

**Projet :
Simulation d'un réseau 4G en vue d'optimiser les
ressources spectrales de l'opérateur**

**Classification des fonctionnalités implémentées par le
logiciel LTE-Sim (version 4.0)**

Année académique 2012/2013

Groupe Projet MIREs

Table des matières

I.	Introduction à l'implémentation du logiciel LTE-Sim	3
II.	Mise en place de la topologie du réseau	5
III.	Gestion de la mobilité des utilisateurs dans LTE-Sim	6
1.	Le modèle Randon Walk	6
2.	Le modèle aléatoire de direction (Randon Direction)	7
3.	Le modèle Randam Way Point.....	7
4.	Le modèle Constant Position.....	7
5.	Le modèle de Manhattan.....	7
IV.	Paramétrage de vitesse et handover	7
V.	Gestion des flux de données et pile du protocole LTE sous LTE-Sim	8
1.	Notion de « bearer » ou support.....	8
2.	Bearer par défaut et bearer dédié.....	10
3.	QoS et le support radio ou bearer radio sous LTE-Sim	11
4.	La couche Application sous LTE-Sim	12
VI.	Structure du canal radio et gestion des ressources radio sous LTE-Sim	15
1.	Le Gestionnaire de la bande passante sous LTE-Sim	15
2.	Réutilisation de fréquence sous LTE-Sim.....	15
3.	Structure de la trame LTE sous LTE-Sim	16
4.	Ordonnancement des ressources radio dans LTE-Sim	17
5.	L'algorithme PF (Proportional Fairness)	19
6.	L'algorithme M-LWDF (Modified Largest Weighted Delay First)	19
7.	L'algorithme EXP (Exponential Fair).....	20
VII.	Implémentation du canal radio et de la couche PHY sous LTE-Sim	21
1.	Canal radio mobile sous LTE-Sim	21
2.	Modèle de propagation sous LTE-Sim	21
	Références	23

I. Introduction à l'implémentation du logiciel LTE-Sim

Dans ce document, nous désignerons par ***class ::Function()*** la fonction ***Function()*** définie dans la classe ***class***.

Les principales composantes (classes, attributs et variables) du logiciel LTE-Sim sont représentées dans le document [1].

LTE-Sim propose une simulation événementielle, c'est-à-dire que chaque simulation effectuée par LTE-Sim est composée de plusieurs objets (définis en langage C++) modélisant les éléments principaux d'un réseau LTE, chacun de ces objets peut au cours de la simulation, si besoin nécessaire générer un nouveau événement en utilisant la méthode ***Simulator::Schedule()*** afin de permettre une interaction réaliste entre les différents nœuds du réseau.

Un autre élément très important dans LTE-Sim c'est la classe ***Calendar*** qui permet de ranger les événements dans un ordre chronologique de leur création (horodatage). L'ordonnancement des événements est géré par la classe ***Simulator***. En effet, au début de chaque trame de données, la classe ***Calendar*** est composée de trois événements qui sont :

- L'instant correspondant au début de la simulation obtenu avec la méthode ***Simulator::Run()***
- L'instant correspondant au début de la transmission des trames (***Classe FrameManager***) obtenu en utilisant la méthode ***FrameManager::StartFrame()***.
- La fin de la simulation (durée de la simulation) à travers la méthode ***Simulator::Stop()***.

Au cours de la simulation, d'autres événements vont être créés par les éléments du système LTE (c-à-dire les objets ou les méthodes représentant ces éléments et qui sont implémentés dans LTE-Sim) qui constituent d'une manière générale le scénario simulé par LTE-Sim. Comme exemple d'événements que peuvent être créés, nous avons :

- ***Application::CreatePacket()*** pour la création des paquets d'une application
- ***NetworkNode::SendPacketBurst()*** pour l'envoi des paquets
- ***ENodeB::ResourceAllocation()*** pour l'allocation des ressources entre les utilisateurs d'une cellule du réseau.

Pour rendre les simulations plus réalistes, LTE-Sim a implémenté trois catégories de nœuds du réseau LTE à savoir :

- ***UE (User Equipment)*** qui représente les utilisateurs du réseau LTE.

- **eNB (Evolved Node B)** qui représente les stations de base dans le réseau LTE.
- **MME/GW (Mobility Management Entity/Gateway)** qui représente l'élément clé dans le contrôle des nœuds du réseau d'accès LTE (UE, eNB). Il permet également de gérer la procédure d'activation/désactivation de la transmission sur le lien radio, de gérer la procédure de handover et d'effectuer le choix de la passerelle pour la transmission des paquets d'un UE lorsque celui se rattache à un eNB.

Il est important de noter que chacun de ces nœuds peut être à la fois source ou destinataire d'un message et est par conséquent identifié dans LTE-Sim par une adresse source et de destination, un port source et de destination et le type de protocole de transport qu'il utilise. A noter que dans la version actuelle du LTE-Sim seul le protocole de transport UDP (User Datagram Protocol Protocol) est implémenté.

LTE-Sim permet aussi de simuler des stratégies d'allocation des ressources radio dans le domaine temps-fréquence.

- Dans le domaine temporel, les ressources radio sont distribuées à chaque TTI (Transmission Time Interval) de durée 1 ms. De plus, chaque TTI est composé de deux slot de temps de durée 0.5 ms chacun et correspondant à 14 symboles OFDM dans une configuration par défaut. 10 TTI consécutifs forment une trame LTE.
- Dans le domaine fréquentiel, la bande passante est divisée en sous-canaux de largeur 180 KHz chacun correspondant à 12 sous-porteuses consécutives et régulièrement espacées. Vu que la largeur de chacun sous-bande est fixe, pour les différentes bande de fréquences qu'utilise LTE, le nombre de sous-canaux varie proportionnellement.
- Dans le domaine temps-fréquence, l'allocation des ressources radio s'étend sur une durée de 0.5 ms correspondant à un slot temporel et un sous-canal de largeur 180 KHz dans le domaine fréquentiel. On peut ainsi allouer à un utilisateur dans le domaine temps-fréquence un **RB (Resource Block)** qui correspond en fait à la plus petite ressource radio qui être alloué à un UE pour la transmission.

