseaux de diffusion existe mais n'est pas déployée. Cette voie montante permet aux utilisateurs des réseaux cellulaires de remonter des informations sur la qualité du lien radio à l'émetteur. Comme présenté dans la section 1.3.3, ces informations permettent d'utiliser les techniques d'adaptation de lien. Rappelons également que dans les réseaux cellulaires, les données de chaque utilisateur sont transmises en mode *unicast* en utilisant des ressources temporelles et fréquentielles distinctes ; ainsi la capacité disponible dans la zone couverte par un émetteur est partagée entre tous les utilisateurs. Dans les réseaux de diffusion tous les utilisateurs bénéficient de la totalité des ressources disponibles mais les techniques d'adaptation de lien ne peuvent pas être utilisées et les paramètres de transmission doivent être adaptés au pire cas possible. Enfin, la présence d'une voie de retour dans les réseaux cellulaires permet au système LTE de mettre en place des mécanismes de retransmission qui permettent de corriger les erreurs de transmission et d'améliorer ainsi la robustesse de la transmission des données des utilisateurs. Ces mécanismes permettent d'obtenir une bonne qualité de service sans imposer une marge de bruit importante ; la marge de bruit est la différence entre le niveau de signal reçu et le niveau de signal nécessaire à la bonne réception

du service. Dans le cas des réseaux de diffusion, le service doit être reçu dès la première transmission ce qui nécessite une marge de bruit importante.

Des études récentes [27, 28] ont analysé les performances des systèmes de diffusion eMBMS et DVB-T2 dans un scénario de diffusion de services linéaires comme la télévision mobile. Habituellement, les systèmes de diffusion (DVB, ATSC, ISDB, etc.) sont associés à un réseau de diffusion avec une topologie de type HPHT. Cependant la composante de diffusion des réseaux cellulaires eMBMS repose sur une topologie réseau de type LPLT. Ces deux études ont montré deux résultats majeurs :

- La topologie de réseau joue un rôle important dans les performances des systèmes de transmission. En effet les résultats montrent qu'une topologie LPLT dense est plus performante qu'une topologie HPHT mais elle se traduit par un coût de déploiement très élevé.
- Les systèmes de transmission eMBMS et DVB-T2 présentent des performances assez similaires même si la norme DVB-T2 permet d'atteindre performances légèrement plus élevées que l'eMBMS.

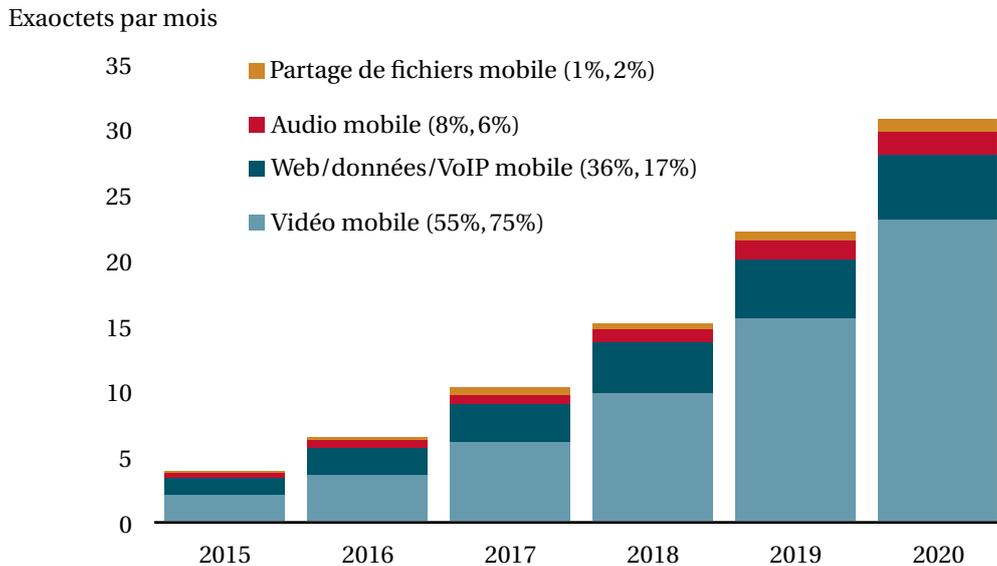


FIGURE 1.8 – Répartition du trafic de données dans les réseaux mobiles. Source : Visual Networking Index (VNI) 2016, Cisco [1].

1.4 Services multimédias mobiles : une tendance forte

1.4.1 Mode de consommation des services multimédias

L'évolution permanente des technologies de transmission sans fil associée à la forte pénétration des appareils mobiles intelligents comme les smartphones et tablettes ont stimulé le besoin, chez les utilisateurs, d'être tout le temps connectés. Cette connectivité se traduit par l'évolution des usages et services comme la consommation de contenus multimédias avec les appareils mobiles.

Aujourd'hui, la consommation de ces contenus multimédias sous forme de service représente une proportion importante du trafic de données mobiles dans les réseaux cellulaires. En effet, les prévisions concernant l'évolution de ce trafic sont annoncées comme exponentielle avec une multiplication du trafic par dix chaque année de 2015 à 2020 [1]. Par ailleurs, comme illustré sur la Figure 1.8, 70 % de ce trafic sera constitué de contenus de type vidéo. Par exemple, sur la base d'un sondage sur la consommation de vidéos réalisé en 2012 au Royaume-Uni [2], plus de la moitié des personnes interrogées ont déclaré regarder des vidéos sur un appareil mobile de type *smartphone* ou tablette. La moitié des utilisateurs de *smartphones* et tablettes préfère regarder ces vidéos en direct et l'autre moitié déclare consommer ces vidéos à la demande en différé.

Le principal moteur de la croissance de ce trafic est en effet lié à la consommation de contenus vidéo sur les appareils mobiles et à la popularité croissante de ces services mul-

timédias. Ces contenus vidéo sont donc souvent consommés immédiatement de façon linéaire (en direct) ou non (en différé) par de nombreux utilisateurs connectés aux réseaux cellulaires.

Traditionnellement, les réseaux cellulaires utilisent un mode de transmission point-à-point (*unicast*) dédié à la transmission de données individualisées. Face à l'augmentation des utilisateurs mobiles et à la popularité croissante des services multimédias, l'utilisation du mode de transmission *unicast* risque de conduire à un engorgement rapide des réseaux cellulaires au détriment de la qualité de service rendu.

Dans l'objectif de répondre aux besoins de capacité liés à l'augmentation du trafic de données dans les réseaux mobiles et à la coexistence des différentes générations de technologies de réseaux mobiles, le dividende numérique a été attribué aux opérateurs de réseaux mobiles comme mentionné à la section 1.1.3.

Cependant, même dopés avec de nouvelles ressources spectrales, les gains de performances et d'efficacité des nouveaux réseaux de télécommunication mobiles 4G resteront en décalage avec cette demande.

1.4.2 Vers la coopération des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion

Historiquement la distribution de ces services multimédias, en particulier les services de télévision, est souvent associée aux réseaux de diffusion. Cependant, grâce à la forte pénétration des appareils mobiles et aux avancées technologiques, ces services multimédias sont de plus en plus consommés sur les appareils mobiles connectés aux réseaux cellulaires. Cette nouvelle tendance de consommation des services multimédias risque de générer un engorgement rapide des réseaux cellulaires face à la popularité croissante de ces services. Ainsi pour faire face à cette explosion de trafic au sein des réseaux cellulaires, le déploiement des réseaux hybrides et hétérogènes est nécessaire voire même obligatoire.

De telles approches existent déjà avec le rapprochement des réseaux cellulaires 3GPP et des réseaux IEEE WiFi pour décharger une partie du trafic des réseaux cellulaires vers les réseaux WiFi domestiques ou publics. Ces approches hybrides peuvent être complétées par une composante de diffusion qui est plus adaptée pour des services destinés à un grand nombre d'utilisateurs. En outre, avec l'introduction de l'eMBMS dans les réseaux cellulaires présenté à la section 1.3.4, il est naturel d'envisager le rapprochement des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion afin d'offrir des services multimédias riches et de qualité aux utilisateurs basés sur des méthodes de transmission efficaces et optimisées. Cette coopération ouvre ainsi des perspectives de services à valeur ajoutée pour l'utilisateur et de nouvelles sources de revenus pour les opérateurs.

Conclusion

Le monde des radiocommunications a subi de nombreuses évolutions durant ces dernières décennies, avec notamment le passage aux technologies numériques. Avec l'arrivée des appareils mobiles plus performants, ce changement de technologies a eu des conséquences très variées sur les services proposés ainsi que sur le mode de consommation de ces services par les utilisateurs. Le passage des technologies analogiques aux technologies numériques des réseaux de radiodiffusion après celle des réseaux de télécommunications rend possible le rapprochement de ces deux mondes très différents mais complémentaires. Ainsi, dans le chapitre suivant, nous présentons et analysons différents exemples de coopération entre les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion.

COOPÉRATION DES RÉSEAUX DE DIFFUSION ET CELLULAIRES

Introduction

La consommation des services multimédias, particulièrement les services vidéos et de télévision, sur les appareils mobiles intelligents et connectés risque de générer un trafic de données très important dans les réseaux cellulaires. Pour faire face à cette croissance du trafic données mobiles, les réseaux cellulaires ont subi d'importantes évolutions ces dernières années.

Ces évolutions, basées sur les dernières avancées technologiques, permettent d'offrir, aujourd'hui, des capacités de plus en plus élevées (voir chapitre 1). Cependant, devant la rarefaction des ressources spectrales et la popularité de ces appareils mobiles favorisant ainsi la consommation des services multimédias, ces évolutions resteront en décalage avec les besoins en termes de capacité des futurs réseaux.

L'Union Internationale des Télécommunications (UIT) estime, la quantité nécessaire de ressources spectrales pour maintenir la coexistence des technologies existantes et assurer le développement des futurs systèmes IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications Advanced), entre 1280 à 1720 MHz selon les besoins des services [29, 30].

Au moment où les réseaux cellulaires font face à un besoin imminent de ressources spectrales, le passage de la diffusion analogique à la diffusion numérique dans les réseaux de diffusion a permis de libérer une partie des ressources spectrales utilisées. Ce spectre libéré, désigné sous le terme de *dividende numérique* (voir section 1.1.3 du chapitre 1), est ainsi attribué aux opérateurs de réseaux cellulaires par l'UIT pour répondre à leur besoin en res-

sources spectrales.

Par ailleurs, dans ce contexte d'attribution du *dividende numérique* aux opérateurs de réseaux cellulaires, de nombreux acteurs des domaines des réseaux cellulaires et de diffusion se sont regroupés dans différents groupes de réflexion dans l'objectif d'identifier les futurs scénarios d'utilisation des ressources spectrales dédiées aux réseaux de diffusion et de proposer des stratégies efficaces de gestion de ces ressources. Nous pouvons citer à titre d'exemple :

- Le groupe de travail ECC (Electronic Communications Committee)/TG6 au CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) dont les travaux ont conduit au rapport *ECC report 224* [31] qui propose une vision long terme de l'utilisation du spectre *Ultra High Frequency* (UHF).
- Le groupe de haut niveau (GHN) mis en place par la Commission européenne [32]. Les études menées dans ce groupe ont conduit au rapport Lamy [11] sur la gestion du spectre UHF.
- Le groupe technique TM-CSU (Technical Module on Cooperative Spectrum Usage of the UHF spectrum) du DVB (Digital Video Broadcasting)-Project qui a proposé des approches coopératives d'utilisation du spectre UHF dans son rapport final [33].

Dans le cadre de ce chapitre, nous présentons les principaux scénarios de coopération issus des rapports publiés par ces groupes de réflexion, puis nous proposons une analyse et synthèse de ces scénarios identifiés.

2.1 Intérêt de la coopération des réseaux de diffusion et cellulaires

Prenons l'exemple de la diffusion d'un service de télévision mobile. Cette diffusion met en relation trois entités :

- L'éditeur des contenus ou fournisseur de services.
- L'opérateur du réseau de distribution des contenus de l'éditeur.
- Les utilisateurs qui consomment les contenus de l'éditeur avec leurs appareils mobiles connectés au réseau de distribution.

Le choix du réseau de distribution revient au fournisseur de service. Pour acheminer ses contenus, le fournisseur de service peut faire appel soit à un opérateur de réseau de diffusion ou soit à un opérateur de réseau cellulaire.

D'une part, lorsque le choix du réseau de distribution s'est porté sur un réseau cellulaire le coût de la distribution du service est supporté par les utilisateurs. Cependant dans le cas de la diffusion de contenus populaires, (c'est-à-dire lorsque le nombre d'utilisateurs devient

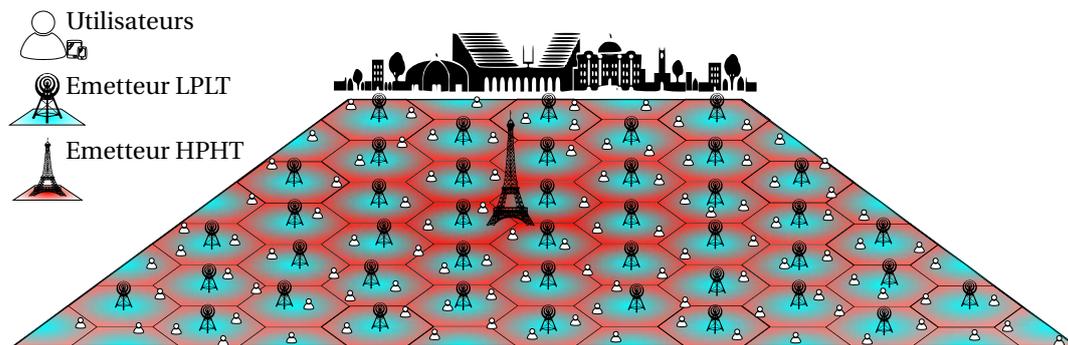


FIGURE 2.1 – Exemple de coopération entre les réseaux cellulaires et de diffusion. Les utilisateurs reçoivent les services multimédias à partir des deux réseaux.

important) tels que la transmission de la finale d'une compétition sportive par exemple, le réseau cellulaire doit faire face à des pics de trafic qui se traduisent par une dégradation de la qualité de service et de la qualité d'expérience des utilisateurs. Pour maintenir une bonne qualité de service pour tous les utilisateurs, l'opérateur de réseaux cellulaires doit augmenter les ressources utilisées. Par conséquent, le coût de distribution augmente avec la popularité du service.

D'autre part, lorsque le choix du réseau de distribution s'est porté sur un réseau de diffusion le coût de la distribution du service est supporté par le fournisseur de service. Dans ce cas, le coût de distribution ne dépend pas du nombre d'utilisateurs. Cependant, ce coût peut être relativement élevé à cause du dimensionnement des réseaux de diffusion qui est généralement réalisé en considérant le pire des cas possibles afin de garantir la même qualité de service pour tous les utilisateurs. Enfin, la diffusion de services multimédias mobiles comme la télévision mobile peut être très coûteux en fonction de la popularité des contenus du fournisseur de services et du choix du réseau de distribution utilisé.

Dans de telles situations, l'exploitation de la complémentarité des réseaux cellulaires et de diffusion permettrait d'assurer une bonne qualité de service et d'expérience à tous les utilisateurs tout en réduisant le coût de distribution du service. Dans une approche coopérative par exemple, comme illustré sur la figure 2.1 les contenus très demandés seraient acheminés par le réseau de diffusion tandis que les contenus peu demandés seraient diffusés par le réseau cellulaire. En effet, de nombreuses études (par exemple [34, 35, 36, 37]) ont montré, qu'un mode de transmission de type *broadcast (multicast)* restait compétitif techniquement et économiquement pour l'acheminement des contenus les plus fréquemment demandés, ceci à partir d'une architecture de réseau de diffusion existante ou hybridée avec une architecture de réseau cellulaire. Ces études ont également montré que la coopération des réseaux cellulaires et de diffusion présente de nombreux avantages aussi bien pour les opérateurs de

réseaux de diffusion que pour les opérateurs de réseaux cellulaires.

Parmi ces avantages, nous pouvons citer par exemple la possibilité pour les opérateurs de réseaux cellulaires :

- De bénéficier de la couverture très large des réseaux de diffusion avec un très haut débit permettant de réduire les phénomènes de *handovers* (mécanisme de changement de cellule).
- D'utiliser les ressources spectrales de manière efficace.
- De délester une partie du trafic de données multimédias vers les réseaux de diffusion, souvent désigné sous le terme de *data offloading*.

Et, pour les opérateurs de réseaux de diffusion :

- D'utiliser la voie de retour des réseaux cellulaires, indispensable pour offrir des services interactifs et personnalisés.
- De compléter la couverture du service en utilisant les sites des réseaux cellulaires pour une réception à l'intérieur des bâtiments.

2.2 Analyse et synthèse des scénarios de coopération

2.2.1 Composantes clés des scénarios de coopération

Les principaux scénarios de coopération identifiés dans les différents groupes de réflexion peuvent être décrits et classés à l'aide de cinq composantes clés que nous introduisons dans cette section.

❖ Service

Les services multimédias peuvent être regroupés en deux catégories de services : les services linéaires et non-linéaire.

- Les services linéaires font références aux services de télévision et radio traditionnelles que les utilisateurs reçoivent passivement. En effet pour ces types de services, l'instant de diffusion des contenus est prédéterminé par le fournisseur de service. Les utilisateurs sont donc contraints de consommer immédiatement les contenus diffusés.
- Les services non-linéaires sont caractérisés par les contenus que les utilisateurs choisissent de consulter à la demande. Ces contenus peuvent être personnalisés et les utilisateurs peuvent également choisir l'instant de consommation de ces services.

❖ Mode de transmission

Le mode de transmission détermine la manière dont les contenus des services sont

transmis aux utilisateurs. Il existe deux modes de transmission pour la diffusion des services multimédias mobiles : *unicast* ou *broadcast (multicast)*.

- Le mode *unicast* offre un accès individuel, point-à-point, aux contenus des services proposés. Ce mode de transmission est bien adapté pour des contenus personnalisés. En contrepartie, le besoin en termes de ressources spectrales augmente en fonction du nombre d'utilisateurs à servir.
- Le mode *broadcast (multicast)* offre un accès aux mêmes contenus du service à tous les utilisateurs, *broadcast*, ou à un groupe d'utilisateurs, *multicast*. L'avantage de ce mode de transmission est l'économie des ressources spectrales utilisées pour la transmission des contenus du service. En effet, la quantité de ressources nécessaire pour la transmission du service ne dépend pas du nombre d'utilisateurs à servir. Cependant, ce mode de transmission n'est pas adapté pour des contenus personnalisés.

❖ Technologie

La technologie fait référence à la norme de transmission utilisée pour la diffusion des services multimédias mobiles. Chaque norme de transmission utilise au moins un des modes de transmission *unicast* ou *broadcast (multicast)*. À titre d'exemple, les normes de diffusion DVB utilisent uniquement le mode *broadcast* (DVB-T2) tandis que la norme LTE (Long Term Evolution) propose les deux modes de transmission *unicast* avec la technologie LTE ou *broadcast (multicast)* avec la composante de diffusion eMBMS (enhanced Multimedia Broadcast Multicast Service).

❖ Infrastructure de réseau

L'infrastructure de réseau est caractérisée par la topologie des sites de transmission (hauteur des sites, antennes, puissance d'émission, etc.) utilisée pour la transmission des contenus des services multimédias. De manière générale, les réseaux de diffusion sont basés sur une infrastructure de réseau composée de sites hauts qui émettent avec des puissances de transmission assez élevées. Ce type d'infrastructure est souvent désigné par le terme de *High Power High Tower* (HPHT). Contrairement aux réseaux de diffusion, les réseaux cellulaires sont basés sur une infrastructure de type *Low Power Low Tower* (LPLT), c'est-à-dire une topologie de réseau composée de sites bas à faible puissance d'émission.

❖ Ressource spectrale

Il s'agit des ressources spectrales nécessaires pour la transmission des services multimédias. Rappelons que dans le contexte d'attribution des dividendes numériques, le spectre UHF est utilisé comme ressource par les différents scénarios de coopération issus des différents groupes de réflexion.

2.2.2 Analyse des scénarios des scénarios de coopération

2.2.2.1 Scénario S1 : Common Broadcasting System (CBS)

Le scénario *Common Broadcasting System*(CBS) a été proposé dans le cadre du projet français *Mobile Multi Media* (M³) de l'Agence Nationale de la Recherche en France (ANR). L'objectif de ce projet était de promouvoir l'utilisation de techniques de diffusion pour la transmission des services multimédias destinés aux appareils mobiles.

Le scénario CBS repose sur la spécification d'une nouvelle couche physique unique, basée sur une forme d'onde unique [38, 39], pour la transmission de services multimédias destinés aux appareils mobiles. En effet, l'utilisation d'une forme d'onde unique facilite l'intégration du système CBS dans les appareils mobiles, ce qui permet de réduire le coût de fabrication des appareils mobiles. Cette nouvelle couche physique, nommée *Common PHYSical layer* (CPHY), vise ainsi à assurer et faciliter l'interopérabilité entre les réseaux de diffusion et les réseaux cellulaires.

Par ailleurs, l'introduction de la composante de diffusion eMBMS dans les réseaux cellulaires (voir chapitre 1, section 1.3.4) facilite le rapprochement des réseaux cellulaires avec les réseaux de diffusion. Ainsi, la couche physique CPHY utilise un système de transmission issu des normes de transmission LTE et DVB. Ce nouveau système de transmission proposé est optimisé pour la transmission de services multimédias mobiles et adapté à diverses infrastructures de réseaux d'accès tels que les sites LPLT, HPHT, etc. Comme illustré sur la figure 2.1, dans ce scénario les utilisateurs peuvent recevoir les contenus multimédias qui sont diffusés en utilisant la couche physique CPHY à partir des sites HPHT sur une porteuse allouée aux opérateurs de réseaux de diffusion (représenté en couleur rouge sur la figure 2.1) et à partir des sites LPLT sur une autre porteuse allouée aux opérateurs de réseaux cellulaires (représenté en couleur bleue sur la figure 2.1).

Comparée aux couches physiques LTE et DVB, la couche physique CPHY regroupe les avantages des systèmes LTE et DVB en introduisant des paramètres OFDM plus flexibles et adaptés à une situation de mobilité. Ces paramètres offrent en effet la possibilité de transmettre sur une large gamme de fréquences et d'obtenir des zones de couvertures plus ou moins larges (d'une centaine de mètres à quelques dizaines de kilomètres) suivant les besoins en termes de couverture des services. Le tableau 2.1 résume les principaux paramètres OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) de la couche physique CPHY. Notons également que ces paramètres reprennent les paramètres de base de la couche physique LTE, comme mentionné précédemment, tout en introduisant de nouvelles configurations adaptées aux contraintes associées à une infrastructure de réseaux HPHT.

Ce scénario S1, basé sur le concept de CBS, est en phase avec les initiatives menées au sein du groupe de réflexion FoBTV (Future of Broadcast TeleVision) et constitue ainsi une première étape vers une norme de diffusion mondiale pour la transmission de services multimédias destinés aux appareils mobiles.

Tableau 2.1 – Scénario S1 – Paramètres OFDM de la couche physique CPHY sur une largeur de bande de 8 MHz (fréquence centrale : 600 MHz).

Espacement sous-porteuse (kHz)	Taille FFT	Durée intervalle de garde (μs)	Symbole OFDM par sous-trame	Rayon de couverture (km)
15	1024	16.67	12	5
7.5	2048	33.33	6	10
3.75	2048	66.67	3	20
2.5	3072	100	2	30
1.25	6144	200	1	60

2.2.2.2 Scénario S2 : tower overlay

Le scénario S2 utilise le concept de *tower overlay* développé et mis en œuvre par l'université technique de Braunschweig (TUBS) (Allemagne) en 2013 [40]. Ce scénario permet de réduire la consommation énergétique des réseaux de distribution, le coût de distribution du service et la charge des réseaux cellulaires liée à la consommation de services multimédias populaires sur les appareils mobiles.

Le concept de *tower overlay* offre la possibilité de diffuser des services multimédias mobiles en utilisant un réseau de diffusion avec une architecture de type HPHT superposé à un réseau cellulaire basé sur une architecture de type LPLT. Comme illustré à la figure 2.2, ce concept utilise les *trames* Future Extension Frame (*FEF*) de la norme DVB-T2 (présenté au chapitre 1, section 1.3.2) et la fonctionnalité d'agrégation de porteuses de la norme LTE pour insérer des trames eMBMS dans les *Super trames* DVB-T2 destinées aux appareils mobiles.

L'agrégation de porteuses est l'une des principales fonctionnalités de la Release 10 de la norme LTE [41, 13]. Cette fonctionnalité consiste à servir l'utilisateur sur deux porteuses simultanément. Elle permet également d'étendre la largeur de bande de transmission du LTE jusqu'à 100 MHz par agrégation de cinq signaux occupant chacune une bande de 20 MHz. Les porteuses agrégées peuvent être dans la même bande de fréquences ou dans des bandes de fréquences différentes. Comme illustré à la figure 2.2, dans le scénario S2 les utilisateurs fonctionnant principalement sur une porteuse dans la bande des 800 MHz peuvent agréger une porteuse supplémentaire dans la bande des 600 MHz pour recevoir des services multimédias.

Afin de garantir une bonne transmission du service, les appareils mobiles restent connectés au réseau cellulaire qui leur fournit toutes les informations de signalisations nécessaires pour la réception du service sur la nouvelle porteuse agrégée.

Comparé au scénario S1 où une nouvelle couche physique est proposée, le scénario S2, basé sur le concept de *tower overlay*, utilise les couches physiques existantes des normes LTE et DVB. Cependant, le concept de *tower overlay* nécessite la modification de la norme

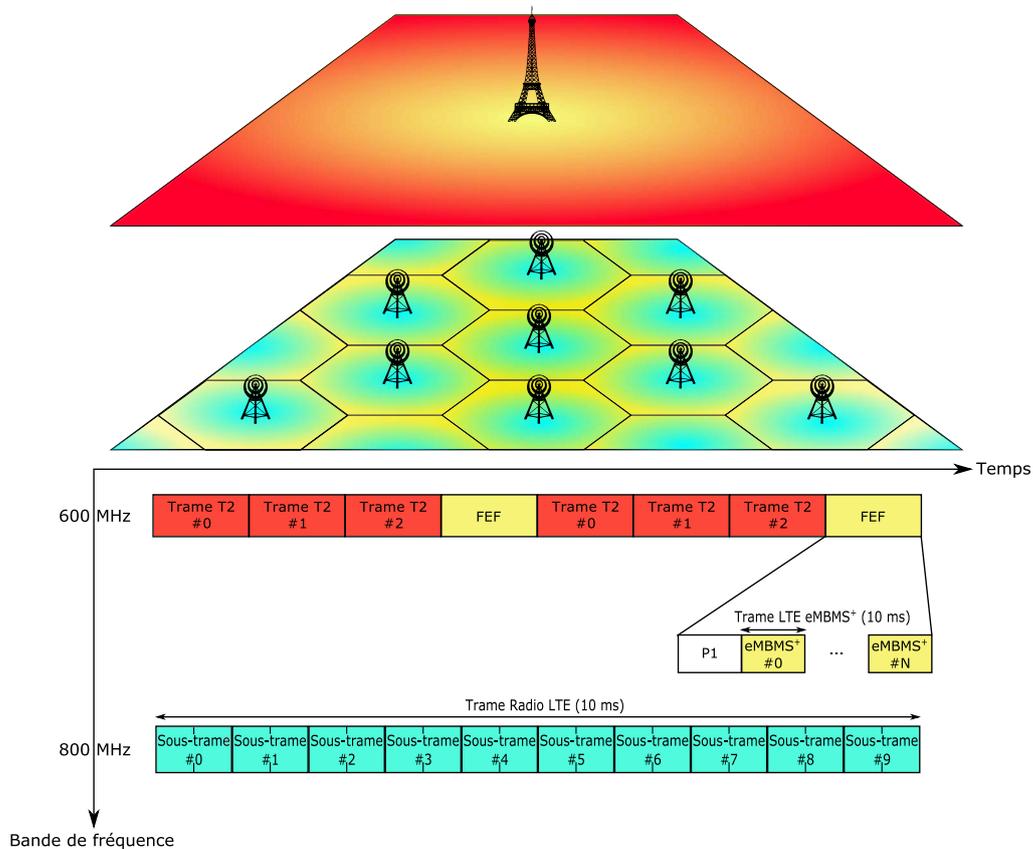


FIGURE 2.2 – Scénario S2 – *tower overlay* : Superposition des réseaux cellulaires et de diffusion pour la réduction du trafic de données dans les réseaux cellulaires.

LTE pour permettre à la fois :

- L'utilisation de la composante de diffusion eMBMS sur les architectures de réseau de type HPHT.
- L'identification du préambule P1 des *Super trames* DVB-T2 afin de décoder les services multimédias intégrés dans les *trames FEF* sur les porteuses agrégées.

2.2.2.3 Scénario S3 : dynamic broadcast

Le scénario S3, basé sur le concept de *dynamic broadcast* [42, 43], a été également proposé par TUBS. Ce scénario, nommé *dynamic broadcast*, exploite l'espace de stockage disponible sur les appareils mobiles et le caractère redondant des services multimédias comme les programmes télévisés par exemple. L'objectif de ce scénario est de mettre en place des mécanismes de pré-chargement de contenus, souvent désignés par le terme de *pushed content*,

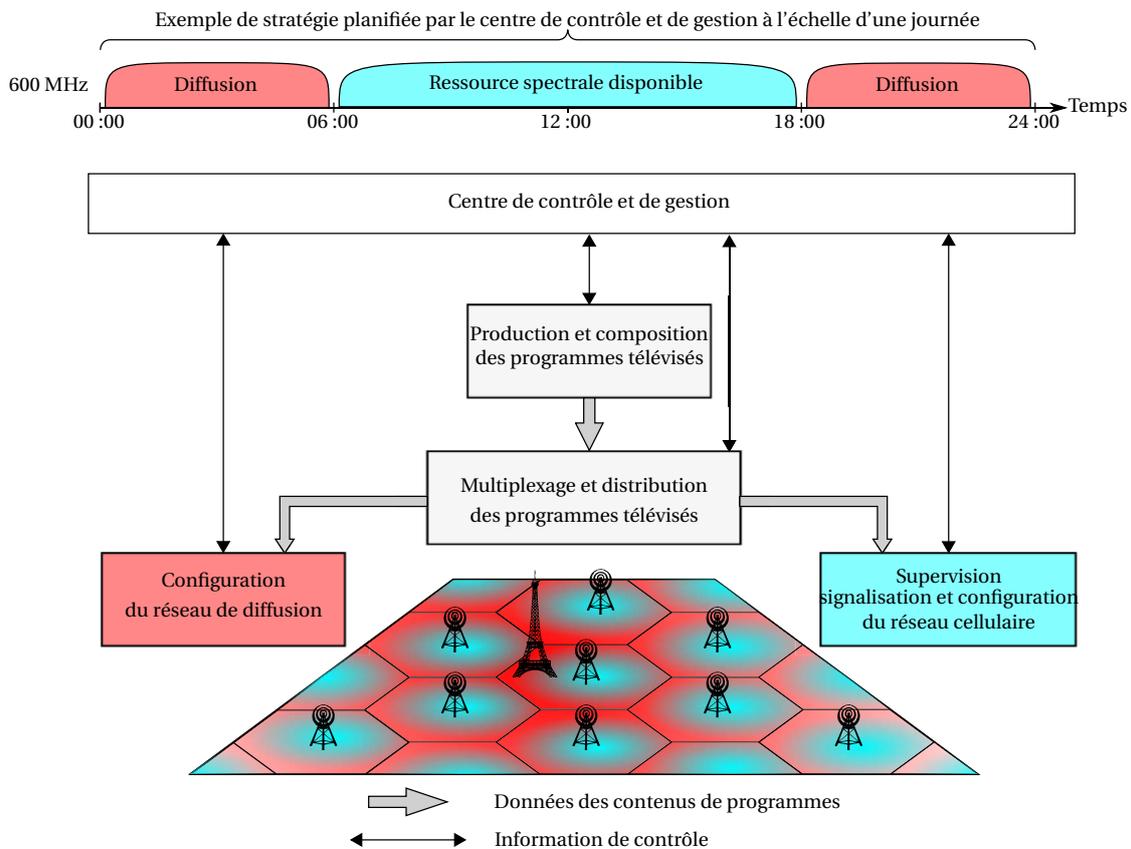


FIGURE 2.3 – Scénario S3 – *Dynamic Broadcast* : partage dynamique des ressources spectrales basé sur l'exploitation de la redondance des programmes télévisés et l'utilisation de l'espace de stockage des appareils mobiles.

qui permettent une utilisation plus efficace des ressources spectrales en partageant de manière temporelle les ressources spectrales avec d'autres réseaux. Ces mécanismes *pushed* permettent également d'améliorer la qualité d'expérience (QoE) de l'utilisateur tout en réduisant le coût de diffusion des services multimédias.

La réalisation du concept *dynamic broadcast* nécessite la mise en place d'une entité de contrôle et de gestion dont le rôle principal est d'orchestrer et d'assurer le bon fonctionnement de chaque composante du réseau hybride notamment le réseau de diffusion et le réseau cellulaire. Comme illustré à la figure 2.3, le choix de la stratégie de coopération est déterminé par cette entité de contrôle et de gestion en fonction des informations reçues.

Dans ce scénario S3, les utilisateurs reçoivent et stockent à l'avance le contenu des programmes télévisés pour les rejouer ensuite à l'instant de diffusion initialement prévu par le fournisseur de services. Les utilisateurs qui n'auraient pas reçu les contenus des programmes à l'avance pourront toujours récupérer ces contenus ou regarder les programmes *en direct*

en utilisant leurs connexions au réseau cellulaire.

Cette approche permet ainsi de libérer les ressources spectrales dédiées à la diffusion des programmes télévisés pendant une certaine période. Ce spectre libéré pourra être utilisé par les réseaux cellulaires pour d'autres types d'applications et services ou par d'autres types de réseaux opportunistes par exemple.

2.2.2.4 Scénario S4 : rupture

Le scénario S4 n'envisage pas de coopération entre les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion pour la transmission des services multimédias. En effet, dans ce scénario, les services multimédias sont intégralement diffusés par les réseaux cellulaires en utilisant comme ressources spectrales la bande UHF. Le mode de transmission, la technologie et l'infrastructure des réseaux cellulaires sont utilisés pour transmettre le service aux appareils mobiles. Ainsi, ce scénario S4 a été qualifié de scénario de « rupture » car il s'affranchit du rôle des opérateurs de réseaux de diffusion.

2.2.2.5 Scénario S5 : continuité

Comme pour le scénario S4, le scénario S5 n'envisage pas de coopération entre les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion. Cependant, dans ce scénario S5, les services multimédias sont transmis aux utilisateurs en utilisant les réseaux de diffusion. Ainsi, dans ce scénario qualifié de scénario de « continuité », les opérateurs de réseaux de diffusion se chargeront de diffuser les services multimédias aux appareils mobiles en utilisant le mode de transmission, la technologie et l'infrastructure des réseaux de diffusion. Ce scénario de « continuité » représente ainsi l'évolution naturelle des réseaux de diffusion.

2.2.3 Synthèse des scénarios de coopération

Afin de mettre en évidence les différences majeures qui existent entre les réseaux cellulaires et de diffusion, les scénarios S4 et S5 ont été aussi présentés à titre de comparaison. Les cinq composantes clés des scénarios de coopération, présentées à la section 2.2.1, permettent de dresser une grille de lecture et de comparaison des principaux scénarios de coopération issus des différents groupes de réflexion. Le tableau 2.2 synthétise cette grille de lecture qui donne une classification de ces scénarios en fonction des composantes clés identifiées. Rappelons que les deux scénarios S4 et S5 ne considèrent pas la coopération entre les réseaux cellulaires et de diffusion. Dans ces deux scénarios, les ressources spectrales utilisées (le spectre UHF) pour la transmission des services multimédias ne sont pas partagées tandis que pour les scénarios de coopération les ressources spectrales utilisées sont soit partagées dans le domaine fréquentiel (scénario S1), soit dans le domaine temporel à l'échelle d'une trame (scénario S2) ou de la bande (scénario S3). En complément de la grille de lec-

Tableau 2.2 – Classification et comparaison des principaux scénarios de coopération.

		S1	S2	S3	S4	S5
		<i>CBS</i>	<i>Tower overlay</i>	<i>Dynamic broadcast</i>	<i>Rupture</i>	<i>Continuité</i>
Service	Linéaire	✓	✓	✓	✓	✓
	Non linéaire	✓	✓	✓	✓	✗
Mode de transmission	<i>Broadcast</i>	✓	✓	✓	✗	✓
	<i>Unicast</i>	✗	✗	✓	✓	✗
Technologie	DVB-T2	✗	✓	✓	✗	✓
	LTE	✗	✗	✓	✓	✗
	eMBMS ³	✓	✓	✗	✗	✗
Topologie de réseau	HPHT	✓	✓	✓	✗	✓
	LPLT	✓	✗	✓	✓	✗
Ressources spectrales	Temps ¹	✗	✓	✓	✗	✗
	Fréquence ²	✓	✗	✗	✗	✗

¹ Partage des ressources spectrales dans le domaine temporel ;

² Partage des ressources spectrales dans le domaine fréquentiel ;

³ Version améliorée de l'eMBMS.

ture présentée au tableau 2.2, le tableau 2.3 présente les avantages et les inconvénients des différents scénarios de coopération identifiés.

Comparé aux scénarios de coopération S1 et S3, les modifications à apporter à la couche physique des réseaux de diffusion et des réseaux cellulaires dans le scénario S2 sont peu nombreuses. En effet, la réalisation du scénario S2 nécessite d'une part, l'utilisation d'un modulateur hybride dans les réseaux de diffusion pour intégrer les contenus des réseaux cellulaires dans les *trames FEF*, et d'autre part, l'adaptation de la composante de diffusion eMBMS aux contraintes liées à l'infrastructure HPHT des réseaux de diffusion tels que l'espacement entre porteuses, les motifs des séquences pilotes ou encore la durée des préfixes cycliques.

Par ailleurs, ce scénario S2 a fait l'objet de plusieurs expérimentations en Europe [44] qui ont démontré la faisabilité de la coopération entre les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion pour la transmission de services multimédias. Notons également que dans le cadre de ces essais, deux flux de données se partagent une même ressource spectrale dans le spectre UHF en répartition temporelle. Un premier flux diffuse des programmes de télévision numérique destinés aux récepteurs DVB-T2 classiques, tandis qu'un deuxième flux embarqué diffuse un flux de contenus spécifiques, destiné aux appareils mobiles comme les *smartphones*, les ordinateurs portables ou encore les tablettes. Pour ces raisons, le scéna-

Tableau 2.3 – Avantages et inconvénients des principaux scénarios de coopération.

