

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère De l'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique
Université A/MIRA-Bejaia

Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique



Mémoire de MASTER

Filière : TELECOMMUNICATION

Option : Réseaux et Télécommunications

Thème

**Sélection du Mode de Communication D2D/D2I
dans les Réseaux 5G/LTE**

Réalisé par : AZNI Cilia

Soutenu le 27/06/2019, devant le jury composé de :

N. BENAMIROUCHE,	Encadreur
Mr. M. TOUNSI,	Président
Mme S. GHENAM,	Examinatrice

Année universitaire : 2018/2019

A mes parents
A mon frère Ferhat

Remerciements

Je voudrais d'abord remercier Monsieur BENAMIROUCHE, Maître de conférences au département de Génie Électrique de l'Université A. MIRA de Bejaia, d'avoir bien voulu diriger ce mémoire.

Je remercie également tous les enseignants du département de Génie Électrique qui ont contribué à ma formation.

Enfin, je remercie mes parents pour leur soutien durant toute ma formation.

Table des matières

Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
1 Architecture et fondements des réseaux mobiles 4G/LTE	3
1.1 Introduction	3
1.2 Caractéristiques du réseau LTE	3
1.3 Architecture physique du réseau LTE	4
1.3.1 Le User Equipement (UE)	4
1.3.2 Le réseau d'accès E-UTRAN	5
1.3.3 Le réseau coeur EPC	6
1.4 Architecture protocolaire du réseau LTE	7
1.5 Techniques d'accès dans le réseau LTE	10
1.5.1 Principe de l'OFDM	10
1.5.2 Principe de l'OFDMA	11
1.5.3 Le SC-FDMA	12
1.6 Allocation de ressources radio	13
1.6.1 Dimension temporelle	13
1.6.2 Dimension fréquentielle	14
1.6.3 Dimension spatiale	15
1.6.4 Stratégies de scheduling	15
1.7 Conclusion	16
2 Extension de l'Architecture 4G/LTE : La Technologie D2D	17

2.1	Introduction	17
2.2	Principe général de la communication D2D	17
2.3	Architecture étendue 4G/LTE	18
2.4	Classifications des communications D2D	20
2.4.1	D2D Management	20
2.4.1.1	D2D control	21
2.4.1.2	D2D discovery	22
2.4.2	D2D scenarios	22
2.4.2.1	La couverture	22
2.4.2.2	Type de communications D2D	23
2.4.2.3	Zone de communication D2D	23
2.4.2.4	Relayage	23
2.4.3	Radio Resource Management (RRM)	24
2.4.3.1	Mode de duplexage et réutilisation des ressources	25
2.4.3.2	Mode de communication	25
2.4.3.3	Classification des interférences	26
2.5	Sélection du mode de communication	28
2.5.1	Mode de sélection statique	28
2.5.2	Mode de sélection dynamique	28
2.6	Atténuation des interférences	31
2.6.1	Atténuation des interférences causées par les communications D2D	31
2.6.2	Atténuation des interférences causées par les CUE aux DUE	32
2.6.3	Atténuation des interférences mutuelles entre CUE et DUE	33
2.6.4	Atténuation des interférences entre les paires D2D	35
2.7	Conclusion	36
3	Performances de la technologie D2D	37
3.1	Introduction	37
3.2	L'environnement de simulation réseaux ns-3	37
3.2.1	Mise en place de l'environnement ns-3	38
3.2.2	Classes de base du langage ns-3	38

3.3	Intégration de la technologie D2D dans le module LTE de ns-3	39
3.4	Simulations et performances	40
3.4.1	Direct Discovery	40
3.4.2	Direct Communication	41
3.4.2.1	Probabilité de collision sur PSCCH	42
3.4.2.2	Débit sur PSSCH	42
3.4.3	Synchronisation	43
3.5	Conclusion	44
	Bibliographie	47

Liste des figures

1.1	Architecture physique d'un réseau LTE	5
1.2	Architecture protocolaire d'un réseau LTE	8
1.3	Schéma d'un modulateur OFDM	10
1.4	Nomenclature des ressources radio dans le réseau LTE	12
2.1	Architecture physique d'un réseau LTE supportant le D2D	18
2.2	D2D Management	20
2.3	D2D Scenarios	23
2.4	Gestion des ressources radio	24
2.5	Classification des interférences dans les communications D2D	26
2.6	Selection du mode de communication, basée sur la perte de trajet	29
2.7	Selection de mode du point de vue d'une communication cellulaire	30
2.8	Selection de mode d'un point de vu d'une communication D2D	30
2.9	Atténuation des interferences grace au contrôle de puissance	32
2.10	Atténuation des interferences subies par les DUE	33
2.11	Attenuation des interferences mutuelles entre DUE et CUE grace à la technique FFR	34
2.12	Atténuation des interferences entres paires D2D	36
3.1	CDF en fonction du nombre de périodes requises par Direct Discovery	41
3.2	Probabilité de collision sur PSCCH pour deux configurations de ressources	42
3.3	Débit de communications D2D sur PSSCH en fonction des ressources allouées	43
3.4	Classification des interférences dans les communications D2D	44

Liste des tableaux

3.1 Paramètres de simulation de débit	43
---	----

liste des abreviations

LTE	Long Term Evolution.
UE	User Equipement.
VoIP	Voice Over IP
EPC	Evolved Packet Core.
eNB	Evolved NodeB.
NAS	Non Access Stratum.
S-GW	Serving Gateway.
MME	Mobility Management Entity.
3GPP	Third Generation Partnership Project.
P-GW	Packet Data Network Gateway.
QoS	Quality Of Service.
P2P	Peer-to-Peer.
HSS	Home Subscriber Subsystem.
PCRF	Policy and Charging Rules Function.
RRC	Radio Resource Control.
PDCP	Packet Data Convergence Protocol.
RLC	Radio Link Control.
MAC	Medium Access Control.
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access.
IDFFT	Inverse Direct Fast Fourier Transform.
TTI	Transmission Time Interval.
RB	Ressource Block.
DFT	Discret Fourier Transform.
MIMO	Multiple Input Multiple Output.
PRB	Physical Ressource Block.
ICIC	Iner-Cell Interference Coordination.
D2D	Device-to-Device.
D2I	Device to Interface.

ProSe	Proximity Based Service.
D2MD	Device to Multi-Device.
UL	Up Link.
DL	Down Link.
DUE	Device to Device User Equipment.
CUE	Cellular User Equipment.
PL	Path Loss.
RRA	Radio Ressource Allocation.
SINR	Signal to Interference Noise Ratio.
FFR	Fractional Frequency Reuse.
API	Application Programming Interface.
SIB	System Information Block.
PSDCH	Physical Sidelink Discovery Channel.
CDF	Cumulative Distribution Function.
PSCCH	Physical Sidelink Control Channel.
MCS	Modulation and Coding Scheme.
PSSCH	Physical Sidelink Shared Channel.

Introduction

L'avènement et le déploiement des réseaux LTE a marqué un tournant dans le domaine des réseaux mobiles, tant ils offrent des avancées considérables en comparaison avec les technologies précédentes. Les plus remarquables de ces avancées étant, des débits élevés allant jusqu'à 100 Mb/s en voie descendante, une connexion permanente aux réseaux, une réduction du délai de transmission et bien d'autres caractéristiques que nous verrons plus loin dans ce mémoire, Ce qui a contribué au développement d'applications de plus en plus exigeantes en termes de ressources. Ajoutons à cela une augmentation très rapide du nombre d'appareils connectés et à la démocratisation de l'internet des objets, et un nombre d'utilisateurs croissant, les réseaux LTE doivent aujourd'hui faire face au challenge de continuer à fournir la très bonne qualité de communication pour laquelle ils ont été développés, et ce pour un nombre d'utilisateurs de plus en plus grand. Parmi les solutions que le 3GPP envisage pour répondre à cette problématique, il y a l'exploitation du "sidelink" appelé aussi, communication D2D (device to device), pour diminuer la charge qui incombe au réseau de l'opérateur.

Les communications directes, sont en réalité déjà largement utilisées, c'est par exemple le cas en Bluetooth ou du WiFi direct, mais pour être capable de mettre ce concept en œuvre dans les réseaux LTE, nous devons prendre en considération plusieurs autres contraintes que les technologies précédemment mentionnées n'ont pas. Il faut entre autres, pouvoir facturer ses communications, authentifier les parties qui y participent, assurer une qualité de service raisonnable et éviter que des interférences surviennent entre les communications D2D et cellulaires.

Dans ce projet de fin d'étude, nous nous proposons d'étudier D2D qui a été introduite comme évolution dans la technologie des réseaux cellulaires de quatrième génération LTE-A. Le mémoire est structuré en 3 chapitres plus cette introduction et une conclusion.

Le premier sera consacré à la présentation des réseaux LTE, nous présenterons leurs caractéristiques, leurs architectures physiques et nous discuterons brièvement des composantes de celle-ci, nous verrons également leurs architectures protocolaires

en détaillant certaines des couches les plus importante, on passera en suite aux techniques d'accès employées au sein des réseaux LTE, ou nous présenterons le principe du OFDM, du FDMA ainsi que SC-FDMA, et terminerons par un description de la façon dont les ressources sont partagées entre les utilisateurs , et introduirons le principe de scheduling et ainsi que certains des scheduler les plus connus.

Dans le deuxième chapitre, nous introduirons le principe de la communications D2D, nous verons l'architecture d'un réseau LTE destiné a prendre en charge des communications D2D et décrirons les élément qui lui ont été rajouter a cet effet, nous donnerons les différentes catégories selon les quelles les communications D2D peuvent être classées, nous parlerons de la sélection du mode de communication, dans quel mesure et selon qu'elle critères un mode doit-il être choisi, nous verons également les types d'interférences pouvant survenir dans un réseau supportant le D2D et les différentes techniques pouvant être mises en places pour les atténuer.

Dans le 3ème chapitre nous présenterons le simulateur de réseaux ns-3, car c'est lui que nous utiliserons pour réaliser nos simulations. Nous verons les changements qu'il faudra apporter au classes existantes déjà dans les bibliothèques ns-3, qui sont dédiées aux simulations de réseaux LTE, pour leurs permettre de prendre en charge les simulations de communications D2D. Nous donnerons les résultats des simulations que nous avons effectuées, et nous les interpréterons.

Architecture et fondements des réseaux mobiles 4G/LTE

1.1 Introduction

Nous allons dans ce chapitre donner une vue globale d'un réseau de quatrième génération 4G-LTE (Long Term Evolution) et ses caractéristiques. Nous présenterons d'abord l'architecture physique où nous donnerons une brève présentation des composants qui le forment, puis nous décrirons l'architecture protocolaire d'un tel réseau. Nous étudierons aussi la technique d'accès utilisée, ainsi que la manière dont les ressources du réseau sont partagées entre les utilisateurs.

1.2 Caractéristiques du réseau LTE

Le réseau LTE est caractérisé par quelques éléments fondamentaux qui le distinguent des réseaux des générations qui le précèdent. Nous pouvons citer les caractéristiques suivantes [1] :

- **Connexion permanente** : bien que la connexion soit permanente au niveau du réseau, il est nécessaire pour le terminal de passer de l'état IDLE à l'état ACTIF lorsqu'il veut échanger du trafic avec les autres terminaux. Ce changement d'état se réalise en moins de 100 ms. Le principe de ce réseau est qu'il peut recevoir du trafic de tout terminal rattaché, puisque ce dernier dispose d'une adresse IP (Internet Protocol).
- **Délai pour la transmission de données** : le délai pour la transmission de données est de moins de 5 ms entre un équipement utilisateur, qu'on désigne ici par UE (User Equipment) et la passerelle d'accès dans une situation de

non-charge, où un seul terminal est actif sur l'interface radio ; le délai sera de 25 ms dans une situation de charge moyenne. Ainsi, il permet de supporter le service temps réel tel que la VoIP (Voice over IP) et le streaming.

- **La mobilité** : le réseau LTE assure le bon déroulement du handover à des vitesses allant de 120 à 350 Km/h. Notons que LTE ne permet que le hard handover et pas le soft handover dans les cas où l'utilisateur se déplace à grande vitesse.
- **Flexibilité dans l'usage des bandes de fréquences** : la technologie LTE offre la possibilité et la flexibilité d'opérer des allocations de bandes de fréquences de différentes tailles dont 1.25, 2.5, 5, 10, 15, 20 MHz.
- **Haut débit** : LTE offre des débits allant jusqu'à 100 Mbit/s sur la voie descendante et de 50 Mbit/s sur la montante.

1.3 Architecture physique du réseau LTE

L'architecture physique des réseaux LTE/EPC est composée de trois parties logiques fondamentales, comme le montre la figure 1.1. Ces trois parties sont [1] [2] :

1. L'équipement utilisateur, appelé *User Equipment* (UE) ;
2. Le réseau d'accès, appelé *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) ;
3. Le réseau coeur, ou *Evolved Packet Core* (EPC).

1.3.1 Le User Equipement (UE)

En LTE l'équipement utilisateur se compose des deux parties suivantes :

1. **L'équipement terminal** : désigne l'élément physique sur lequel l'utilisateur accède aux services du réseau mobile. Il peut s'agir d'un ordinateur, d'un téléphone portable ou tout autre équipement pouvant accéder au réseau mobile.
2. **L'équipement mobile** : il assure la gestion de la connexion avec le réseau mobile et la continuité de service en mobilité, de façon transparente pour l'équipement terminal. C'est donc cet équipement qui met en oeuvre les protocoles et mécanismes propres à la technologie mobile utilisée.

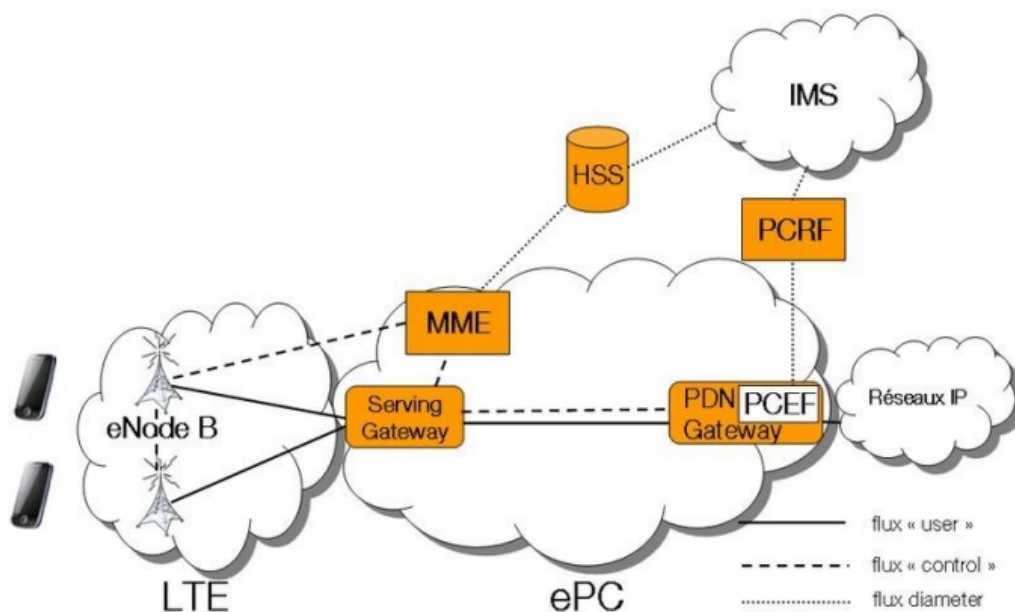


Figure 1.1 : Architecture physique d'un réseau LTE

1.3.2 Le réseau d'accès E-UTRAN

Le réseau d'accès en LTE est appelé E-UTRAN ; il prend en charge la communication entre l'équipement utilisateur UE et le réseau coeur EPC. Il est composé d'un seul équipement qui est appelé l'eNodeB ou eNB (evolved NodeB). Chaque eNB est une station de base qui contrôle les mobiles dans une ou plusieurs cellules. Les eNB communiquent avec l'EPC grâce à l'interface S1 et peut se connecter aux autres stations de base voisines via l'interface X2, qui est principalement utilisée pour la signalisation et la transmission de paquets durant les handover. Dans les réseaux LTE il n'existe pas de contrôleur de stations de base ; cette architecture est dite plate. Le choix de se passer du contrôleur de stations de bases vise à diminuer la latence du système. Cette décision a des répercussions importantes sur la complexité des eNodeB et du réseau coeur car ils doivent désormais assurer de nombreuses tâches qui étaient prises en charge par le contrôleur de stations de bases [2] [3].