Dans la version courante du LTE-Sim, la structure de la trame LTE est garantie par la **classe FrameManager**. Cette classe a pour rôle de contrôler l'ordonnement des trames et des sous-trames (c'est-à-dire les TTIs) et d'assurer la synchronisation entre tous les eNBs.

Les aspects de la couche PHY sont gérés par les UEs et les eNBs. En particulier, un objet de la **classe PHY** a été créé pour chacun de ces éléments (UE et eNB) afin d'enregistrer les paramètres de la couche PHY et le modèle de canal (modèle de propagation et type d'environnement de propagation) auquel il est interconnecté. Y

sont enregistrés les informations telles que la qualité du lien radio, et le niveau d'interférence perçu. Les autres paramètres liés à la couche PHY (fréquence porteuse, bande passante disponible, liste des RBs disponibles en liaison UL ou DL, les paramètres de réutilisation fréquentielle etc.). L'architecture d'une trame LTE est présentée à la figure suivante (figure 1).

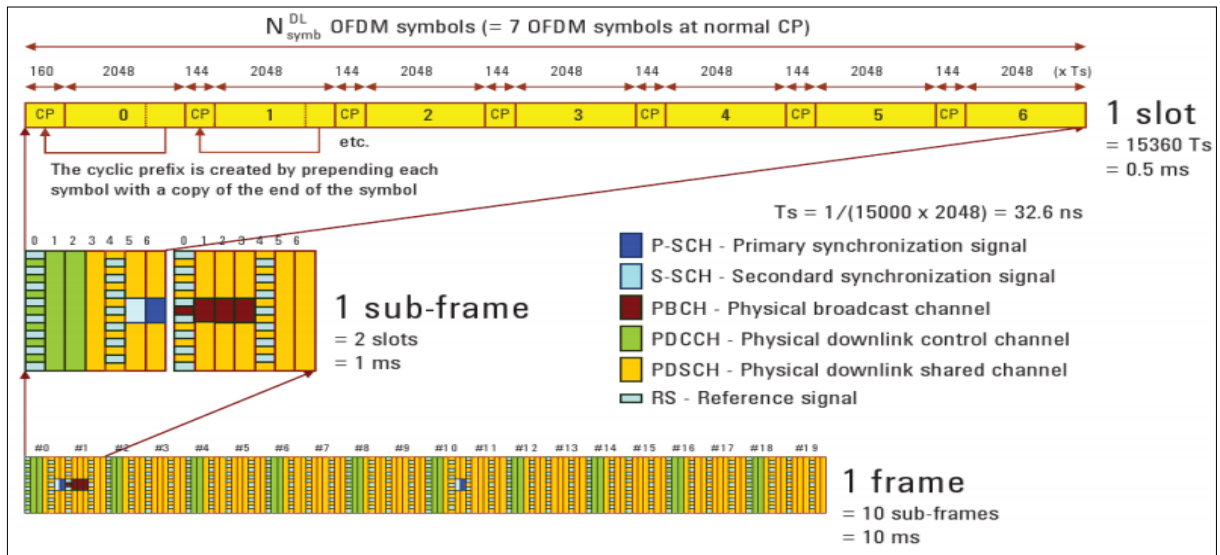


Figure 1: Structure d'une trame LTE

Au niveau de la couche Application, LTE-Sim a implémenté quatre types de générateurs de trafic qui sont :

- **Le générateur trace-based**
- **Le générateur ON-OFF**
- **Le générateur CBR (Constant Bit Rate)**
- **Le générateur infinite buffer**

Dans la suite du document, nous allons présenter en détails les rôles de chacun des éléments constituant l'architecture du logiciel LTE-Sim et le rôle joué par chaque composante dans la mise en place d'un réseau LTE réaliste.

II. Mise en place de la topologie du réseau.

La topologie du réseau est composée d'un ensemble de plusieurs nœuds (des eNBs, un ou plusieurs MME/GW et plusieurs UEs) distribués entre les cellules

LTE-Sim permet de simuler des scénarios de communication dans des topologies mono-cellules ou multi-cellules.

Toutes les méthodes nécessaires à la création et la gestion de la topologie du réseau sont fournies par la classe **NetworkManager**.

Une cellule LTE, implémentée dans LTE-Sim par la classe **cell** est identifiée par un Identifiant Unique (ID), son rayon et ses coordonnées définies dans un système **Cartésien**.

Pour chaque nœud du réseau LTE, une classe dédiée a été développée par extension de la classe **NetworkNode** (c'est-à-dire la **classe ENodeB**, la **classe UserEquiptement** et la **classe MME-GW**) qui se trouve le dossier **lte-sim-r4.0\src\device**.

Chaque nœud étant identifié par un ID unique et sa position dans un système cartésien.

III. Gestion de la mobilité des utilisateurs dans LTE-Sim

Afin de prendre en compte la mobilité des utilisateurs pour assurer une simulation réaliste, LTE-Sim propose un système inter-cellules prenant en compte la procédure de handover.

Cinq modèles de mobilité les plus rencontrés sont supportés par la version 4.0 de LTE-Sim à savoir le **modèle Random Walk**, le **modèle aléatoire de direction (Random Direction)**, le **modèle de Manhattan**, le **modèle Constant Position** et le **modèle Random Way Point** dont nous détaillons les procédures un peu plus loin.

Pour chacun de ces modèles, une classe dédiée (la classe **RandomDirection**, la classe **RandomWalk etc.**) a été créée par extension de la classe **MobilityModel** qui se trouve dans le dossier **lte-sim-r4.0\src\mobility**.

La mobilité des utilisateurs est gérée par la classe **NetworkManager** qui après chaque TTI, met à jour la position des UEs selon le modèle de mobilité adopté et vérifie à travers la méthode **NetworkManager::HandOverProcedure()** si la procédure de handover est nécessaire.