	Avantages	Inconvénients
S1 : CBS	<p>Système de diffusion unique</p> <p>Exploitation des différentes infrastructures de réseau pour offrir une zone de couverture de grande dimension</p>	<p>Normalisation d'une nouvelle couche physique</p> <p>Modification des appareils mobiles</p>
S2 : Tower overlay	<p>Réduction du trafic de données des réseaux cellulaires</p> <p>Expérimentation réalisée dans plusieurs pays (France, Italie, Allemagne, etc.)</p> <p>Processus d'intégration au sein du 3GPP en cours</p>	<p>Modification de la composante de diffusion eMBMS</p>
S3 : Dynamic broadcast	<p>Gestion efficace des ressources spectrales</p> <p>Ressources spectrales partagées avec d'autres types de réseaux (cellulaires, opportunistes, etc.)</p>	<p>Nécessité d'un espace de stockage suffisant sur les appareils mobiles</p> <p>Synchronisation et échange d'information entre les réseaux de diffusion et les réseaux cellulaires</p>
S4 : Rupture	<p>Plateforme de transport en IP</p> <p>Présence d'une voie de retour</p>	<p>Accès aux services <i>free-to-air</i> (authentification par carte SIM nécessaire)</p> <p>Disparition de l'infrastructure de réseau HPHT</p>
S5 : Continuité	<p>Évolution naturelle des réseaux de diffusion</p> <p>Amélioration de la qualité de service (diffusion en UHD, 3D, etc.)</p>	<p>Intégration d'un tuner DVB dans les appareils mobiles</p> <p>Densification des infrastructures de réseau</p>

rio S2 est l'approche la plus réaliste en termes de coopération des réseaux cellulaires et de diffusion pour la transmission de services multimédias.

2.3 État de la recherche sur la coopération des réseaux

La coopération des réseaux cellulaires et de diffusion a fait l'objet de plusieurs publications scientifiques ces dernières années.

De nombreuses études se sont intéressées à l'hybridation des systèmes cellulaires UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) et de diffusion DVB-H (Digital Video Broadcasting-Handheld). C'est le cas des travaux, présentés dans [45], qui ont pour objectif la réduction du coût de l'infrastructure de réseau. Ces auteurs ont proposé de réutiliser au maximum l'infrastructure de réseau existante du réseau de diffusion pour transmettre les services multimédias, puis de retransmettre un complément d'informations via le réseau cellulaire. Les résultats de ces études ont montré qu'en s'appuyant sur des mécanismes de correction d'erreur au niveau applicatif nommé *Application Layer - Forward Error Correction* (AL-FEC), il est possible de réduire les investissements nécessaires pour garantir un service de qualité aux utilisateurs.

Dans [46] avec la même approche, les auteurs ont montré que, pour des services non-linéaires de type téléchargement de fichier par exemple, le nombre de sites de transmission ainsi que la puissance d'émission peuvent être réduits de manière significative. Quant aux services linéaires, les résultats suggèrent qu'un compromis doit être fait entre la zone de couverture et le coût des investissements nécessaires pour assurer un service de qualité à tous les utilisateurs. Ainsi les auteurs recommandent pour ce dernier, des approches de type *pushed content* où les contenus des programmes sont transmis pendant les périodes d'inactivité des utilisateurs, puis mis en cache dans l'espace de stockage disponible sur les appareils de réception. L'efficacité de ces mécanismes *pushed content* dans un réseau hybride a fait l'objet de l'article [47] dans lequel les auteurs ont proposé une modélisation et une analyse théorique du réseau hybride pour évaluer les performances de ces mécanismes dans la distribution des contenus des services multimédias.

Par ailleurs, toujours sur la base de l'hybridation des systèmes cellulaires UMTS et de diffusion DVB-H, les auteurs de l'article [48] ont proposé des méthodes de planification automatisée d'un réseau hybride associant les modes de transmission *unicast* et *broadcast* pour la distribution des services multimédias. Les résultats de ces travaux ont montré que de telles approches hybrides permettent de réduire le trafic de données dans les réseaux cellulaires en utilisant les réseaux de diffusion pour transmettre des contenus sollicités par un grand nombre d'utilisateurs.

De plus dans [49], les auteurs ont également souligné la pertinence de la coopération entre les réseaux cellulaires et de diffusion pour la transmission des services linéaires. En effet, les résultats ont montré qu'un gain important est obtenu pour les scénarios de coopé-

ration dans lesquels la réception du service à l'extérieur des bâtiments est assurée par le réseau de diffusion tandis que la réception du service à l'intérieur des bâtiments est assurée par le réseau cellulaire.

Aujourd'hui, du fait de l'introduction de l'eMBMS dans les réseaux cellulaires et de la définition de la cinquième génération de réseaux mobiles (5G), l'intérêt porté par le rapprochement des réseaux cellulaires et de diffusion est de plus en plus important.

À titre d'exemple, nous pouvons citer l'article [50] qui propose une revue des différentes tendances dans le domaine de la coopération des réseaux cellulaires et de diffusion. Les auteurs ont ainsi mis l'accent sur les challenges techniques à relever par les opérateurs de réseaux cellulaires et de diffusion. Basées sur les dernières avancées technologiques des systèmes cellulaires et de diffusion, les études les plus récentes ont montré que la superposition d'un réseau cellulaire avec un réseau de diffusion est l'approche la plus efficace pour offrir aux utilisateurs des services multimédias de très haut débit à moindre coût. Nous pouvons citer, par exemple, les travaux présentés dans [51] qui ont mis en avant la capacité de ces approches d'hybridation à adresser l'évolution exponentielle du trafic de données prévue dans les réseaux cellulaires.

D'un point de vue implémentation, les travaux présentés dans l'article [39] ont conduit à la spécification d'une couche physique, nommée CPHY, unique et dédiée à la diffusion de services multimédias. À ces démarches d'implémentation s'ajoutent les études sur le concept *tower overlay* [52] menées à la TUBS. Le concept *tower overlay* utilise les *trames FEF* de la norme DVB-T2 et la fonctionnalité d'agrégation de porteuses de la norme LTE. Ces deux fonctionnalités permettent d'intégrer dans les *Super trames DVB-T2* des données des réseaux cellulaires destinées aux appareils mobiles.

D'autres travaux se sont intéressés à la gestion des ressources dans un réseau hybride et à la sélection du réseau le plus approprié pour la transmission des services multimédias. Nous pouvons citer l'article [53] dans lequel les auteurs ont proposé des mécanismes d'aiguillage de contenus pour des services non-linéaires permettant d'équilibrer la charge du réseau hybride en termes de trafic de données. Ces mécanismes proposés sont basés sur les propriétés des contenus des services comme la taille et la popularité des contenus multimédias. À partir de la théorie des files d'attente, les auteurs ont évalué les performances de ces mécanismes en termes d'utilisation des ressources et de temps de téléchargement des fichiers. Concernant les services linéaires, les auteurs de l'article [54] ont évalué les performances de ces mécanismes d'aiguillage de contenus sous la contrainte d'une métrique de qualité de service (QoS). Dans [55], ces mécanismes d'aiguillage de contenus sont étudiés en tenant compte des contraintes liées aux aspects énergétiques, l'objectif étant de déterminer, en fonction du nombre d'utilisateurs, le réseau le plus économe en énergie pour la transmission des services.

Dans tous ces travaux présentés et dans tant d'autres publications, les auteurs ont souvent fait l'hypothèse d'une zone de couverture identique pour les réseaux cellulaires et de

diffusion.

Cependant des études récentes montrent qu'une approche de coopération où les deux réseaux ont des zones de couvertures distinctes mais complémentaires permet d'obtenir de meilleurs résultats. En effet, c'est le cas des travaux [56, 57, 58] qui ont proposé et étudié un scénario d'extension de couverture pour la transmission des services multimédias.

Un scénario d'extension de couverture consiste à utiliser deux réseaux différents pour assurer la couverture d'un même service. Par exemple, un même service peut être transmis sur une partie de la zone de couverture par un des deux réseaux et sur la partie restante par l'autre réseau. Les résultats présentés dans ces études montrent que cette approche de coopération améliore les performances du réseau hybride en termes de qualité de couverture du service et d'efficacité énergétique.

De plus, les auteurs de l'article [59], ont montré que l'utilisation des réseaux à fréquence unique, nommés *Single Frequency Network* (SFN), améliore la qualité de couverture du service ainsi que la capacité du réseau hybride. Ceci permettrait à terme de réduire le coût de distribution des services multimédias.

2.4 Positionnement de la thèse

Les études présentées dans la section précédente ont montré l'intérêt porté par la coopération des réseaux cellulaires et de diffusion ainsi que la définition d'un réseau hybride où les réseaux cellulaires et de diffusion sont superposés et coopèrent pour la transmission des services multimédias.

Aujourd'hui, les dernières tendances de coopération sont basées sur le concept *tower overlay* associé à un scénario d'extension de la couverture du service. Ainsi, dans ce manuscrit nous nous intéressons à la modélisation et à l'optimisation de ces tendances de coopération. Nous considérons ainsi le scénario S2 (voir section 2.2.2.2) avec une stratégie d'extension de couverture.

Par ailleurs, notons que la stratégie d'extension de couverture proposée dans l'état de l'art repose uniquement sur l'utilisation d'un mode de transmission *broadcast (multicast)* dans un réseau classique ou SFN.

Toutefois, l'utilisation des réseaux SFN présente des inconvénients surtout en termes de synchronisation et gestion des ressources spectrales. En effet, la synchronisation en temps et en fréquence des émetteurs appartenant au même réseau SFN implique une allocation presque statique des ressources sur toute la zone de couverture. De ce fait, lorsque les utilisateurs ne sont pas intéressés par le service pendant une période donnée les ressources ne sont pas utilisées par le service mais elles restent toujours allouées pour maintenir la synchronisation.

Par conséquent dans un scénario d'extension de couverture, la modélisation du réseau hybride proposée dans cette thèse utilise un mode de transmission *unicast* pour les réseaux

cellulaires et un mode de transmission *broadcast* pour les réseaux de diffusion. Cette modélisation tient également compte du nombre d'utilisateurs accédant au service ainsi que de leur localisation dans la zone de couverture.

Conclusion

Ce chapitre s'est intéressé aux différents scénarios de coopération entre les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion pour la distribution de services multimédias destinés aux appareils mobiles. Malgré les grandes différences liées aux contraintes de mode de transmission et d'infrastructure de ces deux types de réseaux, de nombreux scénarios de coopération visant à exploiter leur complémentarité ont été proposés dans différents groupes de réflexion.

Nous avons ainsi présenté dans ce chapitre les principaux scénarios de coopération issus de ces différents groupes de réflexion que nous avons ensuite analysés et comparés pour proposer une synthèse de ces scénarios de rapprochement. Cette synthèse nous a permis d'identifier les scénarios de coopération entre les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion les plus réalistes. Enfin, nous avons présenté l'état de l'art sur la coopération entre les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion, ce qui nous a permis d'identifier les différents axes de recherches présentés dans cette thèse.

Dans le chapitre suivant, nous proposons une définition d'un réseau hybride et une modélisation analytique pour évaluer l'intérêt de ces scénarios de coopération et mettre en évidence des points de fonctionnement optimaux.

MODÉLISATION DU RÉSEAU HYBRIDE POUR LA DIFFUSION DE SERVICES LINÉAIRES

Introduction

Les réseaux de diffusion sont optimisés pour la transmission d'un même service destiné à un très grand nombre d'utilisateurs répartis dans une zone de grande dimension. Dans ce type de réseau, les utilisateurs sont tous traités de la même manière sans distinction possible entre eux. Contrairement aux réseaux de diffusion, les réseaux cellulaires sont optimisés pour la transmission de services individualisés. Chaque utilisateur est traité séparément en fonction des services demandés.

Face à l'explosion du trafic de données dans les réseaux cellulaires [1], l'exploitation de la complémentarité de ces deux réseaux dans un scénario de coopération constitue une solution attractive permettant d'offrir des services multimédias riches et basés sur des méthodes de transmission optimisées.

Par ailleurs, avec l'introduction de la composante de diffusion eMBMS dans les réseaux cellulaires, de nombreuses études se sont intéressées au rapprochement des réseaux cellulaires et de diffusion.

Ainsi, nous proposons dans ce chapitre une définition et une modélisation analytique d'un réseau hybride composé d'une composante cellulaire et d'une composante de diffusion qui coopèrent pour la diffusion des services multimédias sous forme de services linéaires. Puis, nous définissons également des métriques de performances permettant d'évaluer le gain de coopération du réseau hybride. Enfin, nous présentons quelques résultats de simulation du réseau hybride dans un scénario de type *tower overlay* (voire scénario S2 du cha-

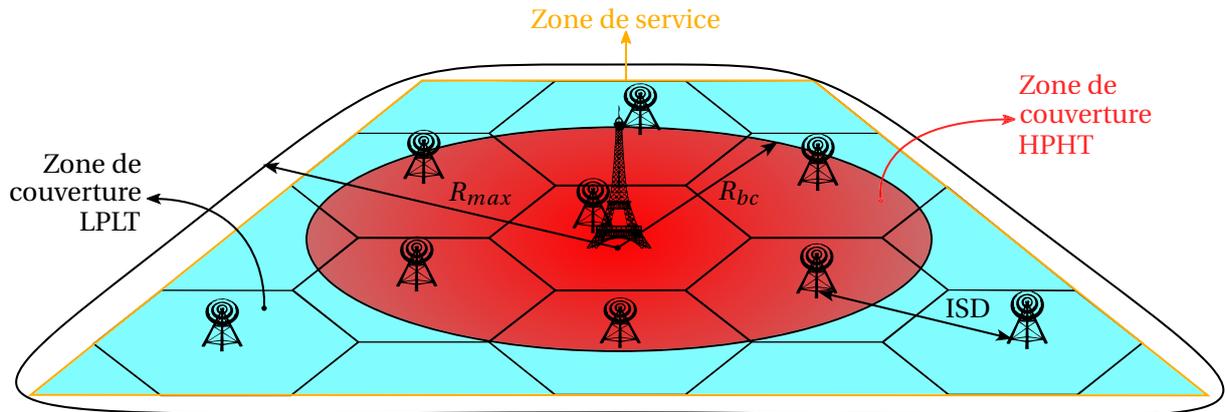


FIGURE 3.1 – Illustration du réseau hybride dans un scénario *tower overlay* avec une stratégie d’extension de la couverture du service.

pitre 2).

3.1 Définition et modélisation du réseau hybride

Le réseau hybride, considéré dans le cadre de cette thèse, est composé d’un réseau de diffusion et d’un réseau cellulaire.

Comme illustré à la figure 3.1, ces deux réseaux sont superposés. Le réseau cellulaire utilise la norme LTE classique s’appuyant uniquement sur un mode de transmission *unicast*. Il est composé de N_{LPLT} émetteurs de type *Low Power Low Tower* (LPLT) qui sont tous configurés avec les mêmes paramètres de transmission ; ceci conduit aux mêmes zones de couverture comme illustré à la figure 3.1. Concernant le réseau de diffusion, il est composé d’un seul émetteur de type *High Power High Tower* (HPHT) utilisant une norme de diffusion (e.g. DVB-T2, T2-Lite, NGH ou encore la composante eMBMS (enhanced Multimedia Broadcast Multicast Service) de la norme LTE). La zone de couverture de l’émetteur HPHT est représentée par une aire circulaire de rayon R_{bc} . Rappelons que les systèmes de transmission utilisés par ces deux réseaux reposent sur la modulation OFDM.

Compte tenu du contexte d’attribution du dividende numérique, les réseaux cellulaires et de diffusion du réseau hybride utilisent le spectre UHF comme ressources spectrales, et opèrent sur la bande des 700 MHz. Cependant, pour éviter les interférences entre ces deux réseaux, les systèmes utilisent des fréquences porteuses différentes pour la transmission des services. Du fait de la grande différence d’échelle entre ces deux réseaux, une modélisation détaillée du comportement du réseau hybride peut être très complexe.

Ainsi, la modélisation proposée ici utilise des résultats statistiques permettant d’évaluer les performances du réseau hybride pour des nombres très élevés d’utilisateurs. Afin d’éva-

luer les performance du réseau, le modèle tient compte des caractéristiques du canal de propagation, du nombre d'utilisateurs dans la zone de couverture et de leur répartition.

3.1.1 Hypothèses

3.1.1.1 Services linéaires

Dans ce chapitre nous nous intéressons en effet à la modélisation d'un réseau hybride pour la transmission de services linéaires destinés à un grand nombre d'utilisateurs répartis dans une zone de service. En pratique, les services linéaires font références aux services de télévision que les utilisateurs reçoivent de manière passive. Nous supposons ainsi que le service linéaire doit être tout le temps diffusé à tous les utilisateurs dans la zone de service. Par ailleurs, selon la qualité de service (QoS) ciblée par le fournisseur de service, une capacité minimale, notée C_{req} , est nécessaire par utilisateur pour recevoir le service diffusé.

3.1.1.2 Utilisateurs

Soit M le nombre d'utilisateurs souhaitant recevoir le service diffusé. Ces utilisateurs sont uniformément répartis dans la zone de service. Nous supposons également que les appareils mobiles des utilisateurs sont équipés de sorte à pouvoir recevoir le service soit à partir du réseau cellulaire soit à partir du réseau de diffusion sans difficultés.

Remarque 1. *Dans le cas où l'émetteur HPHT produit un signal issu des systèmes DVB (Digital Video Broadcasting), l'intégration d'un tuner DVB sur les appareils mobiles serait obligatoire à la réalisation de la coopération. Cependant, l'utilisation d'une évolution de la composante de diffusion eMBMS de la norme LTE (Long Term Evolution) permet de pallier à cette contrainte au niveau des appareils mobiles.*

Notons C_m la capacité d'un utilisateur m dans la zone de service. Un service diffusé dans le réseau hybride est considéré comme reçu par un utilisateur quelconque situé dans la zone de service si la condition (3.1) suivante est satisfaite :

$$C_m \geq C_{req}. \quad (3.1)$$

3.1.1.3 Modèle de consommation de puissance

Dans les réseaux cellulaires et de diffusion, la puissance consommée par les utilisateurs est liée à la recharge de la batterie des appareils mobiles qui sont généralement optimisés pour avoir une grande autonomie. Cette puissance est négligeable devant les puissances consommées par les réseaux des opérateurs. Parmi ces puissances, la part du réseau d'accès mobile et des stations de base représente environ 70% de la puissance totale [60, 61]. Il existe aujourd'hui de nombreuses études qui s'intéressent à l'optimisation de la puissance

Tableau 3.1 – Modèle de consommation de puissance des sites de transmission LPLT et HPHT.

	Émetteur LPLT	Émetteur HPHT
P_{max} [W]	40	5000
Δ_p	4,75	3
P_0 [W]	260	260
P_{sleep} [W]	150	–

consommée dans ces réseaux sans fil. Ces études ont abouti à l'élaboration de modèles de consommation de puissance des réseaux d'accès mobiles [62, 63, 64].

Ainsi, nous utilisons dans notre modélisation, le modèle de consommation de puissance issu du projet de recherche européen *Energy Aware Radio and neTwork tecHnologies* (EARTH) [62]. Ce modèle tient compte de la consommation de puissance des différents composants des sites de transmission (e.g. chaînes de traitement et d'amplification du signal, systèmes de refroidissement, etc.). Il a l'avantage d'être simple et précis. De plus, ce modèle permet une approximation linéaire de la puissance consommée P_{in} par un site de transmission à l'aide de la fonction suivante :

$$P_{in} = \begin{cases} P_0 + \Delta_p P_{max} \rho & \text{si l'émetteur est allumé,} \\ P_{sleep} & \text{sinon,} \end{cases} \quad (3.2)$$

où P_0 désigne la puissance consommée lorsque l'émetteur est allumé mais n'émet aucun signal de données, P_{max} est la puissance maximale de transmission de l'émetteur, P_{sleep} est la puissance consommée lorsque l'émetteur est en veille, Δ_p est la pente du modèle linéaire de consommation de puissance, et ρ est le facteur d'utilisation des ressources spectrales disponibles au niveau de l'émetteur. Dans le cas des réseaux LTE par exemple, ce coefficient ρ est défini par le rapport entre le nombre de *Physical Resource Block* (PRB)s utilisé et le nombre total de PRBs disponible.

Le tableau 3.1 présente les paramètres du modèle de consommation de puissance utilisé pour les sites de transmission LPLT et HPHT. Les valeurs des paramètres de l'émetteur LPLT sont issues des publications [62, 63, 64] tandis que celles de l'émetteur HPHT sont déduites en appliquant le modèle linéaire de consommation de puissance sur des données pratiques de consommation de puissance des émetteurs HPHT.

3.1.1.4 Modèle de propagation

Les communications sans fil se font par la transmission d'ondes électromagnétiques entre un émetteur et un récepteur. La propagation de ces ondes radio dans un environnement sujet aux perturbations extérieures (présence d'obstacles, de réflexions, etc.) est un

phénomène compliqué et est généralement décomposé en plusieurs éléments : l'affaiblissement du signal, ou *path loss*, dû à la distance entre l'émetteur et le récepteur ; les effets de masque ou *shadowing*, causés par la présence d'obstacles sur le chemin de transmission ; et l'évanouissement ou *fading*, dû aux multiples réceptions du signal émis suite à des réflexions par exemple.

Un modèle de propagation permet de simuler l'environnement de transmission radio électrique entre un émetteur et un récepteur et d'estimer le niveau du signal en réception. Le modèle de propagation tient généralement compte des caractéristiques de l'environnement de propagation comme les différents obstacles de la liaison (e.g. relief, forêt, bâtiments, etc.), de la gamme de fréquences utilisée pour la transmission du signal et des conditions d'émission et de réception comme la hauteur des sites de transmission. Les modèles de propagation sont utilisés principalement dans deux domaines

Le premier domaine est la définition et la normalisation des systèmes de transmission radio. Dans ce domaine, ces modèles permettent de déterminer les paramètres du système offrant le meilleur compromis entre la robustesse du signal vis à vis des bruits et des évanouissements et l'efficacité spectrale obtenue permettant de déduire le débit de transmission dans une bande donnée.

Le deuxième domaine est le déploiement des infrastructures de réseau. Dans ce domaine, les modèles de propagation servent aux études d'ingénierie pour le calcul des bilans de liaison, des zones de couverture et de service en prenant en compte les interférences entre émetteurs. La précision de ces modèles de propagation est essentielle car disposer d'un modèle précis permet d'optimiser le dimensionnement du réseau en calculant au mieux le nombre d'émetteurs nécessaires pour couvrir une zone donnée et de s'affranchir ainsi de longues et coûteuses campagnes de mesures sur le terrain.

Dans les réseaux cellulaires, les modèles de propagation de type « COST231-HATA » [65, 66] sont souvent utilisés tandis que dans les réseaux de diffusion, le modèle « Okumura-HATA » [67, 68] est classiquement utilisé. Cependant, dans le cadre de la modélisation analytique proposée dans cette thèse, nous utilisons un modèle de propagation donné par :

$$L(d) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^\alpha \quad (3.3)$$

où $L(d)$ représente l'atténuation subie par le signal émis après avoir parcouru une distance d , λ est la longueur d'onde du signal et α est un facteur d'atténuation qui dépend de l'environnement de propagation.

Ce modèle à grande échelle a l'avantage d'être simple et exploitable analytiquement dans notre démarche de modélisation puisque le modèle ne dépend que du facteur d'atténuation α . Il convient également de noter que ce modèle peut être calibré en utilisant les modèles de propagation de type « COST231-HATA » et « Okumura-HATA » pour le choix du paramètre α .

3.1.2 Modélisation de la composante de diffusion

Dans un système de diffusion, toutes les ressources spectrales disponibles sont allouées à tous les utilisateurs présents dans la zone de service.

Remarque 2. *Du fait de l'absence d'une voie de retour dans les réseaux de diffusion, les techniques d'adaptation de lien pour améliorer l'efficacité spectrale des transmissions ne sont pas utilisées. Par conséquent, tous les utilisateurs dans la zone de couverture de l'émetteur HPHT vont bénéficier d'une capacité de transmission identique, quel que soit leur niveau de puissance reçue. Rappelons que dans le cadre de cette thèse, la notion de capacité est perçue comme étant le débit maximal atteignable par un utilisateur.*

En pratique, cette capacité est déterminée pour qu'un utilisateur, situé en bordure de la zone de couverture, puisse bénéficier d'un rapport signal à bruit, nommé *signal-to-noise ratio* (SNR), permettant une réception correcte du service avec la QoS ciblée par le fournisseur du service. Ainsi, la planification du réseau de diffusion est effectuée en considérant les conditions de réception les plus défavorables.

3.1.2.1 Planification de la zone de couverture de l'émetteur HPHT

La zone de couverture d'un émetteur HPHT dépend principalement de deux paramètres. L'un des paramètres est le SNR de réception minimum permettant une bonne réception du service avec la QoS ciblée. Ce SNR de réception minimum est en général le SNR moyen d'un utilisateur en limite de la zone de couverture. L'autre paramètre est la puissance de transmission P_{tx}^{bc} de l'émetteur HPHT.

Soit γ_0^{bc} le SNR moyen d'un utilisateur en bordure de la zone de couverture de l'émetteur HPHT. Son expression est donnée par :

$$\gamma_0^{bc} = \frac{P_{tx}^{bc}}{P_n L_p^{bc}}, \quad (3.4)$$

où P_n est la puissance moyenne du bruit de réception et L_p^{bc} fait référence aux différentes pertes de propagation de la liaison radio entre l'émetteur HPHT et le récepteur. L'expression de L_p^{bc} est obtenue à partir du modèle de propagation utilisé :

$$L_p^{bc} [\text{dB}] = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{L(R_{bc})} \right) + Total\ Margins [\text{dB}] \quad (3.5)$$

où $L(R_{bc})$ est donné par l'équation (3.3) et *Total Margins* est une marge de pertes supplémentaire introduite lors de l'étude du bilan de liaison [69]. Par exemple dans [69], une marge totale de 12 [dB] est introduite pour une réception du signal sur des appareils mobiles situés à l'extérieur des bâtiments.

Compte tenu de la QoS ciblée par le fournisseur de service, la valeur de γ_0^{bc} est choisie de sorte à satisfaire la condition suivante :

$$B^{bc} \log_2 \left(1 + \gamma_0^{bc} \right) \geq C_{req}, \quad (3.6)$$

où B^{bc} est la largeur du canal de transmission utilisé par le système de diffusion (e.g. 8 MHz pour le système DVB-T2 ou 10 MHz pour l'eMBMS). Notons que cette condition (3.6) permet de garantir l'accès au service diffusé à tous les utilisateurs situés dans la zone de couverture de l'émetteur HPHT.

Par conséquent, pour couvrir une zone de service donnée comme illustré à la figure 3.1, la puissance de transmission P_{tx}^{bc} de l'émetteur HPHT est déterminée à partir d'une étude de bilan de liaison qui tient compte des diverses pertes de la liaison entre l'émetteur HPHT et le récepteur. La valeur de P_{tx}^{bc} est donc déduite à partir de l'équation (3.4) comme suit :

$$P_{tx}^{bc} [\text{dB}] = \gamma_0^{bc} [\text{dB}] + P_n [\text{dB}] + L_p^{bc} [\text{dB}], \quad (3.7)$$

Comme illustré à la figure 3.1, notons R_{max} le rayon de couverture maximale de l'émetteur HPHT et P_{max}^{bc} la puissance de transmission associée à cette zone de couverture maximale.

3.1.2.2 Capacité par utilisateur dans la zone de couverture HPHT

En pratique, la valeur de γ_0^{bc} permet de déterminer le schéma de modulation et de codage à utiliser permettant d'obtenir la qualité souhaitée pour la transmission du service visé. Ce schéma de modulation et de codage permet également de déterminer la capacité du réseau de diffusion. Cependant, rappelons que la modélisation proposée ici est basée sur la capacité théorique de « Shannon ». Ainsi l'expression de la capacité C_m^{bc} d'un utilisateur dans la zone de couverture de l'émetteur HPHT est donnée par :

$$C_m^{bc} = B^{bc} \log_2 \left(1 + \gamma_0^{bc} \right). \quad (3.8)$$

3.1.2.3 Capacité totale de l'émetteur HPHT

Soit \mathcal{M}^{bc} l'ensemble des utilisateurs dans la zone de couverture de l'émetteur HPHT et M^{bc} le cardinal de cet ensemble.

Définition 3.1. Capacité de l'émetteur HPHT : la capacité de l'émetteur HPHT est définie par la somme des capacités des utilisateurs situés dans sa zone de couverture. Ainsi, l'expression de la capacité C^{bc} de l'émetteur HPHT s'écrit :

$$C^{bc} = M^{bc} C_m^{bc}. \quad (3.9)$$

Rappelons que par définition, tous les utilisateurs situés dans la zone de couverture de l'émetteur HPHT ont la même capacité au sens du débit maximal atteignable.

3.1.2.4 Consommation de puissance de l'émetteur HPHT

La puissance consommée P_{in}^{bc} par l'émetteur HPHT est calculée à partir du modèle linéaire de consommation de puissance. L'expression de P_{in}^{bc} est donc obtenue à partir de l'équation (3.2) :

$$P_{in}^{bc} = P_0^{bc} + \Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc}. \quad (3.10)$$

où P_0^{bc} et Δ_p^{bc} sont les paramètres du modèle de consommation de puissance pour l'émetteur HPHT (voir tableau 3.1).

Remarque 3. *Étant donné que dans un système de diffusion, toutes les ressources spectrales disponibles sont allouées à la transmission des données destinées à tous les utilisateurs présents dans la zone de couverture, le facteur d'utilisation des ressources spectrales est fixé à $\rho = 1$.*

3.1.3 Modélisation de la composante cellulaire

Contrairement aux réseaux de diffusion, les réseaux cellulaires utilisent un mode de transmission *unicast*. Avec ce mode de transmission, les utilisateurs sont traités séparément. Ceci permet d'utiliser les techniques d'adaptation de lien présentées à la section 1.3.3 du chapitre 1 afin de garantir la QoS ciblée par le fournisseur de service.

Comme illustré à la figure 3.1, le réseau cellulaire considéré ici est composé de N_{LPLT} émetteurs LPLT permettant de couvrir une zone de service donnée. Les utilisateurs sont associés à l'émetteur LPLT le plus proche. Cet émetteur offre en général la meilleure qualité de signal en réception.

Dans le cadre de cette thèse, nous supposons que tous les émetteurs LPLT sont configurés avec les mêmes paramètres de transmission donnant ainsi les mêmes zones de couverture appelées cellules (voir figure 3.1). Par conséquent, nous nous concentrons d'abord sur la modélisation d'une cellule LPLT, pour ensuite généraliser le résultat aux autres émetteurs LPLT.

3.1.3.1 Planification d'une cellule LPLT

Dans une cellule LPLT, l'émetteur LPLT s'occupe de la gestion des utilisateurs. Il alloue à chaque utilisateur un certain nombre de PRBs en fonction de la qualité du lien radio de l'utilisateur qui est déterminée par le SNR moyen γ_m de l'utilisateur. L'expression de γ_m est donnée par :

$$\gamma_m = \gamma_0 \left(\frac{R_{uc}}{d_m} \right)^\alpha, \quad (3.11)$$

où d_m est la distance entre l'utilisateur m et l'émetteur LPLT, R_{uc} le rayon de couverture de la cellule LPLT et γ_0 représente le SNR moyen d'un utilisateur situé à la limite de la cellule LPLT soit à la distance R_{uc} de l'émetteur. L'expression de γ_0 est donnée par :

$$\gamma_0 = \frac{P_{tx}^{uc}}{P_n L_p^{uc}} \quad (3.12)$$

où P_{tx}^{uc} est la puissance de transmission de l'émetteur LPLT et L_p^{uc} représente les pertes de propagation de la liaison.

Comme pour la planification de la composante de diffusion, l'expression de L_p^{uc} est obtenue à partir du modèle de propagation utilisé :

$$L_p^{uc} \text{ [dB]} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{L(R_{uc})} \right) + Total \ Margins \text{ [dB]} \quad (3.13)$$

où $L(R_{uc})$ est donné par l'équation (3.3) et *Total Margins* est une marge de pertes supplémentaires introduite lors de l'étude du bilan de liaison [69].

Soit RB_m le nombre de PRBs alloués à un utilisateur situé dans la cellule LPLT. Ce nombre dépend de la stratégie d'allocation de ressources utilisée par l'opérateur de réseau cellulaire. Il existe plusieurs stratégies d'allocation de ressources dans la littérature. Ces stratégies permettent de répondre aux exigences des différents services proposés par les opérateurs de réseaux cellulaires. Une des stratégies les plus connues est le *round robin*. Cette stratégie consiste à allouer un PRB à chaque utilisateur à tour de rôle pendant un certain temps (un *Transmission Time Interval* (TTI) dans le cas du LTE par exemple).

Cependant, la stratégie généralement appliquée et notamment dans le cadre de notre modélisation est de choisir le nombre RB_m permettant de garantir la QoS ciblée par le fournisseur de services. En d'autres termes ce nombre doit satisfaire la condition suivante :

$$RB_m \underbrace{B_{RB} \log_2(1 + \gamma_m)}_{C_m^{RB}} \geq C_{req}, \quad (3.14)$$

où B_{RB} est la largeur de bande occupée par un PRB et $C_m^{RB} = B_{RB} \log_2(1 + \gamma_m)$ représente la capacité d'un PRB alloué à un utilisateur m situé dans la cellule. Notons que la capacité C_m^{RB} dépend du SNR moyen γ_m qui dépend de la position de l'utilisateur m dans la cellule. Ainsi, nous introduisons la proposition suivante qui permet de calculer la valeur de RB_m en considérant la distribution des utilisateurs dans la cellule.

Proposition 1. *Étant donnée une répartition uniforme des utilisateurs dans la cellule LPLT,*

la capacité moyenne d'un PRB est donnée par :

$$\mathbb{E}[C_m^{RB}] = C_0^{RB} + \frac{\gamma_0^{\frac{2}{\alpha}} B_{RB}}{\ln 2} B\left(\frac{1}{1+\gamma_0}; \frac{2}{\alpha}, 1 - \frac{2}{\alpha}\right), \quad (3.15)$$

où $C_0^{RB} = B_{RB} \log_2(1 + \gamma_0)$ est la capacité d'un PRB alloué à un utilisateur se trouvant à la limite de la cellule et $B(z; u, v)$ désigne la fonction spéciale « Béta incomplète » [70].

Preuve. Nous commençons par introduire un lemme qui servira pour la démonstration de la proposition 1.

Lemme 1. En considérant une répartition uniforme des utilisateurs dans une cellule LPLT, la fonction de densité de probabilité, notée pdf , du SNR est donnée par :

$$pdf(\gamma) = a\gamma_0^a \gamma^{-(a+1)}, \quad (3.16)$$

où $a = 2/\alpha$ et γ_0 est le SNR moyen d'un utilisateur à la limite de couverture de la cellule.

Preuve. Soit $pdf(x, y)$ la fonction de densité de probabilité de la position d'un utilisateur pour tout $x \in [-x_{max}, x_{max}]$ et $y \in [-y_{max}, y_{max}]$. Compte tenu de la répartition uniforme des utilisateurs, l'expression de la fonction de densité de probabilité est donnée par :

$$pdf(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi R_{max}^2} & \text{si } x^2 + y^2 \leq R_{max}^2, \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases} \quad (3.17)$$

où $R_{max}^2 = x_{max}^2 + y_{max}^2$ est la distance entre l'émetteur LPLT et un utilisateur situé à la limite de la cellule. Soit $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ la distance entre un utilisateur dans la cellule et l'émetteur LPLT. À partir de l'équation (3.17), nous pouvons calculer la fonction de densité de probabilité de la distance entre un utilisateur dans la cellule et l'émetteur LPLT de la manière suivante :

$$pdf(x, y) = \begin{cases} \frac{2r}{R_{max}^2} & \text{si } r \leq R_{max}, \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases} \quad (3.18)$$

À partir de l'équation (3.11), l'expression du SNR d'un utilisateur dans une cellule LPLT est donnée par

$$\gamma(r) = \gamma_0 \left(\frac{r}{d_0}\right)^{-\alpha}. \quad (3.19)$$

Nous pouvons alors en déduire la fonction de densité de probabilité de la répartition du SNR dans une cellule LPLT comme suit

$$pdf(\gamma) = \left(\frac{2}{\alpha}\right) \left(\frac{d_0}{R_{max}}\right)^2 \gamma_0^{\frac{2}{\alpha}} \gamma^{-\left(\frac{2}{\alpha}+1\right)}. \quad (3.20)$$

En prenant $d_0 = R_{max}$ comme distance de référence et $a = 2/\alpha$ nous obtenons (3.16), ce qui conclut la démonstration du lemme 1. ■

Rappelons que la capacité d'un PRB est donnée par :

$$C_m^{RB} = B_{RB} \log_2(1 + \gamma_m). \quad (3.21)$$

Ainsi l'expression de la capacité moyenne d'un PRB peut s'écrire comme suit :

$$\mathbb{E}[C_m^{RB}] = \int_{\gamma_0}^{+\infty} B_{RB} \log_2(1 + \gamma) p d f(\gamma) d \gamma. \quad (3.22)$$

À partir du lemme 1, il s'en suit que :

$$\mathbb{E}[C_m^{RB}] = ab\gamma_0^a \int_{\gamma_0}^{+\infty} \ln(1 + \gamma) \gamma^{-(a+1)} d \gamma, \quad (3.23)$$

où $b = B_{RB}/\ln 2$. Puis en intégrant par partie l'équation (3.23) nous obtenons

$$\mathbb{E}[C_m^{RB}] = C_0 + b\gamma_0^a \int_{\gamma_0}^{+\infty} \frac{\gamma^{-a}}{1 + \gamma} d \gamma, \quad (3.24)$$

où $C_0 = B_{RB} \log_2(1 + \gamma_0)$ représente la capacité d'un utilisateur situé à la limite de la cellule LPLT. En appliquant les changements de variables suivants $u = \gamma/(1 + \gamma)$ puis $v = 1 - u$ à l'équation (3.24), nous obtenons :

$$\mathbb{E}[C_m^{RB}] = C_0 + b\gamma_0^a \int_0^{\frac{1}{1+\gamma_0}} v^{a-1} (1 - v)^{-a} d v. \quad (3.25)$$

Il est possible de montrer que $\int_0^{\frac{1}{1+\gamma_0}} v^{a-1} (1 - v)^{-a} d v$ désigne la fonction spéciale Béta incomplète $B\left(\frac{1}{1+\gamma_0}; a, 1 - a\right)$. Enfin, nous avons

$$\mathbb{E}[C_m^{RB}] = C_0 + b\gamma_0^a B\left(\frac{1}{1+\gamma_0}; a, 1 - a\right), \quad (3.26)$$

ce qui conclut la démonstration de la proposition 1. ■

Nous pouvons ainsi déduire à partir de la proposition 1 et de l'équation (3.14) le nombre de PRBs moyen, noté \overline{RB}_m , alloué à un utilisateur dans une cellule LPLT pour qu'il puisse accéder au service diffusé comme suit :

$$\overline{RB}_m = \frac{C_{req}}{\mathbb{E}[C_m^{RB}]}. \quad (3.27)$$

Dans la modélisation analytique du réseau hybride, nous supposons que l'émetteur LPLT alloue \overline{RB}_m PRBs à chaque utilisateur présent dans la cellule dans la limite du nombre de PRBs disponible. Rappelons aussi que le nombre maximal RB_{max} de PRBs disponibles dépend de la largeur du canal de transmission du système LTE qui peut varier de 1,5 MHz à 20 MHz (voir tableau 1.6, section 1.3.3, chapitre 1).