1.3.3 Le réseau coeur EPC

Le réseau coeur est l'interface entre le réseau mobile LTE et le réseau internet. Contrairement aux réseaux 2G et 3G qui utilisent la commutation de circuits et la commutation de paquets, le réseau coeur EPC offre tous ses services sur IP. Il assure les fonctions suivantes :

- l'enregistrement et la mise à jour de la position de l'UE ;
- l'authentification de l'UE ;
- la sécurité de niveau NAS (Non Access Stratum) ;
- la gestion des appels ;
- l'établissement des bearers (supports logiques de transmission).

Voici le rôle des noeuds logiques de l'EPC [1] [4] :

Le S-GW (Serving Gateway) : tous les paquets IP à destination de l'utilisateur traversent le S-GW qui sert de point d'ancrage pour les bearers de données lorsque l'UE est en mobilité entre plusieurs eNodeB. La S-GW conserve également des contextes sur les bearers de l'UE lorsqu'il est en veille. Si elle reçoit des données à destination d'un UE en veille, elle contacte alors le MME (Mobility Management Entity) pour notifier l'UE et rétablir ainsi les bearers associés au contexte. Par ailleurs, la S-GW gère quelques fonctions annexes au sein du réseau visité dans le contexte d'itinérance, telles que l'envoi d'informations pour la facturation. Elle sert également de point d'ancrage pour l'inter-fonctionnement avec d'autres technologies d'accès 3GPP (3rd Generation Partnership Project) comme l'UMTS ou le GPRS.

MME (Mobility Management Entity) : est le noeud de contrôle qui gère la signalisation entre UE et le réseau coeur. Il est notamment le point de terminaison des protocoles NAS au sein de l'EPC. Le MME est responsable de la gestion des bearers et notamment des phases d'établissement, de configuration et de relâche des bearers mais aussi la gestion de connexion de signalisation et la sécurité entre le réseau et l'UE. La gestion de la connexion est prise en charge au sein des protocoles NAS. Le MME maintient un contexte de l'UE tant que celui-ci est connecté au réseau ; ce contexte contient notamment les paramètres de sécurité NAS et la capacité radio et réseau de l'UE.

Le P-GW (Packet Data Network Gateway) : c'est une passerelle qui a pour premier rôle d'allouer une adresse IP à l'UE. Elle permet également d'assurer la qualité de service application correspondant au contrat du client. Elle supporte la fonction appelée *deep packet inspection* qui analyse les paquets du plan usager, identifie la nature des

flux, applique les règles prédéfinies pour tous les clients ou par clients, en fonction de l'offre souscrite. Par exemple la P-GW peut décider de brider le débit d'un flux de type P2P (Peer-to-Peer), qui veut dire paire-à-paire, en fonction de la politique de l'opérateur. La P-GW alloue ainsi des paquets IP transférés au sein de bearers de QoS (Qualité de Service) différentes et joue ainsi un rôle déterminant dans la cadre de la gestion de la QoS, notamment pour les bearers à débit garanti. Par ailleurs, la P-GW permet de mettre en oeuvre la facturation par flux de données. Enfin, elle sert de point d'ancrage pour l'inter-fonctionnement avec d'autres technologies d'accès non 3GPP, telles que le CDMA 2000 et le WiMAX.

HSS (Home Subscriber Subsystem) : HSS contient les informations de souscription des utilisateurs telles que le profile de la QoS des abonnés ou les restrictions d'accès en itinérance. Il contient également les informations concernant les réseaux de données (PDN) auxquels l'utilisateur peut se connecter. Ces informations peuvent se retrouver sous la forme d'un nom de point d'accès APN, ou sous la forme d'une adresse PDN. Par ailleurs, le HSS supporte des informations dynamiques telles que l'identité du MME auquel l'utilisateur est attaché.

PCRF (Policy and Charging Rules Function) : c'est un noeud optionnel au sein de l'architecture EPC ; toutefois il permet d'appliquer des règles de gestion évoluées sur le trafic et la facturation de l'utilisateur en fonction de son offre. Pour mettre en oeuvre ses règles, il communique avec le PCEF (Policy and Charging Enforcement Function), fonction intégrée à la P-GW. Par exemple, lorsqu'un utilisateur atteint le seuil de volume de données que sa souscription lui permet de transférer, le PCRF peut indiquer au PCEF de diminuer le débit de ce dernier. Le PCRF peut également, lors de l'établissement ou en cours de session, changer les caractéristiques de QoS à appliquer par le PCEF sur les flux de données. Le PCRF s'assure que le traitement appliqué est en accord avec le profil de souscription de l'utilisateur.

1.4 Architecture protocolaire du réseau LTE

Il existe plusieurs protocoles de communications qui sont utilisés pour le traitement de l'information dans les réseaux LTE. L'architecture protocolaire globale est montrée par la figure 1.2.

Comme le montre la figure 1.2, on distingue deux types de données pouvant transiter par les interfaces des systèmes LTE/EPC : les données utilisateur, portées par le plan usager (Plan-U), et les données de signalisation qui transitent par le plan de

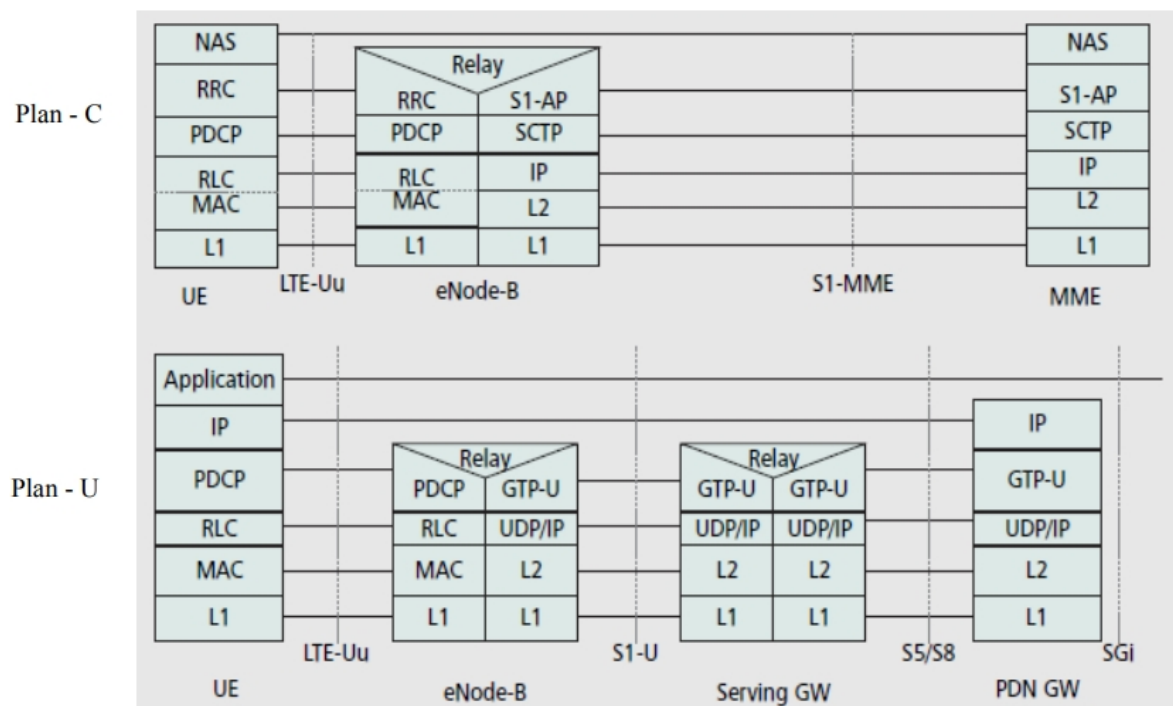


Figure 1.2 : Architecture protocolaire d'un réseau LTE

contrôle (Plan-C). On appelle le plan usager d'une interface les protocoles et fonctions mis en oeuvre sur cette interface pour le traitement des données de l'utilisateur, transitant sur le réseau mobile, et liées aux services auxquels cet usager accède. Le plan de contrôle désigne l'interface qui permet de contrôler le plan usager par l'établissement, la reconfiguration, la relâche de connexions et l'échange d'informations et de contexte associées à l'UE. Il permet ainsi d'établir le service et d'en assurer la continuité dans l'environnement du réseau mobile. Notons que le plan de contrôle ne porte pas forcément des informations provenant ou à destination de l'UE. Lorsqu'ils sont mis en oeuvre sur une interface, ces deux plans sont matérialisés par des piles protocolaires différentes. En réalité ils partagent un tronc commun mais se différencient au niveau des couches supérieures.

Dans la suite de cette section, nous allons donner un aperçu des couches les plus importantes.

La couche NAS (non access stratum) Elle gère plusieurs tâches de contrôles, dont :

- La gestion des entrées au réseau ;
- L'authentification ;

- La gestion de la mobilité ;
- La mise en place des data bearer.

La couche RRC (Radio Resource Contrôle) La couche RRC au niveau de l'eNodeB opère les tâches suivantes :

- La diffusion des informations du système ;
- La procédure de pagination ;
- Prend les décisions de handover, se basant sur les informations du UE sur les cellules voisines ;
- L'allocation des identifiants temporaires au UE ;
- La configuration de la signalisation des porteurs radio (pour la connexion RRC) ;
- Facilite les services MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service).

La couche PDCP (Packet Data Convergence Protocol) La couche PDCP sur le plan utilisateur assure la compression et la décompression des entêtes IP liées aux données des utilisateurs. Elle utilise RoHC (Robust Header Compression) pour augmenter l'efficacité de la bande passante. Elle est aussi responsable du chiffrement des données sur les deux plans. Les messages de la couche NAS sont chiffrés deux fois, au niveau de MME et de l'eNodeB, puisqu'ils passent par la couche RRC.

La couche RLC (Radio Link Control) Située sous la couche PDCP, elle forme et transporte les paquets entre l'eNodeB et l'UE. Elle offre trois modes de transmission qui sont adaptés chacun aux exigences sur la qualité de service des diverses applications

1. Le mode AM (Acknowledged Mode) qui nécessite un acquittement. Ce mode de transmission est utile pour les applications tolérantes au délai, tels les téléchargements de fichiers ;
2. Le mode UM (Unacknowledged Mode) qui ne nécessite pas d'acquittement et qui convient aux applications à temps réelles, comme le streaming vidéo ou le VoIP ;
3. Le mode TM (Transparent Mode). Ce mode de transmission est utile quand la taille du message $PDU = SDU + \text{entête PDPC}$.

La couche MAC (Medium Access Control) Elle s'occupe de cartographier les données entre les canaux logiques (définis au niveau de la couche MAC) et les canaux de transports (définis au niveau de la couche physique), en utilisant une fonction de multiplexage de RLC. Au niveau de la couche MAC, les mesures de l'état du trafic et de la correction des erreurs sont assurées par la méthode de retransmission HARQ

(Hybrid Automatic Repeat Request). La couche MAC offre également le service d'ordonnancement (scheduling) qui gère l'allocation de ressources aux utilisateurs.

1.5 Techniques d'accès dans le réseau LTE

La technique d'accès utilisée dans les réseaux LTE est OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) qui est basée sur OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). OFDM est une technique de transmission multi-porteuses qui découpe la bande passante totale en un très grand nombre de sous porteuses ayant chacune une bande de fréquences étroite, et transmet simultanément sur chacune d'entre elles.

1.5.1 Principe de l'OFDM

Pour transmettre un nombre N_c de symboles nous suivons le processus décrit par la figure 1.3.

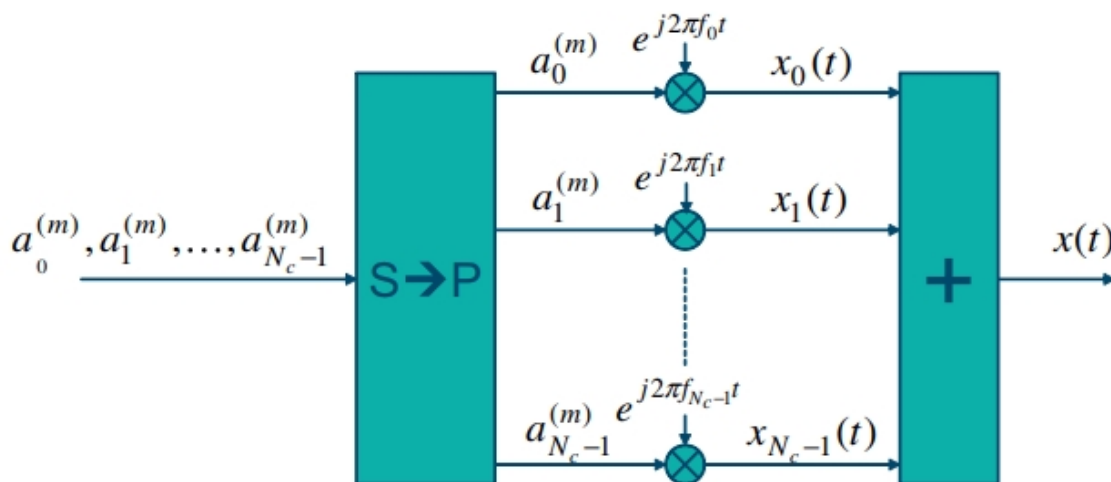


Figure 1.3 : Schéma d'un modulateur OFDM

Comme le montre cette figure, les symboles à transmettre passent d'abord par un convertisseur série-parallèle puis multipliés par des sous-porteuses complexes avant de passer par un convertisseur parallèle-série. Les N_c symboles obtenus en sortie forment un seul symbole OFDM. Les porteuses utilisées lors de la modulation d'un

symbole OFDM doivent d'être orthogonales, de sorte que quelque soit une porteuse f_i et une porteuse f_j , elles doivent respecter le critère exprimé par l'équation 1.1 :

$$\int_0^{T_s} e^{i2\pi f_k t} \times e^{i2\pi f_j t} dt = 0, \quad k \neq j \quad (1.1)$$

où $i = \sqrt{-1}$, k et j sont des entiers quelconques et T_s est la durée d'un symbole OFDM.

Le nombre de sous-porteuses utilisées peut varier de moins d'une centaine à plusieurs milliers, avec un espacement entre les porteuses de quelques KHz à des centaines de KHz, selon l'environnement dans lequel le système doit évoluer. Dans la norme 3GPP LTE, on utilise un espacement entre sous-porteuse de 15KHz. En pratique la modulation OFDM est réalisée par une transformée de Fourier inverse IDFFT (Inverse Discret Fast Fourier Transform) afin de passer du domaine fréquentiel au domaine temporel.