1. Le modèle Random Walk

Ce modèle est développé pour imiter un mouvement imprévisible. Un nœud mobile dans ce modèle se déplace de son endroit courant à un nouvel endroit en choisissant aléatoirement une direction et une vitesse suivant lesquelles il se déplace. La nouvelles vitesse et direction toutes les deux sont choisies dans des gammes prédéfinies entre $[0, 2\pi]$ respectivement. Un nœud mobile atteignant la frontière de simulation, rebonds avec l'angle déterminé par la direction entrante et puis continue le long du nouveau chemin. Par défaut, la distance parcourue est égale

à 200, 400, 1000 m lorsque la vitesse de l'utilisateur est égal à 3, 30 et 120 kilomètres par heure, respectivement.

2. Le modèle aléatoire de direction (Randon Direction)

Ce modèle fournit un nombre constant de voisins dans toute la simulation. Les nœuds mobiles choisissent une direction aléatoire suivant laquelle ils se déplacent à la frontière de la simulation dans cette direction. Une fois que la frontière est atteinte, le nœud mobile fait une pause pendant le temps indiqué, choisit une autre direction angulaire continue alors le processus.

3. Le modèle Randam Way Point

Dans ce modèle la mobilité des nœuds est typiquement aléatoire et tous les nœuds sont distribués uniformément dans l'espace de simulation. En effet il consiste en :

- Le placement d'un certain nombre de mobiles dans une zone carrée dans laquelle ils ne peuvent sortir.
- L'affectation d'une position, d'une vitesse et d'une destination initiale à chaque mobile.
- Le déroulement proprement dit de la simulation, où à chaque fois que les mobiles atteignent leur destination dans le carré, ils repartent vers une autre destination choisie aléatoirement après un éventuel temps de pause.

4. Le modèle Constant Position

Dans ce modèle les nœuds sont immobiles.

5. Le modèle de Manhattan

Le modèle de mobilité de Manhattan est utilisé pour émuler le modèle de circulation des nœuds mobiles dans des rues définies par des cartes. Une carte est composée d'un certain nombre de rues horizontales et verticales. Chaque rue a deux voies dans chaque direction (les directions Nord et Sud en rues verticales, l'Est et l'Ouest en rues horizontaux). Le nœud mobile est autorisé à se déplacer selon la grille des rues horizontales et verticales sur la carte. A l'intersection d'une rue horizontale et d'une rue verticale, le nœud mobile peut tourner à gauche, à droite ou aller tout droit.

D'autres modèles de mobilité plus sophistiqués peuvent être développés par extension de la classe ***MobilityModel***.

IV. Paramétrage de vitesse et handover

Dans LTE-Sim, les variables ***m_speed*** et ***m_speedDirection*** sont utilisées pour définir la vitesse et la direction des UEs selon le modèle de mobilité. Typiquement, les vitesses 0, 3, 30 et 120 km/h sont adoptées et sont équivalentes respectivement à des scénarios statiques, des piétons, des véhicules. Pour chaque UE, un élément

m_mobility a été créée pour gérer sa mobilité.

D'autre part, dans LTE-Sim, seul le **hard handover** est implémenté. Durant cette procédure, lorsque l'UE se déplace d'une cellule à l'autre, *le choix de la nouvelle eNB est basé uniquement sur la distance entre l'eNB et l'UE.*

Pendant la procédure du hard handover, l'UE se déplace vers un nouvel état (cellule) pendant une durée de temps égale à 30 ms (sous LTE-Sim). Pendant ces 30 ms (>>10 ms, durée d'une trame), aucun flux dirigé ou provenant de l'UE ne peut être ordonné par l'eNB.

Le contrôle d'admission dans une nouvelle cellule lors du processus de handover n'est pas implémenté sous LTE-Sim.

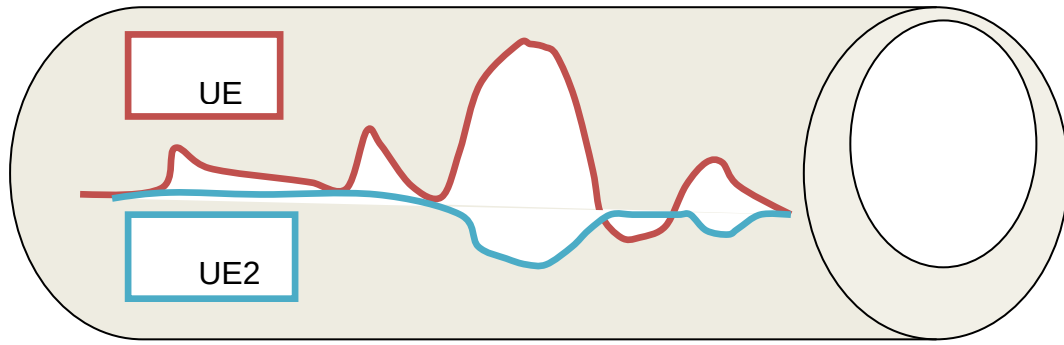
V. Gestion des flux de données et pile du protocole LTE sous LTE-Sim

LTE-Sim a développé un système basé sur une des spécifications de la norme LTE qui est la gestion de la qualité de service, pour cette raison, une approche basée sur *l'EPS bearer* (Evolved Packet System) a été introduit dans le logiciel afin de fournir une différenciation au niveau des exigences en QoS.

1. Notion de « bearer » ou support

Comme décrit dans le document [3], dans tout réseau, les ressources de transmission et de traitement au sein des nœuds sont limitées et partagées entre les utilisateurs. Selon la nature et la technologie du réseau, l'accroissement de ces ressources par l'opérateur peut être complexe et coûteux. Dans un réseau mobile par exemple, la ressource radio (spectre) est particulièrement onéreuse. Cette préoccupation a conduit à considérer des mécanismes optimisant l'utilisation de ces ressources sur l'interface radio, mais également sur les autres interfaces du réseau impliqués dans le plan usager (UE-réseau). Ces mécanismes de Qualité de Service ou QoS visent à offrir à l'utilisateur le service demandé avec une qualité satisfaisante, tout en minimisant les ressources utilisées pour y parvenir.