3.1.3.2 Capacité d'un utilisateur dans une cellule LPLT

La capacité d'un utilisateur dans une cellule LPLT est obtenue en utilisant l'équation d'allocation de ressources (3.27). Ainsi l'expression de la capacité d'un utilisateur m dans une cellule LPLT est donnée par :

$$C_m^{uc} = \overline{RB}_m C_m^{RB}. \quad (3.28)$$

3.1.3.3 Capacité et consommation de puissance d'une cellule LPLT

Capacité : soit \mathcal{M}_i^{uc} l'ensemble des utilisateurs situés dans la $i^{\text{ème}}$ cellule LPLT et M_i^{uc} le nombre d'utilisateurs dans cet ensemble.

Définition 3.2. Capacité d'une cellule LPLT : la capacité d'une cellule LPLT est définie par la somme des capacités de tous les utilisateurs présents dans la cellule. Compte tenu du nombre de PRBs disponible au niveau de l'émetteur, la capacité de la cellule est donnée par :

$$C_i^{uc} = \sum_{m \in \mathcal{M}_i^{uc}} C_m^{uc} \eta_{m,i}^{uc}, \quad (3.29)$$

où $\eta_{m,i}^{uc}$ est une variable binaire qui indique si l'émetteur LPLT a réussi à allouer le nombre \overline{RB}_m de PRBs à l'utilisateur m au sein de la $i^{\text{ème}}$ cellule.

En considérant une répartition uniforme des utilisateurs au sein de la cellule, nous pouvons calculer la capacité moyenne de la cellule de la manière suivante :

$$\mathbb{E}[C_i^{uc}] = M_i^{uc} \overline{RB}_m \mathbb{E}[C_m^{RB}] \underbrace{\min\left(1, \frac{RB_{max}}{M_i^{uc} \overline{RB}_m}\right)}_{\mathbb{E}[\eta_i^{uc}]}, \quad (3.30)$$

où

$$\mathbb{E}[\eta_i^{uc}] = \min\left(1, \frac{RB_{max}}{M_i^{uc} \overline{RB}_m}\right) \quad (3.31)$$

représente le taux d'accès moyen d'un utilisateur m dans la $i^{\text{ème}}$ cellule.

Consommation de puissance : la puissance consommée $P_{in,i}^{uc}$ du $i^{\text{ème}}$ émetteur LPLT est calculée à partir du modèle linéaire de consommation de puissance.

Ainsi l'expression de $P_{in,i}^{uc}$ est obtenue à partir de l'équation (3.2) :

$$P_{in,i}^{uc} = P_0^{uc} + \Delta_p^{uc} P_{tx}^{uc} \rho_i^{uc}, \quad (3.32)$$

où P_0^{uc} et Δ_p^{uc} sont les paramètres du modèle de consommation de puissance associés au $i^{\text{ème}}$ émetteur LPLT (voir tableau 3.1) et

$$\rho_i^{uc} = \min \left(1, \frac{\overline{RB}_m M_i^{uc}}{RB_{max}} \right) \quad (3.33)$$

désigne le facteur d'utilisation des ressources spectrales de la $i^{\text{ème}}$ cellule LPLT.

Remarque 4. Le facteur d'utilisation ρ_i^{uc} des ressources spectrales de la $i^{\text{ème}}$ cellule LPLT est l'inverse du taux d'accès moyen $\mathbb{E}[\eta_i^{uc}]$ d'un utilisateur m dans la $i^{\text{ème}}$ cellule.

3.1.3.4 Capacité et consommation de puissance de la composante cellulaire

Définition 3.3. Capacité de la composante cellulaire : la capacité de la composante cellulaire est définie par la somme des capacités de toutes les cellules LPLT de la zone de service :

$$C^{uc} = \sum_{i=1}^{N_{LPLT}} C_i^{uc}. \quad (3.34)$$

Rappelons que N_{LPLT} est le nombre de cellules LPLT dans la zone de service.

Définition 3.4. Consommation de puissance de la composante cellulaire : de la même manière, la puissance consommée de la composante cellulaire est définie par la somme de la puissance consommée de toutes les cellules LPLT dans la zone de service :

$$P_{in}^{uc} = \sum_{i=1}^{N_{LPLT}} P_{in,i}^{uc}. \quad (3.35)$$

3.1.4 Métriques de performance

Afin d'évaluer et d'optimiser les performances du réseau hybride, nous définissons dans cette section les métriques de performances suivantes : la capacité moyenne de service, le taux d'accès moyen d'un utilisateur dans la zone de service, la puissance consommée du réseau hybride et l'efficacité énergétique du réseau hybride.

3.1.4.1 Capacité moyenne de service

Avant de définir la capacité moyenne de service, nous introduisons d'abord la capacité de service du réseau hybride, nommée C_s^H , comme étant la somme des capacités de tous les

utilisateurs ayant une capacité suffisante pour recevoir le service diffusé :

$$C_s^H = \sum_{m \in \mathcal{M}^{bc}} C_m^{bc} + \sum_{i=1}^{N_{LPLT}} \sum_{m \in \mathcal{M}_i^{uc}} C_m^{uc} \eta_m. \quad (3.36)$$

Définition 3.5. Capacité moyenne de service : la capacité moyenne de service $\mathbb{E}[C_s^H]$ est donnée par la somme de la capacité moyenne de la composante de diffusion obtenue par (3.9) et de la capacité moyenne de la composante cellulaire obtenue par (3.34) :

$$\mathbb{E}[C_s^H] = C^{bc} + \sum_{i=1}^{N_{LPLT}} \mathbb{E}[C_i^{uc}]. \quad (3.37)$$

3.1.4.2 Taux d'accès moyen au service

Le taux d'accès au service, η_s^H , du réseau hybride est défini par le rapport entre le nombre d'utilisateurs ayant une capacité suffisante pour recevoir le service diffusé et le nombre total d'utilisateurs présent dans la zone de service :

$$\eta_s^H = \frac{1}{M} \left(M_{bc} + \sum_{i=1}^{N_{LPLT}} \sum_{m \in \mathcal{M}_i^{uc}} \eta_m \right). \quad (3.38)$$

Définition 3.6. Taux d'accès moyen au service : le taux d'accès moyen au service $\mathbb{E}[\eta_s^H]$ est donné par :

$$\mathbb{E}[\eta_s^H] = \frac{1}{M} \left(M_{bc} + \sum_{i=1}^{N_{LPLT}} \bar{\eta}_i M_i^{uc} \right). \quad (3.39)$$

Remarque 5. Comme présenté à la section 3.1.2.1, la composante de diffusion est planifiée afin de garantir l'accès au service à tous les utilisateurs présents dans sa zone de couverture. Ainsi, tous les utilisateurs associés à l'ensemble \mathcal{M}^{bc} reçoivent directement le service diffusé. Concernant la composante cellulaire, nous avons montré dans la section 3.1.3.1 que le taux d'accès moyen par cellule dépend du nombre d'utilisateurs présents dans les cellules. C'est pourquoi le taux d'accès moyen au service dépend également du nombre d'utilisateurs associés à la composante cellulaire.

3.1.4.3 Consommation de puissance du réseau hybride

Définition 3.7. Puissance consommée : la puissance consommée par le réseau hybride est la somme de la puissance consommée par l'émetteur HPHT donnée par (3.10) et celles des

émetteurs LPLT donnée par (3.35) :

$$P_{in}^H = P_{in}^{bc} + \sum_{i=1}^{N_{LPLT}} P_{in,i}^{uc}. \quad (3.40)$$

3.1.4.4 Efficacité énergétique du réseau hybride

Définition 3.8. Efficacité énergétique : Dans ce manuscrit l'efficacité énergétique EE^H du réseau hybride est définie par le rapport entre la capacité de service et la puissance consommée du réseau hybride :

$$EE^H = \frac{C_s^H}{P_{in}^H}. \quad (3.41)$$

3.2 Simulation du réseau hybride

Les performances des systèmes de transmission doivent être évaluées précisément avant la phase de normalisation puis de déploiement dans les réseaux. Compte tenu de la complexité des systèmes actuels notamment celles des normes de transmission LTE et DVB, il est difficile d'évaluer pleinement leurs performances en utilisant uniquement des méthodes analytiques. Par conséquent, les outils de modélisation et de simulation numérique représentent une bonne alternative pour l'évaluation de ces systèmes. Ces outils permettent également d'obtenir un bon compromis entre complexité, coût et temps de développement. En effet, une approche possible de modélisation consiste à reproduire toutes les interactions entre les émetteurs et les utilisateurs du réseau. Cette modélisation doit prendre en compte les aspects de trafic et de mobilité des utilisateurs ainsi que les paramètres, concernant la modulation, le codage des données et le canal de propagation, associés à chaque lien entre un émetteur et un utilisateur. Toutefois, une telle modélisation entraînerait un coût de calcul et des temps de simulation excessifs.

Pour ces raisons, les outils de simulation numérique sont généralement divisés en deux étapes ou niveaux d'abstraction pour réduire cette complexité. Ces niveaux sont connus sous le nom de *Link Level Simulations* (LLS) et *System Level Simulations* (SLS).

D'une part, le simulateur LLS est utilisé pour évaluer les performances de la liaison radio entre un utilisateur et un émetteur. À ce niveau lien, la simulation tient compte des schémas de modulation et de codage, des caractéristiques du canal de propagation, de l'estimation de canal, de la démodulation, du décodage, etc. Ce niveau de simulation permet d'étudier le comportement des signaux physiques et obtenir ainsi les courbes de taux d'erreurs binaires *Bit Error Rate* (BER), ou paquets *Packet Error Rate* (PER), en fonction du SNR pour un canal de transmission donné.

D'autre part, le simulateur SLS permet d'évaluer les performances du réseau dans son ensemble, c'est-à-dire en tenant compte de l'ensemble des interactions entre les émetteurs

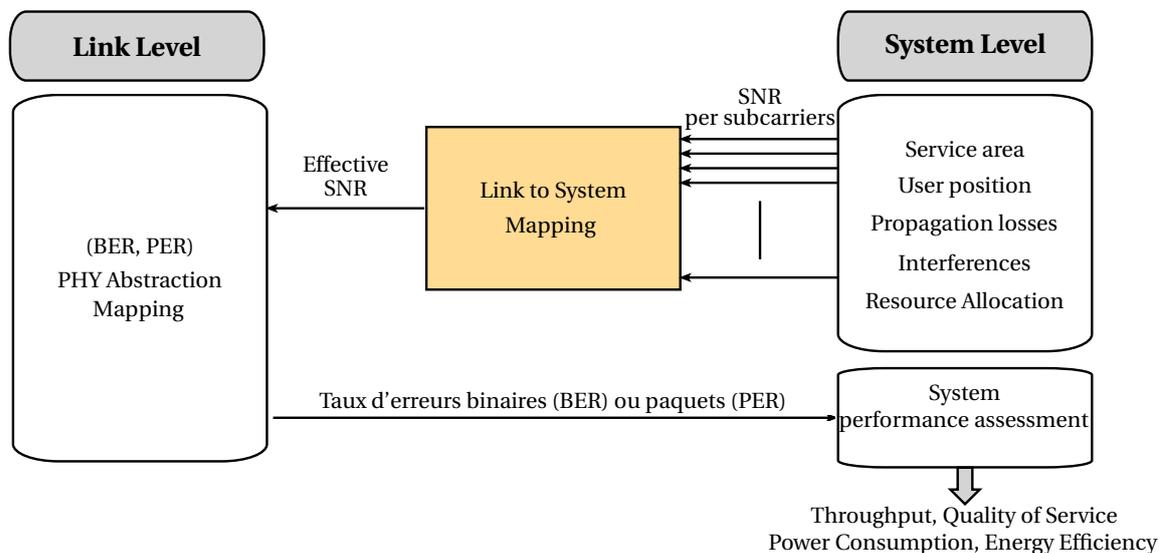


FIGURE 3.2 – Structure de l'environnement de simulation.

et les utilisateurs, de la mobilité des utilisateurs, des interférences et des pertes de propagations lors du calcul du SNR des utilisateurs, etc. À ce niveau système, le SNR de chaque utilisateur est calculé, puis converti en taux d'erreurs ou en débit en utilisant les résultats du simulateur LLS obtenus au niveau lien. Ceci permet par exemple d'évaluer les performances du réseau en termes de capacité ou de qualité de service fournies aux utilisateurs.

Comme illustré à la figure 3.2, le passage entre ces deux niveaux de simulation est réalisé en utilisant des modèles d'abstraction de la couche physique [71, 72, 73] qui permettent d'évaluer la qualité du lien entre un émetteur et un utilisateur.

Ces modèles d'abstraction peuvent être décrits en deux étapes :

- La première étape mesure la qualité du lien sur chaque sous porteuse du système utilisé puis fournit un vecteur de SNR correspondant à la qualité du lien mesurée.
- La deuxième étape compresse le vecteur de SNR pour obtenir un SNR effectif en premier lieu. Puis, en second lieu, le SNR effectif et les courbes de taux d'erreurs en *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) sont utilisées pour évaluer les performances du réseau en termes de débits ou de taux d'erreurs par exemple.

La précision de ces modèles d'abstraction dépend de la fonction de compression utilisée pour le calcul du SNR effectif.

Dans l'article [71], les auteurs présentent un état de l'art des différentes fonctions de compression ainsi que leurs performances. Les modèles les plus précis et utilisés sont basés sur la fonction exponentielle, nommé *Exponential Effective SNR Mapping* (EESM), ou sur l'information mutuelle, nommé *Mutual Information Effective SNR Mapping* (MIESM).

3.2.1 Environnement de simulation du réseau hybride

Afin d'évaluer les métriques de performances du réseau hybride définies dans ce chapitre, nous avons utilisé le simulateur système de la norme LTE développé par l'université technologique de Vienne, Autriche.

Ce simulateur SLS, plus connu sous le nom de *LTE downlink system level simulator* [74, 75, 76], permet d'évaluer les performances d'un système LTE en utilisant l'approche d'abstraction de la couche physique que nous venons de présenter. Par ailleurs, notons que la version initiale de ce simulateur est principalement orientée pour la simulation d'un réseau cellulaire point-à-point en utilisant uniquement un mode de transmission *unicast* sur une infrastructure de réseau de type LPLT.

Par conséquent, nous avons apporté plusieurs modifications à la version d'origine (v1.8r1375) afin d'intégrer une composante de diffusion basée sur des infrastructures de réseaux de diffusion et des modes de transmission *broadcast* ou *multicast* dans les fonctionnalités de ce simulateur système. Les principales modifications apportées sont les suivantes :

- La prise en compte des infrastructures de réseau de type HPHT avec la possibilité de configurer la hauteur des sites de transmission ainsi que la puissance de transmission.
- La prise en compte des modèles de propagation de type « Okumura-HATA » adaptés aux infrastructures de réseau HPHT.
- La prise en compte des études de bilans de liaison des modes de réception portable et mobile dans la planification de la composante de diffusion.
- La prise en compte des méthodes d'allocation des ressources dans un système de diffusion qui allouent toutes les ressources spectrales disponibles à tous les utilisateurs. En revanche, les techniques d'adaptation de lien ne pourront pas être utilisées dans ce cas.

3.2.2 Résultats de simulation du réseau hybride

Pour simuler et évaluer les performances du réseau hybride dans une approche de type *tower overlay* (voir scénario S2, chapitre 2), nous considérons ici la transmission d'un service linéaire destiné à un certain nombre d'utilisateurs uniformément répartis dans une zone de service donnée.

Rappelons que la capacité minimale requise pour recevoir le service correctement est fixée à $C_{req} = 512$ kbps. Nous supposons que tous les utilisateurs présents dans la zone de service sont intéressés par le service diffusé. Afin de simuler le scénario de déchargement du trafic des réseaux cellulaires vers les réseaux de diffusion comme proposé dans le scénario S2, nous supposons également qu'un utilisateur situé dans la zone de couverture du réseau de diffusion sera directement associé à l'émetteur HPHT. Cependant dans le réseau cellulaire, l'utilisateur est associé à l'émetteur LPLT le plus proche, ce qui permet de bénéficier du meilleur SNR.

Par ailleurs, la norme LTE est utilisée comme système de transmission dans le réseau cellulaire et dans le réseau de diffusion avec sa composante de diffusion eMBMS. Cette dernière a été modifiée pour intégrer les contraintes liées à l'infrastructure de réseau HPHT et à la gestion des ressources dans les réseaux de diffusion. Notons aussi qu'une stratégie d'allocation de ressource classique comme le *round robin* est utilisée dans le réseau cellulaire. Les paramètres de configuration utilisés pour la simulation du réseau sont présentés au tableau 3.2. Les métriques de capacité moyenne et de taux d'accès moyen ont été évaluées à la suite d'une simulation de *monte carlo* avec 100 réalisations.

La figure 3.3 présente le taux d'accès moyen au service en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service. Les résultats sont présentés pour le réseau cellulaire, le réseau de diffusion et le réseau hybride avec différentes zones de couvertures de la composante de diffusion matérialisées par la valeur de γ_0^{bc} .

Tout d'abord comme illustré à la figure 3.3, nous pouvons observer qu'en utilisant uniquement le réseau cellulaire, l'accès au service ne peut pas être assuré pour tous les utilisateurs présents dans la zone de service. En effet, lorsque le nombre d'utilisateurs augmente, la quantité de ressources nécessaires pour garantir l'accès au service pour tous les utilisateurs augmente également. Par conséquent, compte tenu du nombre limité de ressources, le réseau cellulaire ne peut assurer la distribution du service que pour un certain nombre d'utilisateurs. Ceci explique la dégradation du taux d'accès moyen au service lorsque le nombre d'utilisateurs augmente. Comme illustré à la figure 3.3, lorsqu'uniquement le réseau cellulaire est utilisé, environ 35% des utilisateurs reçoivent le service diffusé pour un nombre total de 10000 utilisateurs dans la zone de service.

Tableau 3.2 – Paramètres de simulation du réseau hybride dans un scénario de type *tower overlay*.

	Composante cellulaire	Composante de diffusion
Zone de service	30 km × 30 km	
Infrastructure de réseau	LPLT	HPHT
Distance entre sites (ISD)	1700 m	1 seul site
Système de transmission	LTE	eMBMS
Fréquence porteuse	750 MHz	700 MHz
Largeur canal de transmission	10 MHz	10 MHz
Mode de transmission	<i>unicast</i>	<i>broadcast</i>
Modèle de propagation	COST231 HATA	Okumura HATA
Puissance de transmission	1,5 kW	10 kW
Hauteur antenne de transmission	40 m	100 m
Hauteur antenne de réception	1,5 m	1,5 m
Allocation de ressources	<i>round robin</i>	₋₁

¹ Toutes les ressources disponibles sont allouées à tous les utilisateurs ;

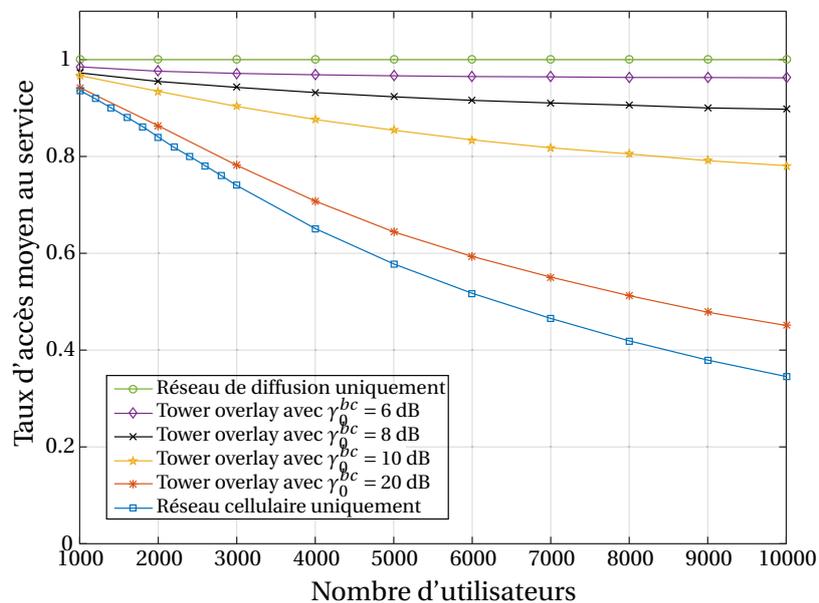


FIGURE 3.3 – Taux d'accès moyen au service dans le réseau hybride en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service ; les résultats sont présentés pour différentes zones de couverture de la composante de diffusion.

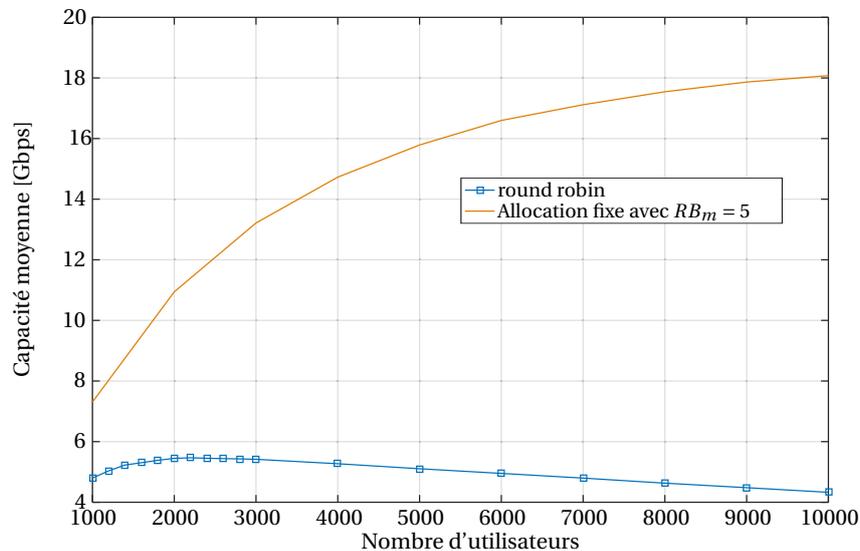


FIGURE 3.4 – Capacité moyenne de service de la composante cellulaire en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service pour une stratégie fixe d'allocation de ressources et une stratégie de type *round robin*; pas de coopération avec le réseau de diffusion pour la transmission du service.

Deuxièmement, la dégradation du taux d'accès moyen au service dans le réseau cellulaire se traduit par une réduction de la capacité moyenne fournie par le réseau. Toutefois, la réduction de la capacité moyenne de service est fonction de la stratégie d'allocation de ressource utilisée par l'opérateur de réseau cellulaire. Ceci est illustré à la figure 3.4 qui présente l'évolution de la capacité moyenne offerte par le réseau cellulaire en fonction du nombre d'utilisateurs présents dans la zone de service pour une stratégie d'allocation de ressources de type *round robin* et celle considérée dans cette thèse avec $RB_m = 5$. Rappelons que cette dernière stratégie consiste à choisir un nombre RB_m de PRBs permettant à un utilisateur de recevoir le service proposé.

Nous pouvons observer sur la figure 3.4 qu'à partir de 2000 utilisateurs, l'augmentation du nombre d'utilisateurs entraîne une diminution de la capacité moyenne lorsque la stratégie *round robin* est utilisée. Cette réduction de la capacité moyenne, est due à la stratégie d'allocation des ressources utilisée pour la transmission du service. En effet, la stratégie *round robin* utilisée dans le cadre de cette simulation cherche à garantir l'équité dans le partage des ressources spectrales. Ainsi, lorsque le nombre d'utilisateurs augmente, le nombre de PRBs alloué par utilisateur diminue. Par conséquent, la capacité moyenne fournie par le réseau décroît.

Cependant, avec une stratégie où le nombre RB_m est fixé par utilisateur, la capacité moyenne de service reste constante lorsque le nombre maximum d'utilisateurs supportés est atteint

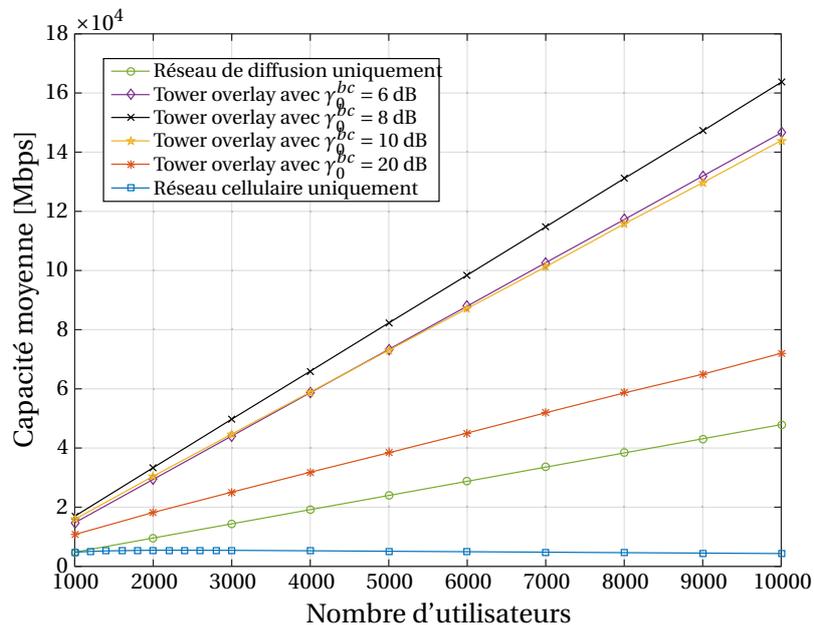


FIGURE 3.5 – Capacité moyenne de service du réseau hybride en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service ; les résultats sont présentés pour différentes zones de couverture de la composante de diffusion.

comme illustré sur la figure 3.4. En effet, dans ce cas, le nombre de PRBs alloués à un utilisateur ne dépend pas du nombre d'utilisateurs présents dans la zone de service.

Ces résultats montrent ainsi qu'une stratégie fixe d'allocation des ressources est plus adaptée qu'une stratégie de type *round robin* pour la transmission de services populaires, c'est-à-dire destinés à un grand nombre d'utilisateurs.

D'autre part, comme illustré à la figure 3.3, la coopération des composantes cellulaire et de diffusion dans le réseau hybride permet d'améliorer le taux d'accès moyen au service comparé au réseau cellulaire. Notons également que le gain de coopération est fonction de la zone de couverture de la composante de l'émetteur HPHT puisque nous supposons une puissance constante de l'émetteur HPHT.

En effet, plus la zone de couverture de l'émetteur HPHT est grande, c'est-à-dire plus γ_0^{bc} diminue, meilleur est le taux d'accès moyen au service. Par conséquent, lorsque la zone de service est entièrement couverte par l'émetteur HPHT, le taux d'accès moyen au service est de 1 et tous les utilisateurs présents dans la zone de service reçoivent le service diffusé. En d'autres termes, ceci revient à utiliser uniquement la composante de diffusion pour transmettre le service. Cependant, pour couvrir toute la zone de service, la composante de diffusion doit être planifiée en considérant le cas de transmission le plus défavorable. Ceci conduit à une faible capacité moyenne de service comme illustré à la figure 3.5 qui montre

l'évolution de la capacité moyenne de service en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service. Les résultats sont présentés pour le réseau cellulaire, le réseau de diffusion et le réseau hybride avec différentes zones de couverture de la composante de diffusion matérialisées par la valeur de γ_0^{bc} . Observons que les capacités de service les plus faibles sont obtenues lorsqu'il n'y a pas de coopération entre les deux composantes. De plus, nous pouvons constater que la réduction de la zone de couverture de la composante de diffusion permet d'augmenter la capacité moyenne de service du réseau hybride jusqu'à un maximum où le gain de coopération le plus élevé est atteint en terme de capacité. À titre d'exemple sur la figure 3.5, le gain de coopération maximal est atteint pour une valeur de $\gamma_0^{bc} = 8$ dB.

Notons qu'en négligeant l'impact des utilisateurs du réseaux cellulaires et sachant que la distribution des utilisateurs dans la zone de service est uniforme, il est possible de déterminer la zone de couverture de la composante de diffusion permettant de maximiser la capacité totale du réseau hybride. En d'autres termes, cela revient à chercher le rayon de couverture R_{bc} de la composante de diffusion qui maximise la capacité totale du réseau de diffusion.

Enfin, ces résultats suggèrent qu'un réseau de diffusion est plus approprié pour la transmission de services populaires. Compte tenu du dimensionnement des réseau de diffusion, cette approche conduit à de faibles capacités de service car toute la zone de service doit être couverte par l'émetteur HPHT. En revanche, la coopération des réseaux cellulaires et de diffusion dans un réseau hybride permet de maximiser la capacité de service fournie avec une légère dégradation du taux d'accès moyen au service. Néanmoins, cette dégradation du taux d'accès moyen au service est acceptable comparé au scénario sans coopération où un réseau cellulaire est utilisé pour la transmission du service.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une modélisation analytique de la coopération des réseaux cellulaires et de diffusion pour la distribution de services linéaires destinés à un grand nombre d'utilisateurs. Nous avons également défini des métriques de performances comme la capacité moyenne de service, le taux d'accès moyen au service, la puissance consommée ainsi que l'efficacité énergétique du réseau hybride pour évaluer le gain de cette coopération. Enfin, nous avons présenté quelques résultats de simulation du réseau hybride dans un scénario de type *tower overlay*. Les résultats de ces simulations ont montré que la coopération permet d'améliorer les performances du réseau pour la distribution des services linéaires. Ces résultats ont également montré l'existence d'un point de fonctionnement optimal qui est obtenu en ajustant la zone de couverture de la composante de diffusion du réseau hybride. Ces résultats obtenus ont fait l'objet d'une publication à la conférence internationale ISWCS'2015 (International Symposium on Wireless Communication Systems) [77].

OPTIMISATION DE LA CAPACITÉ POUR LA DIFFUSION DE SERVICES LINÉAIRES

Introduction

De façon générale, la coopération des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion permet d'améliorer les performances du réseau hybride pour la distribution des services linéaires destinés à un grand nombre d'utilisateurs. Dans le chapitre précédent, nous avons proposé une modélisation analytique et défini des métriques de performances du réseau hybride afin d'évaluer le gain de coopération dans un scénario de type *tower overlay* dans lequel un réseau cellulaire coopère avec un réseau de diffusion pour assurer la transmission des services linéaires dans une zone de service donnée.

Les résultats de simulation des performances du réseau hybride présentés, ont mis en évidence l'existence d'un point de fonctionnement optimal qui conduit à un gain de coopération maximal. Ces résultats ont également montré que ce gain de coopération dépend de la zone de couverture du réseau de diffusion. Ainsi, l'objectif de ce chapitre est de déterminer ce point de fonctionnement optimal, notamment les paramètres de planification du réseau de diffusion dans un scénario de coopération avec un réseau cellulaire.

Rappelons, d'une part, qu'un réseau de diffusion est habituellement planifié pour couvrir toute la zone de service considérée en utilisant les conditions de réception les plus défavorables afin de garantir l'accès au service à tous les utilisateurs dans la zone de service. Cette stratégie de planification conduit généralement à une faible capacité de service du réseau de diffusion ainsi qu'une forte consommation de puissance des émetteurs *High Power High Tower* (HPHT).

D'autre part, il est important de rappeler que le nombre de *Physical Resource Block* (PRB) disponibles dans un réseau cellulaire étant limité, le taux d'accès au service des utilisateurs associés au réseau cellulaire se dégrade lorsque le nombre d'utilisateurs intéressés par le service augmente.

Compte tenu de ces deux observations, notre approche se place dans l'optique de déterminer la zone de couverture du réseau de diffusion qui permet d'optimiser les métriques de performances du réseau hybride.

Comme illustré à la figure 4.1, déterminer la zone de couverture optimale de la composante de diffusion revient donc à trouver le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT dans un scénario de coopération du type *tower overlay*.

Ainsi, nous abordons dans ce chapitre l'optimisation de la capacité moyenne de service du réseau hybride pour la diffusion de services linéaires destinés à un grand nombre d'utilisateurs.

4.1 Présentation du problème (P1)

Dans cette section, nous étudions le problème de maximisation de la capacité moyenne de service sous la contrainte d'un taux d'accès moyen au service ciblé, désigné par η_{cible} . Le problème de maximisation est formulé de la manière suivante :

$$(P1) : \quad \begin{aligned} \max_{0 \leq r_{bc} \leq 1} \quad & \mathbb{E}[C_s^H] \\ \text{s.t.} \quad & \mathbb{E}[\eta_s^H] \geq \eta_{cible}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

où $r_{bc} = R_{bc}/R_{max}$ représente le rayon de couverture de l'émetteur HPHT normalisé par rapport au rayon de couverture maximale R_{max} (voir figure 4.1).

Remarque 6. À partir de l'équation (3.37), nous pouvons montrer que la capacité de service de la composante cellulaire du réseau hybride ne dépend pas du rayon de couverture de l'émetteur HPHT. Le fait d'ajuster le rayon de couverture de l'émetteur HPHT permet d'augmenter ou de réduire la capacité de service de la composante de diffusion du réseau hybride. Par conséquent, la maximisation de la capacité moyenne de service du réseau hybride peut s'interpréter par l'optimisation de la capacité de déchargement du réseau hybride de sa composante cellulaire à sa composante de diffusion.

4.2 Résolution analytique du problème (P1)

La capacité moyenne de service $\mathbb{E}[C_s^H]$, donnée par (3.37), et le taux moyen d'accès au service $\mathbb{E}[\eta_s^H]$, donné par (3.39), peuvent s'écrire en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT.

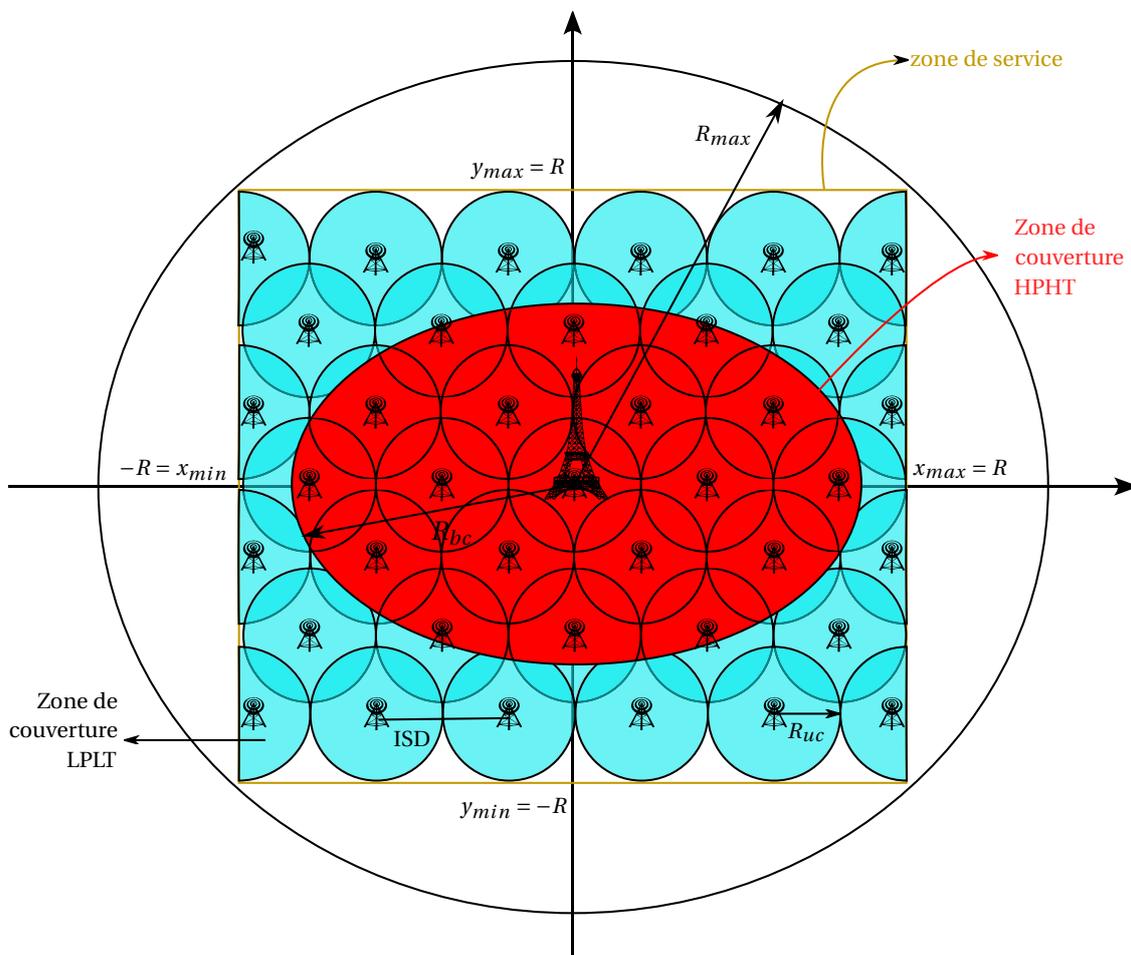


FIGURE 4.1 – Modélisation analytique du réseau hybride dans un scénario *tower overlay* avec une stratégie d'adaptation de la zone de couverture de la composante de diffusion.

Proposition 2. *En considérant une répartition uniforme des utilisateurs dans la zone de service, les expressions de la capacité moyenne de service et du taux d'accès moyen au service du réseau hybride sont données par :*

$$\mathbb{E}[C_s^H] = M \left[r_{bc}^2 B^{bc} \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_0^{bc}}{r_{bc}^{\alpha_{bc}}} \right) + \mathbb{E}[\eta_i^{uc}] (1 - r_{bc}^2) \mathbb{E}[C_m^{uc}] \right], \quad (4.2)$$

$$\mathbb{E}[\eta_s^H] = r_{bc}^2 + \mathbb{E}[\eta_i^{uc}] (1 - r_{bc}^2). \quad (4.3)$$

Rappelons que $\mathbb{E}[C_m^{uc}]$ représente la capacité moyenne d'un utilisateur dans une cellule Low Power Low Tower (LPLT). Cette capacité est obtenue à partir des équations (3.28) et (3.15). $\mathbb{E}[\eta_i^{uc}]$ désigne le taux d'accès moyen au service d'un utilisateur dans la $i^{\text{ème}}$ cellule LPLT. Son

expression est donnée par (3.31).

Preuve. Nous présentons d'abord la démonstration de la capacité moyenne de service donnée par l'équation (4.2) ; ensuite nous passons à la démonstration du taux d'accès moyen au service donné par l'équation (4.3).

Soient M le nombre d'utilisateurs dans la zone de service et R_{bc} le rayon de couverture de l'émetteur HPHT. Rappelons que la capacité moyenne de service du réseau hybride est la somme de la capacité moyenne de l'émetteur HPHT et des émetteurs LPLT utilisés pour transmettre le service diffusé.

La capacité moyenne de service de l'émetteur HPHT, est déduite à partir de l'équation (3.9) et s'écrit

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[C^{bc}] &= M^{bc} C_m^{bc} \\ &= M^{bc} B^{bc} \log_2 \left(1 + \gamma_0^{bc} \right) \\ &= M \mathbf{P} \left[m \in \mathcal{M}^{bc} \right] B^{bc} \log_2 \left(1 + \gamma_0^{bc} \left(\frac{R_{bc}}{R_{max}} \right)^{-\alpha_{bc}} \right),\end{aligned}\quad (4.4)$$

où R_{max} est le rayon de couverture maximal de l'émetteur HPHT qui permet de couvrir toute la zone de service comme illustré à la figure 4.1, γ_0^{bc} est le *signal-to-noise ratio* (SNR) minimum de réception à la distance de référence R_{max} , et $\mathbf{P} [m \in \mathcal{M}^{bc}]$ est la probabilité qu'un utilisateur soit dans la cellule HPHT.