1.5.2 Principe de l'OFDMA

En OFDM, la granularité fréquentielle fournie par le découpage de la bande du système en sous-porteuses permet de multiplexer aisément en fréquence différents utilisateurs, ou différents canaux, en leurs allouant des sous-porteuses différentes durant des tranches de temps bien déterminées ; l'accès multiple selon ce principe est appelé OFDMA, et est employé dans les liaisons descendantes du LTE. OFDMA, en particulier, permet de dimensionner le nombre de sous-porteuses allouées à un UE en fonction de ses besoins en débit. A titre d'exemple, un appel voix se verra allouer moins de sous-porteuses qu'un téléchargement volumineux.

Pour mettre en oeuvre OFDMA, en LTE les transmissions sont organisées dans le domaine temporel par trames radio de 10 ms, chacune des trames étant divisée en 10 sous trames de 1 ms. Une sous trame est elle-même divisée en deux slots de 0,5 ms. Un slot correspond alors à la durée de 6 ou 7 symboles OFDM, selon le principe de la figure 1.3. En LTE, le domaine fréquentiel est, lui, divisé en 2048 sous porteuses espacées entre elles par un espacement fréquentiel de 15 Khz. Aussi, dans LTE, une sous trame, appelée en anglais *sub frame* (SF), définit ce qui est appelé un TTI (Transmission Time Interval). Un groupe de 12 sous porteuses contiguës durant le temps d'un slot forment ce qui est appelé un Bloc de Ressources (RB). L'allocation de ressources aux divers utilisateurs se fait alors par unités de RB. La figure 1.4 montre la relation entre les diverses notions que nous venons d'introduire.

L'allocation des sous porteuses peut être de type localisée ou distribuée. Dans l'al-

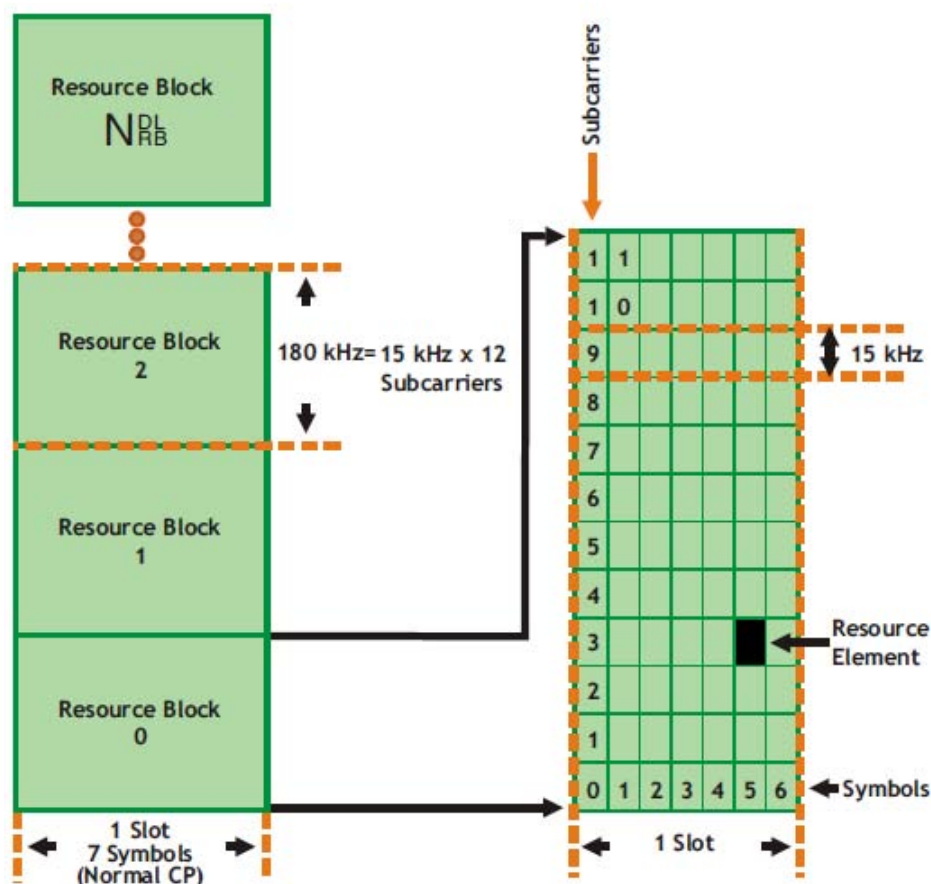


Figure 1.4 : Nomenclature des ressources radio dans le réseau LTE

location localisée, les sous-porteuses allouées à un UE sont contigües. Ce type d'allocation convient au Scheduleur adaptatif en fréquences, ou l'on souhaite viser une sous-bande particulière car l'UE y connaît de bonnes conditions de canal (en termes de qualité du signal et du niveau d'interférences). Alternativement lorsque l'émetteur ne possède pas de connaissances suffisamment précises des conditions de réception d'un UE dans les différentes sous-bandes du système, on a recours à une allocation distribuée. Ce type d'allocation répartit les sous-porteuses allouées à un UE sur la bande du système afin de bénéficier de la diversité en fréquences.

1.5.3 Le SC-FDMA

Le SC-FDMA est une variante de l'OFDMA, utilisée en voie montante dans les réseaux LTE ; il peut être mis en oeuvre à l'aide de modulateurs OFDM auxquels on ajoute un précodage des symboles à transmettre par une DFT (Discrete Fourier Trans-

form) qu'on insère entre la conversion série-parallèle et les modulateurs de sous-porteuses. D'une manière similaire à l'OFDM, le signal dans le domaine temporel correspondant au bloc des symboles de modulation d'entrée est appelé un symbole SC-FDMA. Nous pouvons noter qu'un symbole émis sur une sous-porteuse est maintenant une combinaison linéaire des symboles modulés du bloc d'entrée. Par ailleurs, les sous-porteuses allouées à un UE donné ont la contrainte d'être toutes contiguës. Le but de SC-FDMA est de réduire la consommation de la batterie en transmettant un signal dont la bande passante est réduite par rapport au signal OFDMA, ce qui facilite la conception des amplificateurs de puissance qui équipent les équipements mobiles.

1.6 Allocation de ressources radio

Comme nous l'avons expliqué dans la section précédente, OFDMA permet un partage des ressources radio entre divers utilisateurs en divisant le domaine des fréquences en plusieurs sous-bandes et le domaine temporel en tranches bien définies. Dans cette section, nous allons expliquer les fondements de cette procédure pour parvenir à un partage efficace. En fait, l'accès au canal est déterminé par le *scheduler* ou ordonnanceur, qui doit décider des paramètres suivantes :

- quel UE servir à chaque TTI (Transmission Time Interval) ;
- quelles ressources en fréquences allouer à chaque UE servi ;
- quel traitement spatial appliquer pour un UE donné dans le cadre du MIMO (Multiple Input Multiple Output) ;
- quelle puissance appliquer, en particulier en voie montante.

La fonction de scheduling est hébergée par la couche MAC de l'eNodeB, mais s'appuie sur les mesures effectuées par la couche physique des UE (de l'eNodeB respectivement) pour optimiser l'allocation des ressources. Le scheduling rentre ainsi dans la classe des fonctions conçues selon une optimisation inter-couches, dont l'exploitation est l'une des caractéristiques fortes des réseaux LTE. Le scheduler est amené à exploiter les dimensions temporelles, fréquentielles et spatiales.

1.6.1 Dimension temporelle

Les données sont transmises sur des canaux partagés entre les UE du système, la raison de ce choix est double. D'une part, les besoins en ressources radio des UE peuvent varier considérablement au cours du temps en fonction du type de service requis. Au cours d'un appel voix par exemple, les périodes de silence sont nombreuses ; or pendant ces périodes aucunes données ne sont transmises. Réserver des

ressources radio pour la durée d'un appel voix revient alors à les gaspiller pour le système, puisqu'elles pourraient être allouées à d'autres UEs durant les périodes de silence. Il est donc plus efficace de mutualiser les ressources radio en canaux partagés et de les allouer aux UEs en fonction de leurs besoins instantanés.

L'autre avantage d'un accès partagé, est le gain de diversité multiutilisateur. Cette diversité exploite les variations rapides du canal de transmission, afin de servir le UE lorsque celui-ci est dans un état favorable, typiquement un état d'évanouissement constructif. Or, les canaux de transmission de UE différents sont affectés de manières indépendantes par les évanouissements rapides, ainsi plus le nombre d'utilisateurs actifs est élevé plus grande est la probabilité que le canal de l'un d'entre eux soit dans un état d'évanouissement constructif à un instant donné. Avec un grand nombre de UE simultanés, ils peuvent être servis avec une qualité de canal meilleure que la moyenne, bénéficiant ainsi d'un débit plus important sur les ressources allouées. Pour le système il s'en suit un débit moyen plus élevé puisque chaque ressource allouée porte une plus grande quantité de données. Le scheduling pouvant exploiter les variations rapides du canal est dit "dynamique". Pour ce faire, les ressources temporelles allouées doivent être très brèves. En LTE, la granularité de l'allocation des ressources temporelles allouées est d'une sous-trame, soit 1 milliseconde. En d'autres termes, le scheduler est libre de choisir quel UE servir ainsi que leurs allocation de PRB à chaque sous trame.

1.6.2 Dimension fréquentielle

Les ressources radios se présentent comme une grille temps-fréquence divisée en un certain nombre de blocs de ressources appelés PRB (Physical Resource Bloc). Leur nombre dépend de la largeur de la bande du système. Un PRB a pour dimension 180 KHz en fréquence et 0.5 ms en temps. En LTE les PRB sont toujours alloués par paires, un PRB de la paire étant alloué sur chaque slot de 0.5 ms d'une sous-trame. Cette possibilité d'allouer des ressources spécifiques en fréquences est propre aux systèmes OFDM. Tout comme l'adaptation aux évolutions du canal dans la dimension temporelle, le scheduler peut tirer parti des variations du canal dans la dimension fréquentielle, en attribuant à chaque utilisateur des PRB bénéficiant de conditions radio favorables ; on parle alors de "scheduling adaptatif en fréquences". En raison de la variation de la réponse en fréquence du canal au cours du temps, le scheduling adaptatif en fréquence est forcément dynamique. La dimension fréquentielle permet en outre d'éviter les interférences entre cellules voisines, grâce à la technique ICIC (inter-cell interference coordination).

1.6.3 Dimension spatiale

La gestion des transmissions MIMO impose au scheduler de prendre en considération une dimension supplémentaire qui est la dimension spatiale. Celle-ci entre en jeu en émission via l'opération de recodage spatiale, qui donne une propriété spatiale à la transmission, par exemple en formant un faisceau pointant vers une direction privilégiée. En réception, les antennes multiples révèlent également des propriétés spatiales des signaux, par exemple leurs directions d'arrivées. La dimension spatiale permet notamment de transmettre plusieurs flux d'informations, aux couches spatiales sur les mêmes ressources temps-fréquences, mais aussi accroître la robustesse de la transmission lorsqu'une seule couche spatiale est transmise.

1.6.4 Stratégies de scheduling

L'algorithme de scheduling proprement dit n'est pas normalisé car il ne requiert pas d'interfonctionnement avec d'autres équipements, et fait donc l'objet d'une implémentation propriétaire. Il vise cependant généralement un critère de performance, sous un certains nombres de contraintes.

Une notion fondamentale pour évaluer l'intérêt pratique d'un scheduler est l'équité. Elle traduit la capacité d'un scheduler à servir les différents UE d'un système dans des propensions semblables, c'est-à-dire à ne pas favoriser un UE au détriment des autres. En effet le scheduler se doit de servir le plus grand nombre de clients possible ; toutefois, l'égalité absolue n'est pas forcément souhaitable du point de vu de l'efficacité du système, puisqu'il peut être avantageux de tirer parti des bonnes conditions radio de certains UE pour leurs transmettre les données demandées en un temps court et ainsi libérer les ressources afin de les mettre plus rapidement à disposition des autres UEs. Nous présenterons ci-dessous trois algorithmes de référence.

1. Le scheduler Round Robin

il alloue les ressources aux UEs à tour de rôle, indépendamment de leurs conditions radio. Ce scheduler est le plus équitable, mais est peut efficace en terme de débit total du système, puisqu'il ne tire pas avantage des conditions radio.

2. Le scheduler Max-CQI

alloue des ressource au UE qui bénéficient des meilleurs conditions radio, en particulier ceux situés en bordure de cellules ne sont jamais servis. Pour cette raison ce scheduler ne présente aucun intérêt pratique si il est utilisé seul, par contre si un autre critère est utilisé pour choisir les UEs à servir dans le domaine temporel, le critère Max-CQI peut être utilisé dans le domaine fréquentiel pour attribuer chaque PRB au UE qui en tirera le plus avantage.

3. Le scheduler Proportional Fair

alloue des ressources au UEs qui maximisent une métrique du type débit instantané atteignable à l'instant courant, divisé par son débit moyen. Ce scheduler réalise un compromis entre les deux précédents, puisqu'il tient compte à la fois des conditions radio (à débit moyen similaire l'UE avec une meilleur qualité de canal sera sélectionné en priorité), mais aussi de l'équité entre les UEs (à qualité instantanée du canal similaire, l'UE ayant reçu le débit le plus faible jusque-la sera sélectionné en priorité).

Les algorithmes de scheduling peuvent être paramétrés pour offrir (voire garantir) un débit minimal en bordure de cellules, ou plus généralement pour fournir un compromis entre la capacité de la cellule et l'équité entre utilisateurs. Ils doivent également avoir une capacité de gestion de priorités, par exemple entres :

- service à débit ou latence garantie (voix, streaming), ou service best effort (FTP, HTTP) ;
- transmission initiale ou retransmission HARQ ;
- service d'urgences ou services aux abonnés ;
- satisfaire les requêtes des cellules dont ils ont la charge et des requêtes d'autres cellules liées à la coordination d'interférences entre cellules voisines.

1.7 Conclusion

Ce premier chapitre a été consacré à la présentation des réseaux LTE. Nous avons décrit ce qui les caractérise, leurs architectures physique ainsi que les rôles des différentes entités qui la composent. Nous avons également vu la pile de protocoles qui sont implémentés sur de tels réseaux, et nous avons décrit les couches les plus importantes d'entre elles. Par la suite, nous avons présenté les techniques d'accès FDMA et SC-FDMA qui sont utilisées en voies descendante (DL) et montante (UP) respectivement, puis nous avons expliqué la façon dont les ressources sont partagées entre les utilisateurs. Enfin, nous avons abordé le principe scheduling pour finir par une brève description des schedulers les plus connus. La technologie D2D fera l'objet du chapitre 2.

Extension de l'Architecture 4G/LTE : La Technologie D2D

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons l'architecture étendue du réseau 4G/LTE. L'innovation dans cette extension d'architecture est l'inclusion de la nouvelle technologie D2D (device to device). Nous présenterons d'abord les nouvelles fonctions qui ont été introduites pour supporter les communications D2D puis, nous citerons les critères selon lesquels sont classées les communications D2D, la manière dont le mode de communication est sélectionné, les différents types d'interférences pouvant survenir lors d'une communication D2D ainsi que les techniques pouvant être mises en place pour les atténuer.