Les figures suivantes illustrent l'importance de tels mécanismes. Dans cet exemple, l'UE2 a un appel voix en cours, avec un débit assez stable. L'UE1 navigue sur Internet et démarre un téléchargement. En l'absence de mécanisme approprié de partage de ressources, l'UE1 monopoliserait à partir de cet instant la bande passante du système, privant l'UE2 de ressources pour recevoir des données. En revanche, en autorisant un débit instantané maximal à l'UE1 et en garantissant un débit minimal à l'UE2 pour son appel voix, le trafic de l'UE1 sera lissé, tandis que l'UE2 pourra recevoir des données au rythme auquel elles sont produites, sans subir les variations de débit de l'UE1.



Sans mécanismes de QoS, l'UE2 subit les variations de trafic d'UE1.

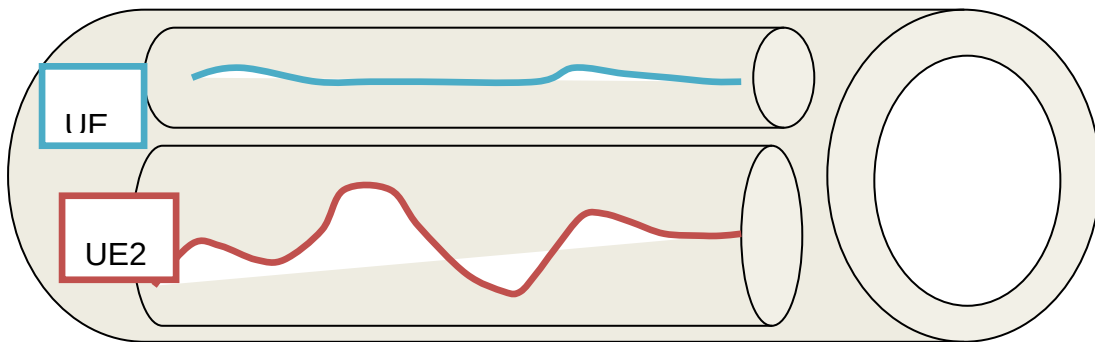


Figure 2: Gestion de la QoS dans les réseaux radio mobiles.

Avec les mécanismes de QoS, l'UE2 peut avoir un débit garanti, l'UE1 ne peut monopoliser toute la bande passante.

Pour affecter efficacement les ressources aux besoins d'un appel, la notion de bearer a été introduite dans les télécommunications, dès la conception du système GSM. Un bearer peut être vu comme un tuyau entre deux entités du réseau qui communiquent entre elles sur une interface, tuyau dont certaines caractéristiques sont négociées entre ces entités lors de son établissement et qui permet le transfert de données. Le concept de bearer est ainsi décliné sur les interfaces du réseau dont les ressources doivent être économisées, et en particulier sur :

- L'interface radio, entre l'UE et l'eNB ;
- L'interface S1 entre l'E-UTRAN et le réseau cœur ;
- Les interfaces du réseau cœur

Les bearers sur ces interfaces forment un bearer agrégé, entre l'UE et le réseau cœur : le bearer EPS (Evolved Packet System) ou EPS bearer.

La connectivité à un réseau de données via l'E-UTRAN et l'EPC (Evolved Packet Core) est assurée par un bearer EPS. Celui-ci porte les flux de trafic qui doivent recevoir un même traitement de QoS entre l'UE et la P-GW (Packet Data Network Gateway). Il est constitué des éléments suivants :

- Le radio bearer sur l'interface Uu, entre l'UE et l'eNB ;
- Le bearer S1, entre l'eNB et la S-GW (interface SI-U) ;
- Le bearer S5/S8, entre la S-GW et la P-GW

Le radio bearer et le bearer S1 forment en outre une connexion logique entre l'UE et la S-GW : l'E-RAB (E-UTRAN Radio Access Bearer), qui constitue un élément agrégé du bearer EPS.

Enfin, l'association du bearer EPS et du bearer sur le réseau de données externe fournit le support de bout-en-bout pour le service.

Ces éléments et entités du réseau qui le portent sont représentés sur la figure suivante :

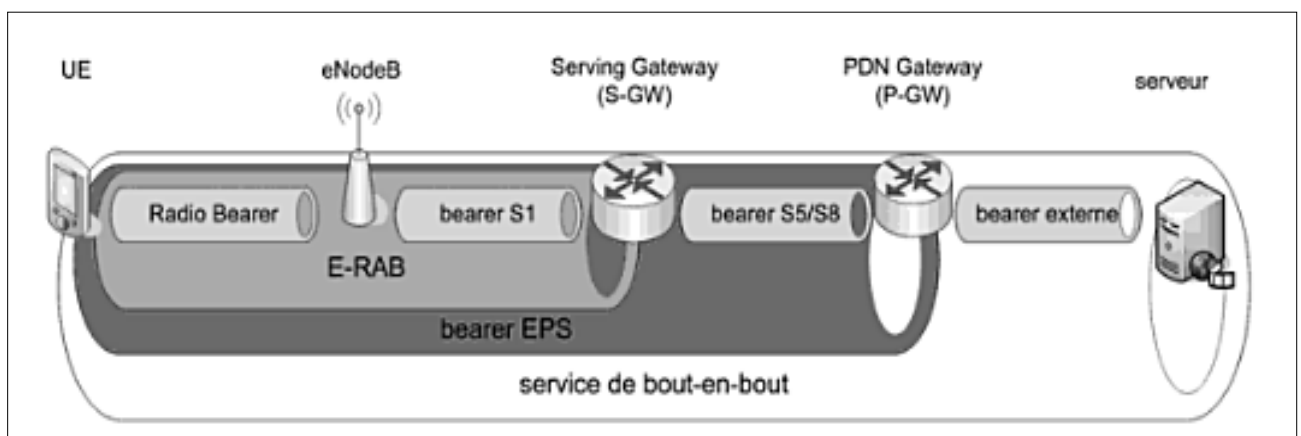


Figure 3: Le bearer EPS dans le réseau LTE

Un bearer EPS ou support EPS est caractérisé par des paramètres protocolaires, qui permettent le routage de bout-en-bout des données transmises sur ce bearer, mais également par des paramètres de QoS.