En supposant une répartition uniforme des utilisateurs dans la zone de service, la capacité moyenne de service de l'émetteur HPHT s'écrit

$$\mathbb{E}[C^{bc}] = M r_{bc}^2 B^{bc} \log_2 \left(1 + \gamma_0^{bc} r_{bc}^{-\alpha_{bc}} \right), \quad (4.5)$$

où $r_{bc} = R_{bc}/R_{max}$ est le rayon de couverture de l'émetteur HPHT normalisé par rapport au rayon de couverture maximal R_{max} .

Puisque les utilisateurs situés dans la zone de couverture de la composante de diffusion du réseau hybride sont directement rattachés à l'émetteur HPHT, la capacité moyenne de service de la composante cellulaire est donnée par

$$\mathbb{E}[C^{uc}] = \sum_{i \in \mathcal{N}} \mathbb{E}[C_i^{uc}], \quad (4.6)$$

où \mathcal{N} désigne l'ensemble des émetteurs LPLT situés en dehors de la zone de couverture de l'émetteur HPHT.

À partir de l'équation (3.29), nous obtenons

$$\mathbb{E}[C_i^{uc}] = \sum_{m \in \mathcal{M}_i^{uc}} \mathbb{E}[C_m^{uc} \eta_m]. \quad (4.7)$$

Compte tenu de la stratégie d'allocation de ressource considérée dans cette étude qui attribue à chaque utilisateur dans une cellule LPLT un nombre fixe \overline{RB}_m de PRBs dans la limite du nombre maximal RB_{max} de PRBs disponible, nous pouvons supposer sans pertes de généralité que les paramètres C_m^{uc} et η_m sont indépendants.

Par conséquent, la capacité moyenne d'une cellule LPLT est le produit de la capacité moyenne d'un utilisateur dans la cellule, du taux d'accès moyen de la cellule et du nombre d'utilisateurs dans la cellule. L'expression de la capacité moyenne d'une cellule LPLT est donnée par

$$\mathbb{E}[C_i^{uc}] = \mathbf{MP} [m \in \mathcal{M}_i^{uc}] \mathbb{E}[C_m^{uc}] \overline{\eta}_i, \quad (4.8)$$

où

$$\overline{\eta}_i = \min \left(1, \frac{RB_{max}}{\mathbf{MP} [m \in \mathcal{M}_i^{uc}] \overline{RB}_m} \right), \quad (4.9)$$

représente le taux d'accès moyen au service dans une cellule LPLT. En considérant une répartition uniforme des utilisateurs dans la zone de service nous obtenons

$$\mathbb{E}[C_i^{uc}] = Mr_{uc}^2 \mathbb{E}[C_m^{uc}] \min \left(1, \frac{M_{i,max}^{uc}}{Mr_{uc}^2} \right), \quad (4.10)$$

où $r_{uc} = R_{uc}/R_{max}$ est le rayon de couverture d'un émetteur LPLT normalisé par rapport R_{max} et $M_{i,max}^{uc} = RB_{max}/\overline{RB}_m$ représente le nombre maximal d'utilisateurs pris en charge dans une cellule LPLT.

Puisque les émetteurs LPLT sont configurés de la même manière avec des paramètres de transmission et des zones de couverture similaires, toutes les cellules LPLT ont donc la même capacité moyenne de service ainsi que le même taux d'accès au service.

Par conséquent la capacité moyenne de la composante cellulaire du réseau hybride est le produit de la capacité moyenne d'une cellule LPLT donnée par (4.10) et du nombre d'émetteurs LPLT situés en dehors de la zone de couverture de l'émetteur HPHT. Le nombre d'émetteurs LPLT en dehors de la zone de couverture de l'émetteur HPHT est donné par $N'_{LPLT} = (1/r_{uc}^2)(1 - r_{bc}^2)$.

Ainsi à partir de (4.6) et (4.10) nous déduisons la capacité moyenne de service des émetteurs LPLT utilisés pour transmettre le service

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[C^{uc}] &= \sum_{i \in \mathcal{N}} \mathbb{E}[C_i^{uc}] \\ &= N'_{LPLT} Mr_{uc}^2 \mathbb{E}[C_m^{uc}] \min \left(1, \frac{M_{i,max}^{uc}}{Mr_{uc}^2} \right) \\ &= M(1 - r_{bc}^2) \mathbb{E}[C_m^{uc}] \min \left(1, \frac{M_{i,max}^{uc}}{Mr_{uc}^2} \right). \end{aligned} \quad (4.11)$$

Enfin, l'équation (4.2) est obtenue en faisant la somme de (4.5) et (4.11).

De la même manière nous pouvons déterminer le taux d'accès moyen du réseau hybride. Par définition le taux d'accès au service de la cellule HPHT est unitaire. Par conséquent le taux d'accès moyen au service s'écrit

$$\mathbb{E}[\eta_s^H] = \mathbf{P}[m \in \mathcal{M}^{bc}] + \sum_{i \in \mathcal{N}} \mathbf{P}[m \in \mathcal{M}_i^{uc}] \bar{\eta}_i. \quad (4.12)$$

En supposant une répartition uniforme des utilisateurs dans la zone de service nous obtenons l'équation (4.3)

$$\mathbb{E}[\eta_s^H] = r_{bc}^2 + (1 - r_{bc}^2) \bar{\eta}_i. \quad (4.13)$$

■

En utilisant le résultat de la proposition 2, nous pouvons reformuler le problème (P1) de la manière suivante :

$$(P1): \quad \begin{aligned} & \max_{0 \leq r_{bc} \leq 1} && M \left[r_{bc}^2 B^{bc} \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_0^{bc}}{r_{bc}^{\alpha_{bc}}} \right) + \mathbb{E}[\eta_i^{uc}] (1 - r_{bc}^2) \mathbb{E}[C_m^{uc}] \right] \\ & s.t. && r_{bc}^2 + \mathbb{E}[\eta_i^{uc}] (1 - r_{bc}^2) \geq \eta_{cible}. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Étant donné que la capacité moyenne de service du réseau hybride est une fonction continue et dérivable du rayon de couverture normalisé de l'émetteur HPHT, le problème d'optimisation (P1) admet une solution dans l'intervalle $[0, 1]$. Afin de montrer l'existence et l'unicité de la solution au problème (P1) nous introduisons la proposition suivante :

Proposition 3. soient $\xi_0 \geq 0$, $\alpha_{bc} > 0$ et $f(x)$ la fonction définie pour tout $x \in [0, 1]$ par

$$f(x) = x^2 \ln(1 + \gamma_0^{bc} x^{-\alpha_{bc}}) + (1 - x^2) \xi_0. \quad (4.15)$$

La fonction $f(x)$ est convexe pour tout $x \in [0, 1]$. Autrement dit, il existe alors un unique $x^* \in [0, 1]$ tel que pour tout $x \in [0, 1]$ $f(x) \leq f(x^*)$.

Preuve. La fonction $f(x)$ est composée par une somme et produit de fonctions continues dans $[0, 1]$. Ainsi par définition, la fonction $f(x)$ est continue sur $[0, 1]$. Il en résulte que la fonction $f(x)$ est dérivable sur $[0, 1]$ et sa fonction dérivée est donnée par :

$$f'(x) = 2x \left[\ln \left(1 + \frac{\gamma_0^{bc}}{x^{\alpha_{bc}}} \right) - \frac{\alpha_{bc}}{2 \left(1 + \frac{x^{\alpha_{bc}}}{\gamma_0^{bc}} \right)} - \xi_0 \right]. \quad (4.16)$$

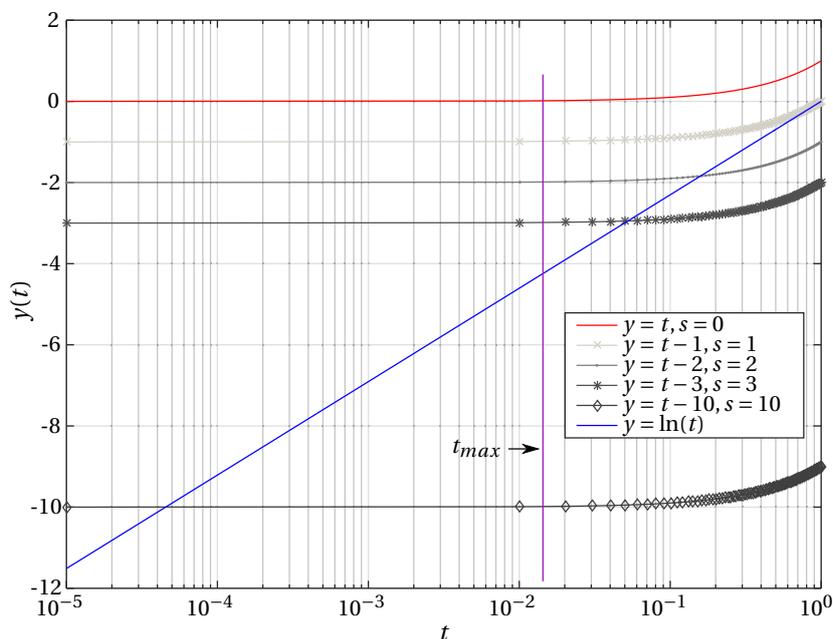


FIGURE 4.2 – Représentation des fonctions $y = \ln(t)$ et $y = t - s$ pour différentes valeurs du paramètre $s \geq 0$.

En appliquant le changement de variable suivant :

$$t = \frac{\alpha_{bc}}{2 \left(1 + \frac{\gamma_0^{bc}}{x^{\alpha_{bc}}} \right)}, \quad (4.17)$$

nous pouvons montrer que pour tout $t \in [0, t_{max}]$ où $t_{max} = (\alpha_{bc}/2)/(1 + \gamma_0^{bc})$, le signe de la fonction dérivée $f'(x)$ dépend uniquement du signe de la fonction $g(t)$ définie par

$$g(t) = t - s - \ln(t), \quad (4.18)$$

avec

$$s = \frac{\alpha_{bc}}{2} - \ln\left(\frac{\alpha_{bc}}{2}\right) + \xi_0 \quad (4.19)$$

Notons par ailleurs que pour des valeurs typiques de α_{bc} et γ_0^{bc} , nous avons $t_{max} \leq 1$. Ainsi, sans perte de généralité nous supposons que $t_{max} \leq 1$.

La figure 4.2 donne une représentation des fonctions $y(t) = \ln t$ et $y(t) = t - s$ pour différentes valeurs du paramètres $s \geq 0$. Nous pouvons d'ailleurs constater sur la figure 4.2 que le signe de la fonction $g(t)$ dépend principalement du paramètre s .

Puisque $s \geq 0$ par définition, nous obtenons :

- Pour les valeurs de $s \leq 1$ que $g(t) > 0$ pour tout $t \in [0, t_{max}]$. Ainsi $f'(x) \geq 0$ et $f(x)$ est une fonction strictement croissante. Par conséquent, la valeur maximale de la fonction $f(x)$ n'est atteinte qu'à la borne supérieure de l'intervalle, c'est-à-dire pour $x^* = 1$. Ceci prouve également l'unicité de la solution x^* .
- Pour des valeurs de $s > 1$,

$$\exists t_0 \text{ tel que } \begin{cases} g(t) \geq 0 \forall t \in [0, t_0], \\ g(t) \leq 0 \forall t \in [t_0, 1]. \end{cases} \quad (4.20)$$

À partir de l'équation (4.20) nous pouvons observer, d'une part que pour $t_{max} \leq t_0$ la fonction $f(x)$ est strictement croissante. Ainsi, la valeur maximale de la fonction n'est atteinte qu'à la borne supérieure de l'intervalle, c'est-à-dire pour $x^* = 1$. D'autre part, pour $t_{max} > t_0$, la fonction $f(x)$ est strictement décroissante. En d'autres termes $f(x)$ est une fonction concave. Par conséquent, il existe un unique x^* tel que $f(x) \leq f(x^*)$ pour tout $x \in [0, 1]$.

- Enfin, lorsque $s \rightarrow +\infty$ il existe $t_0 \rightarrow 0$ tel que $g(t) < 0$. Ainsi, $f'(x) < 0$ et $f(x)$ est une fonction strictement décroissante. Dans ce cas la valeur maximale de la fonction $f(x)$ n'est atteinte qu'à la borne inférieure de l'intervalle $[0, 1]$, c'est-à-dire pour $x^* = 0$. D'où l'unicité de la solution x^* .

Ceci conclut la démonstration de la proposition 3. ■

Pour résoudre le problème d'optimisation (P1), nous adoptons la démarche suivante. Premièrement, nous abordons l'optimisation de la capacité moyenne de service sans la contrainte de taux d'accès moyen au service. Dans un second temps, nous prenons en compte la contrainte de taux d'accès moyen au service.

4.2.1 Résolution du problème d'optimisation sans contrainte

À partir de la preuve de la proposition 3 nous pouvons montrer que la fonction de la capacité moyenne de service est équivalente à la fonction $f(x)$ dont l'expression est donnée par l'équation (4.15) en prenant $x = r_{bc}$ et

$$\xi_0 = B_0^{bc} \mathbb{E}[C_m^{uc}] \mathbb{E}[\eta_i^{uc}], \quad \text{où } B_0^{bc} = \frac{\ln 2}{B^{bc}}. \quad (4.21)$$

Remarque 7. Le paramètre ξ_0 est homogène à une efficacité spectrale, obtenue comme le rapport de la capacité moyenne, au sens du débit moyen atteint, des utilisateurs de la composante cellulaire sur la bande de transmission allouée à la composante de diffusion du réseau hybride. En d'autres termes, ξ_0 représente l'efficacité spectrale qu'aurait un réseau cellulaire en utilisant les ressources spectrales d'un réseau de diffusion. Ainsi, l'équation (4.15) peut être interprétée comme une fonction d'équilibre entre deux termes d'efficacité spectrale.

Ainsi, en utilisant l'équation (4.18) nous définissons le paramètre s comme étant une variable de décision permettant de déterminer le niveau de coopération optimale entre la composante cellulaire et la composante de diffusion du réseau hybride.

Définition 4.1. Paramètre de décision de coopération : *le paramètre de décision de la coopération entre la composante cellulaire et de diffusion du réseau hybride dans un scénario de type tower overlay est défini par*

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{\alpha_{bc}}{2} - \ln \frac{\alpha_{bc}}{2} + \xi_0, \\
 &= \frac{\alpha_{bc}}{2} - \ln \frac{\alpha_{bc}}{2} + B_0^{bc} \mathbb{E}[C_m^{uc}] \mathbb{E}[\eta_i^{uc}], \\
 &= \frac{\alpha_{bc}}{2} - \ln \frac{\alpha_{bc}}{2} + B_0^{bc} \mathbb{E}[C_m^{uc}] \min \left(1, \frac{RB_{max}}{M_i^{uc} RB_m} \right).
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

Remarquons que le terme $RB_{max}/\overline{RB_m}$ représente la charge maximale, en termes de nombre d'utilisateurs qu'une cellule LPLT peut supporter afin de garantir l'accès au service à tous les utilisateurs. Par conséquent, notons $M_{i,max}^{uc}$ le nombre maximal d'utilisateurs supporté par une cellule LPLT.

À partir de l'équation (4.22) nous pouvons observer que le paramètre de décision s dépend, soit du nombre de PRBs alloués à chaque utilisateur dans une cellule LPLT, soit du nombre d'utilisateurs dans la cellule LPLT.

D'une part, lorsque les cellules LPLT ne sont pas surchargées, c'est-à-dire $M_i^{uc} \leq M_{i,max}^{uc}$, le paramètre de décision de coopération dépend simplement de la stratégie d'allocation de ressources utilisée par la composante cellulaire. En effet, lorsque $M_i^{uc} \leq M_{i,max}^{uc}$, l'expression du paramètre de décision peut s'écrire de la manière suivante :

$$s = \frac{\alpha_{bc}}{2} - \ln \frac{\alpha_{bc}}{2} + B_0^{bc} \mathbb{E}[C_m^{uc}]. \tag{4.23}$$

Puisque $\mathbb{E}[C_m^{uc}] = \overline{RB_m} \mathbb{E}[C_m^{RB}]$ d'après (3.28), la valeur du paramètre de décision s est une fonction du nombre RB_m de PRBs alloués à un utilisateur qui dépend de la stratégie d'allocation de ressources utilisée. Cependant, étant donné que la stratégie considérée dans notre étude alloue le même nombre RB_m de PRBs à chaque utilisateur, la valeur du paramètre de décision s est alors constante dans ce cas.

D'autre part, lorsque les cellules LPLT sont surchargées, c'est-à-dire $M_i^{uc} \geq M_{i,max}^{uc}$, le paramètre de décision de coopération s'écrit de la manière suivante :

$$s = \frac{\alpha_{bc}}{2} - \ln \frac{\alpha_{bc}}{2} + \frac{B_0^{bc} RB_{max} \mathbb{E}[C_m^{RB}]}{M_i^{uc}}. \tag{4.24}$$

Ainsi, la valeur du paramètre de décision est une fonction décroissante du nombre moyen M_i^{uc} d'utilisateurs dans les cellules LPLT et ne dépend pas, dans ce cas, de la stratégie d'allocation de ressources utilisée pour ces cellules LPLT. En effet, lorsque $M_i^{uc} \geq M_{i,max}^{uc}$, les émetteurs LPLT ne peuvent pas allouer des ressources à tous les utilisateurs en raison du nombre limité de ressources disponible. C'est pourquoi quelle que soit la stratégie d'allocation des ressources utilisée la capacité maximale des émetteurs est atteinte.

Remarque 8. *De façon générale, la stratégie de coopération entre les réseaux cellulaires et de diffusion pour la transmission de services linéaires doit tenir compte du nombre d'utilisateurs intéressés par les services qui seront diffusés et de la stratégie d'allocation des ressources utilisée dans les réseaux cellulaires. Ainsi, l'impact du nombre d'utilisateurs intéressés par le service diffusé et du nombre \overline{RB}_m de PRBs alloués sur les performances du réseau hybride sera vu en simulation.*

À présent, sur la base de la démonstration de la proposition 3, nous pouvons déterminer la solution du problème d'optimisation (P1) sans la contrainte de taux d'accès moyen au service en fonction de la valeur du paramètre de décision de coopération s .

- Pour les valeurs de $s < 1$, la solution optimale pour transmettre le service est obtenue en utilisant uniquement la composante de diffusion, c'est-à-dire $r_{bc}^* = 1$.
- Pour les valeurs de $s \geq 1$, la solution optimale est donnée par la proposition 4.
- Pour les valeurs de $s \rightarrow +\infty$, la solution optimale pour transmettre le service est obtenue en utilisant uniquement la composante cellulaire, c'est-à-dire $r_{bc}^* = 0$.

Remarque 9. *En pratique, $s \rightarrow +\infty$ revient à dire que la valeur du paramètre de décision de coopération s est très grand; autrement dit $s \gg 1$, ce qui est traité dans cas où $s \geq 1$.*

Proposition 4. *Pour les valeurs de $s > 1$, le rayon de couverture optimal r_{bc}^* de l'émetteur HPHT qui maximise la capacité moyenne de service est donné par*

$$r_{bc}^* = \left(\frac{\gamma_0^{bc}}{\frac{\alpha_{bc}}{2} \frac{e^s}{(1+v_0(s))} - 1} \right)^{\frac{1}{\alpha_{bc}}}, \quad (4.25)$$

où $v_0(s)$ est une fonction tabulée du paramètre de décision de coopération s . La figure 4.3 donne une représentation de cette fonction.

Preuve. Pour $s > 1$, nous pouvons montrer que la capacité moyenne de service est une fonction concave du rayon de couverture de l'émetteur HPHT (cf. preuve de la proposition 3). Il en résulte qu'il existe r_{bc}^* tel que $f'(r_{bc}^*) = 0$, où $f'(r_{bc}^*)$ est donnée par (4.16). Autrement

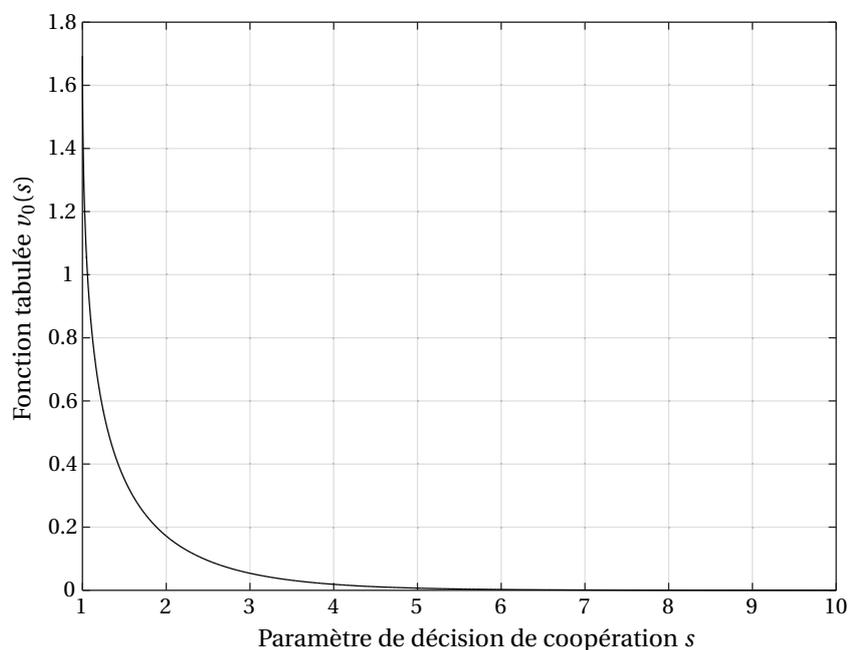


FIGURE 4.3 – Représentation de la fonction v_0 en fonction du paramètre de décision de coopération s .

dit la solution r_{bc}^* est obtenue en résolvant l'équation $f'(r_{bc}^*) = 0$. Soit φ le changement de variable suivant

$$\varphi : [0, 1] \rightarrow [0, t_{max}], \quad r_{bc} \rightarrow t = \frac{\alpha_{bc}}{2(1 + \frac{r_{bc}^{\alpha_{bc}}}{\gamma_0^{bc}})}. \quad (4.26)$$

Par application du changement de variable φ à l'équation $f'(r_{bc}^*) = 0$ nous obtenons

$$\ln t = t - s. \quad (4.27)$$

Soit $v(s)$ une fonction du paramètre s telle que $t = v(s)$ est solution à l'équation (4.27). Par définition, nous avons $v(s) \geq 0$ pour tout $s > 1$. La fonction dérivée de $v(s)$ est donnée par

$$v'(s) = -\frac{v(s)}{1 - v(s)}. \quad (4.28)$$

Puisque $0 \leq v(s) \leq 1$ (cf. figure 4.2), la fonction $v(s)$ est strictement décroissante. Il en résulte qu'il existe un réel $\ell \geq 0$ tel que $\lim_{s \rightarrow +\infty} v(s) = \ell$. Par conséquent, lorsque s tend vers plus l'infini, la fonction $v(s)$ peut être approchée par e^{-s} .

Par ailleurs, en considérant le changement de variable suivant $v_0(s) = e^s v(s) - 1$, il s'ensuit

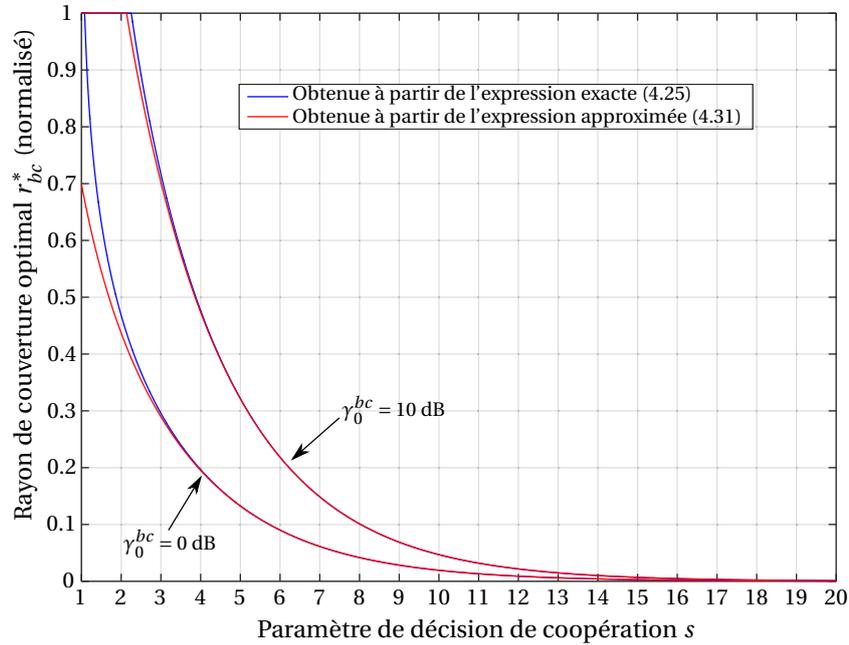


FIGURE 4.4 – Rayon de couverture optimal r_{bc}^* de l'émetteur HPHT en fonction du paramètre de décision de coopération s pour $\gamma_0^{bc} = 0$ dB and $\gamma_0^{bc} = 10$ dB.

que $v(s)$ est une solution de l'équation (4.27) si et seulement si

$$\ln(1 + v_0(s)) = e^{-s}(1 + v_0(s)). \quad (4.29)$$

Comme illustré à la figure 4.3, la fonction $v_0(s)$ peut être tabulée pour tout $s \geq 1$ à partir de l'équation (4.29) à l'aide de méthodes numériques. Ainsi, $v(s) = e^{-s}(1 + v_0(s))$ est une solution de l'équation (4.27) par construction.

Enfin, en appliquant le changement de variable inverse φ^{-1} donnée par

$$\varphi^{-1}: [0, t_{max}] \rightarrow [0, 1], \quad t \rightarrow r_{bc} = \left(\frac{\gamma_0^{bc}}{\frac{\alpha_{bc}}{2t} - 1} \right)^{\frac{1}{\alpha_{bc}}} \quad (4.30)$$

à la fonction $v(s)$, nous obtenons l'expression r_{bc}^* . ■

Remarque 10. L'approche présentée ici pour résoudre l'équation (4.27) pourra être itérée pour trouver une approximation purement analytique de la solution. Cependant, pour des raisons de simplicité nous nous arrêtons à la première itération.

Remarque 11. Comme illustré à la figure 4.3, la fonction $v_0(s)$ est une fonction strictement décroissante de s . Observons aussi que $\lim_{s \rightarrow +\infty} v_0(s) = 0$. Par conséquent, lorsque le paramètre de décision de coopération s devient assez grand (e.g. $s > 3$) la solution optimale peut être approchée, en négligeant la valeur de la fonction $v_0(s)$ dans l'équation (4.25), ce qui conduit à la solution suivante

$$r_{bc}^* \simeq \left(\frac{\gamma_0^{bc}}{\frac{\alpha_{bc}}{2} e^s - 1} \right)^{\frac{1}{\alpha_{bc}}}. \quad (4.31)$$

La précision de l'approximation (4.31) dépend de la valeur du paramètre de décision de coopération s . En effet, lorsque la valeur de ce paramètre s est faible et proche de 1, l'erreur introduite par l'approximation (4.31) de la solution optimale n'est plus négligeable puisque $v_0(s) \neq 0$.

Cette observation est d'avantage mise en évidence à la figure 4.4 qui trace le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT en fonction du paramètre s pour des valeurs de $\gamma_0^{bc} = 0$ dB et $\gamma_0^{bc} = 10$ dB. Ainsi, nous pouvons observer à la figure 4.4 que l'expression approximée (4.31) du rayon de couverture optimal est proche de son expression exacte donnée par (4.25).

Cependant, notons que pour des valeurs faibles du paramètre s (e.g. $s < 3$) et du SNR minimum de réception γ_0^{bc} (e.g. 0 dB), l'erreur d'approximation devient de plus en plus importante. Cette erreur d'approximation peut être réduite en utilisant une approximation d'ordre supérieur comme proposé à la remarque 10.

4.2.2 Prise en compte de la contrainte du taux d'accès moyen au service

Dans cette section, nous intégrons la contrainte du taux d'accès moyen au service dans l'optimisation de la capacité moyenne de service.

Soit $h(r_{bc})$ la fonction de contrainte définie à partir de l'équation (4.14) par

$$h(r_{bc}) = (1 - \mathbb{E}[\eta_i^{uc}]) r_{bc}^2 + \mathbb{E}[\eta_i^{uc}] - \eta_{cible}. \quad (4.32)$$

Une solution optimale r_{bc}^* au problème d'optimisation (P1) doit également vérifier la condition suivante :

$$h(r_{bc}^*) \geq 0. \quad (4.33)$$

Remarque 12. Lorsque les cellules LPLT ne sont pas surchargées, i.e. $M_i^{uc} \leq M_{i,max}^{uc}$, le taux d'accès moyen par cellule LPLT vaut toujours $\mathbb{E}[\eta_i^{uc}] = 1$ puisque tous les utilisateurs dans les cellules LPLT peuvent être servis.

À partir de l'équation (4.32), nous comprenons aisément que lorsque $\mathbb{E}[\eta_i^{uc}] \geq \eta_{cible}$ la condition (4.33) est toujours vérifiée. Cela signifie dans ce cas que la contrainte de taux d'accès repose uniquement sur les cellules du réseau cellulaire. En effet, cette caractéristique ré-

sulte du fait que le rayon de couverture r_{bc} de la composante de diffusion est nécessairement choisi de sorte à satisfaire la contrainte de service pour les utilisateurs connectés à la composante de diffusion. Ainsi, la contrainte de taux d'accès moyen au service peut être ignorée. Le problème (P1) est équivalent à un problème d'optimisation sans contraintes dont la solution est donnée par les équations (4.25) et (4.31).

Cependant, lorsque $\mathbb{E}[\eta_i^{uc}] < \eta_{cible}$ la contrainte ne peut pas être ignorée. Dans ce cas, si la solution optimale donnée par (4.25) ou (4.31) ne vérifie pas la condition (4.33), le rayon de couverture devra être ajusté de sorte à satisfaire la contrainte de taux d'accès moyen au service. En d'autres termes, dans le cas où la contrainte de taux d'accès au service est active, le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT, permettant de maximiser la capacité moyenne de service, est obtenu à partir de (4.32) comme suit :

$$r_{bc}^* = \sqrt{\frac{\eta_{cible} - \mathbb{E}[\eta_i^{uc}]}{1 - \mathbb{E}[\eta_i^{uc}]}}. \quad (4.34)$$

Dans ce cas où la condition (4.33) n'est pas satisfaite par le rayon optimal donné par (4.25), nous pouvons vérifier que le rayon obtenu à partir de (4.34) est supérieur à celui calculé à partir de (4.25). Ainsi, $R_{bc}^* \in [R_{min}, R_{max}]$ où R_{min} est donné par (4.25). En d'autres termes, le rayon de couverture optimal r_{bc}^* est en premier lieu conditionné à la contrainte de taux d'accès au service. Puis, si celle-ci est suffisamment faible, ce rayon est réduit afin d'augmenter la capacité moyenne de service du réseau hybride.

4.3 Évaluations des performances du réseau hybride

Dans cette section, nous proposons une évaluation des performances du réseau hybride en termes de capacité moyenne de service et de taux d'accès moyen au service dans un scénario de type *tower overlay* optimisé pour la transmission de services linéaires. Premièrement, nous évaluons la précision de la modélisation analytique proposée dans le chapitre 3 ainsi que l'approche d'optimisation proposée dans ce chapitre à la section 4.2. Les expressions analytiques du rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT sont comparées aux résultats numériques obtenus à partir de simulations réalistes du réseau hybride. Deuxièmement, nous analysons le gain de coopération en termes de capacité moyenne de service et de taux d'accès moyen au service. Enfin, nous étudions l'impact du nombre d'utilisateurs dans la zone de service sur le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT, la capacité moyenne de service et le taux d'accès moyen au service.

4.3.1 Paramètres de configuration de la simulation

Nous considérons ici la transmission d'un service linéaire destiné à M utilisateurs uniformément répartis dans une zone de service de $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$. La capacité minimale requise pour recevoir le service correctement est fixée à $C_{req} = 2 \text{ Mbps}$. Ainsi à partir des équations (3.6) et (3.27), nous fixons le SNR minimum de réception à $\gamma_0^{bc} = 0 \text{ dB}$ pour la composante de diffusion et le nombre de PRBs alloués à chaque utilisateur dans une cellule LPLT à $RB_m = 5$. Nous supposons que tous les utilisateurs présents dans la zone de service sont intéressés par le service diffusé.

Afin de simuler le scénario de déchargement du trafic des réseaux cellulaires vers les réseaux de diffusion comme proposé dans le scénario S2, nous supposons également qu'un utilisateur situé dans la zone de couverture du réseau de diffusion sera directement associé à l'émetteur HPHT. Cependant dans le réseau cellulaire, l'utilisateur est associé à l'émetteur LPLT le plus proche.

Rappelons que la norme LTE (Long Term Evolution) est utilisée comme système de transmission dans le réseau cellulaire et dans le réseau de diffusion avec sa composante de diffusion eMBMS (enhanced Multimedia Broadcast Multicast Service) qui a été modifiée pour intégrer les contraintes liées à l'infrastructure de réseau HPHT et à la gestion des ressources dans les réseaux de diffusion [39, 52]. Compte tenu des discussions au sujet du dividende numérique sur le spectre *Ultra High Frequency* (UHF), les systèmes des composantes cellulaire et de diffusion du réseau hybride opèrent sur la bande des 700 MHz en utilisant des fréquences porteuses différentes pour éviter les interférences entre systèmes.

Les paramètres de configuration utilisés pour la simulation du réseau sont résumés au tableau 4.1. Les métriques de capacité moyenne et de taux d'accès moyen ont été évaluées en utilisant une simulation de *monte carlo* avec 100 réalisations, valeur qui a été ajustée afin de stabiliser suffisamment les résultats obtenus.

Enfin, compte tenu de la remarque 8, nous avons considéré deux scénarios de simulation pour évaluer les performances du réseau hybride. Dans le premier scénario de simulation, le nombre d'utilisateurs dans la zone de service est fixé à $M = 500$, ce qui correspond à un scénario dans lequel les cellules LPLT ne sont pas surchargées. Dans le second scénario, le nombre d'utilisateurs dans la zone de service est fixé à $M = 10000$, ce qui correspond à un scénario dans lequel les cellules LPLT sont surchargées.

4.3.2 Résultats des simulations

4.3.2.1 Précision du modèle analytique et de l'approche d'optimisation

Considérons le premier scénario de simulation, c'est-à-dire le scénario dans lequel les cellules LPLT ne sont pas surchargées.

Tableau 4.1 – Paramètres de configuration de la simulation du réseau hybride dans un scénario de type *tower overlay*.

	Composante cellulaire	Composante de diffusion
Zone de service	30 km × 30 km	
Infrastructure de réseau	LPLT	HPHT
Distance entre sites (ISD)	1500 m	1 seul site
Système de transmission	LTE	eMBMS
Fréquence porteuse	750 MHz	700 MHz
Largeur canal de transmission	10 MHz	10 MHz
Mode de transmission	<i>unicast</i>	<i>broadcast</i>
Modèle de propagation	$\alpha_{uc} = 2,8$	$\alpha_{bc} = 2,6$
Perte de propagation (L_p)	$L_p^{uc} = 8$ dB	$L_p^{bc} = 12$ dB
Puissance de transmission	1,2 kW	3,3 kW
Hauteur antenne de transmission	40 m	100 m
Hauteur antenne de réception	1,5 m	1,5 m
Allocation de ressources	$RB_m = 5$	$-^1$

¹ Toutes les ressources disponibles sont allouées à tous les utilisateurs ;

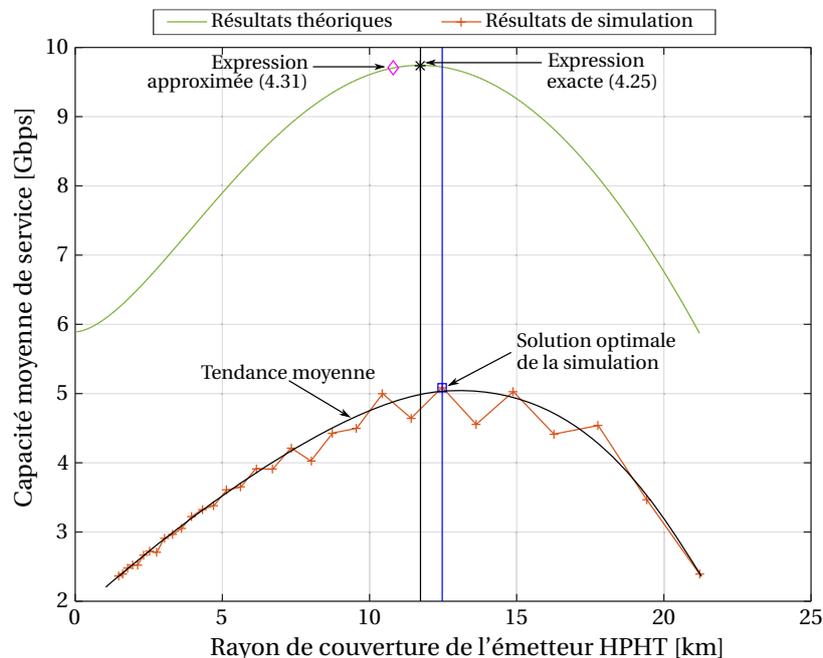


FIGURE 4.5 – Capacité moyenne de service en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT ; résultats analytiques et de simulations pour $M = 500$ et $RB_m = 5$.

La figure 4.5 montre l'évolution de la capacité moyenne de service en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT. Les résultats de simulation réaliste du réseau hybride sont présentés et confrontés aux résultats théoriques du modèle analytique.

Premièrement, comme illustré à la figure 4.5, les expressions analytiques du rayon de couverture, données par (4.25) et (4.31), permettant de maximiser la capacité moyenne de service sans la contrainte de taux d'accès moyen au service sont proches de la solution optimale obtenue à partir des simulations du réseau hybride.

Deuxièmement, nous pouvons observer une différence entre les valeurs de la capacité moyenne de service obtenues à partir du modèle analytique et celles issues des simulations réalistes du réseau hybride. Cette différence est due à l'utilisation de la capacité théorique de « Shannon » dans le modèle analytique, tandis qu'une table de correspondance entre le SNR et la capacité est utilisée pour obtenir les résultats de simulations.

Le tableau 4.2 présente la table de correspondance entre SNR et capacité utilisée dans nos simulations afin de s'approcher du comportement d'un système réel [78, 79]. En effet, dans des systèmes pratiques comme le LTE, le SNR de chaque utilisateur est mappé à un indicateur de qualité de canal (CQI). Le débit de l'utilisateur est ensuite déterminé en utilisant un schéma de modulation et de codage MCS (Modulation and Coding Scheme), sélectionné sur la base des exigences en termes de qualité de service (QoS) du service.