2.2 Principe général de la communication D2D

Dans un réseau LTE, lors d'une communication cellulaire standard, toutes les parties doivent passer par les infrastructures du réseau pour échanger de l'information. Ce procédé s'appelle une communication D2I (Device to Infrastructure). En revanche, une communication D2D est une communication qui a lieu entre deux terminaux de façon directe. En D2D, les terminaux échangent des informations directement sans passer par un intermédiaire (comme cela pourrait se faire en Bluetooth, par exemple). Cependant, nous verrons plus loin qu'il s'agit là d'un idéal théorique, et que dans les faits cela ne peut pas être appliqué tel quel dû à plusieurs raisons dont nous pouvons citer : la nécessité d'authentifier les utilisateurs, déterminer les ressources radio pouvant être exploitées, et la manière de facturer les communications. Le réseau devra donc toujours superviser ces communications, bien que ça soit dans une moindre

mesure en comparaison avec une communication D2I [5] [6].

2.3 Architecture étendue 4G/LTE

Afin de pouvoir effectuer des communications D2D, certaines entités ont été rajoutées au réseau LTE de base. Puisque D2D est destinée aux réseaux cellulaires, son intégration est basée sur les infrastructures LTE déjà existantes. La figure 2.1 illustre l'architecture d'un réseau LTE supportant les communications D2D.

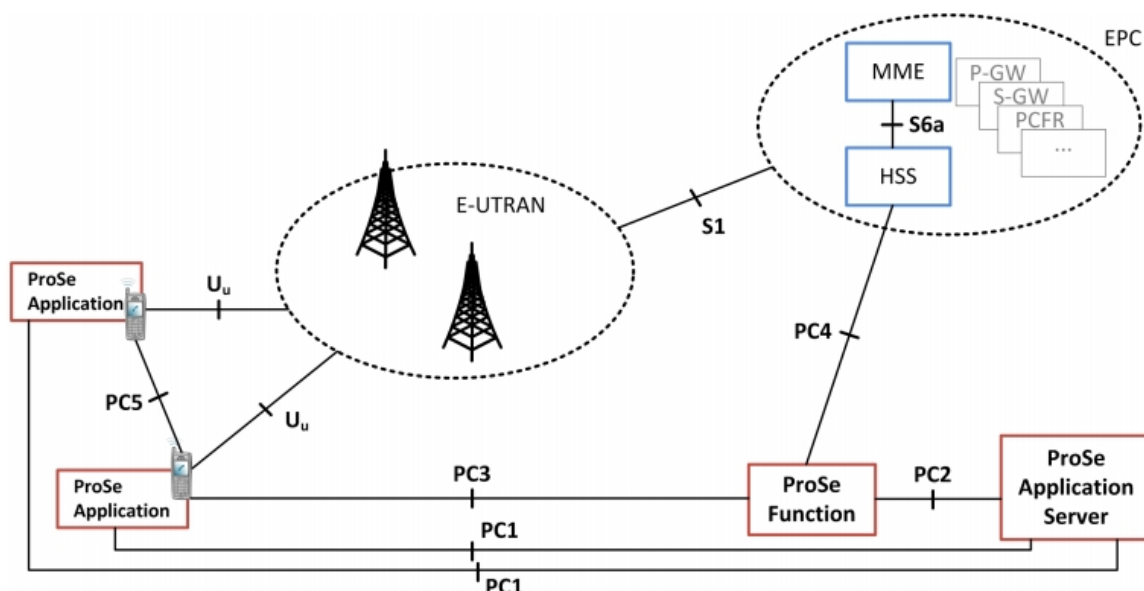


Figure 2.1 : Architecture physique d'un réseau LTE supportant le D2D

Tout comme un réseaux LTE standard, l'architecture d'un réseau D2D comporte un réseau coeur EPC et un réseau d'accès E-UTRAN, mais on y rajoute deux nouvelles entités du coté du réseau; il s'agit de Proximity-based Service (ProSe) Function, et ProSe Application Server. Du coté de l'utilisateur, une entité appelée ProSe Application est aussi rajoutée.

L'entité ProSe Function est implémentée comme une fonction logique qui fournit trois sous fonctions différentes. La première, Direct Provisioning Function, s'occupe de prévoir les paramètres pour la diffusion et l'annonce d'information (*Discovery en anglais*) et l'établissement des communications D2D. Ces paramètres sont reliés à la politique d'accès (si un UE est autorisé à faire une diffu-

sion et/ ou une communication D2D), aux paramètres radio nécessaires pour configurer l'UE afin qu'il soit compatible avec les communications D2D (fréquences, bande passante), et aux paramètres de communication (si par exemple on utilisera IPv4 ou IP v6). La seconde sous fonction, *Direct Discovery Name Management Function*, nous permet d'identifier une application D2D et son support sur le réseau de l'opérateur pour *D2D Discovery*. La troisième sous fonction, *EPC-level Discovery ProSe Function*, fournit des fonctionnalités reliées au réseau, telles que l'autorisation d'accès, la facturation, et les informations de gestion des abonnés. Dans la version 12 du 3GPP seule une fonction *ProSe* est nécessaire, ce qui peut devenir un facteur limitant si celle-ci est surchargée, c'est pourquoi le 3GPP a laissé une porte ouverte à de futures améliorations permettant d'en implémenter d'avantage. Cependant, les modalités de coopération entre plusieurs fonctions doivent encore être définies.

Le *ProSe Application Server* fournit les fonctionnalités de la fonction *ProSe* et relie les clients aux fonctions individuelles. Il stocke également toutes les données relatives aux fonctions disponibles. Notons que l'application elle-même est implémentée sur l'UE mais n'est pas soumise au standard 3GPP. Le *ProSe Application Server* est connecté à *ProSe Function* via une interface PC2, qui définit les interactions entre les deux entités dans le cadre de l'opération de *ProSe Discovery*.

En plus du réseau, le UE doit également être modifié afin de pouvoir effectuer des opérations de *Discovery* et des communications D2D, et pour ce faire il est équipé de l'application *ProSe Application*. La politique d'autorisation pour les communications D2D est prise en charge par l'interface PC3, et les communications ont lieu sur l'interface PC5. L'application *ProSe Application* communique avec le serveur *ProSe Application Server* via l'interface PC1 afin de définir les caractéristiques de la signalisation au niveau de la couche application.

En plus des nouvelles entités, celles déjà existantes, notamment MME (Mobility Management Entity) et HSS (Home Subscriber Server) doivent être améliorées pour permettre l'échange d'informations utilisateur concernant les services *ProSe*. C'est dans ce but que l'interface PC4 est définie entre *ProSe Function* et HSS, et l'interface S6a entre les MME et le HSS doit être améliorée pour permettre le partage d'informations utilisateurs reliées aux communications D2D [7].

2.4 Classifications des communications D2D

La classification des communications D2D peut être faite de trois points de vue. Nous pouvons tout d'abord considérer l'aspect gestion qui donne le *D2D Management*. Nous pouvons ensuite faire une seconde classification selon les divers scénarios de communication, donnant ainsi ce qui est appelé *D2D scenarios*. Enfin, nous pouvons classifier selon le mode de gestion des ressources radio, ce qui donne le paradigme *D2D Radio Resource Management*.

Dans la suite de cette section, nous décrirons ces trois classifications possibles.

2.4.1 D2D Management

D'un point de vu management, les communications D2D peuvent être distinguées en fonction du niveau d'implication du réseau dans le contrôle de la communication, et la façon dont elle est établie la diffusion et l'annonce d'informations système (D2D Discovery). Cela est résumé dans la figure 2.2.

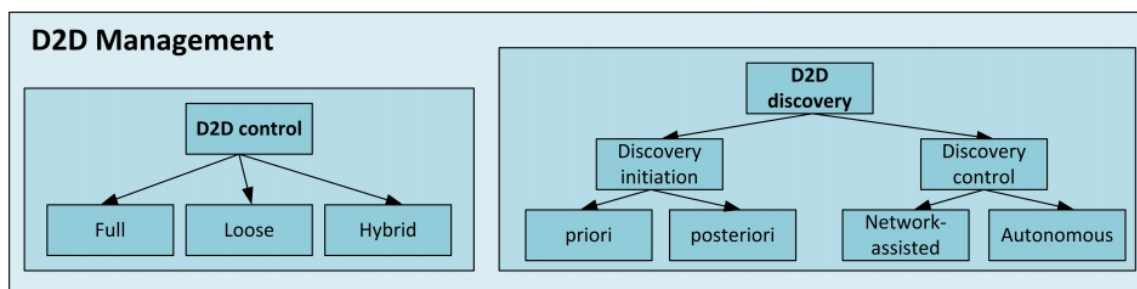


Figure 2.2 : *D2D Management*

Comme le schématise bien la figure 2.2, *D2D management* est une classification qui montre en quelque sorte le taux de participation des équipements mobiles et du réseau dans la prise en charge des communications D2D. Cela porte sur comment les informations systèmes sont diffusées (Discovery) mais aussi sur le contrôle du reste des fonctions impliquées dans les communications D2D.

2.4.1.1 D2D control

D2D control montre à quel point le réseau est impliqué dans le contrôle et la gestion des communications D2D. Comme illustré dans la figure 2.2, le contrôle peut être total (*full control*), léger (*loose control*) ou hybride (un équilibre entre le contrôle total et léger).

Dans le cas du *full control*, la communication est entièrement gérée par le réseau de l'opérateur. Il est responsable de l'authentification durant la phase de *Discovery* et d'initiation de la communication, et il alloue les ressources radio nécessaires au bon déroulement de la communication. L'avantage du *full control* est que le réseau peut facilement coordonner les communications D2D et les communications cellulaires classiques, et donc limiter les interférences entre elles. De plus, l'eNB peut gérer efficacement les ressources radio afin de répondre aux exigences de qualité de service requises. Mais le *full control* présente un inconvénient qui est que l'eNB doit connaître les conditions du canal de toutes les entités impliquées, pour éviter les interférences, ce qui exige d'importantes ressources pour la signalisation.

Si au contraire on applique le *loose control*, les terminaux D2D peuvent communiquer entre eux, avec une intervention très limitée du réseau de l'opérateur. Le réseau n'est responsable que de l'authentification des terminaux lors de leur connexion au réseau ; la communication ainsi que la gestion des ressources radio peuvent être gérées de façon autonome par les équipements D2D. L'avantage de cette approche est qu'elle demande des ressources de signalisation négligeables en comparaison avec la méthode précédente. Ici, le problème principal est les interférences entre les communications cellulaires et D2D. Les opérateurs préfèrent donc éviter cette seconde option car la priorité est d'assurer une bonne qualité de service pour les communications cellulaires. Cependant, une solution peut être envisagée pour rendre l'application du *loose control* possible, et c'est l'utilisation des bandes de fréquence non allouées, comme pour le Bluetooth ou le wifi.

La dernière option est le contrôle hybride. Dans cette perspective, les aspects critiques sont gérés par le réseau, notamment l'authentification, l'allocation de ressources radio sur le long terme, et la gestion de l'énergie. En même temps, les équipements D2D sont capable de gérer les ressources radio et programmer leurs transmission, et leurs consommation d'énergie de façon disruptive et sur un court terme. Cette approche peut donc être vue comme un bon compromis, tant les exigences en termes de signalisation sont raisonnables et cela permet également d'assurer une qualité de service acceptable pour les communications cellulaires. Nous pouvons déduire que le degré de contrôle exercé par le réseau durant une communication D2D influe sur l'importance de la signalisation requise. Il a également un impact sur la complexité

des équipements D2D (en cas de loose control, plus de modifications sont requises).

2.4.1.2 D2D discovery

Une des parties essentielles du D2D est la découverte d'équipements D2D. Le but de cette opération est de localiser les équipements potentiellement candidats pour une communication. Ce processus peut être divisé en deux étapes : *discovery initiation* et *discovery control*. La découverte D2D peut être initiée soit avant que la communication ne commence soit pendant celle-ci. Le premier cas a lieu quand deux utilisateurs souhaitent partager un contenu spécifique, tandis que le second, lorsque les deux utilisateurs sont déjà engagés dans une communication cellulaire en étant en mouvement et finissent par se retrouver à proximité l'un de l'autre ; il devient alors plus judicieux d'utiliser une communication D2D. Comme le D2D control de façon global, le processus de détection peut se produire avec différents niveaux de control de la part du réseau, donc la détection peut soit être entièrement contrôlée par le réseau (network assisted D2D discovery), ou bien de manière autonome par les UE (autonomous D2D discovery). La première option reste tout de même plus efficace, car le réseau est au courant de la localisation des UE (si les équipements sur le point de communiquer ensemble sont dans la même cellule par exemple), mais comme dans le cas du control, une plus grande implication du réseau d'opérateur induit une signalisation plus importante, problème que la détection autonome ne présente pas, mais c'est une opération coûteuse en énergie pour les UE [7] [6].

2.4.2 D2D scenarios

Dans cette section nous décrierons les différents scenarios de communication D2D. En général, nous classons ces scenarios selon quatre aspects, qui sont la couverture, le type de communication D2D, la zone de communication et le relayage. Ceci est illustré dans la figure 2.3.

2.4.2.1 La couverture

Elle décrit la position des utilisateurs par rapport au réseau de l'opérateur, c'est-à-dire si ils sont dans sa zone de couverture ou non, et selon cette classification nous avons les cas de figure suivant :

- **Couvert** : les deux appareils souhaitant communiquer se trouvent dans la zone de couverture ;

figure 2.3

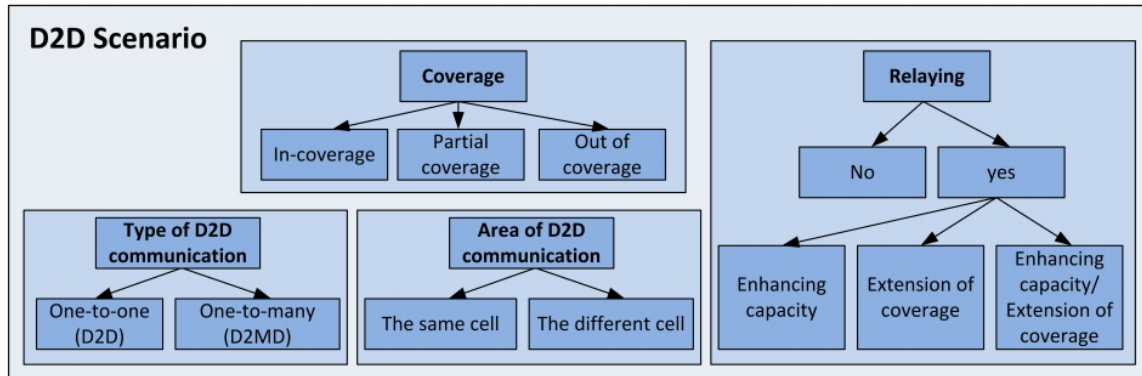


Figure 2.3 : D2D Scenarios

- **Couverture partiel** : l'un des appareils est dans la zone de couverture de l'opérateur et l'autre ne l'est pas ;
- **Non couvert** : les deux appareils sont en dehors de la zone de couverture de l'opérateur. Notons que ce scénario n'est généralement utilisé que pour des services de sûreté public dans le cas où les services des opérateurs sont temporairement inaccessibles.

2.4.2.2 Type de communications D2D

La communication peut être de type :

- **One-to-one**, où seuls deux équipements communiquent directement entre eux ;
- **One-to-many**, où un utilisateur fait un multicast ou un broadcast dans un cluster. Cette option est appelée device to multi-device (D2MD).

2.4.2.3 Zone de communication D2D

En entend par là, si les deux participants d'une communication sont sous le contrôle d'une même cellule ou non. Dans le premier cas, ils seront donc rattachés au même eNB, mais à différents eNB, sinon.