2. Bearer par défaut et bearer dédié

Le préalable à l'application de mécanismes de QoS répondant aux besoins spécifiques de chaque type de trafic est d'identifier et traiter distinctement des flux dont les caractéristiques et les contraintes diffèrent de façon notable. Les concepts de bearer EPS par défaut et bearer EPS dédié ont été définis dans cette optique.

Au niveau de l'UE, seuls les paquets de données destinés à une transmission sur la voie montante passent dans le masque de trafic de l'UE UL TFT1 (Traffic Flow Template 1), pour les orienter sur la bearer EPS adéquat ; les données reçues de la P-GW sont, elles, remises à l'application en fonction du bearer EPS par lequel elles sont portées. Le flux web des applications « actu » et « météo » correspond typiquement à des requêtes http, portés sur TCP, vers le portail Web de l'opérateur, tandis que le flux de l'appel vidéo consiste en des paquets destinés à l'UE distant et produits par le codec vidéo (par exemple H264 sur RTP/UDP). De façon similaire, la P-GW ne compare que les données pour la voie descendante aux masques de trafic

DL TFT1 et DL TFT2, et les données reçues de l'UE sont directement routées vers l'entité distante désignée par l'adresse IP destination.

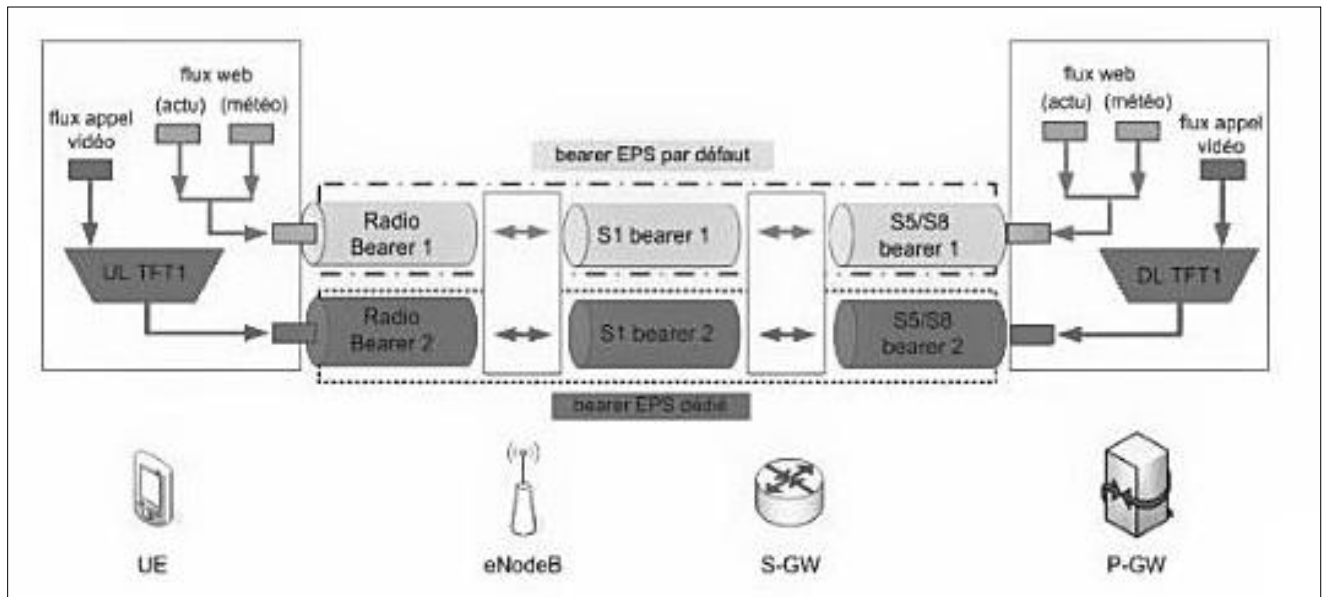


Figure 4: Utilisation des TFT dans le sens UL et DL pour le multiplexage des données sur le plan usager

LTE-Sim a développé uniquement des supports radio dédiés.

Le système LTE/EPC, par l'intermédiaire de la P-GW, peut prendre l'initiative d'établir un bearer dédié sans demande préalable de l'UE, par exemple s'il détecte un nouveau flux qui devrait, dans la politique de l'opérateur, bénéficier d'un traitement spécifique en termes de QoS notamment. C'est par exemple le cas si l'utilisateur, en naviguant sur le portail de l'opérateur, ouvre un contenu vidéo ou audio streaming. L'opérateur peut en effet faire le choix de différencier ce flux du trafic de navigation alors que l'UE ne demande pas de QoS spécifique. De cette façon, l'application de la QoS de l'opérateur n'est pas dépendante de l'implémentation des terminaux.

On notera que les notions de bearer par défaut et de bearer dédié ne sont pas connues de l'E-UTRAN.

3. QoS et le support radio ou bearer radio sous LTE-Sim

Sous LTE-Sim, la classe **Bearer** modélise le bearer radio dédié. Lorsqu'un flux dans le sens UL ou DL démarre, cette classe active un bearer radio dédié entre l'UE et l'eNB et vice versa. En plus, pour chaque UE et eNB, il est possible d'activer plusieurs bearer.

L'objet **QoSParameters** définit dans le dossier *lte-sim_4.0/src/flow/QoS* fournit, pour chaque bearer, les exigences en QoS du flux de données telles que l'identifiant de la classe de service, la priorité d'allocation et de rétention, le débit binaire garanti (GBR) et le débit binaire maximum (MBR).