Toutefois, nous constatons que le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT n'est pas sensible à ce décalage, ce qui permet de valider notre approche de modélisation et d'optimisation.

Par ailleurs, nous constatons sur les figures 4.5 et 4.6 des irrégularités sur les courbes de simulation. Ces irrégularités sont liées à deux phénomènes. Le premier provient d'un effet de seuil causé par la granularité de la table de correspondance entre SNR et capacité utilisée pour les simulations (*voir* tableau 4.2). En effet, comme indiqué au tableau 4.2, une même capacité peut correspondre à plusieurs valeurs de SNR. Le deuxième phénomène provient d'un effet de masse lié au nombre d'utilisateurs dans la zone de couverture de l'émetteur HPHT. En effet lorsque l'effet de seuil se produit, nous constatons que la réduction de la zone de couverture entraîne une chute de la capacité moyenne de service, puisque le nombre d'utilisateurs dans la zone de couverture de l'émetteur HPHT diminue.

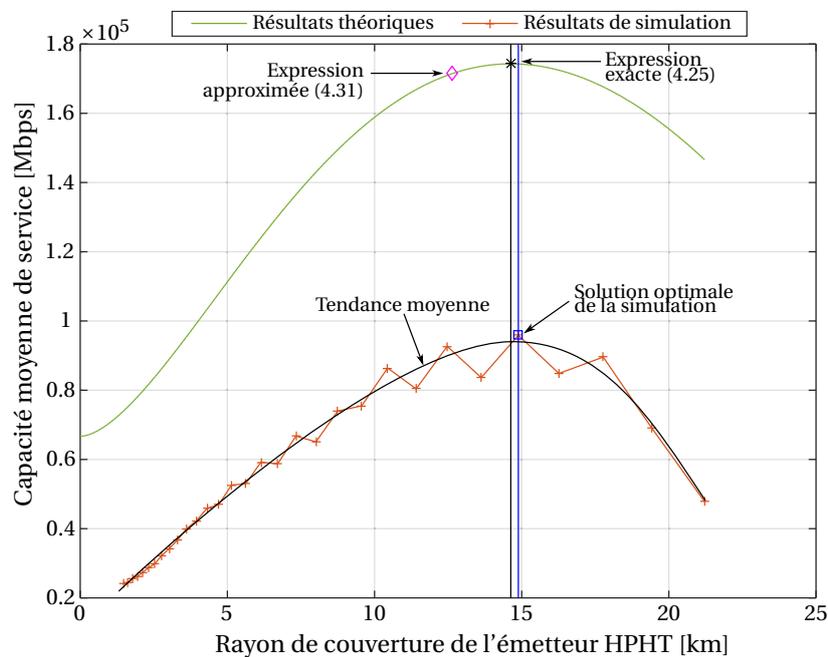
Ces deux phénomènes combinés permettent d'expliquer les fluctuations des résultats en dents de scie autour d'une tendance moyenne, qui elle est conforme aux résultats théoriques.

La précision de cette approche est d'avantage soulignée en considérant le second scénario dans lequel les cellules LPLT sont surchargées avec $M = 10000$.

Comme pour la figure 4.5, la figure 4.6 donne l'évolution de la capacité moyenne de service en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT. Les résultats de simulation réaliste du réseau hybride sont présentés avec les résultats théoriques du modèle analytique. Là encore, nous pouvons observer que malgré le décalage entre les valeurs de la capacité

Tableau 4.2 – Table de correspondance entre SNR et capacité issue du standard LTE [78, 79].

SNR Range [dB]	CQI	Modulation	Code Rate $\times (1/1024)$	Efficiency [bit/s/Hz]
≤ -6.93	0		No transmission (out of range)	
$[-6.93; -5.14]$	1	QPSK	78	0.1523
$[-5.14; -3.18]$	2	QPSK	120	0.2344
$[-3.18; -1.25]$	3	QPSK	193	0.3770
$[-1.25; 0.76]$	4	QPSK	308	0.6016
$[0.76; 2.70]$	5	QPSK	449	0.8770
$[2.70; 4.69]$	6	QPSK	602	1.1758
$[4.69; 6.52]$	7	16QAM	378	1.4766
$[6.52; 8.57]$	8	16QAM	490	1.9141
$[8.57; 10.37]$	9	16QAM	616	2.4063
$[10.37; 12.3]$	10	64QAM	466	2.7305
$[12.3; 14.18]$	11	64QAM	567	3.3223
$[14.18; 15.89]$	12	64QAM	666	3.9023
$[15.89; 17.82]$	13	64QAM	772	4.5234
$[17.82; 19.83]$	14	64QAM	873	5.1152
≥ 19.83	15	64QAM	948	5.5547

FIGURE 4.6 – Capacité moyenne de service en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT ; résultats analytiques et de simulations pour $M = 10000$ et $RB_m = 5$.

moyenne de service du modèle analytique et des simulations, les résultats théoriques restent en accord avec les résultats des simulations.

Notons cependant, que l'approximation du rayon de couverture optimal donnée par (4.31) est moins précise dans ce scénario. Dans de telles situations, l'expression exacte donnée par (4.25) sera préférée à moins que l'approximation (4.31) soit affinée comme suggéré à la section 4.2.1.

Enfin, concernant la métrique de qualité de service, la figure 4.7 montre l'évolution du taux d'accès moyen au service en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT. Les résultats de simulation du réseau hybride sont présentés avec les résultats théoriques du modèle analytique pour les deux scénarios de simulation, c'est-à-dire pour $M = 500$ et $M = 10000$. Comme pour l'évolution de la capacité moyenne de service, nous pouvons noter que les résultats théoriques sont en accord avec ceux de la simulation.

Comme on pouvait s'y attendre (*voir* remarque 12), lorsque les cellules LPLT ne sont pas surchargées, c'est-à-dire $M = 500$, tous les utilisateurs situés dans la zone de service peuvent recevoir le service diffusé. Par conséquent, le taux d'accès moyen du réseau hybride est unitaire et indépendant du rayon de couverture de l'émetteur HPHT. Rappelons que dans ce cas, l'optimisation est sans contrainte et le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT est donnée par (4.25) ou (4.31).

Cependant, lorsque les cellules LPLT sont surchargées, i.e. $M = 10000$, le taux d'accès moyen au service du réseau hybride est une fonction croissante du rayon de couverture de l'émetteur HPHT. Dans ce cas, le rayon de couverture optimal donné par (4.25) ou (4.31) doit être ajusté en fonction du taux d'accès moyen η_{cible} ciblé en utilisant (4.34).

Ces résultats sur l'évolution des performances du réseau hybride en termes de capacité moyenne et de taux d'accès moyen nous ont permis de mettre en évidence la précision de l'approche d'optimisation du réseau hybride, puis de valider le modèle analytique proposé. Dans la suite, nous utilisons le modèle analytique du réseau hybride pour évaluer le gain de coopération et étudier l'impact du nombre d'utilisateurs dans la zone de service sur le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT, la capacité moyenne de service et le taux d'accès moyen au service.

4.3.2.2 Évaluation du gain de coopération à partir du modèle analytique

L'un des défis fondamentaux de la coopération des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion est l'évaluation du gain de coopération. En effet, disposer des outils de mesure du gain de coopération permettrait d'identifier les scénarios dans lesquels ce gain est significatif. Ainsi, à partir du modèle analytique du réseau hybride proposé dans cette thèse, nous pouvons quantifier le gain des scénarios de coopération. Par exemple, le tableau 4.3 présente le gain de coopération en termes de capacité moyenne de service et de taux d'accès moyen au service obtenus pour un scénario de type *tower overlay*. Les résultats sont présentés pour les deux scénarios de simulation, c'est-à-dire $M = 500$ et $M = 10000$. Pour des raisons de

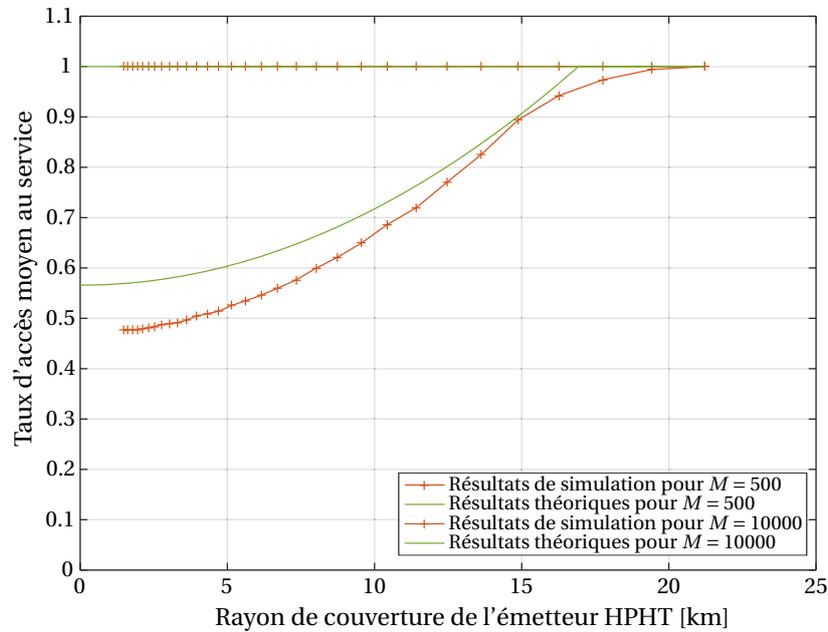


FIGURE 4.7 – Taux d'accès moyen au service en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT ; résultats théoriques et de simulations présentés pour $M = 500$ et $M = 10000$ avec $RB_m = 5$.

Tableau 4.3 – Évaluation du gain de coopération en termes de capacité moyenne de service et de taux d'accès moyen au service du réseau hybride dans un scénario *tower overlay*.

	M = 500		M = 10000	
	Capacité ¹	Taux d'accès ²	Capacité ¹	Taux d'accès ²
Réseau cellulaire uniquement	5,9	1	66,7	0,57
Réseau de diffusion uniquement	6	1	117,6	1
Réseau hybride	8,3	1	117,6	1

¹ Capacité moyenne de service ; ² Taux d'accès moyen au service.

comparaison, nous avons également présenté les résultats des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion obtenus sans coopération. Notons par ailleurs que le taux d'accès moyen ciblé a été fixé à $\eta_{cible} = 1$ pour ces simulations.

Premièrement, si nous considérons le premier scénario, c'est-à-dire $M = 500$, aucune amélioration potentielle en termes de taux d'accès moyen au service n'est obtenue avec l'approche hybride puisque les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion peuvent assurer, sans coopération, l'accès au service à tous les utilisateurs dans la zone de service. Toutefois, nous pouvons noter que l'approche hybride permet d'améliorer, dans ce cas, la capacité moyenne de service. Comme indiqué au tableau 4.3, une augmentation de 40 % de la capacité moyenne est observée par rapport au réseau cellulaire et au réseau de diffusion.

Deuxièmement, en considérant le second scénario dans lequel les cellules LPLT sont surchargées avec $M = 10000$, nous pouvons observer une augmentation de plus de 70 % de la capacité moyenne de service et du taux d'accès moyen au service avec l'approche hybride. Notons cependant que dans ce cas, le réseau de diffusion ne bénéficie pas du gain de coopération puisque le rayon de couverture optimal correspond à une couverture totale de la zone de service. En effet, cela s'explique par le fait que le taux d'accès moyen ciblé est unitaire. Ainsi, pour atteindre ce taux d'accès moyen unitaire, tous les utilisateurs reçoivent le service diffusé en utilisant la composante de diffusion du réseau hybride.

4.3.2.3 Impact du nombre d'utilisateurs dans la zone de service sur les performances du réseau hybride

Rayon de couverture optimal. Afin d'évaluer l'impact du nombre d'utilisateurs dans la zone de service sur le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT, la figure 4.8 montre l'évolution du rayon de couverture optimal en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service. Les résultats sont présentés pour $RB_m = 5$, $RB_m = 10$ et $RB_m = 20$. Là encore, le taux d'accès moyen ciblé a été fixé à $\eta_{cible} = 1$ pour ces simulations.

Tout d'abord, la figure 4.8 montre l'existence de deux modes de fonctionnement avec un point de commutation entre ces deux modes qui dépend du nombre RB_m de PRBs alloué à chaque utilisateur dans une cellule LPLT. Par analogie, nous pouvons montrer que le premier mode de fonctionnement correspond au scénario dans lequel les cellules LPLT ne sont pas surchargées tandis que le deuxième mode de fonctionnement fait référence au scénario dans lequel les cellules LPLT sont surchargées. Ensuite, nous pouvons observer que dans chaque mode de fonctionnement, le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT est indépendant du nombre d'utilisateurs dans la zone de service. Enfin, comme indiqué à la remarque 8, nous pouvons constater que dans le premier scénario, le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT dépend du nombre RB_m de PRBs. En effet, lorsque le nombre RB_m augmente, le rayon de couverture optimal diminue. Cependant, le point de commutation entre les deux modes de fonctionnement se produit plus rapidement. Autrement dit, les

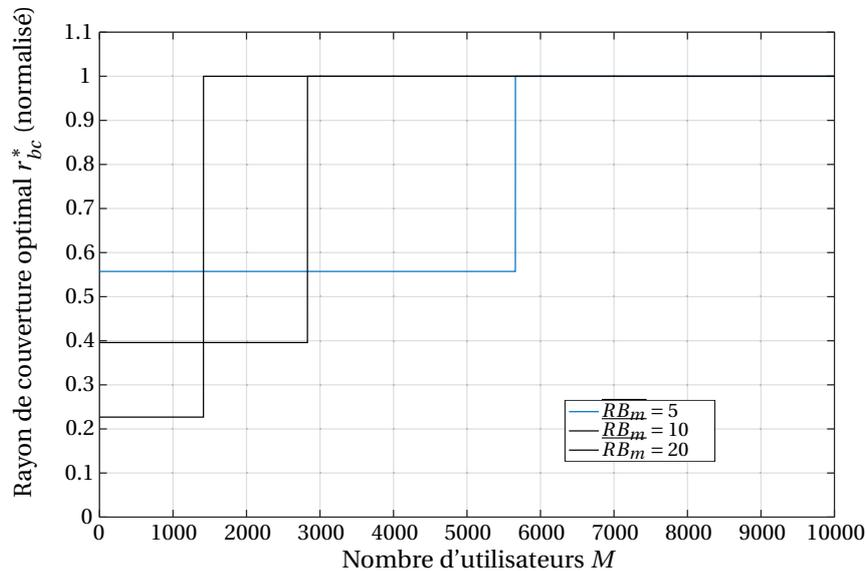


FIGURE 4.8 – Évolution du rayon de couverture optimal r_{bc}^* de l'émetteur HPHT en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service pour $\overline{RB}_m = 5$, $\overline{RB}_m = 10$ et $\overline{RB}_m = 20$.

cellules LPLT sont rapidement surchargées puisque le nombre d'utilisateurs supportés dans les cellules LPLT diminue avec un nombre RB_m plus grand.

Capacité moyenne de service. Concernant l'impact du nombre d'utilisateurs dans la zone de service sur la capacité moyenne de service, la figure 4.9 présente l'évolution de la capacité moyenne de service en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service. Les résultats sont présentés pour le réseau hybride et pour le réseau cellulaire et le réseau de diffusion dans un mode sans coopération. Comme pour la figure 4.8, les deux modes de fonctionnement ainsi que le point de commutation sont bien mis en évidence. De plus, les résultats du réseau cellulaire montrent que le point de commutation se produit lorsque le nombre maximal d'utilisateurs pris en charge dans les cellules LPLT est atteint. Ceci vient confirmer l'identification par analogie faite au paragraphe précédent. Comme illustré à la figure 4.9, lorsque les cellules LPLT ne sont pas surchargées, un gain de coopération en termes de capacité moyenne de service est observé pour le réseau cellulaire et le réseau de diffusion avec l'approche hybride. En revanche, lorsque les cellules LPLT sont surchargées, ce gain de coopération est uniquement observé pour le réseau cellulaire puisque le service est exclusivement transmis en utilisant la composante de diffusion du réseau hybride (*voir* figure 4.8).

Taux d'accès moyen au service. Enfin, concernant l'impact du nombre d'utilisateurs dans la zone de service sur le taux d'accès moyen au service, la figure 4.10 montre l'évolution du

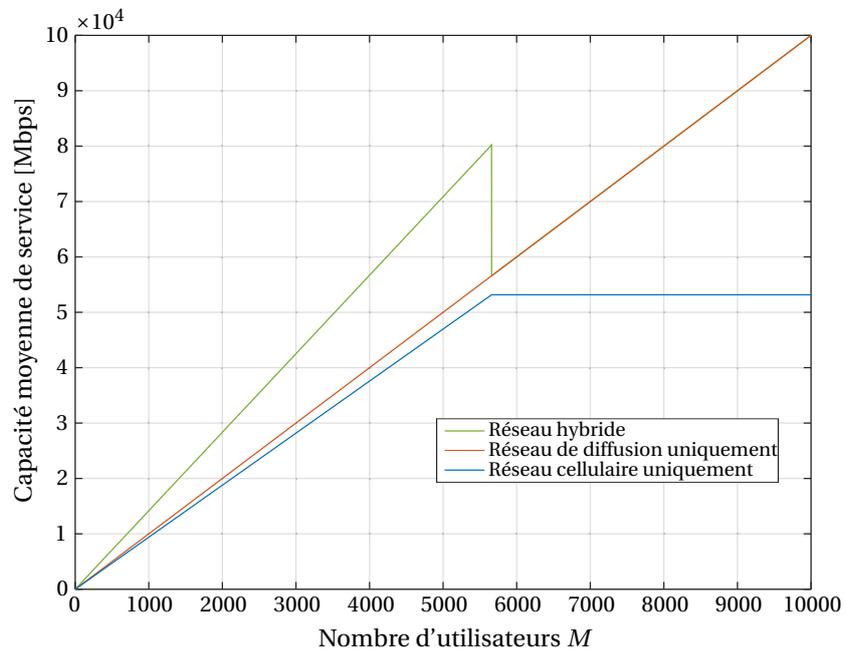


FIGURE 4.9 – Évolution de la capacité moyenne de service en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service pour $\overline{RB}_m = 5$.

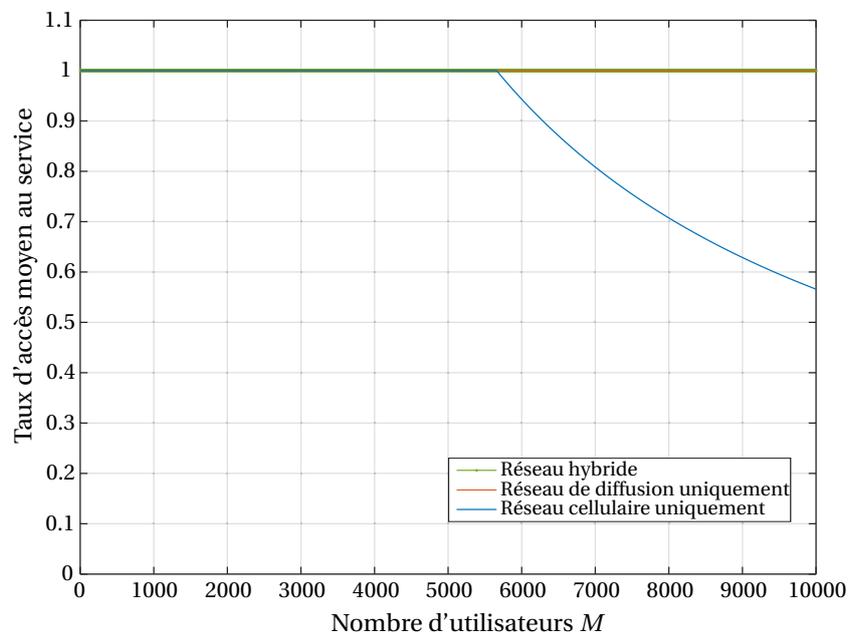


FIGURE 4.10 – Évolution du taux d'accès moyen service en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service pour $\overline{RB}_m = 5$.

taux d'accès moyen au service en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service. Les résultats sont présentés pour le réseau hybride et pour les réseaux cellulaires et de diffusion dans un mode sans coopération. Comme illustré à la figure 4.10, un taux d'accès moyen au service unitaire est atteint dans le premier mode de fonctionnement, c'est-à-dire lorsque les cellules LPLT ne sont pas surchargées. En revanche, dans le deuxième mode de fonctionnement, nous pouvons noter que le taux d'accès moyen au service est amélioré avec une approche hybride. Notons également que le taux d'accès moyen au service du réseau cellulaire est une fonction décroissante du nombre d'utilisateurs dans la zone de service.

Comme indiqué dans [53, 54, 47], un mode de transmission *broadcast* est plus approprié qu'un mode de transmission *unicast* pour la transmission de services populaires, c'est-à-dire destinés à un très grand nombre d'utilisateurs. Cependant, lorsque le service n'est pas populaire, le mode de transmission *unicast* est plus approprié. Néanmoins lorsque le réseau cellulaire n'est pas surchargé, les résultats suggèrent que l'utilisation d'une approche hybride permet d'améliorer la capacité moyenne de service (*voir* figure 4.9). Dans ce cas, le point de fonctionnement optimal en termes de zone de couverture de la composante de diffusion pourra être déterminé à partir du modèle analytique proposé.

Conclusion

Ce chapitre s'est intéressé à l'étude de la coopération des réseaux cellulaires et de diffusion pour la transmission de services linéaires destinés à un grand nombre d'utilisateurs. Un des challenges à relever dans l'étude des scénarios de coopération est l'évaluation des avantages apportés par l'hybridation de ces deux réseaux.

Ainsi sur la base du modèle théorique présenté dans le chapitre précédent, nous avons proposé dans ce chapitre une approche analytique permettant de quantifier le gain de coopération et d'optimiser les performances du réseau hybride en termes de capacité moyenne de service tout en tenant compte des contraintes de taux moyen d'accès au service.

Les résultats obtenus ont montré que la coopération des réseaux cellulaires et de diffusion permet d'améliorer les performances des réseaux de distribution pour la diffusion des services linéaires. En effet, ces améliorations sont obtenues en ajustant les paramètres de planification de la composante de diffusion du réseau hybride tout en tenant compte du nombre d'utilisateurs et de leur répartition dans la zone de service.

Enfin, ces travaux sur la modélisation du réseau hybride et l'optimisation de la capacité pour la diffusion de services linéaires ont fait l'objet d'une publication dans la revue *IEEE Transaction on Broadcasting* [80] et d'une publication à la conférence internationale BMSB 2016 [81].

OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE POUR LA DIFFUSION DE SERVICES LINÉAIRES

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que, dans une approche hybride, la capacité moyenne de service peut être optimisée en ajustant la zone de couverture de la composante de diffusion du réseau hybride. D'un point de vue planification, nous avons déterminé la zone de couverture optimale de la composante de diffusion qui maximise la capacité moyenne de service tout en tenant compte du taux d'accès moyen au service.

En considérant les aspects d'économie d'énergie, nous nous intéressons dans ce chapitre à l'optimisation énergétique du réseau hybride défini dans le chapitre 3. Nous abordons ainsi l'optimisation de la puissance consommée par le réseau hybride et de l'efficacité énergétique afin de trouver un compromis entre l'optimisation de la capacité et de la puissance consommée.

5.1 (P2) : Optimisation de la puissance consommée du réseau hybride

5.1.1 Présentation du problème (P2)

Nous abordons dans cette section la minimisation de la puissance consommée par le réseau hybride pour transmettre un service linéaire. Ainsi, au lieu d'augmenter la capacité

de déchargement du réseau hybride comme indiqué à la remarque 6, nous proposons de réduire la puissance de transmission de l'émetteur *High Power High Tower* (HPHT).

Par ailleurs, nous considérons également que les émetteurs *Low Power Low Tower* (LPLT) dans la zone de couverture de l'émetteur HPHT peuvent se mettre en mode veille pour économiser plus d'énergie lorsqu'ils ne sont pas utilisés pour transmettre le service.

Par conséquent, nous visons ici à déterminer le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT qui permet de minimiser la puissance consommée par le réseau hybride. Le problème d'optimisation (P2) s'écrit alors :

$$(P2) : \quad \min_{0 \leq r_{bc} \leq 1} P_{in}^H, \quad (5.1)$$

$$s.t. \quad C_m^{bc} = C_{req},$$

5.1.2 Résolution analytique du problème (P2)

La puissance consommée par le réseau hybride, donnée par l'équation (3.40), peut s'écrire en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT.

Proposition 5. *En considérant une répartition uniforme des utilisateurs dans la zone de service ainsi que le modèle de consommation de puissance présenté à la section 3.1.1.3, du chapitre 3, l'expression de la puissance consommée par le réseau hybride s'écrit :*

$$P_{in}^H(r_{bc}) = \Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} (r_{bc}^{\alpha_{bc}} - \theta_{p1} r_{bc}^2 + \theta_{p2}), \quad (5.2)$$

où

$$\theta_{p1} = \frac{P_{in,i}^{uc} - P_{sleep}^{uc}}{\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} r_{uc}^2}, \quad \theta_{p2} = \frac{P_{in,i}^{uc} + P_0^{bc} r_{uc}^2}{\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} r_{uc}^2}. \quad (5.3)$$

Rappelons que P_0^{bc} , Δ_p^{bc} , P_{tx}^{bc} , $P_{in,i}^{uc}$ et P_{sleep}^{uc} sont des constantes liées au modèle de consommation de puissance (3.2), r_{uc} est le rayon de couverture normalisé d'une cellule LPLT qui dépend de la distance entre les émetteurs LPLT (ISD) et α_{bc} est le facteur d'atténuation qui caractérise l'environnement de propagation de l'émetteur HPHT.

Preuve. voir annexe A, section A.1 ■

À partir de l'équation (5.2), nous pouvons observer que la fonction de consommation de puissance du réseau hybride est une fonction convexe puisqu'il s'agit d'un polynôme de degré $\alpha_{bc} \geq 2$ défini pour tout $r_{bc} \in [0, 1]$. Par conséquent, le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT, permettant de minimiser la consommation de puissance du réseau

hybride, est obtenu en trouvant la racine de la fonction dérivée de (5.2), ce qui conduit à :

$$r_{bc}^* = \left(\frac{2\theta_{p1}}{\alpha_{bc}} \right)^{\frac{1}{\alpha_{bc}-2}}. \quad (5.4)$$

5.1.3 Évaluation numérique de l'approche d'optimisation

Pour valider la solution proposée, nous représentons l'évolution de la fonction de consommation de puissance du réseau hybride donnée par (5.2). Puis, nous vérifions que le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT donné par l'expression analytique (5.4) coïncide avec la valeur optimale de la fonction de consommation de puissance.

5.1.3.1 Paramètres de configuration de la simulation

Nous considérons ici la transmission d'un service linéaire destiné à M utilisateurs uniformément répartis dans une zone de service de $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$. La capacité minimale nécessaire pour recevoir correctement le service est fixée à $C_{req} = 2 \text{ Mbps}$. Ainsi à partir des équations (3.6) et (3.27), nous fixons le *signal-to-noise ratio* (SNR) minimum de réception à $\gamma_0^{bc} = -3 \text{ dB}$ pour la composante de diffusion et le nombre de *Physical Resource Block* (PRB)s alloué à chaque utilisateur dans une cellule LPLT à $RB_m = 2$. Nous supposons que tous les utilisateurs présents dans la zone de service sont intéressés par le service diffusé.

Comme pour l'optimisation de la capacité moyenne de service présentée dans le chapitre précédent, nous considérons un scénario de déchargement du trafic des réseaux cellulaires vers les réseaux de diffusion comme proposé dans le scénario S2. Ainsi, un utilisateur situé dans la zone de couverture du réseau de diffusion sera directement associé à l'émetteur HPHT. Cependant dans le réseau cellulaire, l'utilisateur est associé à l'émetteur LPLT le plus proche. Rappelons également que la norme LTE (Long Term Evolution) est utilisée comme système de transmission dans le réseau cellulaire et dans le réseau de diffusion avec sa composante de diffusion eMBMS (enhanced Multimedia Broadcast Multicast Service) qui a été modifiée pour intégrer les contraintes liées à l'infrastructure de réseau HPHT et à la gestion des ressources dans les réseaux de diffusion [39, 52].

Comme pour les simulations précédentes, les systèmes des composantes cellulaire et de diffusion du réseau hybride opèrent sur la bande des 700 MHz en utilisant des fréquences porteuses différentes pour éviter les interférences entre systèmes.

Les paramètres de configuration utilisés pour la simulation du réseau sont regroupés dans le tableau 5.1. Enfin, selon le modèle de consommation de puissance utilisé (3.2), les constantes liées au modèle de consommation de puissance sont définies à l'aide du tableau 3.1.

Tableau 5.1 – Paramètres de configuration de la simulation du réseau hybride dans un scénario de type *tower overlay*.

	Composante cellulaire	Composante de diffusion
Zone de service	30 km × 30 km	
Infrastructure de réseau	LPLT	HPHT
Distance entre sites (ISD)	{2;3} km	1 seul site
Système de transmission	LTE	eMBMS
Fréquence porteuse	750 MHz	700 MHz
Largeur canal de transmission	10 MHz	10 MHz
Mode de transmission	<i>unicast</i>	<i>broadcast</i>
Modèle de propagation	$\alpha_{uc} = 2,3$	$\alpha_{bc} = 2,9$
Perte de propagation (L_p)	$L_p^u = 8$ dB	$L_p^{bc} = 12$ dB
Puissance de transmission	1,2 kW	36 kW
Hauteur antenne de transmission	40 m	100 m
Hauteur antenne de réception	1,5 m	1,5 m
Allocation de ressources	$RB_m = \{2;4\}$	$_1$

¹ Toutes les ressources disponibles sont allouées à tous les utilisateurs ;

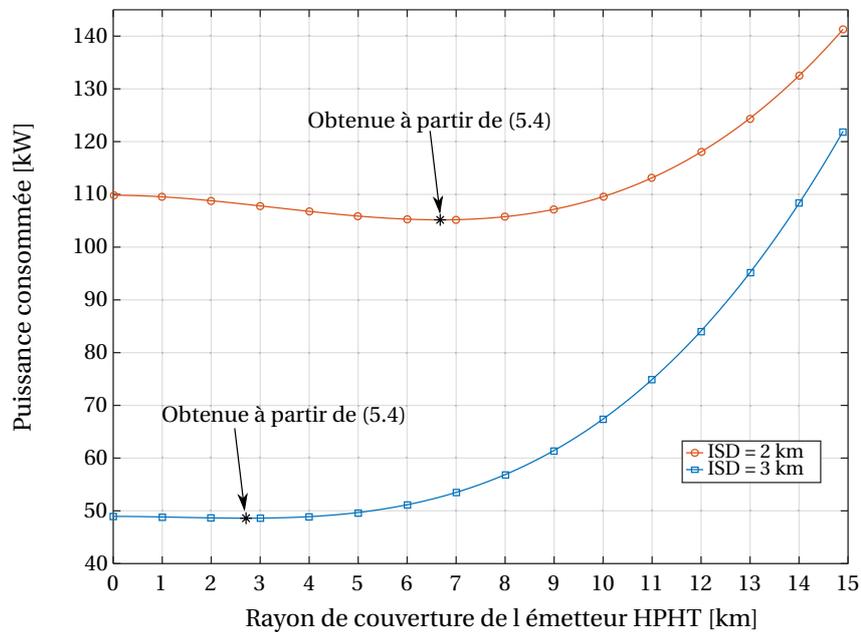


FIGURE 5.1 – Puissance consommée par le réseau hybride en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT pour des distances entre émetteurs LPLT de 2 km et 3 km.

5.1.3.2 Résultats des simulations

La figure 5.1 montre l'évolution de la consommation de puissance du réseau hybride en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT. Les résultats sont présentés pour des distances entre émetteurs LPLT égal à $ISD = 2$ km et $ISD = 3$ km.

Tout d'abord, nous pouvons observer la précision de la solution optimale donnée par l'expression analytique (5.4) qui correspond à la valeur optimale conduisant à une consommation de puissance minimale du réseau hybride. Nous pouvons également constater qu'une consommation de puissance minimale n'est atteinte que lorsque les deux composantes du réseau hybride coopèrent pour transmettre le service.

Deuxièmement, en comparant les puissances consommées pour des distance entre sites de 2 km et 3 km, nous constatons que l'augmentation de la distance entre les émetteurs LPLT permet de réduire la consommation totale du réseau hybride. En effet, l'augmentation de la distance entre les émetteurs LPLT, entraîne une réduction du nombre d'émetteurs LPLT dans la zone de service, et dans ce cas particulier où la puissance de transmission des émetteurs LPLT est constante, cela conduit à une réduction de la puissance consommée par la composante cellulaire du réseau hybride.

Enfin, nous pouvons observer sur la figure 5.1 que lorsque l'ISD augmente, le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT diminue. En effet, lorsque la distance entre les émetteurs augmente, le rayon de couverture r_{uc} des cellules LPLT augmente également. Ainsi, la valeur du paramètre de puissance θ_{p1} diminue ce qui entraîne une réduction de la zone de couverture de l'émetteur HPHT d'après la solution optimale (5.4).

La figure 5.2 présente l'évolution du rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service. Les résultats sont présentés pour un nombre de PRBs par utilisateur de $\overline{RB}_m = 2$ et $\overline{RB}_m = 4$ et pour des distances entre émetteurs LPLT de 2 km et 3 km. Comme pour l'optimisation de la capacité moyenne de service présentée dans le chapitre précédent, nous retrouvons l'existence de deux modes de fonctionnement avec un point de commutation entre les deux modes qui dépend du nombre \overline{RB}_m de PRBs.

Nous pouvons également observer que dans le deuxième mode de fonctionnement, c'est-à-dire après le point de commutation, le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT ne dépend pas du nombre d'utilisateurs dans la zone de service. Cependant dans le premier mode de fonctionnement nous constatons une dépendance linéaire entre le rayon de couverture optimal et le nombre d'utilisateurs dans la zone de service. Cette dépendance linéaire est liée au modèle de consommation de puissance utilisé dans la modélisation du réseau hybride qui dépend linéairement du facteur d'utilisation des ressources spectrales utilisées, donc du nombre d'utilisateurs.

Comme indiqué pour l'optimisation de la capacité moyenne de service du réseau hybride, les résultats présentés ici suggèrent que la coopération des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion permet aussi une réduction de la puissance totale consommée pour la

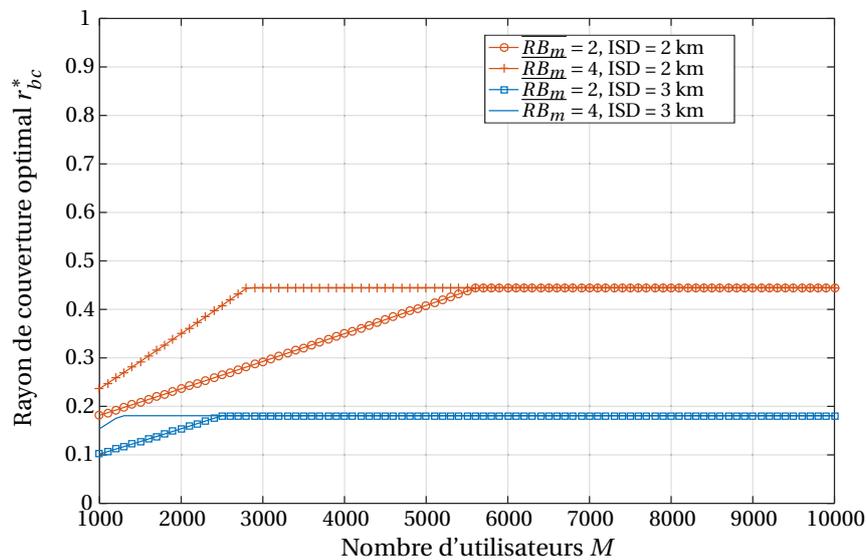


FIGURE 5.2 – Rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service avec $\overline{RB}_m = 2$ et $\overline{RB}_m = 4$; résultats présentés pour des distances entre émetteurs LPLT de 2 km et 3 km.

transmission des services linéaires destinés à un grand nombre d'utilisateurs. Cependant, comparés aux gains de coopération observés lors de l'optimisation de la capacité, les gains obtenus ici sont plus faibles. Par conséquent, nous proposons dans la section suivante d'optimiser l'efficacité énergétique, définie comme le rapport de la capacité moyenne de service sur la puissance totale consommée du réseau hybride, afin d'établir un compromis entre les deux approches d'optimisation des performances du réseau hybride.

5.2 (P3) : Optimisation de l'efficacité énergétique du réseau hybride

5.2.1 Présentation du problème (P3)

Nous étudions dans cette section l'optimisation de l'efficacité énergétique du réseau hybride. Compte tenu de la définition de l'efficacité énergétique donnée par l'équation (3.41), la maximisation de cette métrique de performance permet à la fois de prendre en compte l'optimisation de la capacité moyenne de service ainsi que celle de la consommation de puissance du réseau hybride. Notre objectif est donc de déterminer le rayon de couverture optimal qui permet de maximiser l'efficacité énergétique du réseau hybride,

$$(P3) : \quad \max_{0 \leq r_{bc} \leq 1} \quad EE^H = \frac{C_s^H}{P_{in}^H},$$

Remarque 13. Rappelons que d'après (3.41), l'efficacité énergétique du réseau hybride est définie par le rapport entre la capacité moyenne de service donnée par (3.37) et la puissance totale consommée par le réseau hybride obtenue à partir de (3.40). Notons que la capacité moyenne de service et la puissance totale consommée par le réseau hybride peuvent s'écrire en fonction du rayon de couverture de la composante de diffusion, c'est-à-dire de l'émetteur HPHT. Par ailleurs, rappelons que le rayon de couverture de l'émetteur HPHT peut être ajusté de deux façons :

- soit par une réduction de la puissance de transmission de l'émetteur HPHT pour une capacité moyenne de service constante dans la zone de couverture de l'émetteur HPHT ;
- soit par une augmentation de la capacité moyenne de service pour une puissance de transmission constante de l'émetteur HPHT.

Ainsi, il en résulte que l'efficacité énergétique du réseau hybride est maximisée de façons différentes.

5.2.2 Résolution analytique du problème (P3)

Comme indiqué à la remarque 13, la métrique d'efficacité énergétique du réseau hybride est maximisée soit en réduisant la puissance de transmission de l'émetteur HPHT pour une capacité constante dans la zone de couverture de l'émetteur HPHT, soit en augmentant la capacité moyenne de service dans la zone de couverture de l'émetteur HPHT pour une puissance de transmission constante de l'émetteur HPHT. Nous allons aborder ces deux approches d'optimisation dans la résolution du problème (P3).