2.4.2.4 Relayage

Les équipements D2D peuvent être utilisés comme des relais pour transmettre un message destiné à un autre utilisateur à proximité, et cela se fait dans le but d'amé-

liorer la capacité du réseau. Dans ce cas, l'UE attaché à un autre par une fonction de relais se trouve souvent dans la zone de couverture de l'eNB. Il peut aussi utilisé être pour étendre la zone de couverture, l'UE qui est hors de la zone couverture utilise l'autre pour atteindre l'eNB.

2.4.3 Radio Resource Management (RRM)

La gestion des ressources radio est schématisée par la figure 2.4.

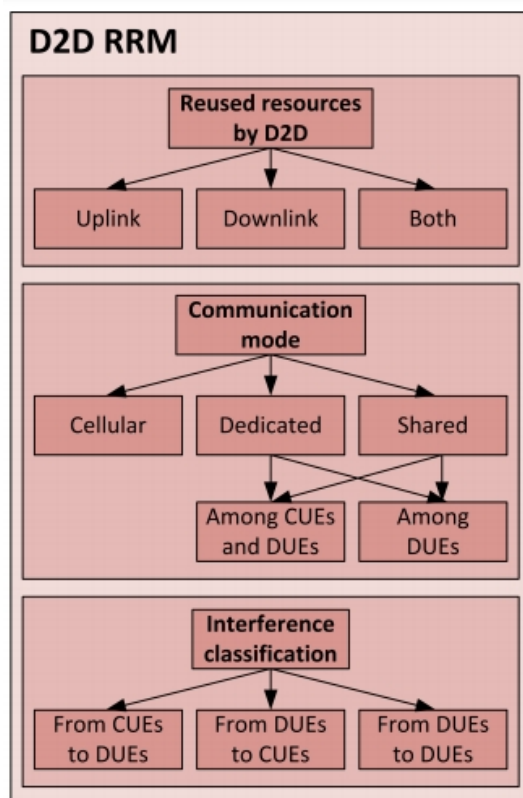


Figure 2.4 : Gestion des ressources radio

En terme de gestion de ressources radio, les communications D2D peuvent être classées selon le mode de duplexage et la réutilisation des ressources, le mode de communication utilisé, et par classification des interférences.

2.4.3.1 Mode de duplexage et réutilisation des ressources

Les communications D2D peuvent avoir accès aux ressources soit en TDD ou en FDD. Les ressources initialement attribuées en UL (up link) ou en DL (down link) ou aux deux peuvent être réutilisées en D2D, même si la tendance est de réutiliser les ressources allouées en UL. Cette voie offre l'avantage d'être peu utilisée par rapport au DL puisque les utilisateurs ont plus tendance à recevoir des données du réseau que l'inverse. De plus, les problèmes d'interférences seront plus faciles à gérer car ils impactent les stations de base et non les utilisateurs.

2.4.3.2 Mode de communication

Cela décrit si les communications D2D sont effectuées directement entre les utilisateurs, ou à travers l'eNB, et si les communications D2D utilisent les mêmes ressources radio que les communications cellulaires, ou des ressources qui leur sont spécialement allouées. Se basant sur ces critères, on peut définir les modes de communications suivants.

- **Mode cellulaire** : cela correspond aux communications cellulaires conventionnelles, les utilisateurs échangent des données via l'eNB et non pas directement entre eux. Ce mode est utilisé quand les utilisateurs sont à une grande distance l'un de l'autre ou si une communication D2D sera de moins bonne qualité dans la situation où ils se trouvent. Cette option offre l'avantage d'une facilité de gestion des interférences, et ne requiert aucune modification du matériel. En contrepartie, elle présente une mauvaise efficacité spectrale.
- **Le mode dédié** : ce mode permet aux équipements D2D d'échanger des données directement sans l'intervention de l'eNB, bien que celle-ci offre les ressources radio à utiliser, ressources qui ne seront pas exploitables par les communications cellulaires. Ce mode offre donc une meilleure efficacité spectrale car les communications D2D ont lieu, soit sur le UL ou le DL, et l'eNB n'a pas à gérer les interférences entre les communications cellulaires et D2D.
- **Mode partagé** : ici, les mêmes ressources radio sont utilisées par les communications cellulaires et D2D. Tout comme en mode dédié, le mode partagé peut utiliser soit le UL ou le DL. D'un point de vue efficacité spectrale, ce mode est meilleur que les deux autres, mais il présente quand même l'inconvénient de générer de fortes interférences entre les communications cellulaires et les communications D2D. Pour pallier à ce problème, de nouvelles techniques doivent être implémentées, ce qui augmente la complexité du système.

Jusque-là, nous avons seulement parlé des cas où les communications D2D utilisent des ressources dédiées ou partagées, uniquement par rapport aux communications cellulaires. Cependant, il y a un autre aspect qui doit être envisagé, à savoir, si les différentes paires D2D peuvent réutiliser les mêmes ressources ou non. Cette possibilité rend les communications D2D encore plus intéressante d'un point de vue efficacité spectrale. En même temps, c'est l'aspect le plus difficile à mettre en place dans une situation réelle, puisque nous n'aurons plus seulement à gérer les interférences entre les communications cellulaires et D2D mais aussi entre les paires D2D.

2.4.3.3 Classification des interférences

Les interférences représentent le problème majeur des communications D2D, pour la double contrainte qui est que les communications cellulaires ne doivent pas être impactées par les communications D2D, mais si les communications D2D sont trop sanctionnés par ce principe, cela rend leur utilisation moins intéressante. Les noeuds, DUE (Device UE), CUE (Cellular), eNB, affectés par les interférences ne sont pas les mêmes selon le mode de communication utilisé et les ressources utilisés par les communications D2D (DL, UP). Comme expliqué précédemment les interférences, entre communications cellulaires et D2D n'existent que si on utilise le mode partagé, et les interférences entre les paires D2D ont lieu dans le cas où elles réutilisent les mêmes ressources. En fonction de qui cause l'interférence et de qui en est la victime, nous pouvons classer les interférences dans trois catégories, comme illustré par la figure 2.5.

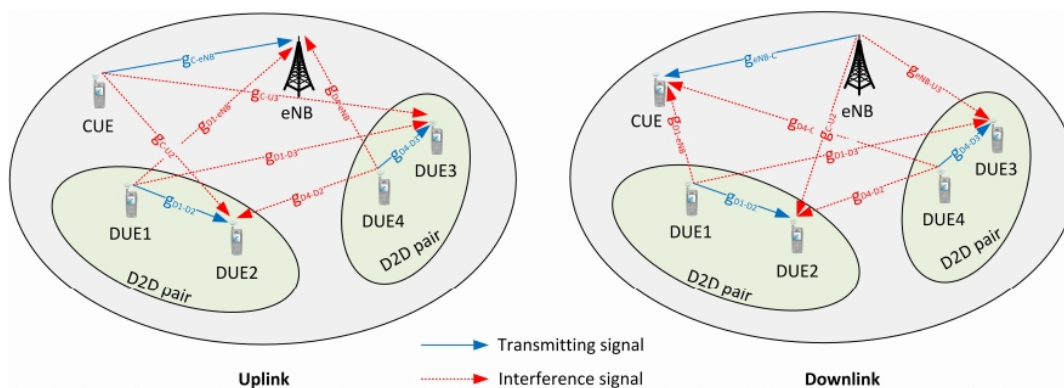


Figure 2.5 : Classification des interférences dans les communications D2D

- **Interférences des communications D2D sur les communications cellulaires :** En UL, c'est l'eNB qui est affectée ; les interférences handicapent la réception des données de la part des CUE. Dans l'exemple présenté dans la figure 2.5, l'eNB est perturbée par les DUE_1 et DUE_4 qui sont entrain de transmettre aux DUE_2 et DUE_3 respectivement. Cette interférence peut être exprimée par l'équation (2.1).

$$\gamma_{eNB} = P_{D1} \times g_{D1-eNB} + P_{D4} \times g_{D4-eNB} \quad (2.1)$$

où P_{D1} et P_{D4} représentent les puissances d'émission de DUE_1 et DUE_4 respectivement, et g représente le gain entre les DUE.

En DL, c'est les CUE qui sont les victimes des interférences causées par les communications D2D, et cela peut s'exprimer par :

$$\gamma_{CUE} = P_{D1} \times g_{D1-C} + P_{D4} \times g_{D4-C} \quad (2.2)$$

- **Interférences des CUE sur les DUE :** en UL, les communications D2D subissent des interférences générés par les communications cellulaires qui envoient des données à l'eNB. Dans notre exemple, DUE_2 et DUE_3 souffrent des ces interférences, ce qui dégrade leurs performances. Cela peut s'exprimer par les équations (2.3) et (2.4). [7]

$$\gamma_{DUE2} = P_C \times g_{C-D2} \quad (2.3)$$

$$\gamma_{DUE3} = P_C \times g_{C-D3} \quad (2.4)$$

où P_C représente la puissance d'émission du CUE.

En DL, c'est toujours DUE_2 et DUE_3 qui subissent des interférences, mais elle sont cette fois causées par l'eNB. On l'exprime par les équations (2.5) et (2.6).

$$\gamma_{DUE2} = P_{eNB} \times g_{eNB-D2} \quad (2.5)$$

$$\gamma_{DUE3} = P_{eNB} \times g_{eNB-D3} \quad (2.6)$$

- **Interférences entre les paires D2D :** si plus d'une paire D2D utilisent les mêmes ressources radio, alors en plus des interférences avec les communications cellulaires, on devra en plus gérer les interférences entre ses paires. Dans ce cas, peut importe la direction de transmission, les interférences sont toujours causées par les DUE émetteurs et subies par les DUE récepteurs. Dans notre exemple les interférences sont causées par DUE_1 et DUE_4 et subies par DUE_2 et DUE_3 , et le taux d'interférences est exprimé comme suit :

$$\gamma_{DUE2} = P_{D4} \times g_{D4-D2} \quad (2.7)$$

$$\gamma_{DUE3} = P_{D1} \times g_{D1-D3} \quad (2.8)$$

A partir des équations (2.1) à (2.8) nous pouvons voir que le taux d'interférences subi par l'eNB, les CUE ou les DUE dépend de la géométrie des paires D2D et des CUE, et de la puissance d'émission. La géométrie exprime la distance qui sépare les paires D2D des CUE et l'eNB. En général, les interférences entre les communications cellulaires et D2D sont moindres si la distance entre les paire D2D et l'eNB (dans le cas où on utilise l'UL) ou les CUE (dans le cas où on utilise le DL) est grande. Et si la distance entre les DUE d'une même paire est courte, cela permet de réduire la puissance d'émission et par la même occasion réduire les risques d'interférences causées par les communications cellulaires, et bien sûr une plus grande distance entre les paires D2D réduit le risque d'interférences mutuelles.

2.5 Sélection du mode de communication

Choisir le bon mode de communication est crucial en D2D. Ça détermine le potentiel d'amélioration de l'efficacité spectrale, et détermine également le taux d'interférences entre les communications cellulaires et D2D ainsi qu'entre les paires D2D.

2.5.1 Mode de sélection statique

La figure 2.6 montre un exemple de référence de mode de selection statique, basé sur le path loss. Cette méthode est considérée comme l'approche la plus simple pour choisir le mode adéquat pour les DUE. La communications à travers l'eNB (communications cellulaires) est choisie si le path loss (PL) entre les DUE est supérieur à un seuil PL_{max} , sinon on préférera une communication D2D. Cependant, la sélection d'un mode de communication en se basant uniquement sur le path loss est loin d'être optimale, vu qu'elle ne reflète pas l'exacte qualité du canal ou les problèmes d'inférences. Pour une meilleure précision, on choisit le mode en prenant également en compte, la distance séparant les DUE les uns des autres ainsi que des eNB, l'efficacité énergétique, la qualité du canal et les risques d'interférences entres les paires D2D.

2.5.2 Mode de sélection dynamique

En mode statique, nous ne prenions pas en compte le caractère dynamique du réseau, où la qualité du canal entre les différents noeuds peut varier au cours du temps, et donc le mode de communications peut également changer durant l'échange. Il faut donc mettre en place des méthodes qui prennent en compte ce facteur. Une solution

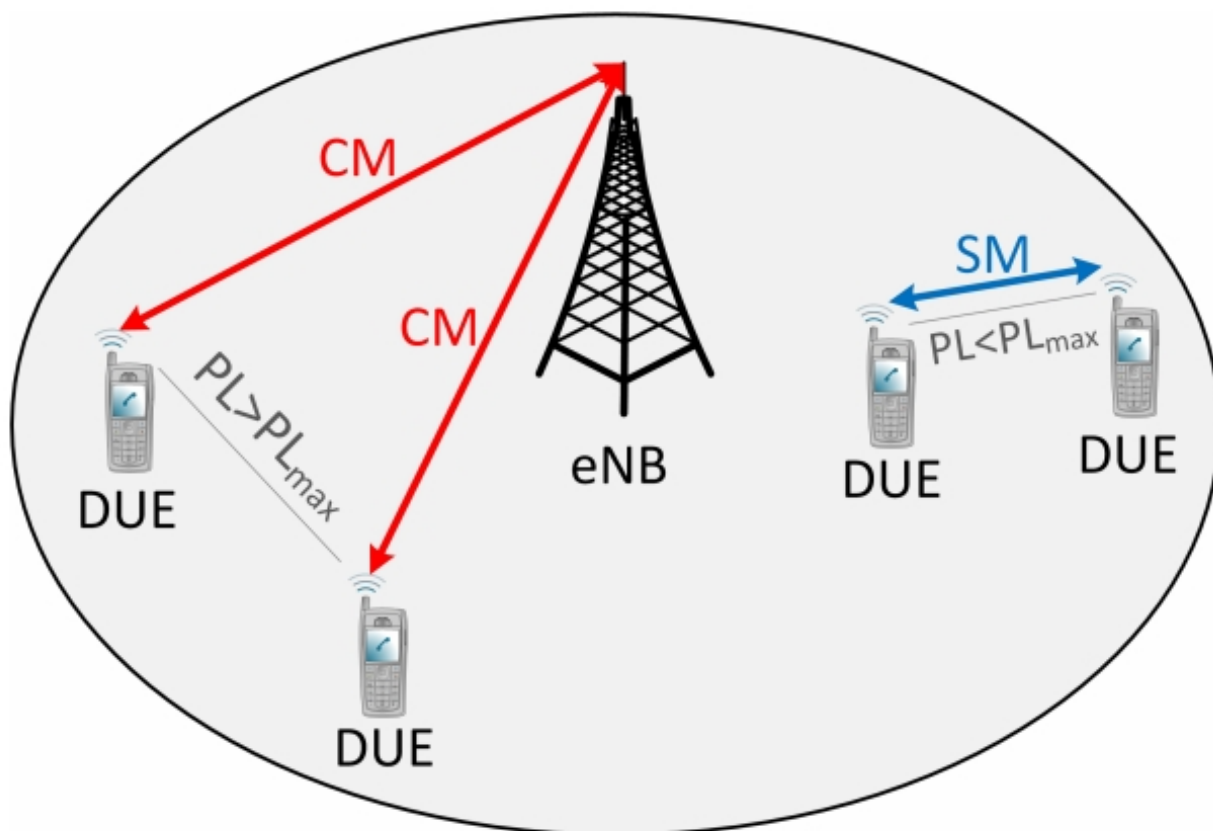


Figure 2.6 : Sélection du mode de communication, basée sur la perte de trajet

est proposé dans [[65], où les auteurs développent un Framework qui sélectionne le mode de communications en fonction des variations de la qualité du canal. Ici, seuls sont pris en compte le mode cellulaire ou le mode dédié, pas de mode partagé. Les figures 2.7 et 2.8 résument le processus de sélection de mode de communications, d'un point de vue d'une communications cellulaire et d'une communication D2D, respectivement.