Ensuite, un classeur IP est utilisé pour faire correspondre les paquets provenant de la couche Application à un bearer radio donné selon les paramètres enregistrés dans la classe **ClassifierParameters**.

4. La couche Application sous LTE-Sim

Les paquets transportés par un bearer radio dédié sont générés au niveau de la couche Application par un des quatre générateurs de trafic suivants:

- Le **générateur traced-based** qui envoie les paquets suivant un modèle réaliste de trace de fichiers vidéo.
- Le **générateur VoIP** génère les flux G.729 pour la voix. En particulier la voix sous LTE-Sim a été modélisée par un modèle de chaîne de Markov ON/OFF, où la période ON est exponentiellement distribuée avec une valeur moyenne de 3 s, et la période OFF a une pdf (probability density function) ou fonction de densité de probabilité exponentielle tronquée avec une valeur limite supérieure de 6.9 s et une valeur moyenne de 3 s. Durant la période ON, la source envoie des paquets de taille 20 octets (bytes) toutes les 20 ms (c'est-à-dire que le débit source est 8 Kbit/s) alors que durant la période OFF le débit est égal à zéro car on fait l'hypothèse qu'un détecteur d'activité de la voix VAD (Voice Activity Detector) est présent. Il est important que ces paramètres puissent être modifiés dans la classe du constructeur de la classe **VoIP** ou en utilisant les méthodes fournies dans le logiciel pour les régler.
- Le **générateur CBR (Constant Bit Rate)** génère des paquets avec un débit source constant. En particulier, la taille des paquets et le temps d'inter-arrivée peuvent être définis pour ce type de trafic.
- Le **générateur Infinite Buffer** modélise une source qui a toujours des données à envoyer. Ce générateur permet de modéliser le trafic des **classes de service best effort (BE)**.

Pour chaque type d'application, une classe dédiée a été développée, nommée **InfiniteBuffer, VoIP, CBR, et TraceBased**.

Il est important de noter que ces classes sont obtenues par extension de la **classe Application** qui fournit les méthodes et les paramètres communs à toutes les classes telles que le début et la fin des données d'une application.

LTE-Sim implémente plusieurs fonctionnalités du plan usager et du plan de contrôle de la pile de protocole LTE. Dans cette idée, la **classe ProtocolStack** a été créée comme un groupe englobant la **couche RRC** (Radio Resource Controller), la

couche RLC (Radio Link Control), la **couche PDCP (Packet Data Convergence Protocol)** et la **couche MAC (Medium Access Control)**. Une instance de **la classe *ProtocolStack*** appelée ***m_protocolStack*** contenant ces entités a été défini pour chaque équipement réseau.

LTE-Sim a implémenté quelques fonctionnalités liées à chacune des couches sur-citées.

- L'entité RRC gère les bearers radio dédiés en sens UL et DL pour un équipement donné. Il interagit avec le classificateur IP afin de classer les paquets dans les bearers radio correspondant.
- L'entité PDCP fournit des méthodes pour la compression des entêtes des paquets provenant de la couche IP, qui seront par la suite mis dans la bonne file d'attente située dans la couche MAC.
- L'entité RLC modélise la transmission en mode aveugle « ***Unacknowledged data transmission*** » au niveau de la couche RLC. Il faut noter qu'il existe deux types de transmissions au niveau de la couche RLC : Le mode « ***Unacknowledged data transmission*** » ou **mode aveugle** et le mode « ***Acknowledged data transmission*** »^[2].
- L'entité MAC fournit l'interface radio entre l'UE et l'eNB. En plus, le module de modulation adaptative est défini à ce niveau. **Trois modulations sont supportées dans LTE-SIM : QAM, 4-QAM et 16-QAM.**

LTE-SIM implémente uniquement le mode aveugle car il est le plus utilisé notamment pour les applications qui ne tolèrent pas de délai telles que la vidéo streaming et la voix. Cette entité est aussi responsable de la segmentation et de la concaténation des données (SDUs pour Service Data Units) provenant de la couche IP.

Un exemple d'interaction entre ces entités implémentées dans LTE-SIM est fourni à la figure [5] suivante. Cette figure montre le chemin suivi par un paquet généré au niveau de la couche Application du eNB jusqu'à la couche Application de l'UE.

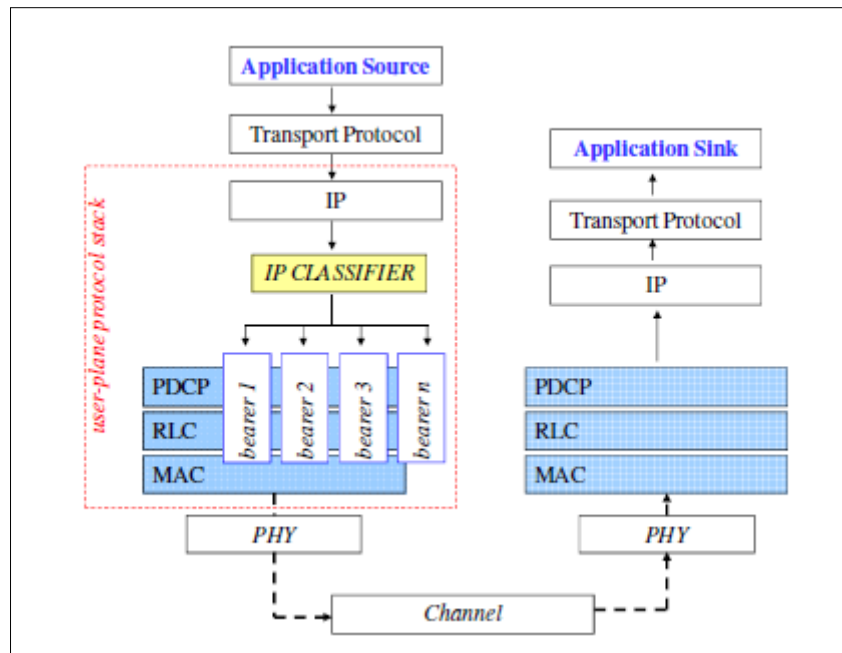


Figure 5: Pile du protocole LTE implémentée sous LTE-Sim

Un autre aspect important dans LTE-Sim est la façon dont est modélisé chaque paquet de donnée. En effet un paquet, représenté par la **classe packet** est défini par trois paramètres :