5.2.2.1 Approche 1 : réduction de la puissance consommée

Dans cette section, nous proposons de minimiser la puissance totale consommée par le réseau hybride en ajustant le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT. En effet, l'approche proposée ici consiste à réduire la puissance de transmission de l'émetteur HPHT tout en tenant compte de la capacité minimale C_{req} nécessaire pour la réception du service diffusé. Par conséquent, la puissance de transmission P_{tx}^{bc} de l'émetteur HPHT est déterminée en fonction de la capacité de service C_{req} ciblée. Ceci permet également de fixer la valeur du SNR minimum de réception γ_0^{bc} en utilisant l'équation (3.4). En d'autres termes, ceci revient à formuler le problème (P3) de la manière suivante :

$$(P3) : \quad \max_{0 \leq r_{bc} \leq 1} \quad EE^H = \frac{C_s^H}{P_{in}^H},$$

$$s. t. \quad C_m^{bc} = C_{req}, \quad (5.5)$$

Proposition 6. *En considérant une répartition uniforme des utilisateurs dans la zone de service ainsi que le modèle de consommation de puissance présenté à la section 3.1.1.3, du chapitre 3, l'expression de l'efficacité énergétique du réseau hybride s'écrit en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT de la manière suivante :*

$$EE^H(r_{bc}) = \left(\frac{ME[C_m^{uc}]E[\eta_i^{uc}]}{\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc}} \right) \frac{1 + \theta_c r_{bc}^2}{r_{bc}^{\alpha_{bc}} - \theta_{p1} r_{bc}^2 + \theta_{p2}}, \quad \forall r_{bc} \in [0, 1] \quad (5.6)$$

où

$$\theta_c = \frac{E[C_m^{bc}]}{E[C_m^{uc}]E[\eta_i^{uc}]} - 1 \quad (5.7)$$

est une constante qui représente le gain en terme de capacité de la composante de diffusion par rapport à la composante cellulaire du réseau hybride, et

$$\theta_{p1} = \frac{P_{in,i}^{uc} - P_{sleep}^{uc}}{\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} r_{uc}^2}, \quad \theta_{p2} = \frac{P_{in,i}^{uc} + P_0^{bc} r_{uc}^2}{\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} r_{uc}^2} \quad (5.8)$$

sont des constantes liées au modèle de consommation de puissance.

Preuve. voir annexe A, section A.2 ■

Soit $f_p(r_{bc})$ la fonction de l'efficacité énergétique donnée par (5.6). Nous pouvons montrer que $f_p(r_{bc})$ est une fonction convexe pour tout $r_{bc} \in [0, 1]$ et $\alpha_{bc} \geq 2$. Par conséquent, le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT est obtenu en trouvant la racine de la

fonction dérivée $f'_p(r_{bc})$, ce qui conduit à :

$$r_{bc}^{\alpha_{bc}-2} - \theta_c \left(\frac{2}{\alpha_{bc}} - 1 \right) r_{bc}^{\alpha_{bc}} = \frac{2}{\alpha_{bc}} (\theta_c \theta_{p2} + \theta_{p1}). \quad (5.9)$$

En appliquant le changement de variable suivant :

$$u = r_{bc} \sqrt{\theta_c \left(\frac{2}{\alpha_{bc}} - 1 \right)} \quad (5.10)$$

à l'équation (5.9), nous obtenons :

$$u^{\alpha_{bc}-2} (1 - u^2) - \theta = 0, \quad (5.11)$$

où

$$\theta = \frac{2}{\alpha_{bc}} (\theta_c \theta_{p2} + \theta_{p1}) \left[\theta_c \left(\frac{2}{\alpha_{bc}} - 1 \right) \right]^{\frac{\alpha_{bc}}{2} - 1}. \quad (5.12)$$

Notons que la solution de l'équation (5.11), va dépendre uniquement de deux paramètres : θ et α_{bc} . Cependant, puisque α_{bc} est prédéterminé par l'environnement de propagation et les conditions de réception du signal, la solution de l'équation (5.11) dépend principalement du paramètre θ , qui est considéré comme un paramètre de décision de coopération.

Soit $v_0(\theta; \alpha_{bc})$ la solution de l'équation (5.11). En utilisant des méthodes d'analyse numérique, par exemple la méthode itérative de Newton, la solution $v_0(\theta; \alpha_{bc})$ peut être tabulée pour toutes les valeurs de θ et α_{bc} .

Ainsi, la figure 5.3 donne une représentation de la solution $v_0(\theta; \alpha_{bc})$ en fonction des valeurs typiques des paramètres θ et α_{bc} .

Proposition 7. Une approximation d'ordre $n \leq 3$ de la solution $v_0(\theta; \alpha_{bc})$ est donnée par

$$v_0(\theta; \alpha_{bc}) \sim \theta^{\frac{1}{\alpha_{bc}-2}} \left(1 + \sum_{k=0}^{n-1} \frac{k}{(\alpha_{bc}-2)^k} \theta^{\frac{2k}{\alpha_{bc}-2}} \right), \quad \forall k \in \mathbb{N}. \quad (5.13)$$

Preuve. voir annexe A, section A.3 ■

La précision de l'approximation de la solution $v_0(\theta; \alpha_{bc})$ donnée par (5.13) est illustrée à la figure 5.4 qui représente la fonction tabulée $v_0(\theta; \alpha_{bc})$ et ses approximations du premier, deuxième et troisième ordre donnée par (5.13) pour des valeurs pratiques de θ et $\alpha_{bc} \in \{2.5; 3.5\}$.

Comme illustré à la figure 5.4, les approximations des deuxième et troisième ordres sont très proches de la solution exacte $v_0(\theta; \alpha_{bc})$. Ceci nous permet d'utiliser (5.13) pour obtenir une solution purement analytique du problème d'optimisation (P3).

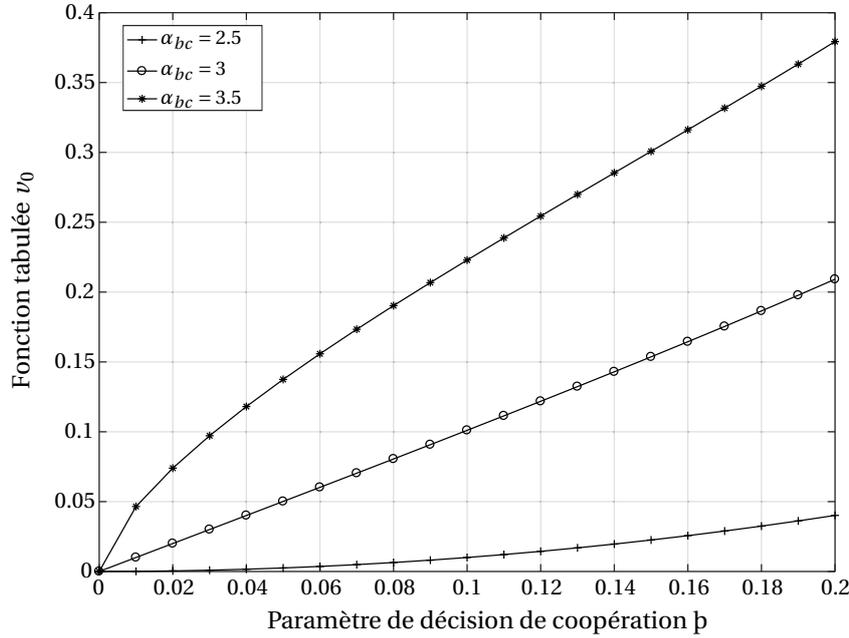


FIGURE 5.3 – Représentation de la fonction tabulée $v_0(\theta; \alpha_{bc})$ en fonction du paramètre de décision de coopération θ pour des valeurs typiques de $\alpha_{bc} = \{2.5; 3; 3.5\}$.

Puisque $v_0(\theta; \alpha_{bc})$ est solution de l'équation (5.11), le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT est obtenu en appliquant le changement de variable inverse suivant :

$$r_{bc} = \frac{u}{\sqrt{\theta_c \left(\frac{2}{\alpha_{bc}} - 1 \right)}} \quad (5.14)$$

à la solution $v_0(\theta; \alpha_{bc})$, ce qui conduit à :

$$r_{bc}^* = \frac{v_0(\theta; \alpha_{bc})}{\sqrt{\theta_c \left(\frac{2}{\alpha_{bc}} - 1 \right)}}, \quad (5.15)$$

puis en utilisant (5.13) nous obtenons :

$$r_{bc}^* = \frac{\theta^{\frac{1}{\alpha_{bc}-2}}}{\sqrt{\theta_c \left(\frac{2}{\alpha_{bc}} - 1 \right)}} \left(1 + \sum_{k=0}^{n-1} \frac{k}{(\alpha_{bc} - 2)^k} \theta^{\frac{2k}{\alpha_{bc}-2}} \right). \quad (5.16)$$

Ainsi, le rayon de couverture optimal donné par 5.16 dépend principalement du paramètre de décision de coopération θ et du gain de capacité θ_c qui dépend du nombre d'utilisateurs dans la zone de service.

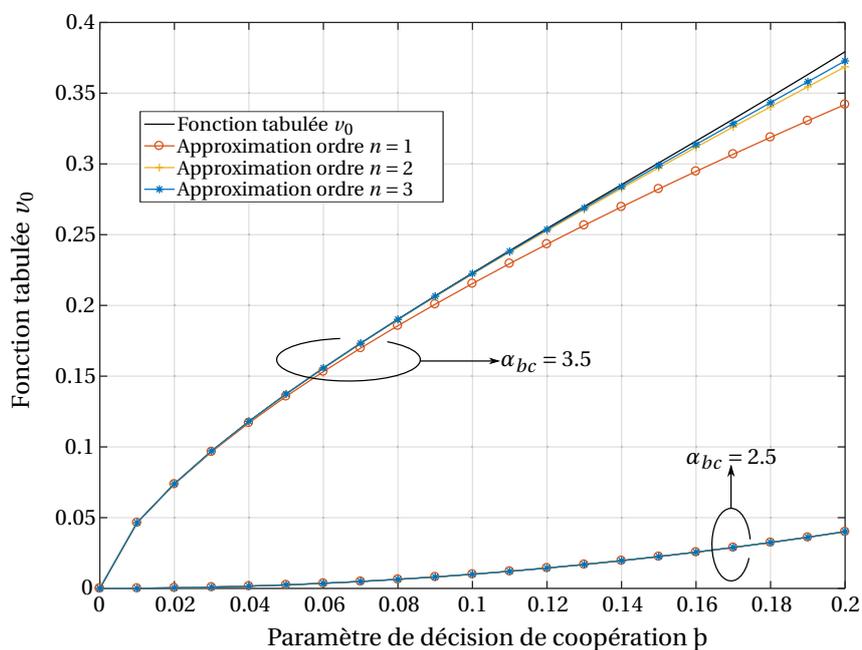


FIGURE 5.4 – Représentation de la fonction tabulée $\nu_0(\theta; \alpha_{bc})$ et ses approximations du premier, deuxième et troisième ordre pour des valeurs pratiques de θ et $\alpha_{bc} \in \{2.5; 3.5\}$.

5.2.2.2 Approche 2 : augmentation de la capacité moyenne de service

Dans cette section, nous présentons la deuxième approche d'optimisation de l'efficacité énergétique. Comparé à la première approche présentée à la section précédente, nous proposons d'augmenter la capacité moyenne de service offerte par l'émetteur HPHT au lieu de réduire sa puissance de transmission. En d'autres termes, ceci revient à formuler le problème (P3) de la manière suivante :

$$(P3) : \quad \max_{0 \leq r_{bc} \leq 1} \quad EE^H = \frac{C_s^H}{P_{in}^H},$$

$$s. t. \quad P_{tx}^{bc} = P_{max}^{bc}, \quad (5.17)$$

Comme pour la première approche, l'expression de l'efficacité énergétique du réseau hybride (3.41) peut être exprimée en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT à l'aide de la proposition suivante :

Proposition 8. *En considérant une répartition uniforme des utilisateurs dans la zone de service ainsi que le modèle de consommation de puissance présenté à la section 3.1.1.3, du cha-*

pitre 3, l'expression de l'efficacité énergétique du réseau hybride s'écrit :

$$EE^H(r_{bc}) = \left(\frac{MB^{bc}}{\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} \ln 2} \right) \frac{r_{bc}^2 \ln(1 + \gamma_0^{bc} r_{bc}^{-\alpha_{bc}}) + (1 - r_{bc}^2) c_0}{1 - \theta_{p1} r_{bc}^2 + \theta_{p2}}, \quad \forall r_{bc} \in [0, 1] \quad (5.18)$$

où

$$c_0 = \frac{\mathbb{E}[\eta_i^{uc}] \mathbb{E}[C_m^{uc}] \ln 2}{B^{bc}}, \quad (5.19)$$

θ_{p1} et θ_{p2} sont données par (5.8). Rappelons que le paramètre c_0 peut être interprété comme l'efficacité spectrale qu'aurait la composante cellulaire en utilisant les ressources spectrales allouées à la composante de diffusion (voir remarque 7).

Preuve. voir annexe A, section A.2 ■

Soit $f_c(r_{bc})$ la fonction de l'efficacité énergétique donnée par (5.18). Comme pour la première approche, nous pouvons montrer que $f_c(r_{bc})$ est une fonction convexe pour tout $r_{bc} \in [0, 1]$ et $\alpha_{bc} \geq 2$. Par conséquent, le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT est obtenu en trouvant la racine de la fonction dérivée $f'_c(r_{bc})$, ce qui conduit à :

$$\ln(1 + \gamma_0^{bc} r_{bc}^{-\alpha_{bc}}) - \frac{\alpha_{bc} \gamma_0^{bc} r_{bc}^{-\alpha_{bc}}}{2(1 + \gamma_0^{bc} r_{bc}^{-\alpha_{bc}})} + \frac{\theta_p \alpha_{bc} \gamma_0^{bc} r_{bc}^{2-\alpha_{bc}}}{2(1 + \gamma_0^{bc} r_{bc}^{-\alpha_{bc}})} = c_0(1 - \theta_p), \quad (5.20)$$

où

$$\theta_p = \frac{\theta_{p1}}{1 + \theta_{p2}}. \quad (5.21)$$

En appliquant le changement de variable :

$$z = \frac{\alpha_{bc}}{2(1 + \gamma_0^{bc} r_{bc}^{-\alpha_{bc}})} \quad (5.22)$$

à l'équation (5.9) nous obtenons :

$$z - \ln z + \theta_p (\gamma_0^{bc} z)^{2/\alpha_{bc}} \left(\frac{\alpha_{bc}}{2} - z \right)^{1 - \frac{2}{\alpha_{bc}}} = \frac{\alpha_{bc}}{2} - \ln \frac{\alpha_{bc}}{2} + c_0(1 - \theta_p). \quad (5.23)$$

Par analogie avec la première approche, nous pouvons remarquer que la solution de l'équation (5.23) va dépendre des paramètres γ_0^{bc} , α_{bc} , c_0 et θ_p . Sachant que les paramètres γ_0^{bc} et α_{bc} sont prédéterminés par les exigences des services et l'environnement de propagation, nous pouvons considérer sans perte de généralité que la solution de l'équation (5.23) dépend principalement des paramètres c_0 et θ_p .

Soit $v_0(\theta_p, c_0)$ la solution de l'équation (5.23). En utilisant des méthodes d'analyse numérique, par exemple la méthode itérative de Newton, la solution $v_0(\theta_p, c_0)$ peut être tabulée

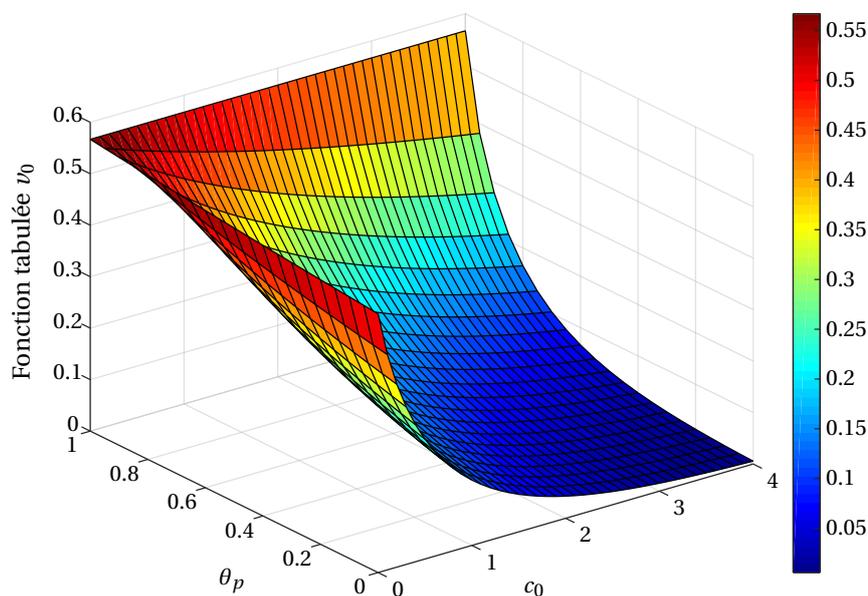


FIGURE 5.5 – Représentation de la fonction tabulée $v_0(\theta_p, c_0)$ en fonction des valeurs pratiques de θ_p et c_0 pour $\alpha_{bc} = 3,5$ et $\gamma_0^{bc} = -20$ dB.

pour toutes les valeurs pratiques de θ_p et c_0 . La figure 5.5 donne, à titre d'exemple, une représentation de la solution $v_0(\theta_p, c_0)$ en fonction des valeurs typiques des paramètres θ_p et c_0 . Par ailleurs, nous pouvons montrer par définition que $0 \leq \theta_p \leq 1$ et $c_0 \geq 0$.

Enfin, puisque $v_0(\theta_p, c_0)$ est la solution de l'équation (5.23), le rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT est obtenu en appliquant le changement de variable inverse :

$$r_{bc} = \left[\frac{\gamma_0^{bc}}{\left(\frac{\alpha_{bc}}{2z} - 1\right)} \right]^{1/\alpha_{bc}} \quad (5.24)$$

à la solution $v_0(\theta_p, c_0)$, ce qui conduit à :

$$r_{bc}^* = \left(\frac{\gamma_0^{bc}}{\frac{\alpha_{bc}}{2v_0(\theta_p, c_0)} - 1} \right)^{\frac{1}{\alpha_{bc}}} . \quad (5.25)$$

5.2.3 Évaluation numérique de l'approche d'optimisation

Afin de valider les deux approches d'optimisation proposées dans les sections 5.2.2.1 et 5.2.2.2 pour résoudre le problème (P3), nous représentons l'évolution des fonctions d'efficacité énergétique du réseau hybride données par (5.6) et (5.18). Puis, nous vérifions que les

expressions du rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT données par (5.16) et (5.25) coïncide avec les valeurs optimales des fonctions d'efficacité énergétique données par (5.6) et (5.18) respectivement.

5.2.3.1 Paramètres de configuration de la simulation

Nous considérons ici la transmission d'un service linéaire destiné à M utilisateurs uniformément répartis dans une zone de service de $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$. La capacité minimale requise pour recevoir le service correctement est fixée à $C_{req} = 1 \text{ Mbps}$. Ainsi à partir des équations (3.6) et (3.27), nous fixons le SNR minimum de réception à $\gamma_0^{bc} = -7 \text{ dB}$ pour la composante de diffusion et le nombre de PRBs alloués à chaque utilisateur dans une cellule LPLT à $RB_m = 1$. Nous supposons que tous les utilisateurs présents dans la zone de service sont intéressés par le service diffusé.

Comme pour les simulations précédentes, nous considérons un scénario de type *tower overlay* dans lequel un utilisateur situé dans la zone de couverture du réseau de diffusion sera directement associé à l'émetteur HPHT.

Par ailleurs, le système LTE est utilisé comme système de transmission dans le réseau cellulaire et dans le réseau de diffusion avec sa composante de diffusion eMBMS qui a été modifiée pour intégrer les contraintes liées à l'infrastructure de réseau HPHT et à la gestion des ressources dans les réseaux de diffusion [39, 52].

Notons également que les systèmes des composantes cellulaire et de diffusion du réseau hybride opèrent sur la bande des 700 MHz en utilisant des fréquences porteuses différentes pour éviter les interférences entre systèmes.

Les paramètres de configuration utilisés pour la simulation du réseau sont regroupés dans le tableau 5.2. Enfin, selon le modèle de consommation de puissance utilisé (3.2), les constantes liées au modèle de consommation de puissance sont définies à l'aide du tableau 3.1.

5.2.3.2 Résultats des simulations

La figure 5.6 montre l'évolution des fonctions d'efficacité énergétique du réseau hybride données par (5.6) et (5.18) pour un nombre d'utilisateurs $M = 1000$. Les résultats sont présentés pour les deux approches d'optimisation présentées aux sections 5.2.2.1 et 5.2.2.2. Rappelons que la première approche vise à réduire la puissance de transmission de l'émetteur HPHT tandis que dans la deuxième approche vise à augmenter la capacité moyenne de service de l'émetteur HPHT.

Premièrement, comme illustré à la figure 5.6, les solutions optimales obtenues à partir des expressions analytiques (5.16) et (5.25) sont respectivement en phase avec les valeurs optimales conduisant à une efficacité énergétique maximale des fonctions (5.6) et (5.18).

Tableau 5.2 – Paramètres de configuration de la simulation du réseau hybride dans un scénario de type *tower overlay*.

	Composante cellulaire	Composante de diffusion
Zone de service	30 km × 30 km	
Infrastructure de réseau	LPLT	HPHT
Distance entre sites (ISD)	2 km	1 seul site
Système de transmission	LTE	eMBMS
Fréquence porteuse	750 MHz	700 MHz
Largeur canal de transmission	10 MHz	10 MHz
Mode de transmission	<i>unicast</i>	<i>broadcast</i>
Modèle de propagation	$\alpha_{uc} = 2,9$	$\alpha_{bc} = 2,9$
Perte de propagation (L_p)	$L_p^{uc} = 8$ dB	$L_p^{bc} = 15$ dB
Puissance de transmission	1,2 kW	24,6 kW
Hauteur antenne de transmission	40 m	100 m
Hauteur antenne de réception	1,5 m	1,5 m
Allocation de ressources	$RB_m = 1$	$-^1$

¹ Toutes les ressources disponibles sont allouées à tous les utilisateurs ;

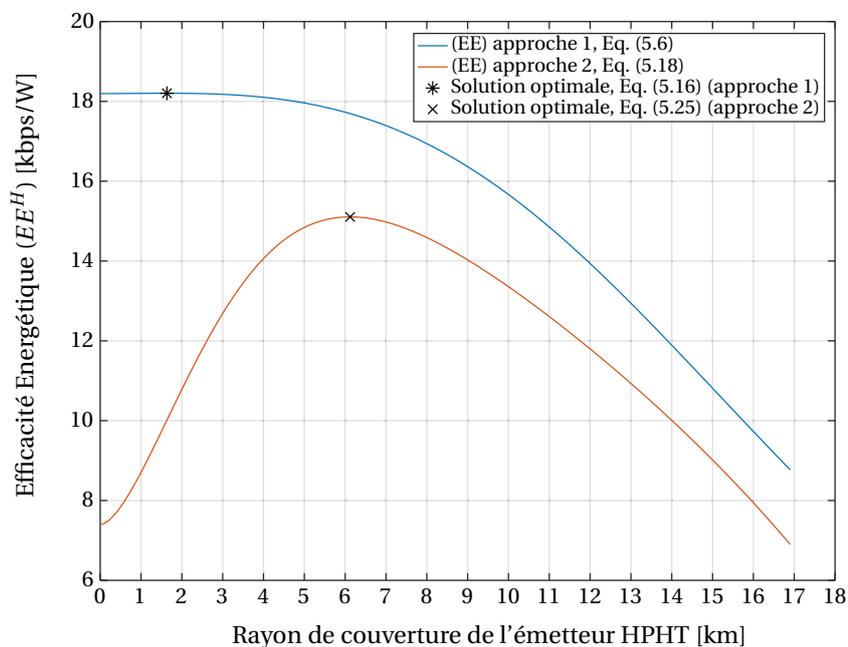


FIGURE 5.6 – Évolution de l'efficacité énergétique en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT pour $M = 1000$; comparaison des deux approches d'optimisation.

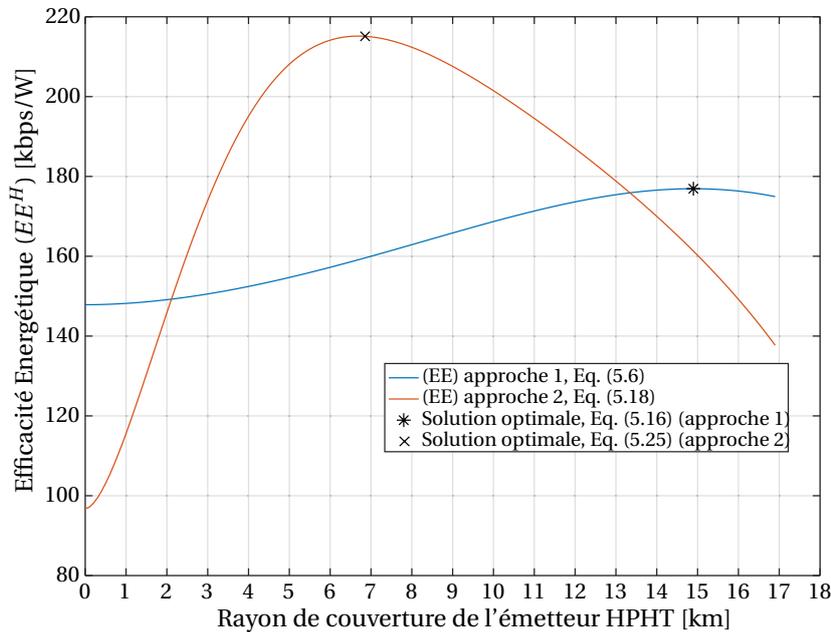


FIGURE 5.7 – Évolution de l'efficacité énergétique en fonction du rayon de couverture de l'émetteur HPHT pour $M = 20000$; comparaison des deux approches d'optimisation.

Deuxièmement, nous pouvons également observer que l'efficacité énergétique maximale est obtenue lorsque la composante cellulaire du réseau hybride coopère avec la composante de diffusion pour transmettre le service proposé.

Enfin, la comparaison des deux approches d'optimisation montre qu'une meilleure efficacité énergétique est obtenue en utilisant la première approche, c'est-à-dire en réduisant la puissance de transmission de l'émetteur HPHT.

Comme pour la figure 5.6, la figure 5.7 montre l'évolution des fonctions d'efficacité énergétique du réseau hybride données par (5.6) et (5.18) pour un nombre d'utilisateurs $M = 20000$. Les résultats sont présentés pour les deux approches d'optimisation.

Là encore, nous pouvons tirer les mêmes conclusions concernant la précision des deux approches d'optimisation ainsi que l'amélioration de l'efficacité énergétique obtenue avec la coopération de la composante cellulaire et de diffusion. En effet, nous pouvons observer que les solutions optimales obtenues à partir des expressions analytiques (5.16) et (5.25) sont respectivement en phase avec les valeurs optimales conduisant à une efficacité énergétique maximale des fonctions (5.6) et (5.18). Cependant, concernant la comparaison des deux approches d'optimisation, nous pouvons noter que la deuxième approche conduit à une meilleure efficacité énergétique du réseau hybride.

Afin d'étudier l'impact du nombre d'utilisateurs M dans la zone de service sur les deux

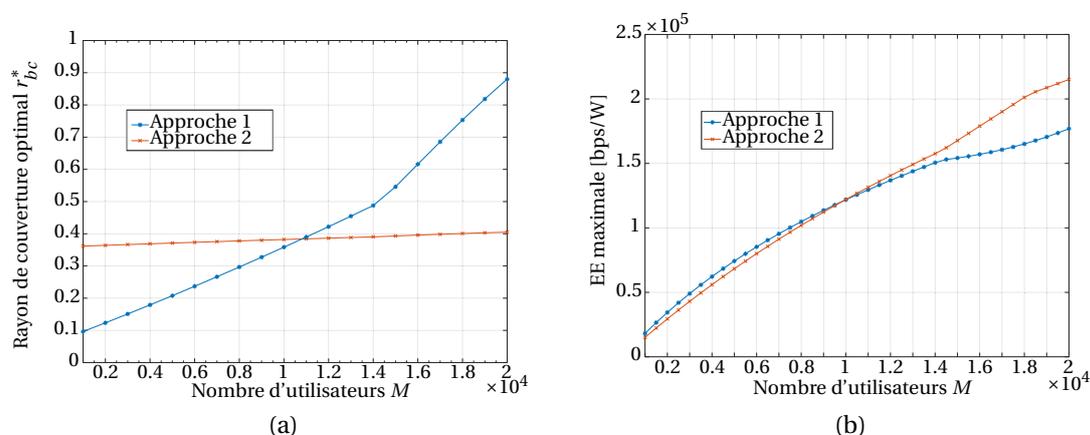


FIGURE 5.8 – Évolution du rayon de couverture optimal de l'émetteur HPHT (a) et de l'efficacité énergétique (b) en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service.

approches d'optimisation proposées, la figure 5.8 montre l'évolution du rayon de couverture optimal (a) et de l'efficacité énergétique maximale (b) en fonction du nombre d'utilisateurs M .

Comme illustré à la figure 5.8a, les résultats montrent que la deuxième approche est moins sensible aux variations du nombre d'utilisateurs dans la zone de service, à savoir que r_{bc}^* est relativement stable quel que soit le nombre d'utilisateurs dans la zone de service. Par ailleurs, nous pouvons observer une dépendance linéaire de la première approche en fonction du nombre d'utilisateurs dans la zone de service avec une pente différente suivant l'état des cellules LPLT, c'est-à-dire en surcharge ou non. Concernant l'efficacité énergétique, nous pouvons observer, d'une part sur la figure 5.8b, que lorsque les cellules LPLT sont surchargées la deuxième approche conduit à de meilleures performances que la première approche.

D'autre part, notons que dans le cas où les cellules LPLT ne sont pas surchargées, les deux approches offrent des performances presque similaires. Cependant nous pouvons observer que les performances sont légèrement meilleures avec la première approche. Compte tenu de ces résultats, il est préférable d'utiliser la deuxième approche qui optimise la capacité moyenne de service pour la diffusion de services linéaires destinés à un grand nombre d'utilisateurs.

D'un point de vue planification du réseau hybride, la deuxième approche est en effet préférable car le rayon de couverture optimal r_{bc}^* de l'émetteur HPHT est stable. De plus, le gain de coopération est plus significatif dans ce cas, ce qui permet d'établir ainsi un bon compromis en termes d'optimisation des performances du réseau hybride pour la diffusion de services linéaires.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux aspects énergétiques de la coopération des réseaux cellulaires et de diffusion pour la transmission de services linéaires destinés à un grand nombre d'utilisateurs.

À partir du modèle de réseau hybride présenté dans le chapitre 3, nous avons abordé dans ce chapitre l'optimisation des performances du réseau hybride en termes de consommation de puissance et d'efficacité énergétique. Les résultats ont montré que l'optimisation de l'efficacité énergétique permet de trouver un bon compromis entre l'optimisation de la capacité moyenne présentée dans le chapitre précédent et l'optimisation de la puissance consommée par le réseau hybride.

D'une manière générale les résultats obtenus dans ce chapitre et dans le chapitre précédent ont montré que la coopération des réseaux cellulaires et de diffusion permet d'améliorer les performances des réseaux de distribution pour la diffusion des services linéaires. En effet, ces améliorations sont obtenues en ajustant les paramètres de planification de la composante de diffusion du réseau hybride tout en tenant compte du nombre d'utilisateurs et de leur répartition dans la zone de service.

Ces travaux sur les aspects énergétiques du réseau hybride ont fait l'objet d'une publication aux journées internationales URSI 2016 [82], d'une publication soumise à la revue *IEEE Access* et d'une publication soumise à *IEEE ICC 2017*.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéressons à la modélisation du réseau hybride pour la diffusion des services non linéaires.

EXTENSION DU MODÈLE POUR LA DIFFUSION DE SERVICES NON-LINÉAIRES

Introduction

Dans le contexte d'attribution du dividende numérique au profit des opérateurs de réseaux cellulaires pour le déploiement des réseaux de quatrième génération (4G) voire de cinquième génération (5G), les travaux présentés dans cette thèse concernant la coopération des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion se sont principalement focalisés sur la distribution des services multimédias sous la forme de services linéaires.

Cependant, compte tenu du changement d'usage des utilisateurs dans la manière de consommer les services multimédias ces dernières années, l'intérêt porté sur les services non linéaires, comme les services de vidéo à la demande ou encore la télévision de rattrapage, est de plus en plus grandissant. Ce constat est illustré sur la figure 6.1 qui montre l'évolution de la consommation des services multimédias sous formes de services linéaires et non linéaires de 2005 à 2020. Les résultats de l'année 2020 ont été obtenus par extrapolation à partir des résultats de 2005 à 2016.

Comme illustré à la figure 6.1, les services linéaires représentent une grande partie de la consommation des contenus multimédias. L'évolution de cette consommation est relativement constante. Toutefois, nous pouvons constater que cette consommation linéaire est de plus en plus complétée par une consommation des contenus multimédias sous forme de services non linéaires.

Par conséquent, nous proposons dans ce chapitre d'étendre la modélisation du réseau hybride, proposée dans le chapitre 3, pour intégrer la distribution des contenus multimédias

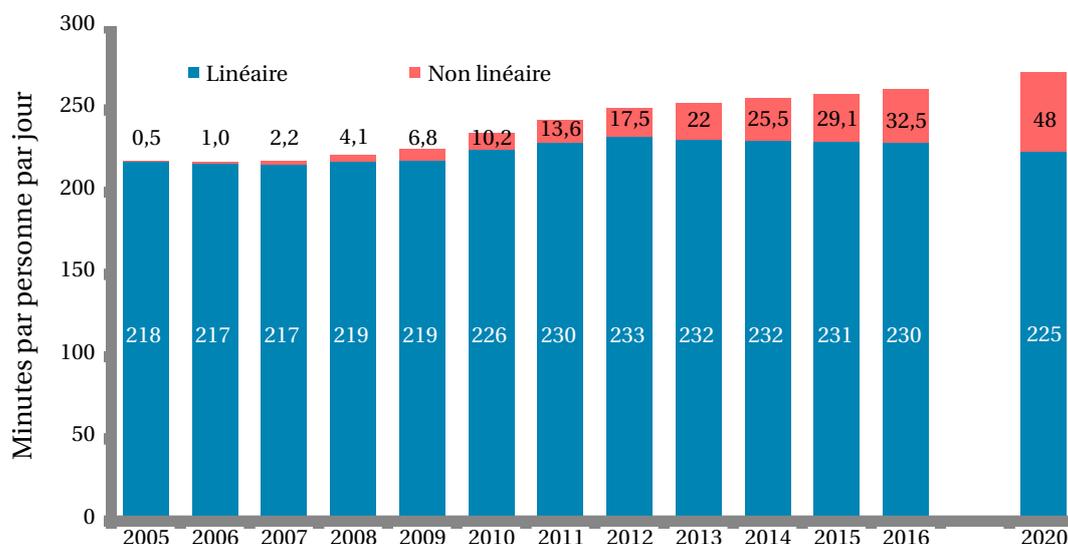


FIGURE 6.1 – Évolution de la consommation des services multimédias de façon linéaire et non linéaire sur « grand écran » pour les pays du « EU BIG 5 » (i.e. France, Allemagne, Italie, Espagne, Royaume-Unis). Source : [31].

sous forme de services non linéaires.

6.1 Structure globale du modèle de réseau hybride

Reprenons l'exemple de la diffusion de contenus multimédias destinés à des utilisateurs répartis dans une zone de service donnée (voire figure 2.1, chapitre 2). Comme indiqué au chapitre 2, la transmission de ces contenus multimédias fait intervenir trois acteurs : l'éditeur de contenus ou fournisseur de service, l'opérateur du réseau de distribution ou le distributeur de contenus et les utilisateurs qui consomment les contenus de l'éditeur sur leurs appareils mobiles.

La figure 6.2 présente la structure globale du modèle de réseau hybride en mettant en évidence les caractéristiques de ces 3 acteurs, que nous décrivons dans la suite de cette section.

6.1.1 Éditeur de contenus

Les contenus multimédias créés par l'éditeur peuvent être regroupés en deux catégories de services : les services linéaires et les services non-linéaires. Comme illustré à la figure 6.2, chaque service peut être caractérisé par un ensemble de contraintes liées au mode

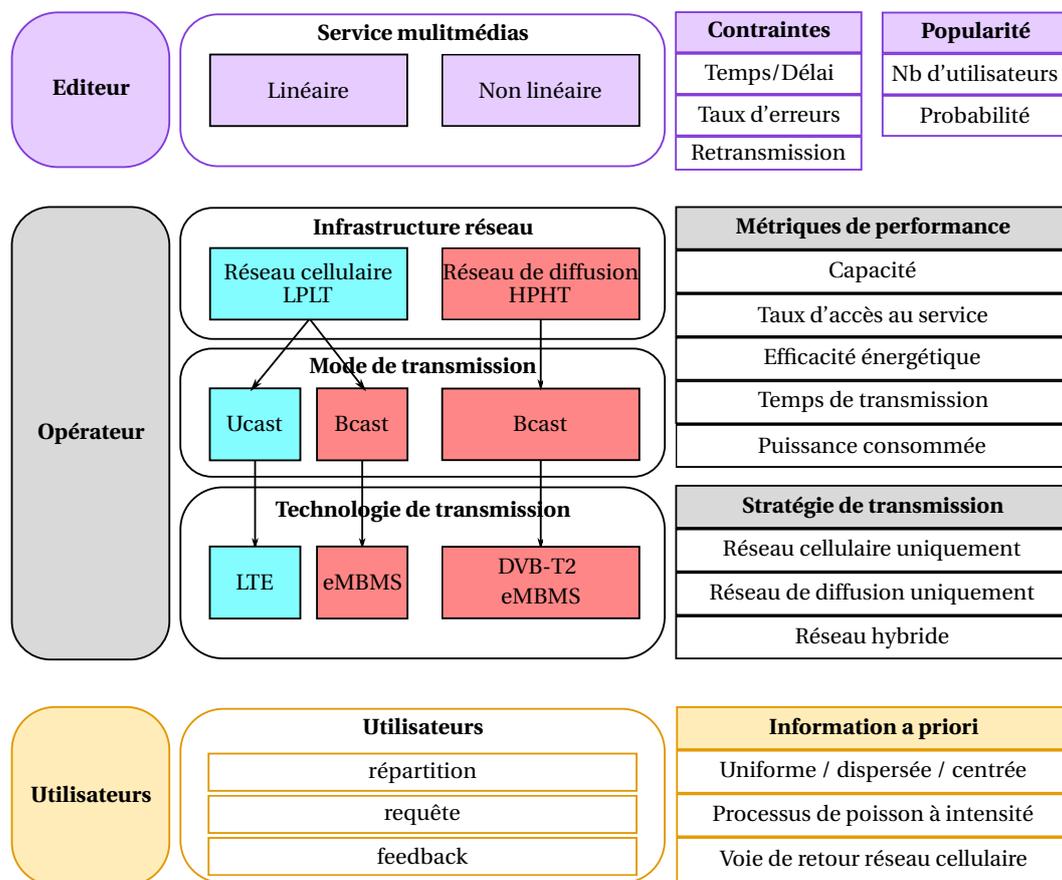


FIGURE 6.2 – Structure globale du modèle de réseau hybride.

de consommation des services (c'est-à-dire de façon linéaire ou non) et à la popularité des services.