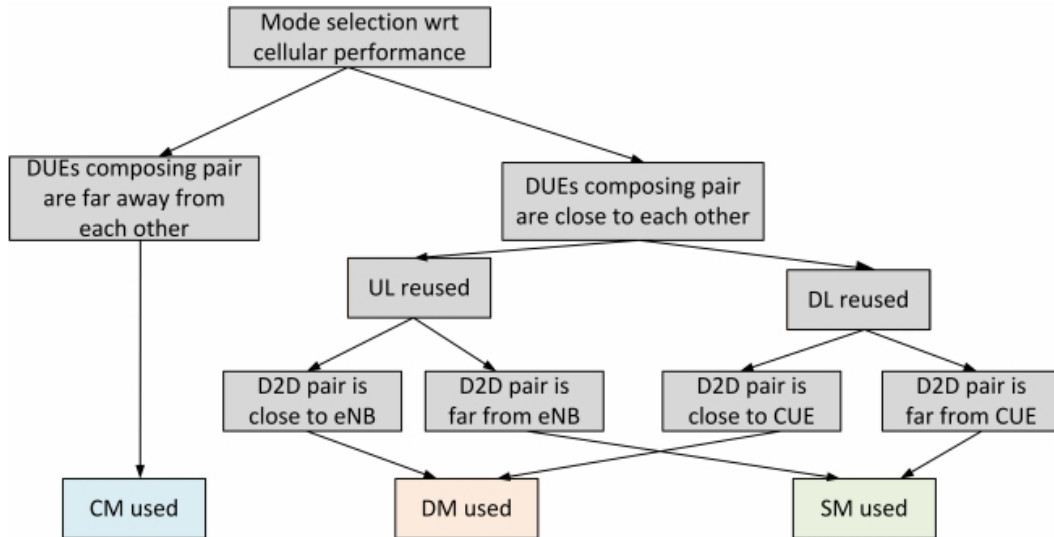


Figure 2.7 : Selection de mode du point de vue d'une communication cellulaire

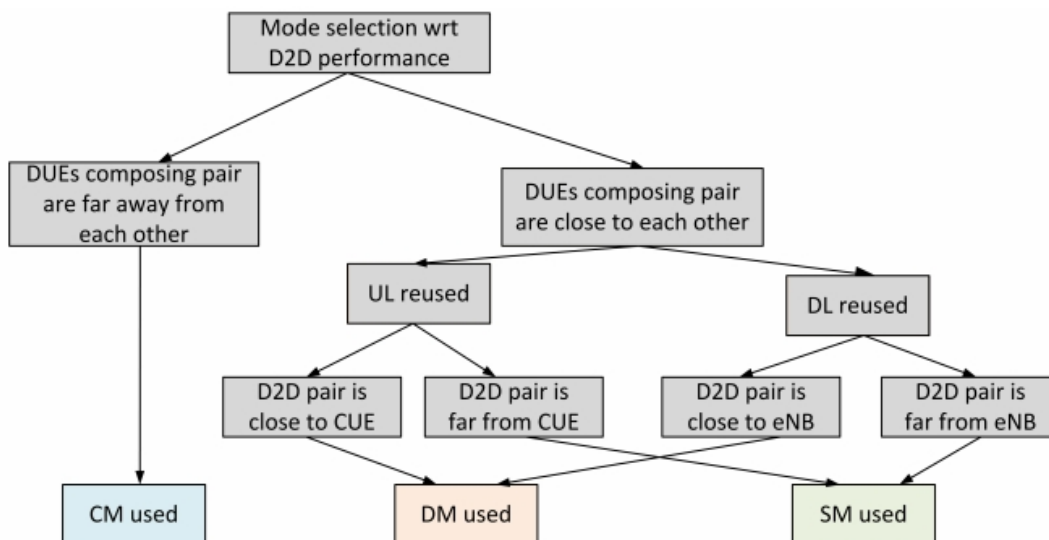


Figure 2.8 : Selection de mode d'un point de vu d'une communication D2D

2.6 Atténuation des interférences

Un challenge majeur pour les communications D2D est d'éviter les interférences entre les communications cellulaires et D2D, si ses dernières utilise les ressources radio allouées aux communications cellulaires. Bien sur ces interférences peuvent être évitées si l'eNB alloue aux communications D2D des ressources propres à elles, mais cela réduit drastiquement l'efficacité spectrale. Des interférences peuvent également survenir entre plusieurs paires de communications D2D, si celles-ci se chevauchent dans le temps, ou en fréquence. Nous allons donc voir dans cette partie les différents types d'interférences qui peuvent survenir dans un réseau supportant le D2D et les solutions possibles pour les réduire.

2.6.1 Atténuation des interférences causées par les communications D2D

Il s'agit du cas de figure le plus important puisque la qualité des communications cellulaires ne doit pas être impactée, sinon, utiliser le D2D n'apporte plus un avantage mais sera plutôt handicapant pour le réseau. Pour réduire ces interférences on dispose des techniques suivantes :

- **Contrôle de puissance** : on réduit la puissance d'émission des équipements D2D afin qu'ils aient un impact minime sur les communications cellulaires. Cette solution présente un problème qui est qu'elle réduit drastiquement la probabilité qu'une communication D2D ait lieu. Il s'agit de l'approche la plus directe, en voici une illustration sur la figure 2.9.
- **Gestion de l'allocation de ressources radio** : ici l'eNB calcule un taux d'interférences tolérable pour chaque bearer radio en UL et diffuse cette information aux équipements D2D. Ces derniers n'utiliseront donc que les ressources qui permettent d'éviter de dépasser le seuil d'interférences fixé par l'eNB. L'avantage de cette méthode est qu'on n'a pas besoin de restreindre la puissance d'émission des équipements D2D, mais le débit de leurs communications se trouve diminué.
- **Association du contrôle de puissance et d'allocation de ressources** : l'atténuation des interférences est réalisée par une combinaison des deux techniques précédentes. Les ressources radio sont allouées en priorité aux communications cellulaires et celles restantes aux communications D2D. Si les exigences des communications D2D ne sont pas satisfaites avec ces allocations, l'eNB peut identifier des ressources qui peuvent être partagées par les CUE et les DUE.

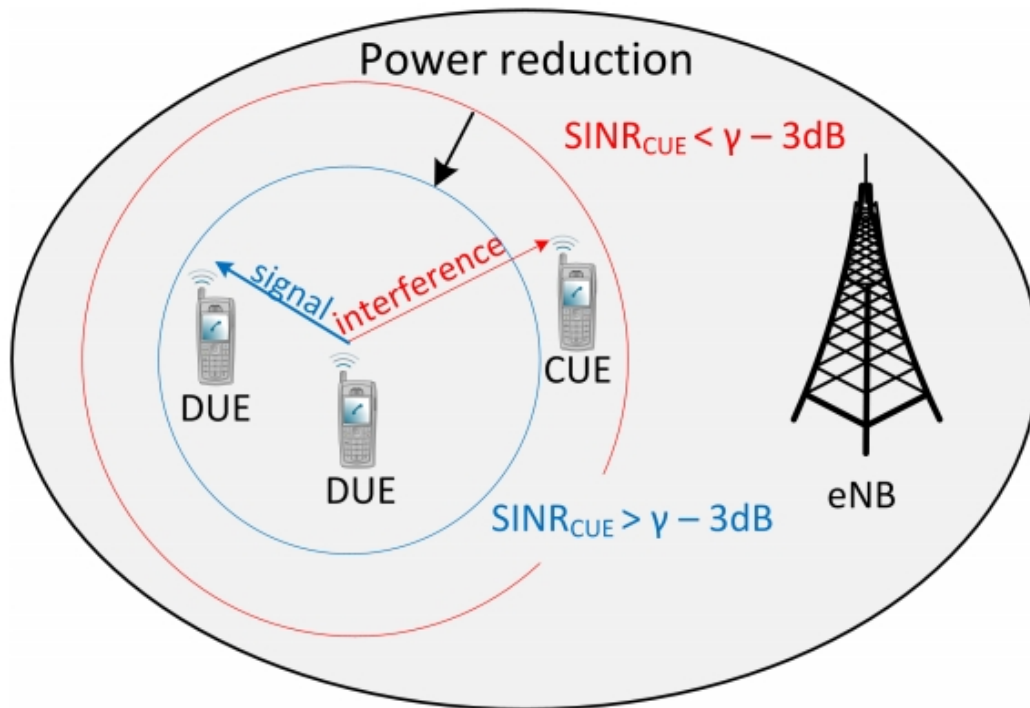


Figure 2.9 : Atténuation des interférences grâce au contrôle de puissance

2.6.2 Atténuation des interférences causées par les CUE aux DUE

Bien qu'assurer une bonne qualité de service aux communications cellulaires soit la priorité du réseau, la qualité des communications D2D doit également être prise en compte. Ce type d'interférences peut être atténué par une allocation de ressources basé sur la position des DUE. Dès qu'un DUE à proximité souhaite communiquer directement (en D2D), il envoie une requête à l'eNB qui sélectionne les ressources radio des CUE qui sont à distance du DUE. La figure 2.10 illustre cette méthode. Dans ce cas, CUE_2 et DUE partagent les mêmes ressources car ils sont suffisamment éloignés. Cette approche présente toutefois une contrainte qui est que l'eNB doit avoir une connaissance exacte de la position des DUE et des CUE pour une allocation de ressources pertinentes. Pour ce faire, on compte sur les méthodes suivantes :

1. **Technique RRA** : les équipements D2D écoutent le canal radio durant la transmission UL et aident l'eNB à connaître les conditions radio de l'environnement, et de les utiliser pour allouer les ressources radio de sorte à éviter les interférences.

2. **Retransmission du signal** : Avec cette méthode, on n'a pas besoin de réserver des ressources radio pour les DUE afin d'atténuer les interférences. Ici, on utilise le principe du rapport de transmission maximum ou MRT (Maximum Ratio Transmission). A la période $i + 1$, le *DUE* récepteur obtient un signal d'interférence de la i^{me} période du UL, de la part de l'eNB mais aussi une interférence sur la période $i + 1$ du UL de la part de CUE, avec un signal de données de la période $i + 1$ du UL de la part du DUE émetteur. Puis, le signal est traité par la technique IC (Interference Cancellation). Pour pouvoir implémenter cette technique, l'eNB doit être équipée de plus d'une antenne, vu qu'elle doit être en mesure de recevoir et transmettre simultanément.
3. **Multi entré multi sorties(MIMO)** : le MIMO assure la diversité spatiale et contribue à l'élévation du rapport SINR (Signal to Interference and Noise Ratio)

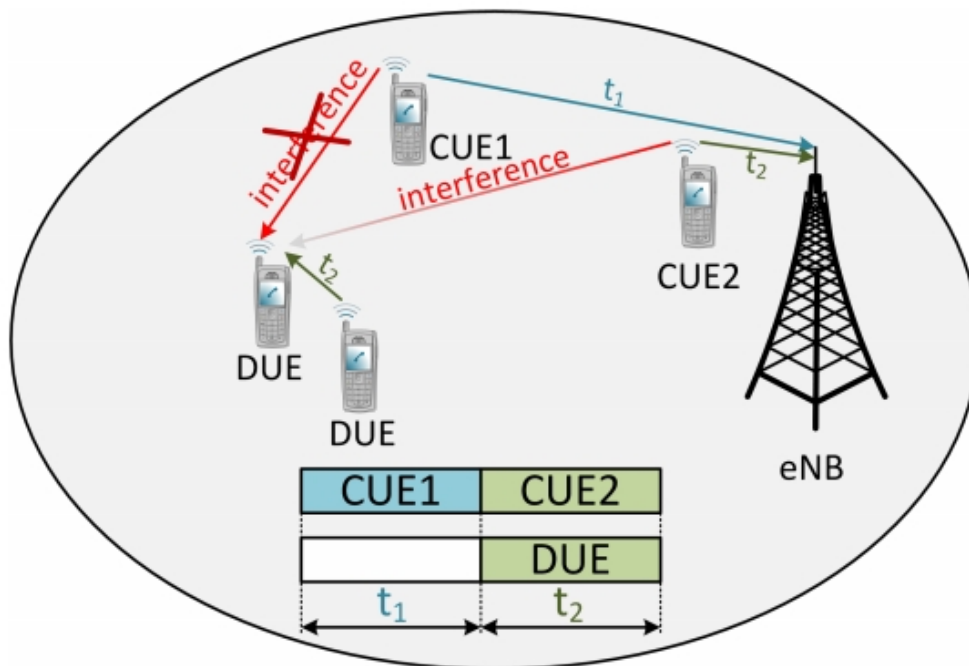


Figure 2.10 : Atténuation des interférences subies par les DUE

2.6.3 Atténuation des interférences mutuelles entre CUE et DUE

Nous pouvons atténuer les interférences entre CUE et DUE en utilisant la technique FFR (Fractional Frequency Reuse). Cette approche consiste en la division de

la bande fréquentielle totale en quatre sous-bandes (f_1, f_2, f_3, f_4). La première sous-bande utilisant la fréquence f_1 est réutilisée dans toutes les cellules par les CUE qui sont dans la région interne, et les autres sous-bandes sont utilisées dans la région externe, comme illustré sur la figure 2.11. Les communications D2D exploitent ce

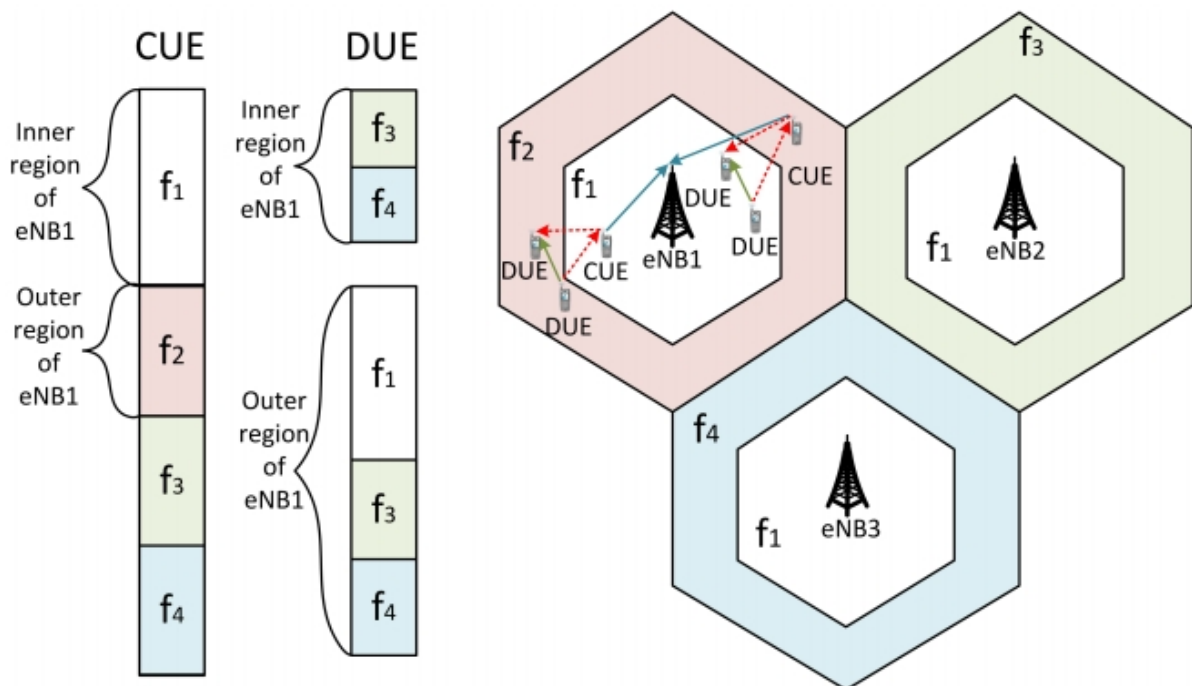


Figure 2.11 : Attenuation des interférences mutuelles entre DUE et CUE grâce à la technique FFR

concept encore plus. Si un DUE est dans la région interne d'un eNB ils peuvent utiliser les sous-bandes allouées aux régions externes ; dans notre exemple, si un DUE est dans la région interne d'une eNB qui utilise f_2 pour la région externe, alors il pourra utiliser les sous-bandes f_3 et f_4 , et s'il se trouve dans la région externe de l'eNB il pourra utiliser f_1 qui est allouée à la région interne. Cette technique, bien qu'efficace d'un point de vue atténuation des interférences, elle n'utilise pas les ressources de façon optimale, vu qu'on alloue qu'un quart de la bande passante aux utilisateurs. Un autre bémol, est qu'on doit faire des approximations sur la position des utilisateurs, ce qui peut diminuer les performances du réseau.