- La **variable m_timeStamp** qui représente l'instant auquel le paquet a été généré au niveau de la couche Application. Sa valeur est être utilisée pour évaluer le délai de transmission du paquet. Plus important, cette valeur peut aussi être utilisée pour des calculs statistiques et les stratégies d'ordonnancement.
- La **variable m_size** qui représente la taille du paquet
- La **variable m_packetHeader** qui contient la liste de tous les entêtes des protocoles qui ont été ajoutées au paquet pendant sa transmission au niveau des couches basses.

Dans la version courante de LTE-Sim seul le protocole UDP a été implémenté. Toutefois, il est possible d'implémenter de nouveaux protocoles (TCP par exemple) par extension de la **classe TransportLayer** qui se trouve dans le fichier **lte-sim-r4_0/src/protocolStack/protocols/**.

Pendant la simulation, la couche Application génère des paquets qui sont passés aux couches Transport et IP. Le classeur IP fait correspondre les datagrammes IP dans les bearers radio. Chaque bearer maintient sa propre file d'attente de type FIFO (first In First Out) de transmission en utilisant la **classe MACqueue**. Une fois que le paquet IP est mis dans la file d'attente, on lui ajoute l'entête PDCP. Le protocole PDCP fournit une technique de compression d'entête en utilisant le protocole ROHC (Robust Header Compression). Le paquet RTP/UDP/IP est ainsi compressé avec un entête de 3 octets au total. Enfin lorsque le paquet est retiré de la file d'attente, un code cyclique CRC (Cyclic Redundancy Check) et un entête MAC lui sont ajoutés.

VI. Structure du canal radio et gestion des ressources radio sous LTE-Sim

Les techniques de duplexage **TDD (Time Division Duplex)** et **FDD (Frequency Division Duplex)** sont implémentés dans LTE-Sim dans la **classe FrameManager**. Les ressources radio sont distribuées dans le domaine temps-fréquence. L'eNB procède à l'ordonnancement des ressources radio entre les flux en sens **UL (uplink)** et **DL (downlink)** au début de chaque sous-trame (un TTI). Toutes les bandes de fréquences utilisées par le réseau LTE (1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz) sont supportées dans LTE-Sim.

1. Le Gestionnaire de la bande passante sous LTE-Sim

Tous les équipements doivent connaître sur quelle bande opère le réseau, ainsi que les sous-canaux disponibles dans les sens UL et DL. Par conséquent, une classe dédiée, la **classe BandwidthManager** a été implémentée pour enregistrer ces informations. Une instance de la classe BandwidthManager est définie pour tout objet PHY (UE et eNB).

2. Réutilisation de fréquence sous LTE-Sim

La réutilisation fréquentielle permet d'améliorer la couverture et la capacité des réseaux cellulaires et de réduire les interférences inter-cellules, l'idée provient du fait chaque cellule n'utilise pas en général tous les sous-canaux disponibles. Un groupe de cellules, utilisant tous les sous-canaux disponibles forment ce qu'on appelle un **cluster ou groupement de cellules** qui est régulièrement répliqué afin de couvrir toute la zone de service. Pour répondre à ce critère, la méthode **NetworkManager::RunFrequency ()** qui se trouve dans le dossier **lte-sim-r4_0\src\utility** a été développée sous LTE-Sim afin d'appliquer la technique de réutilisation de fréquence et de distribuer la bande passante disponible entre les différentes cellules. Le nombre de cellules qui forment un cluster dépend de la bande opératrice de l'E-UTRAN et de la bande passante utilisée dans les DL et UL.

La version actuelle de LTE-Sim supporte toutes les configurations de cluster possibles disponibles pour les bandes opératrices [1929-1980] MHz en sens UL et [2110-2170] MHz en sens DL dans un mode de duplexage FDD. De plus, dans cette version la liste de sous-canaux attribuée à une cellule reste constante pendant la simulation. D'autres configurations de réutilisation fréquentielle plus sophistiquées peuvent être implémentées sous LTE-Sim par extension de la **classe NetworkManager**. Pour prendre en compte la mobilité des UEs, la liste de sous-canaux disponibles est mise à jour après chaque invocation du processus de handover.

LTE-Sim implémente trois types de groupement de cellules représentés dans la figure suivante :