Contraintes des services Les contraintes associées à la transmission des contenus multimédias, sous forme de services linéaires ou non linéaires, sont de trois types : les contraintes de temps ou de délai, les contraintes de taux d'erreurs de transmission et les contraintes de retransmission des données du service. Par exemple, pour des services linéaires ces contenus doivent être transmis aux utilisateurs avec un délai très faible et sans retransmission des contenus erronés. Notons également que dans ce cas, les erreurs de transmission sont tolérées mais ne doivent pas dépasser un certain seuil.

Concernant les services non linéaires, les contraintes liées au temps ou délai de transmission sont plus flexibles. En revanche, les erreurs de transmission ne sont pas tolérées mais les données peuvent être retransmises plusieurs fois afin d'assurer l'intégrité des contenus multimédias.

Tableau 6.1 – Tableau comparatif entre les contraintes liées aux services linéaires et non linéaires.

	Temps ou délai	Erreurs de transmission	Retransmission
Services linéaires	✗ (très faible)	✓ (tolérées)	✗ (pas de retransmission)
Services non linéaires	✓ (toléré)	✗ (non tolérées)	✓ (retransmission possible)

Définition 6.1. Popularité des services : *La popularité d'un contenu ou service est définie par la probabilité qu'un utilisateur m dans la zone de service soit intéressé par le contenu ou service proposé par l'éditeur.*

Ainsi, le nombre potentiel d'utilisateurs à servir est obtenu à partir de cette probabilité. Notons, par ailleurs, que cette définition de la popularité d'un service sous forme de probabilité permet la prédiction de l'évolution de cette popularité en fonction du temps à partir de données statistiques des différentes requêtes des utilisateurs aux contenus proposés [83]. En effet les travaux menés dans la thèse [83], qui s'intéresse à l'étude et à la modélisation du comportement des utilisateurs dans un scénario de communications mobiles opportunistes, ont montré que l'observation de l'évolution de la popularité sur une période temps donnée permet de prédire la popularité des contenus sur une période ultérieure en utilisant des algorithmes de prédiction.

6.1.2 Réseau de distribution des contenus

En général, le choix du réseau de distribution revient à l'éditeur de contenus. En effet, pour acheminer ses contenus multimédias, l'éditeur a le choix entre un réseau cellulaire ou un réseau de diffusion. Cependant, dans une approche coopérative, le réseau de distribution sera choisi en exploitant la complémentarité des réseaux cellulaires et de diffusion afin d'assurer une bonne qualité de service à tous les utilisateurs tout en réduisant le coût de distribution du service. Par conséquent, le choix du réseau de distribution et de la stratégie de coopération résulte de l'optimisation des métriques de performances du modèle de réseau hybride tout en tenant compte des contraintes associées aux services ainsi qu'aux modes de consommation des contenus par les utilisateurs. Par exemple, pour la transmission des services multimédias de façon linéaire, la stratégie de coopération optimale est obtenue à partir des solutions des problèmes d'optimisation ($P1$), ($P2$) et ($P3$) proposés au chapitre 4.

Concernant les métriques de performances, nous reprenons les métriques de capacité moyenne de service, de taux d'accès moyen au service, de puissance consommée et d'efficacité énergétique définies à la section 3.1.4 du chapitre 3. Toutefois, compte tenu de la flexibi-

lité sur les contraintes de temps et de délai des services non linéaires, nous introduisons ici une nouvelle métrique de performance : le temps de service.

Définition 6.2. Temps de service : *Le temps de service est défini comme étant le temps qui s'écoule entre l'instant où l'utilisateur exprime son besoin d'accéder à un certain contenu multimédia d'un service non linéaire jusqu'au moment où ce contenu est reçu.*

Par ailleurs, notons que cette nouvelle métrique de temps de service n'est pas pertinente pour la distribution des contenus multimédias sous forme de services linéaires puisque par définition un service linéaire est toujours diffusé et consommé immédiatement à l'instant de diffusion.

6.1.3 Utilisateurs

Le choix du réseau de distribution et de la stratégie de coopération optimale doit tenir compte du comportement des utilisateurs dans la zone de service ciblée. Ainsi, le modèle de réseau hybride proposé ici et illustré à la figure 6.2 se base sur des informations a priori concernant la répartition des utilisateurs dans la zone de service et les requêtes des utilisateurs aux différents services proposés.

En pratique, la précision et la fiabilité de ces informations nécessitent la présence d'une voie de retour afin de mettre en place des mécanismes de supervision du comportement des utilisateurs dans la zone de service. Ces données de supervision permettront par exemple de déterminer les lois statistiques des requêtes des utilisateurs et de leur répartition dans la zone de service.

6.2 Modélisation analytique des services non linéaires

Afin de formaliser le choix du réseau de distribution dans un scénario de coopération entre les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion, nous proposons dans cette section une modélisation analytique de la diffusion des services non linéaires basée sur le modèle de réseau hybride présenté à la section 6.1.

6.2.1 Contenus multimédias d'un service non linéaire

Soient $\mathcal{S} = \{I_1, I_2, \dots, I_{N_c}\}$ un ensemble de contenus multimédias qui sont consommés de façon non linéaire par les utilisateurs dans la zone de service et N_c le nombre de contenus de l'ensemble \mathcal{S} . Ces contenus seront disponibles pendant une durée T .

Chaque contenu I_i du service non linéaire peut être caractérisé par une taille de fichier F_i du contenu et une popularité p_i associée au contenu. Ces caractéristiques peuvent être

décrites à l'aide de données statistiques issues de la supervision du mode de consommation et des requêtes des utilisateurs dans la zone de service.

Soient λ l'intensité des requêtes aux différents contenus de l'ensemble \mathcal{S} et λ_i l'intensité des requêtes à un contenu I_i du service. Ainsi, la popularité p_i associée à un contenu I_i est donnée par

$$p_i = \frac{\lambda_i}{\lambda}. \quad (6.1)$$

6.2.2 Réseau de distribution

L'ensemble des contenus \mathcal{S} d'un service non linéaire peut être transmis soit en utilisant la composante de diffusion ou la composante cellulaire du réseau hybride. Ainsi, nous proposons dans cette section une modélisation analytique de ces deux composantes pour la diffusion de services non linéaires.

6.2.2.1 Composante de diffusion

Dans un réseau de diffusion, les contenus des services non linéaires sont transmis aux utilisateurs en utilisant une approche de type carrousel ou *push* où les contenus sont transmis à l'avance comme illustré sur la figure 6.3. Dans une telle approche, les contenus du service sont transmis non pas à la suite d'une requête explicite d'un ou plusieurs utilisateurs, mais plutôt dans l'espoir que les contenus transmis seront au moins consommés par un certain nombre d'utilisateurs dans la zone de service. En effet le manque de voie de retour dans les réseaux de diffusion fait que l'opérateur du réseau ne dispose pas d'informations précises sur les contenus qu'un utilisateur souhaite recevoir. Néanmoins, le choix des contenus du carrousel est fait sur la base de données statistiques qui sont obtenues à partir des fichiers d'abonnement aux services ou encore des enquêtes d'audience de services auprès des utilisateurs. Ainsi, l'opérateur de réseau de diffusion peut connaître les requêtes relatives aux différents contenus du service comme la popularité d'un contenu audio par rapport à un contenu vidéo par exemple.

Considérons, maintenant, que les contenus \mathcal{S} d'un service non linéaire sont transmis en utilisant la composante de diffusion. En l'absence de voie de retour, les N_c contenus du service sont ordonnancés et continuellement transmis afin d'assurer une bonne qualité de service et minimiser le temps moyen de service de chaque contenu (voir figure 6.3).

Le temps moyen de service d'un contenu dépend en effet de nombreux paramètres dont la capacité offerte par le réseau de distribution du service et l'ordonnancement des contenus du service dans le carrousel. L'ordonnancement optimal des contenus dans un carrousel a fait l'objet de nombreuses publications scientifiques [84, 85, 86]. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, les travaux publiés dans [84] qui ont montré que dans un ordonnanceur optimal, le nombre de répétitions des contenus est étroitement lié à la popularité des contenus dans le carrousel.

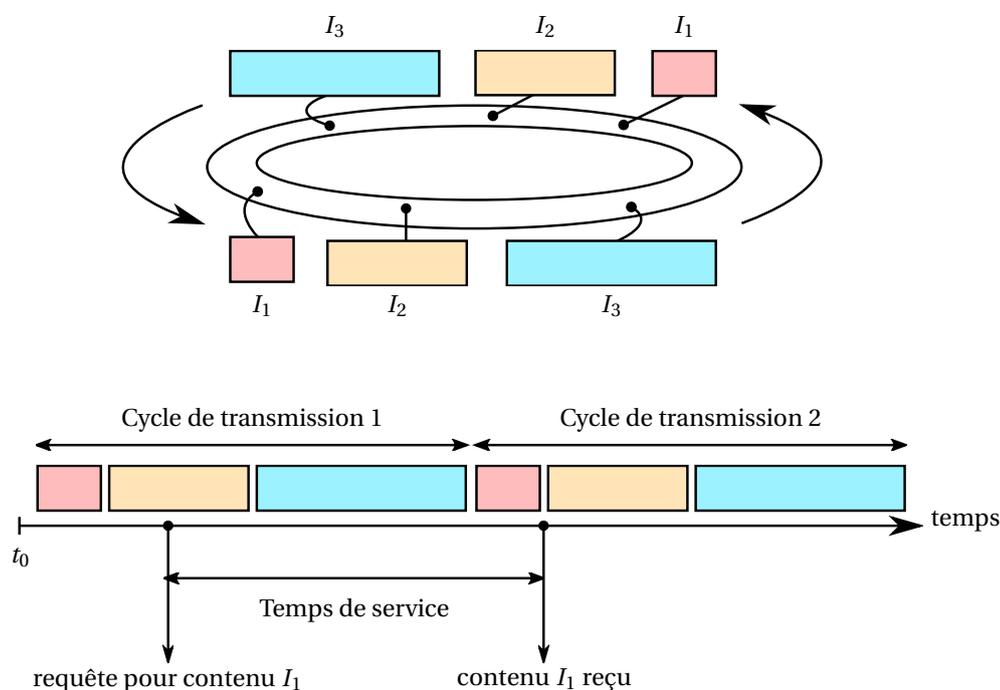


FIGURE 6.3 – Distribution des contenus multimédias de façon non linéaire en mode carrousel dans un réseau de diffusion.

Par ailleurs, les travaux menés dans [85, 86] ont permis de déterminer une expression du temps moyen de service pour des situations dans lesquelles un ordonnanceur optimal est utilisé dans le carrousel.

Soit τ_i^{bc} le temps moyen de service d'un contenu transmis via la composante de diffusion. À partir des résultats des articles [85, 86], nous pouvons montrer que l'expression du temps moyen de service τ_i^{bc} s'écrit

$$\tau_i^{bc} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^{N_c} \sqrt{p_i \frac{F_i}{\min_i F_i} (1 + 2r_i)} \right)^2 \frac{\min_i F_i}{C^{bc}}, \quad (6.2)$$

où r_i est le nombre moyen de répétition du contenu I_i après sa première apparition dans le carrousel et C^{bc} est la capacité moyenne de la composante de diffusion donnée par (3.8).

La répétition des contenus dans le carrousel permet d'améliorer en conséquence la qualité de service rendu. En effet, dans un réseau cellulaire comme le LTE (Long Term Evolution),

il est possible en cas d'échec de transmission des contenus, de demander une retransmission en utilisant la voie de retour des réseaux cellulaires. La retransmission se par trame et seules les trames n'ayant pas pu être décodées correctement sont retransmises [87]. Ce type de mécanisme est désigné sous le nom de *Hybrid Automatic Repeat reQuest* (HARQ). Cependant, ne disposant pas de voie de retour dans les réseaux de diffusion, la retransmission des données sous forme de carrousel permet aux récepteurs de combiner différentes versions reçues des contenus transmis. Par conséquent, le nombre de répétitions r_i est une fonction de la qualité des liens de transmission entre l'émetteur *High Power High Tower* (HPHT) et les différents récepteurs dans la zone de couverture de la composante de diffusion [86].

Rappelons par ailleurs que F_i est la taille de fichier du contenu I_i et p_i la popularité associé au contenu I_i donnée par (6.1). Notons, par ailleurs, que les paramètres N_c , F_i et C^{bc} peuvent être considéré comme des constantes puisqu'ils dépendent de la planification du réseau de diffusion pour la diffusion du service non linéaire. Ainsi, nous pouvons considérer sans pertes de généralités que le temps moyen de service τ_i^{bc} de la composante de diffusion dépend principalement de la popularité p_i associée à chaque contenu ainsi que de la fréquence de répétition r_i de chaque contenu dans le carrousel.

6.2.2.2 Composante cellulaire

Contrairement au réseau de diffusion, dans un réseau cellulaire les contenus des services non linéaires sont transmis aux utilisateurs à la suite des requêtes explicites aux contenus. La présence d'une voie de retour dans un réseau cellulaire permet à l'opérateur de réseau de connaître précisément les statistiques concernant les contenus proposés. À titre d'exemple, l'opérateur peut déterminer les contenus les plus demandés et prendre ainsi des mesures pour assurer une bonne transmission de ces contenus populaires.

Ainsi, dans le cadre d'un réseau hybride, les données statistiques sur les contenus des services non linéaires pourront être partagées avec la composante de diffusion pour optimiser le temps moyen de service des utilisateurs dans la zone de service.

Nous considérons ici que les contenus \mathcal{S} du service linéaire sont transmis en utilisant la composante cellulaire. Tout d'abord, la modélisation de la diffusion des contenus du service non linéaire dans le réseau cellulaire est faite à l'échelle d'une cellule. Ensuite, les résultats obtenus seront généralisés à l'échelle de toutes les cellules du réseau cellulaire considéré.

Soient λ_j l'intensité des requêtes aux contenus du service dans une cellule j du réseau cellulaire et $\lambda_{i,j}$ l'intensité des requêtes au contenu I_i dans la cellule j avec $\lambda_j = \sum_{i=1}^{N_c} \lambda_{i,j}$. Comme proposé dans [53], nous pouvons modéliser la diffusion des contenus au sein d'une cellule du réseau cellulaire par une file d'attente de type $M/M/1$ où les requêtes et les temps de service des utilisateurs suivent un processus de Poisson. Rappelons qu'en théorie des files d'attente, une file $M/M/1$ est un type de file d'attente classique dans lequel les requêtes des clients à traiter par le serveur arrivent avec à des intervalles qui suivent une loi exponentielle,

puis sont mises en attente dans une file avant d'être traitées dans l'ordre d'arrivée, selon une loi exponentielle.

Remarque 14. *La théorie des files d'attente repose sur l'étude de systèmes où des clients se présentent à un dispositif de service, appelé serveur. Elle permet également de modéliser les interactions entre clients et serveurs pour évaluer les performances du système.*

Par analogie, les utilisateurs (clients) dans une cellule j (serveur) occupent les ressources disponibles dans la cellule pendant un certain temps (temps moyen de service) pour récupérer les contenus qui les intéressent. Les ressources disponibles étant limitées, certains utilisateurs doivent attendre avant d'être servis.

Soit $\tau_{i,j}^{uc}$ le temps moyen de service d'un contenu transmis dans une cellule du réseau cellulaire. À partir des résultats de la théorie des files d'attente $M/M/1$, ce temps moyen de service $\tau_{i,j}^{uc}$ est donné par

$$\tau_{i,j}^{uc} = \frac{1}{\mu_{i,j} - \lambda_{i,j}}, \quad (6.3)$$

où $\mu_{i,j}$ représente le taux de service de la cellule j . L'expression de $\mu_{i,j}$ est donnée par

$$\mu_{i,j} = \frac{\mathbb{E}[C_{m,j}^{uc}]}{F_i}, \quad (6.4)$$

où $\mathbb{E}[C_{m,j}^{uc}]$ désigne la capacité moyenne d'un utilisateur m dans une cellule j obtenue à partir de (3.28). Ainsi en remplaçant $\mu_{i,j}$ dans (6.3) par (6.4), nous obtenons :

$$\tau_{i,j}^{uc} = \frac{F_i}{\mathbb{E}[C_{m,j}^{uc}]} \left(\frac{1}{1 - \rho_{i,j}^{uc}} \right), \quad (6.5)$$

où le terme $\rho_{i,j}^{uc} = \lambda_{i,j} / \mu_{i,j}$ représente le taux d'occupation de la cellule souvent désigné par la charge de la cellule. Comme pour la modélisation des services linéaires, cette charge est étroitement liée au nombre d'utilisateurs dans la cellule.

Nous pouvons à présent, déduire le temps moyen de service τ_i^{uc} à l'échelle de toutes les cellules du réseau cellulaire comme suit :

$$\tau_i^{uc} = \frac{1}{N_{LPLT}} \sum_{j=1}^{N_{LPLT}} \tau_{i,j}^{uc}. \quad (6.6)$$

Rappelons que N_{LPLT} désigne le nombre de cellules dans la zone de service.

6.2.2.3 Choix du réseau de distribution

Le choix d'un réseau hybride comme réseau de distribution permet d'optimiser la transmission des contenus du service en mettant à contribution les deux composantes du réseau

hybride, à savoir le réseau cellulaire et le réseau de diffusion.

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'optimisation du temps moyen de service du réseau hybride. Ainsi, la stratégie de transmission des contenus du service non linéaire est déterminée dans le but de réduire le temps moyen de service d'un utilisateur dans la zone de service. Autrement dit, chaque contenu I_i du service sera transmis en utilisant la composante du réseau hybride qui offre le temps moyen de service le plus court. Il est alors possible de formaliser le choix de la composante de transmission pour chaque contenu de la manière suivante.

Soit x_i une variable binaire matérialisant le choix de la composante de transmission. Si la composante de diffusion est choisie pour transmettre le contenu I_i alors $x_i = 1$. Dans le cas contraire, la composante cellulaire est choisie et $x_i = 0$. Notons τ_i^H le temps moyen de service du réseau hybride. L'expression de τ_i^H est donnée par

$$\tau_i^H = x_i \tau_i^{bc} + (1 - x_i) \tau_i^{uc}. \quad (6.7)$$

D'après (6.2), Nous pouvons observer que le temps moyen de service τ_i^H du réseau hybride pour un contenu I_i dépend du nombre de contenus présents dans le carrousel. Par conséquent, le choix de la composante de transmission optimale, à l'échelle de tous les contenus d'un service, est dicté par la solution du problème d'optimisation suivant

$$\begin{aligned} \min_{x_i \in \{0;1\}} \quad & \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} x_i \tau_i^{bc} + (1 - x_i) \tau_i^{uc} \\ \text{s.t.} \quad & \tau_i^H \leq T, \end{aligned} \quad (6.8)$$

où T est la durée de disponibilité du service. La résolution analytique de ce problème reste un problème ouvert et n'a pas été traitée dans le cadre de cette thèse. Toutefois, le problème d'optimisation pourrait être résolu en utilisant des algorithmes de recherche exhaustive de la solution optimale. Ainsi, la suite de ce chapitre tente de démontrer l'existence d'un régime d'optimalité à travers un exemple pratique.

Remarque 15. *Dans le cadre de cette étude, le choix de la stratégie de transmission s'est porté sur l'optimisation du temps moyen de service des utilisateurs dans la zone de service. Toutefois, d'autres métriques de performance comme illustré sur la figure 6.2 pourront être considérées par la suite.*

6.3 Exemple de diffusion d'un service non linéaire

Afin d'évaluer les performances du modèle de réseau hybride proposé, nous nous intéressons à la diffusion d'un unique contenu d'un service non linéaire. Dans le cadre de cette étude, la popularité du contenu dépend principalement du nombre d'utilisateurs qui

souhaitent recevoir le contenu proposé. Comme proposé dans [35], nous choisissons ici l'exemple de la mise à jour d'une application mobile. Dans ce type d'application, le nombre d'utilisateurs est publiquement disponible ce qui permet de déterminer les statistiques concernant la popularité du service. De plus, le contenu de mise à jour est diffusé dans un intervalle de temps relativement restreint débutant au moment de la publication d'une nouvelle version de l'application mobile. À titre d'exemple nous pouvons citer l'application *YouTube* qui est la deuxième application mobile la plus utilisée sur les appareils mobiles. En effet, avec un taux de pénétration de plus de 50%, cette application est installée sur plus de 500 millions d'appareils mobiles [88].

6.3.1 Paramètres de simulation du réseau hybride

Nous considérons ici la transmission d'un contenu de mise à jour d'une application mobile de façon non linéaire à M utilisateurs uniformément répartis dans une zone de service de $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$. Nous considérons que tous les utilisateurs présents dans la zone de service sont intéressés par le contenu de mise à jour. Nous considérons également que la durée de validité du contenu de la mise à jour est $T = 10 \text{ s}$.

Comme pour la simulation du réseau hybride pour la diffusion des services linéaires, le système LTE est utilisé dans la composante cellulaire et dans la composante de diffusion également avec la technologie eMBMS (enhanced Multimedia Broadcast Multicast Service). Les deux composantes du réseau hybride opèrent sur la bande des 700 MHz en utilisant des fréquences porteuses différentes pour éviter les interférences entre systèmes. La composante de diffusion du réseau hybride est planifiée avec un *signal-to-noise ratio* (SNR) minimum de $\gamma_0^{bc} = 0 \text{ dB}$, puis avec un SNR minimum de $\gamma_0^{bc} = -6 \text{ dB}$. Ces valeurs correspondent respectivement à un *Channel Quality Indicator* (CQI) de 4 et 1 (voir tableau 4.2 du chapitre 4). Les paramètres de configuration utilisés pour la simulation du réseau hybride sont présentés au tableau 6.2.

6.3.2 Résultats de simulation

La figure 6.4 montre l'évolution du temps moyen de service en fonction du nombre d'utilisateurs par cellule du réseau cellulaire pour la composante cellulaire et la composante de diffusion pour les valeurs de SNR minimum égales à $\gamma_0^{bc} = 0 \text{ dB}$ et $\gamma_0^{bc} = -6 \text{ dB}$.

Premièrement, lorsque $\gamma_0^{bc} = 0 \text{ dB}$, les résultats montrent que le temps moyen de service est plus court avec la composante de diffusion qu'avec la composante cellulaire. Par conséquent, pour cette configuration la stratégie de transmission optimale est d'utiliser uniquement la composante de diffusion pour transmettre le contenu de mise à jour. Cependant, pour $\gamma_0^{bc} = -6 \text{ dB}$, nous pouvons constater que la composante de transmission optimale dépend du nombre d'utilisateurs dans chaque cellule. Par exemple, lorsque le nombre d'utilisateurs par cellule est inférieur à 3, la composante cellulaire est plus appropriée pour trans-

Tableau 6.2 – Paramètres de configuration de la simulation du réseau hybride pour la diffusion d'un service non linéaire.

	Composante cellulaire	Composante de diffusion
Zone de service		5 km × 5 km
Taille du contenu (F_i)		512 koctets
Infrastructure de réseau	LPLT	HPHT
Distance entre sites (ISD)	1500 m ($N_{LPLT} = 19$)	1 seul site
Système de transmission	LTE	eMBMS
Fréquence porteuse	750 MHz	700 MHz
Largeur canal de transmission	5 MHz	5 MHz
Mode de transmission	<i>unicast</i>	<i>broadcast</i>
Modèle de propagation	COST231 HATA	Okumura HATA
Perte de propagation (L_p)	$L_p^{uc} = 8$ dB	$L_p^{bc} = 13$ dB
Puissance de transmission	40 W	140 W
Hauteur antenne de transmission	40 m	100 m
Hauteur antenne de réception	1,5 m	1,5 m
Allocation de ressources	<i>round robin</i>	$_1$

¹ Toutes les ressources disponibles sont allouées à tous les utilisateurs ;

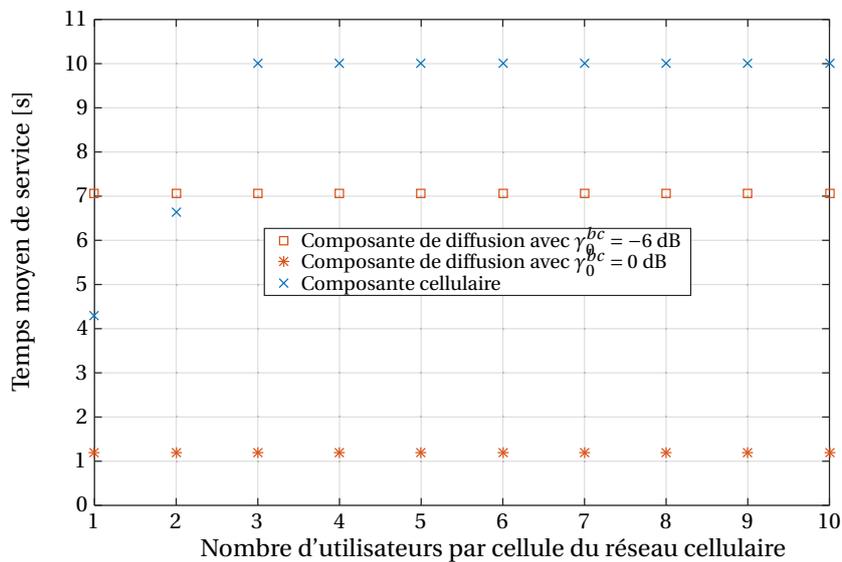


FIGURE 6.4 – Évolution du temps moyen de service en fonction du nombre d'utilisateurs par cellule du réseau cellulaire pour la composante de diffusion et la composante cellulaire du réseau hybride.

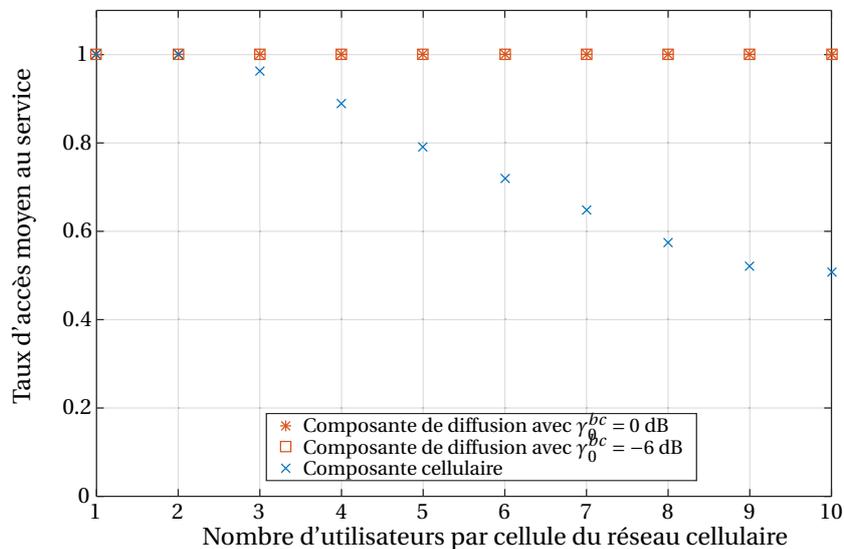


FIGURE 6.5 – Évolution du taux d'accès moyen au service en fonction du nombre d'utilisateurs par cellule du réseau cellulaire pour la composante de diffusion et la composante cellulaire du réseau hybride.

mettre le contenu. Dans le cas contraire, c'est-à-dire le nombre d'utilisateurs par cellule est supérieure à 3, la composante de diffusion sera préférée à la composante cellulaire.

Par ailleurs, nous pouvons également observer dans ce cas que le temps moyen de service est plus long, comparé aux résultats obtenus pour la composante de diffusion avec $\gamma_0^{bc} = 0$ dB. Cette augmentation du temps de service est due à la réduction du SNR minimum, ce qui se traduit par une baisse de la capacité de la composante de diffusion.

Deuxièmement, nous pouvons constater que, lorsque la composante de diffusion est utilisée, le temps moyen de service ne dépend pas du nombre d'utilisateurs dans la zone de service. En effet, la quantité d'information à transmettre dans ce cas est constante quel que soit le nombre d'utilisateurs. Cependant, lorsque la composante cellulaire est utilisée, ce temps moyen de service dépend du nombre d'utilisateurs dans la cellule, c'est-à-dire de la charge de la cellule. Dans ce dernier cas, la quantité d'information à transmettre augmente avec le nombre d'utilisateurs du fait du mode de transmission *unicast* utilisé dans la composante cellulaire. Étant donné que la durée de validité du contenu est de $T = 10$ s, le temps moyen de service de la composante cellulaire est bornée. Autrement dit, à partir de 3 utilisateurs par cellule, le temps nécessaire pour servir tous les utilisateurs est supérieur à 10 s. Par conséquent certains utilisateurs ne pourront pas recevoir le contenu de mise à jour. Cette observation est illustrée sur la figure 6.5.

Enfin, la figure 6.5 montre l'impact du nombre d'utilisateurs par cellule sur le taux d'accès moyen au service. Comme pour la figure 6.4, les résultats sont présentés pour la composante

cellulaire et la composante de diffusion pour les valeur de SNR minimum égales à $\gamma_0^{bc} = 0$ dB et $\gamma_0^{bc} = -6$ dB.

D'une part, nous pouvons observer que, lorsque la composante cellulaire est utilisée pour transmettre le service, le taux d'accès moyen au service baisse en fonction du nombre d'utilisateurs par cellule. Par exemple, comme illustré sur la figure 6.5, à partir de 3 utilisateurs par cellule, certains utilisateurs ne pourront pas recevoir le contenu de mise à jour via la composante cellulaire. D'autre part, nous pouvons constater qu'en utilisant la composante de diffusion tous les utilisateurs dans la zone de service pourront recevoir le contenu de mise à jour.

Ces résultats démontrent ainsi l'intérêt que peut avoir l'hybridation des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion pour la distribution des services multimédias de façon non linéaire. De plus, avec la forte pénétration des appareils mobiles et la popularité croissante des applications mobiles, l'exemple présenté dans cette section met en évidence le potentiel des réseaux de diffusion à délester le trafic des contenus populaires des réseaux cellulaires afin de faire face à l'augmentation du trafic de données des réseaux cellulaires.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la diffusion des services multimédias de façon non linéaire. Inspiré de la modélisation du réseau hybride pour la diffusion des services linéaires, nous avons proposé une extension du modèle permettant d'intégrer la diffusion des services non linéaires. Ensuite, nous avons évalué les performances du réseau hybride en termes de temps moyen de service et de taux d'accès moyen au service sur un exemple de mise à jour d'applications mobiles. Compte tenu de la forte pénétration des appareils mobiles aujourd'hui, ce type de service nécessite la transmission des données de mise à jour à un grand nombre d'utilisateurs. Les résultats obtenus sont très encourageants et illustrent également l'impact que peut avoir l'utilisation d'un réseau de diffusion sur le trafic de données du réseau cellulaire.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion générale

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'étude de la coopération des réseaux de diffusion et des réseaux cellulaires pour la transmission de services multimédias destinés à un grand nombre d'utilisateurs. L'objectif de cette thèse était de modéliser et analyser un système hybride de transmission de services multimédias, pouvant exploiter de façon complémentaire un réseau cellulaire et un réseau de diffusion, dans le but d'optimiser les performances du réseau hybride ainsi constitué. Le réseau hybride à l'étude est constitué d'un réseau cellulaire, composé de plusieurs émetteurs *Low Power Low Tower* (LPLT) basés sur la norme LTE (Long Term Evolution), et d'un réseau de diffusion composé d'un unique émetteur *High Power High Tower* (HPHT) utilisant la composante de diffusion eMBMS (enhanced Multimedia Broadcast Multicast Service) de la norme LTE.

Dans le chapitre 1, nous avons d'abord présenté l'évolution des réseaux de diffusion et des réseaux cellulaires. Ces deux types de réseaux n'ont cessé d'évoluer ces dernières années. Ces évolutions ont permis d'améliorer l'efficacité des réseaux et de proposer des services multimédias riches et de qualité aux utilisateurs. Puis, nous avons présenté les principaux systèmes de transmission utilisés dans ces deux réseaux ainsi que les paramètres de base des couches physiques de ces systèmes. Ainsi, ce premier chapitre, nous a permis de comprendre le fonctionnement de base des réseaux d'accès radio des systèmes cellulaires et de diffusion.

Le chapitre 2 a été consacré à l'étude des scénarios de coopération entre les réseaux de diffusion et les réseaux cellulaires. Ces scénarios, issus de différents groupes de réflexion sur les stratégies de gestion efficace des ressources spectrales, ont été analysés puis synthétisés à l'aide d'une grille de lecture adéquate. Ainsi, cette synthèse a permis d'identifier les scénarios de coopération les plus intéressants et de mettre en avant le potentiel de l'hybridation des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion. Par la suite, un état de la recherche scientifique sur la coopération de ces deux types de réseaux nous a permis de proposer une définition et une modélisation du réseau hybride.

Dans le chapitre 3, nous nous sommes intéressés à la modélisation, puis à la simulation du réseau hybride pour la diffusion de contenus multimédias sous forme de services li-

néaires. Le modèle de réseau hybride présenté se base sur une étude statistique de certaines propriétés des réseaux cellulaires, des réseaux de diffusion, des contenus multimédias et des utilisateurs comme la géométrie des zones de couverture des émetteurs, des conditions de propagations des signaux, de la répartition des utilisateurs et de la popularité des services en termes de nombre d'utilisateurs intéressés par les contenus multimédias. Nous avons ensuite défini des métriques de performances en particulier la capacité moyenne de service, le taux d'accès moyen au service, la consommation de puissance et l'efficacité énergétique pour évaluer les performances du réseau hybride dans un scénario de coopération. Par la suite, la simulation du réseau hybride a permis de montrer l'existence d'un point de fonctionnement optimal qui dépend de la zone de couverture de la composante de diffusion du réseau hybride. Par ailleurs, les résultats de simulation obtenus ont montré que de telles approches hybrides permettent d'améliorer les performances du réseau de distribution pour la transmission des contenus multimédias sous forme de services linéaires.

L'optimisation des performances du réseau hybride pour la diffusion de services linéaires, qui constitue une partie importante de cette thèse, a été présentée dans les chapitres 4 et 5.

Dans un premier temps, nous avons abordé l'optimisation de la capacité moyenne de service en tenant compte d'une contrainte de taux d'accès au service diffusé (chapitre 4). À partir du modèle de réseau hybride, présenté dans le chapitre 3, nous avons proposé une approche analytique pour déterminer la zone de couverture optimale de la composante de diffusion du réseau hybride qui permet de maximiser la métrique de capacité moyenne de service. L'approche analytique présentée a été validée en comparant les résultats théoriques avec les résultats obtenus par simulation du réseau hybride dans un scénario de coopération. Ainsi, en utilisant le modèle de réseau hybride, nous avons évalué le gain de coopération du scénario simulé et étudié l'impact de la popularité du service (en termes de nombre d'utilisateurs) sur les performances du réseau hybride. Les résultats obtenus ont montré que l'hybridation permet de maximiser la capacité moyenne du réseau hybride pour la transmission des services linéaires. Le gain de capacité que nous avons obtenus dépend des paramètres de planification de la composante de diffusion du réseau hybride et de la répartition des utilisateurs dans la zone de service.

Dans le chapitre 5, nous nous sommes consacrés à l'optimisation énergétique du réseau hybride pour la diffusion de services linéaires. Nous avons ainsi présenté l'optimisation de la consommation de puissance et de l'efficacité énergétique. Comme pour l'optimisation de la capacité moyenne de service, une approche analytique permettant de trouver la zone de couverture optimale de la composante de diffusion du réseau hybride a été proposée. Les résultats obtenus ont montré que l'optimisation de la métrique d'efficacité énergétique constitue un bon compromis entre la maximisation de la capacité moyenne de service et la minimisation de la consommation de puissance du réseau hybride.

En nous basant sur les tendances de consommation des contenus multimédias par les utilisateurs, nous avons présenté, dans le dernier chapitre, une extension du modèle de

réseau hybride pour la diffusion des contenus multimédias sous forme de services non linéaires. Nous avons ainsi présenté la structure globale du modèle de réseau hybride en prenant en compte la diffusion des services linéaires et non linéaires. Dans le but d'évaluer les performances du réseau hybride pour la diffusion des services non linéaires, nous avons introduit une nouvelle métrique de temps de service qui permet de mettre en évidence l'intérêt de la coopération des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion. Par ailleurs, nous avons également proposé un problème d'optimisation de cette nouvelle métrique de temps de service.

Dans un contexte de ré-aménagement et d'harmonisation des ressources spectrales et face à l'explosion de la consommation des contenus multimédias avec les appareils mobiles, le modèle de réseau hybride et l'approche analytique d'optimisation des performances du réseau hybride présentés dans cette thèse constitue un atout précieux pour l'hybridation des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion. En effet, ce modèle pourrait permettre, d'une part d'évaluer le gain des approches hybrides, et d'autre part, de mettre en évidence les scénarios et stratégies de transmission de contenus multimédias les plus avantageux en fonction de critères donnés dans le contexte des réseaux « 4G avancés » voire « 5G ».

Enfin, cette problématique de coopération entre les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion est d'une grande importance pour l'entreprise TDF (anciennement TéléDiffusion de France), puisqu'elle peut impliquer à terme l'exploitation de l'architecture réseaux de diffusion détenue par l'entreprise sous un angle complémentaire à destination d'usages multimédias en mobilité, voire son évolution.

Perspectives

Nous exposons dans cette section quelques perspectives de recherche en étroite liaison avec les travaux menés dans cette thèse.

Diffusion des services linéaires en utilisant une infrastructure de type LPLT Avec l'introduction de la composante de diffusion eMBMS dans la norme LTE, nous avons étudié dans le cadre de cette thèse son utilisation dans un réseau de diffusion standard basé sur une infrastructure de réseaux de type HPHT. Aujourd'hui, la norme eMBMS n'est pas encore déployée mais de nombreuses études sont en train d'être menées sur l'évolution de cette norme. Ces études visent à augmenter les performances et la flexibilité de cette composante de diffusion. Nous pouvons citer à titre d'exemple, les études sur le partage dynamique des ressources spectrales entre les modes de transmission *unicast* et *broadcast (multicast)*. Ainsi, il serait intéressant d'améliorer le modèle de réseau hybride dans ce sens, c'est-à-dire en prenant en compte l'utilisation conjointe des systèmes LTE et eMBMS dans les réseaux cellulaires pour la diffusion des services linéaires. Ceci permettrait d'obtenir un modèle de réseau hybride à deux niveaux de coopération. Dans le premier niveau, il s'agirait d'utiliser les modes de

transmission *unicast* et *broadcast (multicast)* au sein du même réseau cellulaire pour la diffusion des services. Le deuxième niveau consisterait à faire coopérer le réseau cellulaire avec un réseau de diffusion comme présenté dans cette thèse.

Optimisation de la diffusion des services non linéaires Nous avons proposé dans le chapitre 6 une formalisation de la diffusion des contenus multimédias sous forme de services non linéaires. Cette formalisation a permis d'identifier et de poser quelques axes d'études comme l'optimisation du temps moyen de service. En effet, cette démarche d'optimisation permet de mettre en œuvre des stratégies efficaces pour la diffusion des services non linéaires. Ainsi, comme pour l'optimisation des services linéaires, il serait intéressant d'aller plus loin dans la démarche dans le but d'établir une approche analytique permettant d'optimiser le réseau hybride de manière globale. Dans ce contexte, les modèles stochastiques spatiaux, en particulier les processus ponctuels, issus de la théorie de la géométrie aléatoire pourront être exploités pour mettre au point l'optimisation du réseau hybride.