2.6.4 Atténuation des interférences entre les paires D2D

Jusque là, nous avons parlé d'interférences entre communications D2D et communications cellulaires. Nous présumons que ces dernières utilisent des ressources radio orthogonales, il n'y a donc pas d'interférences entre elles. Dans cette section, nous nous concentrerons plutôt sur les interférences entre différentes paires D2D. La figure 2.12 résume les différentes techniques mises en place pour atténuer les interférences selon les différents cas de figure.

Les interférences entre paires D2D peuvent être atténuées en allouant des ressources temporelles, spatiales et fréquentielles qui soient orthogonales. L'eNB crée des groupes d'utilisateurs D2D en se basant sur leurs puissances d'émission, et une estimation de leur position géographique (sur la figure 2.12, les paire 1 et 4 forment un groupe et les paire 2 et 3 forment un autre groupe) et alloue des ressources orthogonales aux paires d'un même groupe. Ces dernières sont attribuées sur des périodes assez longues ce qui réduit les besoins en signalisation. Cependant, il subsiste encore un risque d'interférences dans le groupe ; alors en plus des dispositions précédentes, on ajoute des sauts en temps. L'eNB applique régulièrement et de façon aléatoire des décalages de séquences aux ressources allouées, ce qui fait que si il survient une interférence entre paires de groupes différents, elle durera moins longtemps (dans notre exemple, les paires 2 et 4 ont reçu quelques intervalles de temps orthogonaux bien qu'elles n'appartiennent pas au même groupe).

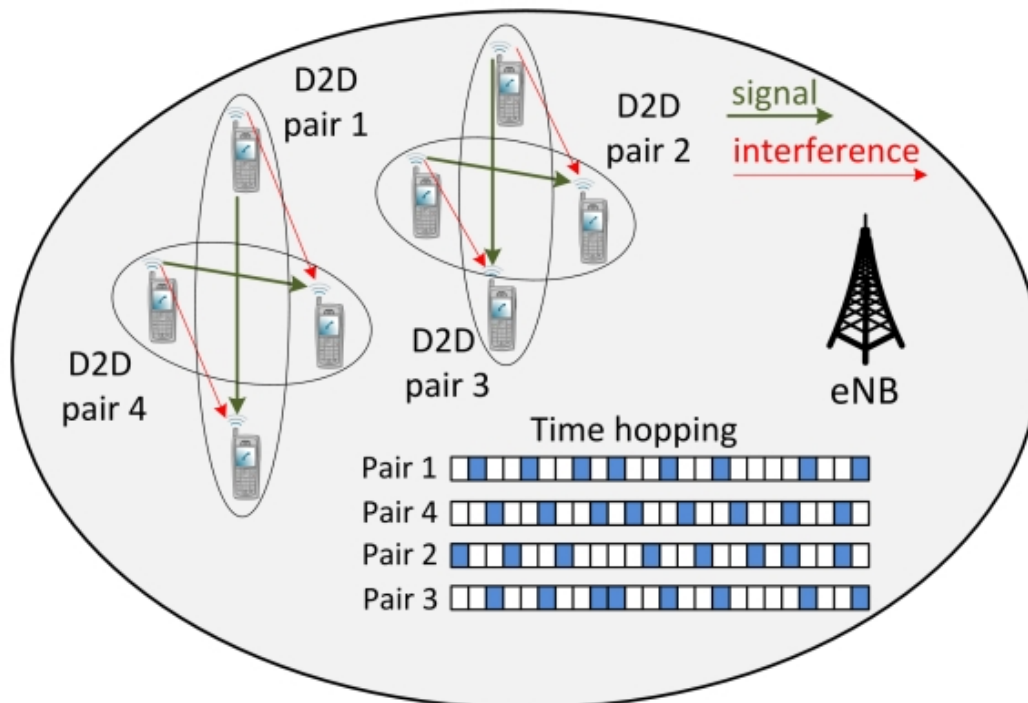


Figure 2.12 : Atténuation des interférences entre paires D2D

2.7 Conclusion

A travers ce chapitre nous avons décrit le principe général des communications D2D. En particulier, nous avons présenté l'architecture étendue des réseaux LTE supportant la technologie D2D. A cet effet, les fonctions de proximité de service ProSe qui ont été ajoutées ont été décrites. Ensuite, nous avons expliqué que les communications D2D pouvaient être classées selon trois critères qui sont le D2D management, le D2D scenario et Radio Ressource Management (RRM). Dans la mesure où dans un réseau supportant le D2D il faut choisir selon le contexte quel mode de communications sélectionner, nous avons présenté les deux modes de sélection, statique et dynamique. Nous avons terminé par les types d'interférences qui pouvaient survenir sur un tel réseau et les différentes solutions qui ont été proposées pour les atténuer.

Performances de la technologie D2D

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'implémentation et à l'évaluation des performances de la technologie D2D dans le cadre des réseaux cellulaires 4G/LTE. Nous présenterons d'abord l'environnement de simulations ns-3 qui a été utilisé pour les simulations proposées. En particulier, nous énumérerons les classes d'abstraction principales qui sont propres à ce logiciel. Vu que D2D n'est pas supporté par la version officielle de ns-3, nous indiquerons les modifications à prendre en compte pour prendre en charge cette technologie. Enfin, nous présenterons quelques résultats de simulation et de validation et discuter du mode de sélection de communication optimal (D2D ou D2I).

3.2 L'environnement de simulation réseaux ns-3

ns-3 est un simulateur de réseaux à événements discrets, prévu principalement pour la recherche et l'enseignement. Le projet ns-3 a débuté en 2006, il est open-source et vise à maintenir un environnement ouvert, permettant aux chercheurs de contribuer à son développement et son perfectionnement. ns-3 fournit un modèle sur comment les paquets de données se comportent au sein d'un réseau ; il fournit également un simulateur permettant aux utilisateurs d'expérimenter leurs modèles. Parmi les raisons d'utiliser ns-3, la possibilité d'effectuer des études de situations qui seraient trop difficiles ou impossibles sur des systèmes réels, d'étudier les comportements des systèmes dans des situations contrôlées et reproductibles, et d'apprendre comment les réseaux fonctionnent. Notons que les modèles présents sur ns-3 se concentrent sur la modélisation du fonctionnement des réseaux et protocoles d'Internet, même s'il n'est pas limité à cet usage. En effet, plusieurs utilisateurs

se servent de `ns-3` pour modéliser des systèmes autres qu'Internet.

Voici quelques caractéristiques de `ns-3` :

1. `ns-3` est conçu comme un ensemble de bibliothèques qui peuvent être soit combinées entre elles, soit avec d'autres bibliothèques externes. Tandis que certaines plateformes de simulation fournissent une interface graphique où tous les aspects sont pris en charge, `ns-3` est plus souple ; plusieurs outils d'analyse de données, d'animation et de visualisation peuvent être utilisés avec `ns-3`. Cependant, l'utilisateur doit s'attendre à travailler avec la ligne de commande, et avec des outils de développement programmables en C++ ou/et en Python.
2. `ns-3` est principalement utilisé sur des systèmes d'exploitation Linux, bien que des supports existent pour *FreeBSD* et *Cygwin* (pour windows).

3.2.1 Mise en place de l'environnement `ns-3`

Comme mentionné plus haut, la programmation en `ns-3` est faite soit en C++ soit en Python. La plupart des API (Application Programming Interface) de `ns-3` sont disponibles en Python, mais les modèles sont écrits en C++ dans tout les cas. `ns-3` est distribué sous forme de code source, ce qui signifie qu'il appartient à l'utilisateur système de posséder un environnement de développement de logiciels pour construire les bibliothèques de `ns-3`, avant de pouvoir exécuter ses propres programmes.

Pour utiliser `ns-3`, une distribution de celui-ci peut être téléchargée à partir du site officiel. Cependant, cela n'est pas suffisant, car en plus de cette distribution il faut plusieurs dépendances (GNU toolchain, mercurial, un éditeur de texte). Il existe une page *Wiki* dédiée à `ns-3`, qui dans la rubrique "Installation" explique clairement les étapes, les packages requis, ainsi que les commandes nécessaires à l'installation de `ns-3` [8]. Une fois le téléchargement des outils requis terminé, il reste donc à construire les bibliothèques du simulateur. Pour ce faire, trois options s'offrent à l'utilisateur et qui sont : "Building with waf", "Building with bake" et "Building with build.py". C'est cette dernière option que nous avons adoptée. Concernant le compilateur C++, nous avons naturellement utilisé `g++` qui est intégré à la plupart des distributions Linux, bien qu'il soit possible d'en utiliser un autre.

3.2.2 Classes de base du langage `ns-3`

Nous allons présenter ici quelques abstractions qui sont connues dans le domaine des réseaux mais qui ont une signification particulière dans le langage de `ns-3`. Voici les principales abstractions :

1. **Node** : dans le jargon d'internet, un appareil qui se connecte à un réseau est appelé hôte ou terminal. Mais puisque ns-3 est un simulateur de réseaux et pas seulement un simulateur de réseaux internet, nous n'utiliserons pas ces termes là ; nous leur préférerons le terme plus générique de *noeuds*. En ns-3, l'abstraction d'un appareil connectable est appelée *noeud*, et elle est représentée en C++ par la classe `Node`.
2. **Application** : dans un système réel, une application s'exécute sur un appareil (ordinateur, téléphone etc...) pour accomplir une tâche précise. En ns-3, elle s'exécutera donc sur un noeud, et son abstraction en C++ est représentée par la classe `Application`.
3. **Channel** : pour se connecter à un réseau, un noeud quelconque a besoin d'au moins une carte d'interface. En ns-3, une telle carte d'interface est appelée `NetDevice`. En utilisant un `NetDevice`, un noeud se connecte au réseau via un canal. En ns-3, le concept de canal est représenté par la classe `Channel`. Un objet `node` se connectera donc au reste du réseau grâce à un objet de type `Channel`.
4. **Topology helpers** : connecter des `NetDevices` à des noeuds, des `NetDevices` à des canaux, et attribuer des adresses IP sont des tâches courantes en ns-3. Par conséquent, des *topology helpers* sont fournis pour rendre ces tâches aussi simples que possible.

3.3 Intégration de la technologie D2D dans le module LTE de ns-3

La distribution officielle de ns-3 ne supporte pas la technologie Device-to-Device (D2D), bien que celle-ci inclue le module `lte` qui permet de simuler les réseaux LTE. Cependant, ns-3 étant open-source, des travaux de recherche et de développement sont en cours pour développer les modules nécessaires pour intégrer la technologie D2D dans la distribution officielle de ns-3. Dans cet objectif, le groupe de travail sur ns-3 ont adopté récemment le produit du développement qui a été proposé dans [9]. En fait, les auteurs dans [9] expliquent les modifications à apporter à la distribution de ns-3.29 pour que celle-ci supporte la technologie D2D. Les modifications en question concernent pratiquement toutes les couches dans la pile protocolaire de LTE, mais aussi quelques unes concernent même le réseau coeur EPC.

Dans ce mémoire, nous avons donc procédé aux modifications qui ont été proposées par les auteurs de [9] et nous avons effectué des simulations pour reproduire les

principaux résultats pertinents à la technologie D2D. Dans la section qui suit, nous allons présenter les résultats que nous avons obtenus.

3.4 Simulations et performances

Afin de prendre en charge les communications D2D dans le réseau LTE, des gestionnaires de services de proximité `ProSe` ont été rajoutés dans le réseau LTE-A, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 2. Ainsi, lorsque les UEs sont en dehors de la zone de couverture d'une station de base, le contrôle et les échanges d'informations peuvent être effectués par les UEs eux-mêmes, via le `Sidelink` qui est un lien latéral, contrairement au `direct link` qui relie une station de base aux UEs qui lui sont attachés. Sur le `Sidelink`, les UEs peuvent assurer de façon autonome trois tâches principales qui sont :

1. **Direct Discovery** : qui consiste à ce que les UEs peuvent diffuser des informations système pour permettre aux autres UEs qui se trouveraient à proximité d'être informés des services auxquels ils peuvent avoir accès. Notons que ce service n'a pas besoin d'établir une communication directe entre les UEs.
2. **Direct communication** : qui consiste à ce que des paires de UEs qui se sont préalablement synchronisés puissent communiquer directement entre eux.
3. **Synchronisation** : celle-ci permet aux UEs de s'entendre sur les termes de la communication D2D, c'est à dire s'aligner mutuellement sur les ressources temporelles et fréquentielles à utiliser.

Dans cette section, nous allons présenter quelques résultats de simulations que nous avons effectuées pour évaluer les performances de la technologie D2D par rapport aux fonctionnalités qu'on vient de citer.

3.4.1 Direct Discovery

Pour effectuer la diffusion d'informations, les UEs diffusent des messages tels que SIB (System Information Block). Au niveau de la couche physique, ces messages utilisent un canal dédié appelé le PSDCH (Physical Sidelink Discovery Channel). Le canal PSDCH est périodique et la périodicité est variable, pouvant aller jusqu'à 1024 trames radio. Durant chaque période, un certain nombre de sous-trames peuvent être configurées pour définir un PSDCH. Pour évaluer le Direct Discovery, nous considérons un scénario dont les ressources consistent en 10 paires de RBs dans le domaine fréquentiel et en 5 sous-trames dans le domaine temporel. Aussi, 10 UEs ont été déployés en dehors de la zone de couverture de la station de base. Les UEs sont aléa-

toirement distribués sur une surface de 100 m x 100 m. La simulation consiste alors à évaluer la fonction de distribution cumulative ou CDF (Cumulative Distribution Function) du nombre de périodes nécessaires pour un UE du groupe pour découvrir tous les autres UEs dans son groupe. Le résultat est montré par la figure 3.1.

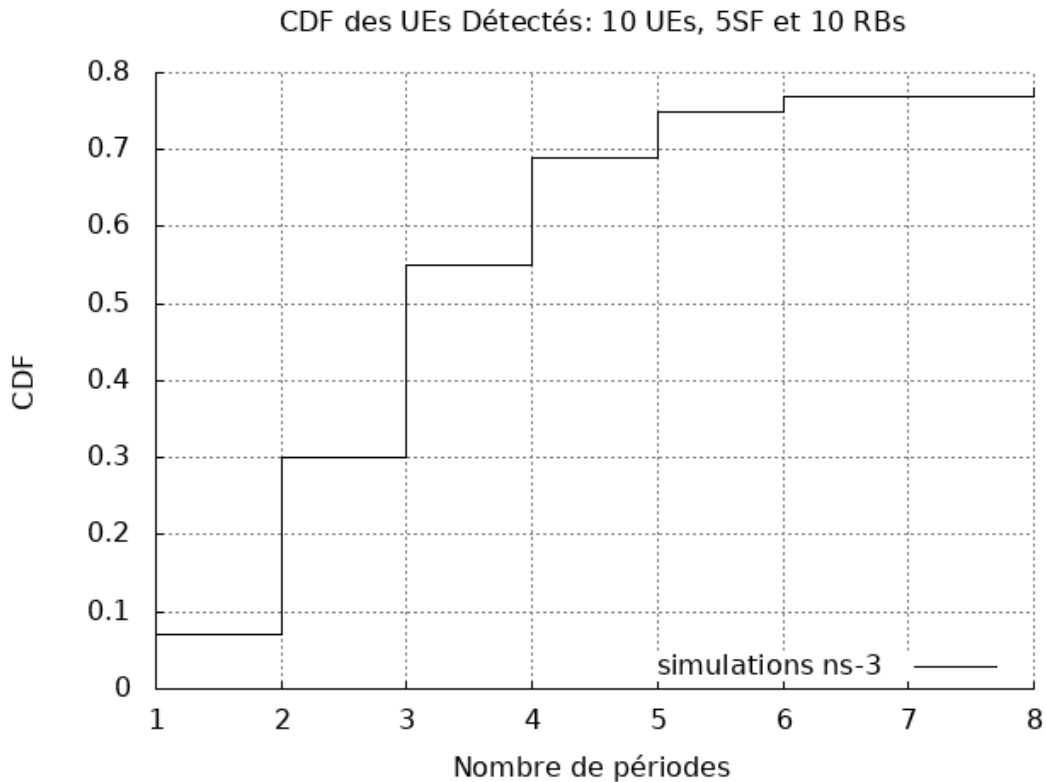


Figure 3.1 : CDF en fonction du nombre de périodes requises par Direct Discovery

3.4.2 Direct Communication

Comme avec les communications conventionnelles dans LTE, les communications sur le Sidelink sont assurées grâce aux canaux de contrôle et aux canaux de données. Au niveau de la couche physique, la technologie D2D définit les canaux PSCCH (Physical Sidelink Control CHannel) et PSSCH (Physical Sidelink Shared Channel). PSCCH est un canal de contrôle qui véhicule les informations de contrôle telles que MCS (Modulation and Coding Scheme) et les signaux de référence DMS (Demodulation Reference Signal). Quant à PSSCH, il transporte les données elles-mêmes.

Pour évaluer les performances de Direct Communication, nous considérons

les canaux PSCCH et PSSCH.

3.4.2.1 Probabilité de collision sur PSCCH

Ce scénario est utilisé pour examiner la probabilité de collision sur PSCCH, étant donnée une configuration particulière d'une plage de ressources et un nombre donné de UEs en concurrence pour l'obtention de ressources. La configuration peut être choisie aléatoirement. Nous considérons qu'il y a collision si deux ou plus UEs sélectionnent les mêmes ressources pour transmettre un message sur PSCCH. Nous avons simulé cette probabilité pour deux configurations différentes, dont l'une est plus restrictive que l'autre en termes de ressources disponibles. Les résultats sont montrés par la figure 3.2. Comme nous le voyons, pour une configuration donnée, à mesure que le nombre de UEs augmente la probabilité de collision augmente aussi. Nous remarquons aussi que la probabilité de collision augmente plus rapidement avec le nombre de UEs lorsque les ressources sont plus restreintes.

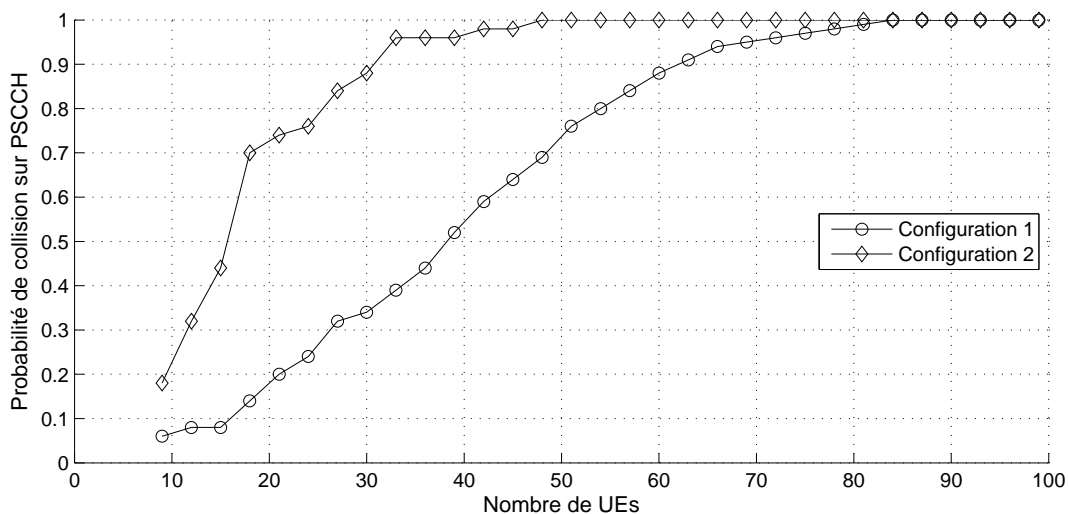


Figure 3.2 : Probabilité de collision sur PSCCH pour deux configurations de ressources

3.4.2.2 Débit sur PSSCH

Cette évaluation est utilisée pour valider le débit maximum atteignable sur le Physical Sidelink Shared Channel (PSSCH) entre deux UEs, en considérant une configuration donnée de la plage de ressources. Nous supposons que les deux UEs sont

assez proches pour éviter les pertes dues au canal. Dans cette simulation, nous utiliserons 3 configurations différentes en variant quelques paramètres. Les paramètres à varier sont résumés dans la table 3.1 et les débits obtenus sont montrés par la figure 3.3. Comme prévu, la taille d'allocation de ressources est déterminant pour le débit. Nous pouvons remarquer aussi l'influence importante du MCS sur le débit. En effet, lorsque MCS augmente l'efficacité spectrale augmente aussi ce qui contribue de façon significative à l'augmentation de débit. Enfin, la durée de PSSCH ainsi que la périodicité contribuent aussi à l'influence sur le débit obtenu.

Tableau 3.1 : Paramètres de simulation de débit

Configuration	Période SL (ms)	Durée PSSCH (ms)	MCS
1	40	8	10
2	80	8	12
3	320	40	15

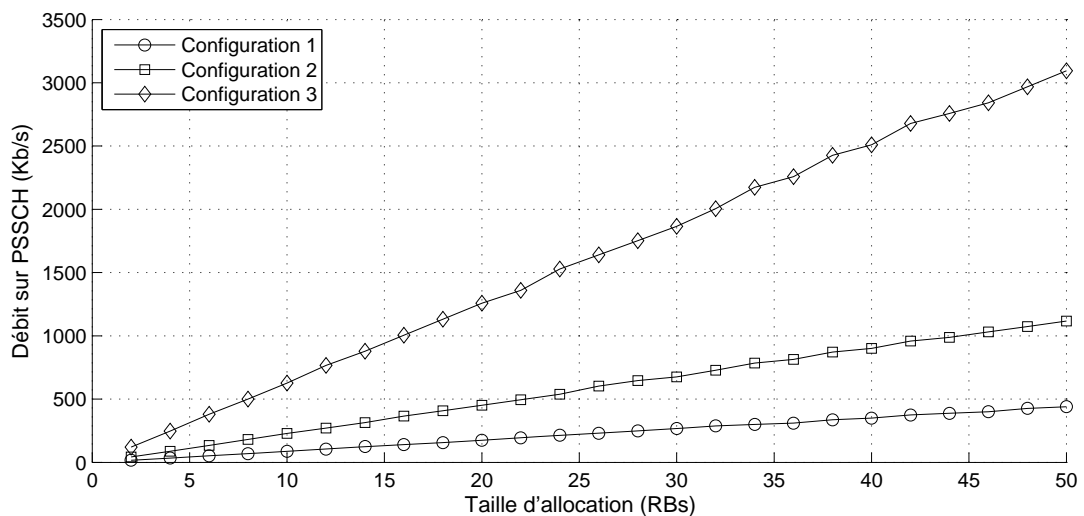


Figure 3.3 : Débit de communications D2D sur PSSCH en fonction des ressources allouées

3.4.3 Synchronisation

Dans cette dernière partie, nous considérons la synchronisation entre les UEs qui se trouveraient dans un groupe donné. Le scénario est composé de 63 UEs unifor-

mément distribués sur une zone donnée. Dans ce scénario, tous les UEs sont non synchronisés au début de la simulation. Chaque UE est ensuite configuré pour effectuer le protocole de synchronisation D2D. Donc, chaque UE transmet les signaux de synchronisation toutes les 40 ms lors d'une transmission de données. Chaque UE observe son environnement pour mesurer la puissance du signal qu'il reçoit à partir de ses pairs. En fonction d'un certain seuil de puissance SyncTxThres , le UE décidera s'il doit jouer le rôle de référence dans le processus de synchronisation ou pas. La figure 3.4 illustre les résultats obtenus. Comme attendu, au fur et à mesure que le seuil augmente, le nombre de UEs qui doivent jouer le rôle de référence pour la synchronisation augmente.

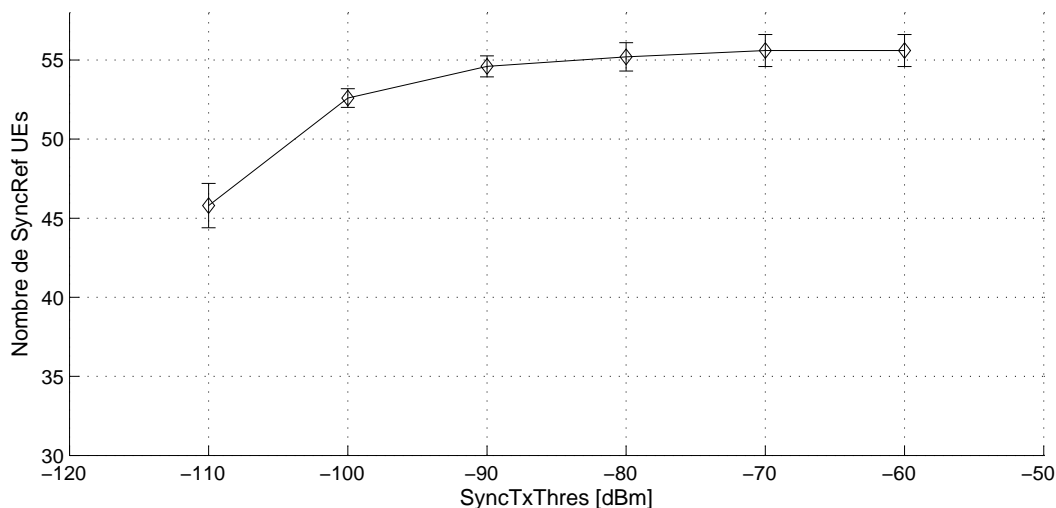


Figure 3.4 : Classification des interférences dans les communications D2D

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les performances de la technologie D2D telle qu'elle a été intégrée dans le réseau LTE-A. Les résultats de simulation ont été obtenus en utilisant l'environnement de simulation ns-3 . 29. Après avoir rapporté les modifications nécessaires pour la prise en charge de D2D, nous avons étudiés les performances de celle-ci par rapport à plusieurs aspects dont Device Discovery, Direct Communication et la synchronisation.

Conclusion

Face aux challenges auxquels les réseaux LTE doivent faire face, en termes d'augmentation du nombre d'utilisateurs, ou bien la qualité de service requise pour le bon fonctionnement d'applications de plus en plus exigeantes, il a fallu développer de nouvelles techniques pour répondre à ces demandes. Les communications Device-to-Device s'avèrent être une solution intéressante, tant elles tirent profit de ressources qui sont la plupart du temps sous-exploitées, à savoir, la voie montante (UL) des communications cellulaires, ou bien les bandes de fréquences qui ne sont pas sous la licence d'un opérateur (cas du outband D2D). Cela a pour effet de permettre à un plus grand nombre d'abonnés de communiquer en même temps sans pour autant réduire la qualité des communications due à une trop grosse charge sur le réseau. Cela est rendu possible grâce aux différentes techniques de sélection du mode de communication le plus approprié au contexte dans lequel se trouve l'utilisateur, ainsi qu'à celles permettant l'atténuation des interférences que ce soit entre CUE et DUE ou bien entre paires DUE. Le D2D présente également l'intérêt d'être basé sur les architectures physique et protocolaire des réseaux LTE, et les modifications sont principalement au niveau logiciel. Le coût de son implémentation est donc assez bas.

Durant ce travail, nous avons d'abord fait une présentation des réseaux LTE et de certaines de leurs caractéristiques, notamment leurs architectures physique et protocolaire, ainsi que la technique d'accès utilisée sur ces réseaux, puis la stratégie de partage de ressources. Nous avons ensuite présenté le principe du D2D, et avons vu que pour permettre aux réseaux LTE de supporter cette fonction il fallait ajouter les entités ProSe Function et ProSe Application Server du côté du réseau de l'opérateur, et installer une ProSe Application sur les UE. Ensuite nous avons présenté une classification des communications D2D selon trois critères, à savoir, *D2D management*, *D2D Scenario* et *D2D Radio Resource Management*. Nous avons également vu que les interférences pouvant survenir sur un réseau supportant le D2D pouvaient être des interférences causées par les DUE et subies par les CUE, ou bien causées par les CUE et subies par les DUE et même des interférences entre paires de DUE. Nous avons aussi présenté les différentes techniques mises en oeuvre pour les atté-

nuer. Nous avons terminé en présentant le simulateur de réseaux ns-3, et donner les modifications qui ont été apportées au niveau du module `lte` pour lui permettre de prendre en charge les communications D2D. Pour finir, nous avons validé à travers plusieurs simulations, les performances de cette nouvelle technologie qui semble être retenue pour les réseaux futurs 5G.

Bibliographie

- [1] Y. Bouguen, E. Hardouin, and F.-X. Wolff, *LTE et le Réseaux 4G*. Eyrolles, 2014.
- [2] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *LTE/LTE-Advanced for mobile broadband*. Elsevier, 2011.
- [3] [Online]. Available : <http://www.tutorialspoint.com>
- [4] "LTE resource guide." [Online]. Available : <http://www.us.anritsu.com>
- [5] T. T. Gunes, S. Tsang Kwang U, and H. Afifi, "Hybrid model for lte network-assisted d2d communications," in *International Conference on Ad-Hoc and Wireless Networks*, 2014.
- [6] J. Feng, "Device-to-device communications in lte-advanced network," Ph.D. dissertation, Telecom Bretagne, université de Bretagne sud, 2013.
- [7] P. Mach, Z. Becvar, and T. Vanek, "In-band device-to-device communication in OFDMA cellular networks : A survey and challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, 2015.
- [8] [Online]. Available : <https://www.nsnam.org>
- [9] R. Rouil, F. J. Cintrón, A. Ben Mosbah, and S. Gamboa, "Implementation and validation of an LTE D2D Model for ns-3," in *W-2017 ns-3 workshop*, 2017.