Étude des données statistiques de la popularité des services et de la répartition des utilisateurs Le modèle de réseau hybride présenté dans cette thèse repose sur des données statistiques concernant la popularité des services multimédias et la répartition des utilisateurs dans la zone de service. En l'absence de données statistiques précises, nous avons considéré les deux hypothèses suivantes.

- Les utilisateurs étaient répartis de manière uniforme dans la zone de service considérée.
- Tous les utilisateurs situés dans la zone de service étaient intéressés par les services diffusés. Par conséquent, la popularité d'un service est donnée par le nombre d'utilisateurs dans la zone de service.

Compte tenu de ces hypothèses, un axe d'étude intéressant est la comparaison de ces données utilisées dans la modélisation du réseau hybride avec des données réelles, éventuellement issues de la supervision du comportement des utilisateurs. Ceci permettrait de modéliser avec plus de précision le comportement des utilisateurs qui jouent un rôle important dans l'étude des scénarios de coopération.



PREUVE DES PROPOSITIONS

Nous présentons dans cette annexe le développement des preuves des propositions 5, 6, 7 et 8 présentées dans le cadre de cette thèse.

A.1 Preuve de la proposition 5

La fonction de la puissance consommée par le réseau hybride est donnée par l'équation (3.40),

$$P_{in}^H = P_{in}^{bc} + \sum_{i=1}^{N_{LPLT}} P_{in,i}^{uc}. \quad (\text{A.1})$$

En exprimant la puissance consommée par l'émetteur HPHT en fonction du rayon de son rayon de couverture, nous obtenons

$$P_{in}^H = P_0^{bc} + \Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} r_{bc}^{-\alpha_{bc}} + \sum_{i=1}^{N_{LPLT}} P_{in,i}^{uc}. \quad (\text{A.2})$$

Rappelons que dans le modèle de consommation de puissance utilisé, les cellules LPLT dans la zone de couverture de l'émetteur HPHT sont mises en mode veille afin d'économiser plus d'énergie. Ainsi, la fonction de consommation de puissance du réseau exprimée s'écrit :

$$P_{in}^H = P_0^{bc} + \Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} r_{bc}^{-\alpha_{bc}} + \sum_{i \in \mathcal{N}_{ON}} P_{in,i}^{uc} + \sum_{i \in \mathcal{N}_{sleep}} P_{sleep}^{uc}, \quad (\text{A.3})$$

où \mathcal{N}_{ON} et \mathcal{N}_{sleep} désignent respectivement l'ensemble des émetteurs LPLT allumés et l'ensemble des émetteurs en mode veille. En considérant une répartition uniforme des utilisateurs dans la zone de service nous avons

$$P_{in}^H = P_0^{bc} + \Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} r_{bc}^{-\alpha_{bc}} + \frac{1 - r_{bc}^2}{r_{uc}^2} P_{in,i}^{uc} + \frac{r_{bc}^2}{r_{uc}^2} P_{sleep}^{uc}, \quad (\text{A.4})$$

En factorisant par $\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc}$ dans (A.4), nous obtenons

$$P_{in}^H = \Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} \left(r_{bc}^{\alpha_{bc}} - \frac{P_{in,i}^{uc} - P_{sleep}^{uc}}{\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} r_{uc}^2} r_{bc}^2 + \frac{P_{in,i}^{uc} + P_0^{bc} r_{uc}^2}{\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} r_{uc}^2} \right). \quad (\text{A.5})$$

En posant

$$\theta_{p1} = \frac{P_{in,i}^{uc} - P_{sleep}^{uc}}{\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} r_{uc}^2}, \quad \theta_{p2} = \frac{P_{in,i}^{uc} + P_0^{bc} r_{uc}^2}{\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} r_{uc}^2} \quad (\text{A.6})$$

nous obtenons

$$P_{in}^H(r_{bc}) = \Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} (r_{bc}^{\alpha_{bc}} - \theta_{p1} r_{bc}^2 + \theta_{p2}), \quad (\text{A.7})$$

comme voulu.

A.2 Preuve des propositions 6 et 8

La fonction d'efficacité énergétique est définie par le rapport entre la capacité moyenne de service et la puissance consommée par le réseau hybride. Ainsi, à partir de (4.2) et (5.2), nous pouvons écrire

$$EE^H(r_{bc}) = \frac{M[r_{bc}^2 \mathbb{E}[C_m^{bc}] + (1 - r_{bc}^2) \mathbb{E}[C_m^{uc}] \mathbb{E}[\eta_i^{uc}]]}{\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} (r_{bc}^{\alpha_{bc}} - \theta_{p1} r_{bc}^2 + \theta_{p2})}. \quad (\text{A.8})$$

En factorisant par $\mathbb{E}[C_m^{uc}] \mathbb{E}[\eta_i^{uc}]$, nous obtenons

$$EE^H(r_{bc}) = \frac{M \mathbb{E}[C_m^{uc}] \mathbb{E}[\eta_i^{uc}]}{\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc}} \left[\frac{1 + r_{bc}^2 \left(\frac{\mathbb{E}[C_m^{bc}]}{\mathbb{E}[C_m^{uc}] \mathbb{E}[\eta_i^{uc}]} - 1 \right)}{r_{bc}^{\alpha_{bc}} - \theta_{p1} r_{bc}^2 + \theta_{p2}} \right]. \quad (\text{A.9})$$

Rappelons que la fonction d'efficacité énergétique est optimisée soit en réduisant la puissance totale consommée par le réseau hybride (Approche 1), soit en augmentant la capacité moyenne de service du réseau hybride (Approche 2).

- **Approche 1** : dans cette première approche la capacité de l'émetteur est constante quelque soit le rayon de couverture, ainsi nous avons

$$EE^H(r_{bc}) = \left(\frac{M \mathbb{E}[C_m^{uc}] \mathbb{E}[\eta_i^{uc}]}{\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc}} \right) \frac{1 + \theta_c r_{bc}^2}{r_{bc}^{\alpha_{bc}} - \theta_{p1} r_{bc}^2 + \theta_{p2}}, \quad \forall r_{bc} \in [0, 1] \quad (\text{A.10})$$

où

$$\theta_c = \frac{\mathbb{E}[C_m^{bc}]}{\mathbb{E}[C_m^{uc}] \mathbb{E}[\eta_i^{uc}]} - 1. \quad (\text{A.11})$$

ce qui conclut la démonstration de la proposition 6.

- **Approche 2** : dans cette deuxième approche la puissance de transmission de l'émetteur HPHT est fixe et ne peut pas être ajustée en fonction du rayon de couverture. Ainsi, $r_{bc}^{\alpha_{bc}} = 1$ dans $r_{bc}^{\alpha_{bc}} - \theta_{p1} r_{bc}^2 + \theta_{p2}$, ce qui conduit à

$$EE^H(r_{bc}) = \frac{M[r_{bc}^2 B^{bc} \log_2(1 + \gamma_0^{bc} r_{bc}^{-\alpha_{bc}}) + (1 - r_{bc}^2) \mathbb{E}[C_m^{uc}] \mathbb{E}[\eta_i^{uc}]]}{\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} (1 - \theta_{p1} r_{bc}^2 + \theta_{p2})} \quad (\text{A.12})$$

en posant $c_0 = (\mathbb{E}[C_m^{uc}] \mathbb{E}[\eta_i^{uc}] \ln 2) / B^{bc}$ nous obtenons

$$EE^H(r_{bc}) = \left(\frac{M B^{bc}}{\Delta_p^{bc} P_{tx}^{bc} \ln 2} \right) \frac{r_{bc}^2 \ln(1 + \gamma_0^{bc} r_{bc}^{-\alpha_{bc}}) + (1 - r_{bc}^2) c_0}{(1 - \theta_{p1} r_{bc}^2 + \theta_{p2})} \quad (\text{A.13})$$

ce qui conclut la démonstration de la proposition 8.

A.3 Preuve de la proposition 7

A partir de la figure 5.3 nous pouvons montrer, pour des valeurs pratiques de θ et α_{bc} , que les valeurs prises par la solution $v_0(\theta, \alpha_{bc})$ sont très proches de zero. De plus, nous remarquons que lorsque $\theta \rightarrow 0$, $v_0(\theta, \alpha_{bc}) \rightarrow 0$. Par conséquent, la solution de l'équation (5.11) peut être approximée par la fonction suivante

$$u_0 = \theta^{\frac{1}{\alpha_{bc}-2}}. \quad (\text{A.14})$$

Cependant, une approximation u_1 plus précise de la solution peut être obtenue en appliquant le changement de variable suivant $u_1 = u_0(1 + \varepsilon_0)$, où ε_0 est considérée comme une fonction d'ajustement permettant d'améliorer la précision de l'approximation. Ainsi, en remplaçant u dans l'équation (5.11) par u_1 nous obtenons

$$1 - u_0^2(1 + \varepsilon_0)^2 = (1 + \varepsilon_0)^{-(\alpha_{bc}-2)}. \quad (\text{A.15})$$

Sachant que $u \rightarrow 0$, nous pouvons supposer que $\varepsilon_0 \rightarrow 0$. Ensuite, en utilisant un développement limité à l'ordre 1 de l'équation (A.15), nous pouvons montrer que

$$\varepsilon_0 \sim \frac{u_0^2}{\alpha_{bc} - 2}, \quad (\text{A.16})$$

et en déduire l'expression de u_1 comme suit

$$u_1 = u_0 \left(1 + \frac{u_0^2}{\alpha_{bc} - 2} \right). \quad (\text{A.17})$$

De manière itérative, nous pouvons utiliser la même approche pour affiner l'approximation de la solution, ce qui conduit à

$$u_2 = u_0 \left(1 + \frac{u_0^2}{\alpha_{bc} - 2} + \frac{2u_0^4}{(\alpha_{bc} - 2)^2} \right). \quad (\text{A.18})$$

A titre d'exemple, une approximation générale à l'ordre $n \leq 3$ de la solution $v_0(\theta; \alpha_{bc})$ est donnée par

$$v_0(\theta; \alpha_{bc}) \sim \theta^{\frac{1}{\alpha_{bc}-2}} \left(1 + \sum_{k=0}^{n-1} \frac{k}{(\alpha_{bc} - 2)^k} \theta^{\frac{2k}{\alpha_{bc}-2}} \right). \quad (\text{A.19})$$

LISTE DES ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

1G Première génération de réseaux mobiles.

2G Deuxième génération de réseaux mobiles.

3G Troisième génération de réseaux mobiles.

3GPP 3rd Generation Partnership Project.

4G Quatrième génération de réseaux mobiles.

5G Cinquième génération de réseaux mobiles.

A.M. Modulation d'Amplitude.

AL-FEC Application Layer - Forward Error Correction.

ANR Agence Nationale de la Recherche en France.

ARIB Association of Radio Industries and Businesses.

ATSC Advanced Television Systems Committee.

ATSC-M/H ATSC Mobile Digital Television.

AWGN Additive White Gaussian Noise (modèle de canal).

BCH Code correcteur d'erreurs Bose, Ray-Chaudhuri et Hocquenghem.

BER Taux d'erreur bits.

CBS Common Broadcasting System.

CDMA Code Division Multiple Access.

CEPT European Conference of Postal and Telecommunications Administrations.

CMR Conférence Mondiale des Radiocommunications.

CPHY Common PHYSical layer.

CQI Channel Quality Indicator.

DAB Digital Audio Broadcasting.

DL Downlink.

- DMB** Digital Multimedia Broadcasting.
- DTMB** Digital Terrestrial Multimedia Broadcast.
- DVB** Digital Video Broadcasting.
- DVB-H** Digital Video Broadcasting - Handheld.
- DVB-NGH** Digital Video Broadcasting - Next Generation Handheld.
- DVB-T** Digital Video Broadcasting - Terrestrial.
- DVB-T2** Digital Video Broadcasting - Terrestrial (Second Generation).
- EARTH** Energy Aware Radio and neTwork tecHnologies (projet européen).
- ECC** Electronic Communications Committee.
- EDGE** Enhanced Data rates for GSM Evolution.
- EESM** Exponential Effective SNR Mapping.
- eMBMS** enhanced Multimedia Broadcast Multicast Service.
- ETSI** European Telecommunications Standards Institute.
- FM.** Modulation de Fréquence.
- FDD** Frequency Division Duplex.
- FEF** Future Extension Frame.
- FoBTV** Future of Broadcast TeleVision.
- GPRS** General Packet Radio Service.
- GSM** Global System for Mobile communications.
- HARQ** Hybrid Automatic Repeat reQuest.
- HDTV** High Definition TeleVision.
- HPHT** High Power High Tower.
- HSPA** High Speed Packet Access.
- HSPA+** High Speed Packet Access+.
- IMT-2000** International Mobile Telecommunication - 2000.
- IMT-Advanced** International Mobile Telecommunication - Advanced.
- IP** Internet Protocol.
- ISDB** Integrated Services Digital Broadcasting.
- LDPC** Code correcteur d'erreurs Low-Density Parity-Check.

LLS Link Level Simulations.

LPLT Low Power Low Tower.

LTE Long Term Evolution.

LTE-A Long Term Evolution-Advanced.

M³ Mobile Multi Media, projet ANR.

M2M Machine To Machine.

MBMS Multimedia Broadcast Multicast Service.

Mbps Megabits per second.

MBSFN Multicast Broadcast Single Frequency Network.

MCS Modulation and Coding Scheme.

MediaFlo MediaFlo.

MIESM Mutual Information Effective SNR Mapping.

MIMO Multiple Input Multiple Output.

MISO Multiple Input Single Output.

MMS Multimedia Messaging Service.

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access.

PER Taux d'erreur paquets.

PLP Physical Layer Pipe.

PRB Physical Resource Block.

QoE qualité d'expérience.

QoS qualité de service.

SFN Single Frequency Network.

SISO Single Input Single Output.

SLS System Level Simulations.

SMS Short Message Service.

SNR Rapport signal à bruit.

TDD Time Division Duplex.

TDF anciennement TéléDiffusion de France. Principal opérateur de réseaux de diffusion en France.

TM-CSU Technical Module on Cooperative Spectrum Usage of the UHF spectrum.

TNT Télévision Numérique Terrestre.

TTI Transmission Time Interval.

TUBS université technique de Braunschweig.

UHDTV Ultra High Definition TeleVision.

UHF Ultra High Frequency.

UIT Union Internationale des Télécommunications.

UL Uplink.

UMTS Universal Mobile Telecommunications System.

VHF Very High Frequency.

W-CDMA Wideband Code Division Multiple Access.

WiFi IEEE wireless network 802.11.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CISCO, « Visual networking index : Global mobile data traffic forecast update, 2015-2020 ». White Paper, fév. 2016.
- [2] QuickPlay MEDIA, « 2012 UK mobile tv/video consumption report ». <http://www2.quickplay.com/uk-mobile-tv-video-report>. Accessed : 2016-09-19.
- [3] GOUSSOT LOUIS, LACHARNAY STÉPHANE et NASSE DOMINIQUE, « Télévision - télévision analogique terrestre », consulté le 13 septembre 2016.
- [4] EBU, « Television systems;Enhanced 625-line PAL/SECAM television;Ghost Cancellation Reference (GCR) signals ». ETS Standard, jan. 1997.
- [5] NTSC, « Ntsc signal specifications ». NTSC Standard, déc. 1953.
- [6] ITU-R, « Transition from analogue to digital terrestrial broadcasting ». REPORT, 2008.
- [7] ITU-R, « Error-correction, data framing, modulation and emission methods for digital terrestrial television broadcasting », Recommendation BT.1306-7, International Telecommunication Union, Geneva, juin 2015.
- [8] ITU-R, « Error-correction, data framing, modulation and emission methods for second generation of digital terrestrial television broadcasting systems », Recommendation BT.1877-1, International Telecommunication Union, Geneva, août 2012.
- [9] ATSC, « Atsc standard : Physical layer protocol (a/322) ». ATSC 3.0 Standard, sept. 2016.
- [10] ITU-D, « Digital Dividend : insights for spectrum Decisions ». Report, août 2012.
- [11] Pascal LAMY, « RESULTS OF THE WORK OF THE HIGH LEVEL GROUP ON THE FUTURE USE OF THE UHF BAND (470-790 MHZ) ». REPORT TO THE EUROPEAN COMMISSION, 2014.
- [12] L. FAY, L. MICHAEL, D. GÓMEZ-BARQUERO, N. AMMAR et M. W. CALDWELL, « An overview of the atsc 3.0 physical layer specification », *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 62, n° 1, p. 159–171, March 2016.
- [13] Yannick BOUGUEN, Eric HARDOUIN, François-Xavier WOLFF, Guy PUJOLLE et Alain MALOBERTI, eds., *LTE et les réseaux 4G*. Paris : Eyrolles, 2012. LTE : Long Term Evolution.

- [14] METIS D1.1, « Scenarios, requirements and kpis for 5g mobile and wireless system ». ICT-317669 METIS Deliverable 1.1, avril 2013.
- [15] METIS D6.6, « Final report on the metis 5g system concept and technology roadmap ». ICT-317669 METIS Deliverable 6.6, avril 2015.
- [16] ERICSSON White PAPER, « 5g radio access ». ERICSSON White paper, avril 2016.
- [17] GSMA INTELLIGENCE, « Understanding 5g : Perspectives on future technological advancements in mobile ». GSMA White paper, déc. 2014.
- [18] Groupe DE TRAVAIL :5G EN FRANCE, « Analyse, enjeux et recommandations pour la 5g en france ». white paper, sept. 2014.
- [19] ITU-R, « Broadcasting of multimedia and data applications for mobile reception by handheld receivers », Recommendation BT.1833-3, International Telecommunication Union, Geneva, fév. 2014.
- [20] ITU-R, « Error-correction, data framing, modulation and emission methods for terrestrial multimedia broadcasting for mobile reception using handheld receivers in vhf/uhf bands », Recommendation BT.2016-1, International Telecommunication Union, Geneva, jan. 2013.
- [21] DVB, « Next generation broadcasting system to handheld, physical layer specification (dvb-ngh) ». DVB BlueBook, nov. 2012.
- [22] DVB, « Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (dvb-t2) ». ETSI Standard, juil. 2015.
- [23] DVB, « Digital Video Broadcasting (DVB) ; Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2) », Technical Specification TS 102 831 V1.1.1 (2010-10), ETSI, 2010.
- [24] David GÓMEZ-BARQUERO, *Next Generation Mobile Broadcasting*. CRC Press, 2013.
- [25] Technical Specification Group Radio Access NETWORK, « Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) ;Base Station (BS) radio transmission and reception », 3GPP, Tech. Rep. TS 36.211, 3rd Generation Partnership Project, sept. 2009.
- [26] Technical Specification Group Radio Access NETWORK, « LTE ; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) ;Physical channels and modulation », 3GPP, Tech. Rep. TS 36.211, 3rd Generation Partnership Project, mai 2009.
- [27] ROLAND BRUGGER et ALEXANDER SCHERTZ, « TV DISTRIBUTION VIA CELLULAR NETWORKS PART 1 : SPECTRUM CONSUMPTION », Technical Review Q2 2014, European Broadcasting Union, 2014.

- [28] ROLAND BRUGGER et ALEXANDER SCHERTZ, « TV DISTRIBUTION VIA CELLULAR NETWORKS PART 2 : COST ASPECTS », Technical Review Q2 2014, European Broadcasting Union, 2014.
- [29] HUAWEI, « Whitepaper on Spectrum ». White Paper, fév. 2013.
- [30] ITU-R, « Future spectrum requirements estimate for terrestrial imt », Report M.2290-0, International Telecommunication Union, Geneva, déc. 2013.
- [31] ECC, « Long term vision for the uhf broadcasting band ». ECC Report, 2014.
- [32] European COMMISSION, « Challenges and opportunities of broadcast-broadband convergence and its impact on spectrum and network use (smart 2013/0014) ». Workshop, 2014.
- [33] DVB PROJECT, « Dvb study mission on cooperative spectrum use ». DVB-TM-CSU, 2013.
- [34] Aurelian BRIA, *Mobile Multimedia Multicasting in Future Wireless Systems : A Hybrid Cellular-Broadcasting System Approach*. Thèse de doctorat, 2008.
- [35] Nicolas CORNILLET, *Convergence des réseaux de télécommunications mobiles et de télédiffusion : modélisation et évaluation des performances d'un réseau hybride LTE/DVB-T2*. phdthesis, INSA de Rennes, déc. 2013.
- [36] JORGE CALABUIG GASPAS, *Broadcasting in 4G mobile broadband networks and its evolution towards 5G*. Thèse de doctorat, 2015.
- [37] Amal ABDEL-RAZZAC, *Cooperation between LTE and emergent DVB technologies for an efficient delivery of mobile TV*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2015.
- [38] MARIE-LINE ALBERI-MOREL, ALCATEL LUCENT BELL LABS FRANCE, CHRISTELLE BOUSTIE, CNES, ARNAUD BOUTTIER, MERCE, LOÏC BRUNEL, MERCE, THIERRY CLESSIENNE, FRANCE TELECOM, NICOLAS CORNILLET, IETR-INSA, MATTHIEU CRUSSIÈRE, IETR-INSA, CATHERINE DOUILLARD, TELECOM BRETAGNE, XENOFON DOUKOPOULOS, DIBCOM, GÉRARD FARIA, TEAMCAST, MARIE LE BOT, FRANCE TELECOM, HAO LIN, FRANCE TELECOM, PHILIPPE ROQUIN, FRANCE TELECOM et OLIVIER ROUSSET, TEAMCAST, « D21.2 - ANALYSIS ON 3GPP E-MBMS/DVB-NGH CONVERGENCE ». Deliverable D21.2 ANR Project Mobile Multimedia, 2012.
- [39] M. CRUSSIÈRE, C. DOUILLARD, C. GALLARD, M. Le BOT, B. ROS, A. BOUTTIER et A. UNTERSEE, « A unified broadcast layer for horizon 2020 delivery of multimedia services », *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 60, n° 2, p. 193–207, June 2014.
- [40] U. REIMERS, « DTT Quo Vadis - Germany as a case study ». EBU Technical Review, 2013.

- [41] A. GHOSH, R. RATASUK, B. MONDAL, N. MANGALVEDHE et T. THOMAS, « Lte-advanced : next-generation wireless broadband technology [invited paper] », *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, n° 3, p. 10–22, June 2010.
- [42] Junge QI, Peter NEUMANN et Ulrich REIMERS, « Dynamic broadcast », in *14th ITG Conference on Electronic Media Technology (CEMT)*, p. 1–6, 2011.
- [43] Peter NEUMANN et Ulrich REIMERS, « Live and time-shifted content delivery for dynamic broadcast : terminal aspects », in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 58, p. 53–59, 2012.
- [44] TDF et RAI, « Lancement simultané des 1ers essais mondiaux de diffusion broadcast par LTE-A+ depuis Paris et Aoste (Italie) ». Consulté le 21-10-2016.
- [45] D. GOMEZ-BARQUERO et A. BRIA, « Repair mechanisms for broadcast transmissions in hybrid cellular and dvb-h systems », in *2006 3rd International Symposium on Wireless Communication Systems*, p. 398–402, Sept 2006.
- [46] D. GÓMEZ-BARQUERO, N. CARDONA, A. BRIA et J. ZANDER, « Affordable mobile tv services in hybrid cellular and dvb-h systems », *IEEE Network*, vol. 21, n° 2, p. 34–40, March 2007.
- [47] K. WANG, Z. CHEN et H. LIU, « Push-based wireless converged networks for massive multimedia content delivery », *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, n° 5, p. 2894–2905, May 2014.
- [48] Peter UNGER et Thomas KÜRNER, « Radio network planning of DVB-H/UMTS hybrid mobile communication networks », *European transactions on telecommunications*, vol. 17, n° 2, p. 193–201, 2006.
- [49] M. L. POPOVIĆ, M. M. ŠUNJEVARIĆ et Ž J. VUJASINOVIĆ, « Effects of dvb-h and 3g cellular networks integration », in *Telecommunication in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services (TELSIKS), 2011 10th International Conference on*, vol. 2, p. 641–644, Oct 2011.
- [50] J. CALABUIG, J. F. MONSERRAT et D. GÓMEZ-BARQUERO, « 5th generation mobile networks : A new opportunity for the convergence of mobile broadband and broadcast services », *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, n° 2, p. 198–205, Feb 2015.
- [51] Rajiv HAZARAY, « The Economic Value of Broadcast Innovation - Impact on the U.S. Treasury ». Social Science Research Network (SSRN), nov. 2011.
- [52] D. ROTHER, S. ILSSEN et F. JURETZEK, « A software defined radio based implementation of the tower overlay over lte-a system », in *2014 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, p. 1–6, June 2014.

- [53] C. HEUCK, « An analytical approach for performance evaluation of hybrid (broadcast/-mobile) networks », *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 56, n^o 1, p. 9–18, March 2010.
- [54] Peter UNGER et Thomas KÜRNER, « Modeling and performance analyses of hybrid cellular and broadcasting networks », *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, vol. 2009, n^o 10.1155/2009/329073, Article ID 329073, 9 pages, 2009.
- [55] N. CORNILLET, M. CRUSSIÈRE et J. F. HÉLARD, « On the hybrid use of unicast/broadcast networks under energy criterion », in *2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - (PIMRC)*, p. 1256–1261, Sept 2012.
- [56] A. A. RAZZAC, S. E. ELAYOUBI, T. CHAHED et B. EL HASSAN, « Planning of mobile tv service in standalone and cooperative dvb-ngh and lte networks », in *Modeling Optimization in Mobile, Ad Hoc Wireless Networks (WiOpt), 2013 11th International Symposium on*, p. 609–614, May 2013.
- [57] U. MEABE, X. GIL, C. LI, M. VÉLEZ et P. ANGUEIRA, « On the coverage and cost of hpht versus lplt networks for rooftop, portable, and mobile broadcast services delivery », *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 61, n^o 2, p. 133–141, June 2015.
- [58] A. A. RAZZAC, S. E. ELAYOUBI, T. CHAHED et B. EL-HASSAN, « Comparison of lte embms and dvb-ngh mobile tv solutions from an energy consumption perspective », in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops), 2013 IEEE 24th International Symposium on*, p. 16–20, Sept 2013.
- [59] L. RONG, O. B. HADDADA et S. E. ELAYOUBI, « Analytical analysis of the coverage of a mbsfn ofdma network », in *IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference*, p. 1–5, Nov 2008.
- [60] O. ARNOLD, F. RICHTER, G. FETTWEIS et O. BLUME, « Power consumption modeling of different base station types in heterogeneous cellular networks », in *2010 Future Network Mobile Summit*, p. 1–8, juin 2010.
- [61] C. HAN, T. HARROLD, S. ARMOUR, I. KRIKIDIS, S. VIDEV, P. M. GRANT, H. HAAS, J. S. THOMPSON, I. KU, C. X. WANG, T. A. LE, M. R. NAKHAI, J. ZHANG et L. HANZO, « Green radio : radio techniques to enable energy-efficient wireless networks », *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, n^o 6, p. 46–54, juin 2011.
- [62] Gunther AUER, Oliver BLUME, Vito GIANNINI, Istvan Godor ETH, Muhammad Ali IMRAN, Ylva Jading EAB, Efstathios KATRANARAS, Magnus Olsson EAB, Dario Sabella TI, Per Skillermark EAB et OTHERS, « Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown ». INFISO-ICT-247733 EARTH, déc. 2010.
- [63] C. DESSET, B. DEBAILLIE, V. GIANNINI, A. FEHSKE, G. AUER, H. HOLTKAMP, W. WAJDA, D. SABELLA, F. RICHTER, M. J. GONZALEZ, H. KLESSIG, I. GÓDOR, M. OLSSON, M. A. IMRAN,

- A. AMBROSY et O. BLUME, « Flexible power modeling of lte base stations », in *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, p. 2858–2862, April 2012.
- [64] Y. N. R. LI, J. LI, H. WU et W. ZHANG, « Energy efficient small cell operation under ultra dense cloud radio access networks », in *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, p. 1120–1125, Dec 2014.
- [65] EURO-COST 231, « Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900 and 1800 MHz Bands ». Report, sept. 1991.
- [66] EURO-COST 231, « Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems ». COST 231 Final report.
- [67] Y. OKUMURA, E. OHMORI, T. KAWANO et K. FUKUDA, « Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service », *Review of the Electrical Communication Laboratory*, vol. 16, n° 9-10, p. 825–873, 1968.
- [68] M. HATA, « Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 29, n° 3, p. 317–325, Aug 1980.
- [69] EBU, « Frequency and network planning aspects of DVB-T2 ». EBU Technical Report, oct. 2014.
- [70] D. ZWILLINGER, *Table of Integrals, Series, and Products*. Elsevier Science, 2014.
- [71] K. BRUENINGHAUS, D. ASTELY, T. SALZER, S. VISURI, A. ALEXIOU, S. KARGER et G. A. SE-RAJI, « Link performance models for system level simulations of broadband radio access systems », in *2005 IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 4, p. 2306–2311 Vol. 4, Sept 2005.
- [72] Lei WAN, Shiauhe TSAI et M. ALMGREN, « A fading-insensitive performance metric for a unified link quality model », in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006.*, vol. 4, p. 2110–2114, April 2006.
- [73] J. C. IKUNO, S. PENDL, M. ŠIMKO et M. RUPP, « Accurate sinr estimation model for system level simulation of lte networks », in *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, p. 1471–1475, June 2012.
- [74] Josep Colom IKUNO, *System level modeling and optimization of the LTE downlink*. Thèse de doctorat, na, 2013.
- [75] J.C. IKUNO, M. WRULICH et M. RUPP, « System Level Simulation of LTE Networks », in *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), 2010 IEEE 71st*, p. 1–5, 2010.
- [76] M. TARANETZ, T. BLAZEK, T. KROPFREITER, M. K. MÜLLER, S. SCHWARZ et M. RUPP, « Runtime precoding : Enabling multipoint transmission in lte-advanced system-level simulations », *IEEE Access*, vol. 3, p. 725–736, 2015.

- [77] P. A. FAM, M. CRUSSIÈRE, J. F. HÉLARD, P. BRÉTILLON et S. PAQUELET, « Global throughput maximization of a hybrid unicast-broadcast network for linear services », in *2015 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, p. 146–150, Aug 2015.
- [78] C. MEHLFÜHRER, M. WRULICH, J. C. IKUNO, D. BOSANSKA et M. RUPP, « Simulating the long term evolution physical layer », in *Signal Processing Conference, 2009 17th European*, p. 1471–1478, Aug 2009.
- [79] 3GPP, « LTE;Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) ; Physical layer procedures ; », TS 36.213, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), avril 2015.
- [80] P. A. FAM, S. PAQUELET, M. CRUSSIÈRE, J. F. HÉLARD et P. BRÉTILLON, « Analytical derivation and optimization of a hybrid unicast-broadcast network for linear services », *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. PP, n° 99, p. 1–13, 2016.
- [81] P. A. FAM, S. PAQUELET, M. CRUSSIÈRE, J. F. HÉLARD et P. BRÉTILLON, « Optimal capacity of hybrid unicast-broadcast networks for mobile tv services », in *2016 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, p. 1–5, June 2016.
- [82] P. A. FAM, S. PAQUELET, M. CRUSSIÈRE, J. F. HÉLARD et P. BRÉTILLON, « On The Energy Efficiency of Hybrid Unicast-Broadcast Networks for Mobile TV Services », in *Journée Scientifique URSI-France 2016 Energie et Radiosciences*, ACTES DES JOURNEES SCIENTIFIQUES URSI 2016, mars 2016.
- [83] Alexandru-Florin TATAR, *Predicting User-Centric Behavior : mobility and content popularity*. Theses, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, juil. 2014.
- [84] M. AMMAR et J. WONG, « On the optimality of cyclic transmission in teletext systems », *IEEE Transactions on Communications*, vol. 35, n° 1, p. 68–73, Jan 1987.
- [85] Nitin H VAIDYA et Sohail HAMEED, « Scheduling data broadcast in asymmetric communication environments », *Wireless Networks*, vol. 5, n° 3, p. 171–182, 1999.
- [86] M. CHIPETA, M. KARALIOPOULOS, B. G. EVANS et R. TAFAZOLLI, « On the use of packet-level fec and data carousels for the delivery of broadcast/multicast services to mobile terminals », in *2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, vol. 4, p. 2394–2399 Vol. 4, May 2005.
- [87] Wang YAFENG, Zhang LEI et Yang DACHENG, « Performance analysis of type iii harq with turbo codes », in *The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring*, vol. 4, p. 2740–2744 vol.4, April 2003.
- [88] YOUTUBE, « YouTube statistics ». Consulté le 02-12-2016.

AVIS DU JURY SUR LA REPRODUCTION DE LA THESE SOUTENUE

Titre de la thèse:

Modélisation, analyse et optimisation de réseaux hybrides unicast-broadcast pour la diffusion de services multimédias linéaires et non-linéaires

Nom Prénom de l'auteur : FAM PAPE ABDOULAYE

Membres du jury :

- Monsieur REIMERS Ulrich
- Monsieur DUHAMEL Pierre
- Monsieur BRETILLON Pierre
- Monsieur HELARD Jean-François
- Monsieur CRUSSIÈRE Matthieu
- Madame DOUILLARD Catherine
- Monsieur LE RUYET Didier

Président du jury : *Pierre Duhamel*

Date de la soutenance : 09 Février 2017

Reproduction de la these soutenue

Thèse pouvant être reproduite en l'état
~~Thèse pouvant être reproduite après corrections suggérées.~~

Fait à Rennes, le 09 Février 2017

Signature du président de jury

Le Directeur,


M'hamed DRISSI





Résumé

L'émergence des utilisateurs mobiles et la popularité croissante des services multimédias linéaires ont entraîné, ces dernières années, une augmentation impressionnante du trafic de données au sein des réseaux mobiles. En effet, le principal moteur de cette croissance est lié à la consommation de contenus vidéo de façon linéaire (télévision) ou non (vidéo à la demande) par de nombreux utilisateurs sur des appareils mobiles (tablettes, smartphones, ordinateurs portables, etc.) connectés aux réseaux cellulaires. Cependant, l'acheminement de ce trafic via le mode de transmission unicast traditionnel des réseaux cellulaires risque de générer un engorgement rapide du réseau au détriment de la qualité du service rendu. Ainsi, pour faire face cette demande continuellement croissante en débit des utilisateurs mobiles et devant la raréfaction croissante du spectre radioélectrique, les opérateurs n'ont d'autre choix que de densifier leurs infrastructures d'accès au réseau radio (RAN) et déployer des réseaux d'accès hétérogènes et hybrides exploitant plusieurs technologies (WiFi/small cells (3G/4G)) permettant le délestage du trafic de données mobiles. Dans cette optique, cette thèse porte sur la modélisation et l'optimisation d'un réseau hybride de diffusion de contenus multimédias pouvant exploiter de façon complémentaire deux infrastructures réseaux existantes et radicalement différentes, à savoir les réseaux cellulaires (LTE) et les réseaux de diffusion (DVB-T2 Lite, DVB-NGH ou éventuellement le mode broadcast LTE-eMBMS).

Dans un premier temps nous nous consacrons à la modélisation et à la simulation du réseau hybride en considérant un scénario d'extension de couverture, où les deux réseaux coopèrent pour distribuer des services linéaires aux utilisateurs mobiles. A l'aide d'un simulateur système, nous évaluons les performances du réseau hybride en termes de capacité, consommation de puissance et efficacité énergétique.

Dans un second temps, nous nous intéressons à l'optimisation de la capacité, de la consommation énergétique et de l'efficacité énergétique du réseau hybride pour la diffusion de ces services linéaires. Sur la base du modèle hybride, nous proposons une approche théorique, basée sur la distribution des utilisateurs, pour trouver une expression analytique de la zone de couverture optimale du réseau de diffusion tout en tenant compte de la qualité du service rendu aux utilisateurs. Les résultats théoriques et ceux obtenus à l'aide du simulateur système sont très proches. Nous étudions également l'impact de la popularité du service (en termes de nombre d'utilisateurs demandant le service) sur cette zone de couverture optimale.

Enfin, nous proposons une extension au modèle de réseau hybride pour la diffusion des services non linéaires comme la vidéo à la demande, le téléchargement de fichiers, etc. Nous proposons une formalisation du problème d'optimisation en tenant compte des contraintes liées à ces services non-linéaires, en particulier le temps d'attente et de téléchargement ainsi que la fiabilité des transmissions radios.

L'approche analytique proposée dans cette thèse constitue un atout précieux pour l'hybridation des réseaux cellulaires et des réseaux de diffusion. Ce modèle pourrait également permettre, d'une part d'évaluer le gain de telles approches hybrides, et d'autre part, de mettre en évidence les scénarios et stratégies de transmission de contenus multimédias les plus avantageux en fonction de critères donnés dans le contexte des réseaux « 4G avancés » voire « 5G ».

Abstract

The increasing popularity of linear multimedia services such as mobile TV, broadcasting live and sports events to mobile and portable devices, has led to a dramatic growth of the mobile data traffic. Indeed, the reason of this growth is related to the consumption of video content either as a linear service (live TV) or as a non-linear service (time-shifted or on demand), by many users on different devices (tablets, smartphones, laptops, etc.) connected to a cellular network. In cellular networks, these types of services are usually delivered over unicast connections, i.e. as many times as the number of users. This strategy is likely to lead to critical situations, e.g. network congestion at the expense of the quality of service. Thus, to deal with this mobile data traffic explosion and the lack of frequency bands, operators need to densify their radio access network infrastructure (RAN) and deploy heterogeneous and hybrid access networks using multiple technologies (WiFi / small cell (3G / 4G)), that enable data offloading.

In this context, this thesis focuses on the definition and optimization of a hybrid network, where a unicast network (LTE) and a broadcast network (DVB-T2 Lite, DVB-NGH, LTE-eMBMS, etc.) cooperate to deliver multimedia content to mobile and portable devices.

Firstly, we focus on the modeling and simulation of the hybrid unicast-broadcast network for the delivery of linear services. We consider a coverage extension scenario, where the coverage area of the broadcast network can be adjusted with respect to the distribution of the users and the number of users requesting the service. Using the TU-Wien system level simulator, we evaluate the performance of the hybrid network in terms of capacity, power consumption and energy efficiency.

Secondly, with the proposed model, we provide a theoretical method to find an analytical expression of the broadcast coverage area that optimizes the service capacity, the power consumption and the energy efficiency of the hybrid network with respect to the quality of service requirements. Indeed, the theoretical results are in agreements with the simulation ones. Based on the proposed model, we analyze the impact of the number of users requesting the service on the optimal broadcast coverage area.

Finally, we focus on the extension of the proposed hybrid network for the delivery of the non-linear services such as video on demand and file download services. We state an optimization problem regarding the constraints of these non-linear services, especially the waiting and downloading time and the transmission errors.

This thesis provides great insights on the potential benefits that such hybrid approaches may bring in a context of "4G advanced" and "5G" networks where the UHF broadcasting spectrum is under pressure for being partly or completely attributed to mobile broadband operators due to the predicted explosion of the mobile data traffic.

Utiliser la police Arial Taille 9 dans les champs texte « résumé » et « abstract » - Texte justifié -
Ne pas dépasser le nombre de caractères des cadres de texte ci-dessus.
Ne pas modifier la taille des cadres de texte