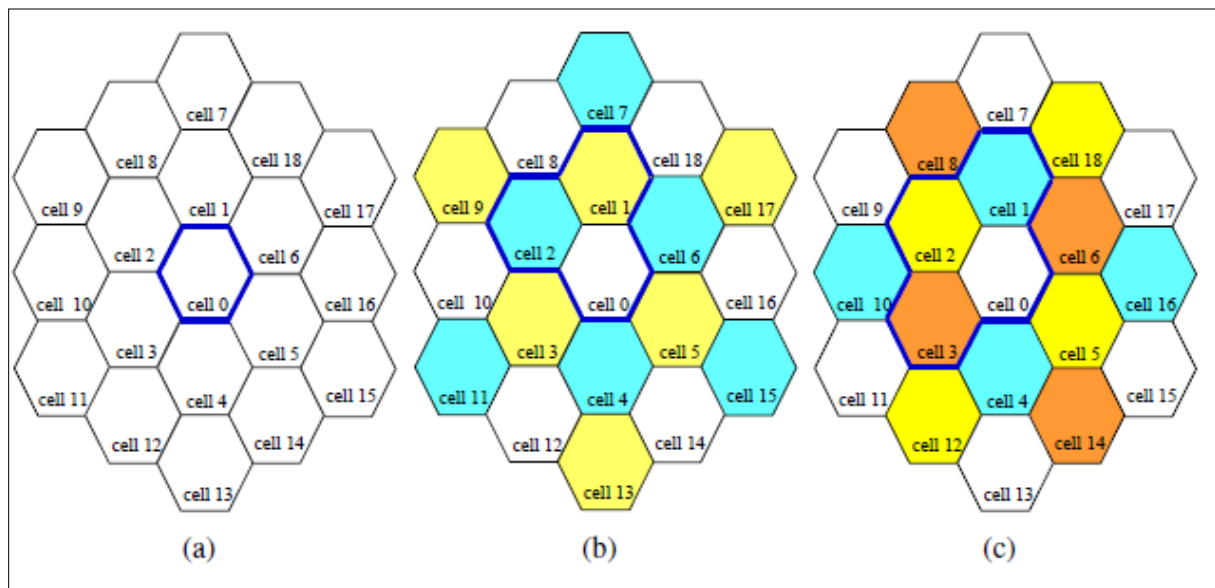


Figure 6: Les types de groupement de cellules implémentés sous LTE-Sim

3. Structure de la trame LTE sous LTE-Sim

LTE-Sim supporte deux types de structure de trames pour l'interface E-UTRAN. La première structure est définie pour le mode FDD (**frame structure type 1**). Le second est défini pour le mode TDD (frame structure type 2). Pour le type 1, la bande passante est divisée en deux parties, permettant les transmissions simultanées en sens UL et DL.

Pour le type 2, la trame LTE est divisée en deux trames consécutives, chacune d'une durée de 5 ms. De plus, une sous-trame spéciale est réservée dans chaque trame et n'est pas utilisée pour la transmission des données. Elle peut être utilisée pour envoyer des symboles pilotes en sens UL et DL.

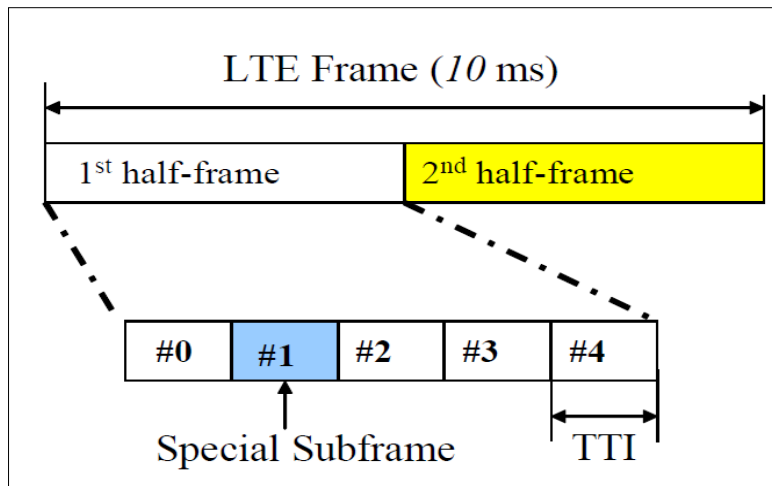


Figure 7: Trame de type 2 en mode TDD

Dans LTE-Sim, les structures de trame (type 1 et type 2) et la configuration TDD ont été définies dans la **classe *FrameManager*** qui se trouve dans le dossier ***lte-sim-r4_0\src\componentManagers***.

Pendant la simulation la **classe *FrameManager*** ordonnance les trames et sous-trames LTE et décide selon la structure de la trame si une sous-trame sera utilisée dans le sens UL ou DL ou dans les deux sens (trame TDD).

4. Ordonnancement des ressources radio dans LTE-Sim

L'objectif le plus important dans LTE est l'ordonnancement des ressources radio afin de satisfaire aux exigences en QoS de toutes les applications. Cet objectif est très difficile à atteindre en présence des applications multimédia temps réel caractérisées par une intolérance au délai de transmission des paquets.

Dans les systèmes LTE, on exploite le fait que les utilisateurs n'ont pas la même sensibilité face aux perturbations du canal radio mobile. En effet, en présence de plusieurs utilisateurs, il est toujours possible de trouver un utilisateur ayant une bonne qualité du signal transmis sur le canal radio.

Fort de cette idée, les algorithmes d'ordonnancement **MT (Maximum Throughput)** et **PF (Proportional Fair)** sont devenus les algorithmes les plus connus dans les stratégies d'ordonnancement dans les réseaux LTE car les décisions d'allocation sont strictement basées sur la qualité du canal expérimentée par chaque UE qui mesure périodiquement la qualité du canal à partir des symboles de références et renseigne l'eNB à travers les messages **CQI (Channel Quality Information)**. Cette information est utilisée par la suite par l'ordonnanceur pour distribuer les RBs (Resource Block) entre les utilisateurs. Cette information est également utilisée par le **module AMC (Adaptive Modulation Coding)** qui sélectionne pour chaque UE le schéma de modulation et de codage adéquat afin de maximiser l'efficacité spectrale.

LTE-Sim a implémenté les classes d'ordonnancement en sens UL et DL appelées **ULScheduler** et **DLScheduler**. Ces classes fournissent l'implémentation de quelques algorithmes d'ordonnancement les plus couramment rencontrés dans les stratégies d'ordonnancement :

Au début de chaque sous-trame, l'ordonnanceur sélectionne tous les flux qui peuvent être ordonnancés. **Un flux peut être ordonnancé si et seulement s'il contient des données de paquets à transmettre dans la couche MAC et que le récepteur à qui est destiné le flux est dans un état actif.**

A chaque TTI, l'ordonnanceur calcule une métrique pour chaque flux qui peut être ordonnancé. Nous supposons que la métrique attribuée au flux i sur le sous-canal j est définie par $w_{i,j}$. Les algorithmes diffèrent suivant la méthode de calcul de la métrique.

L'ordonnanceur opère en attribuant le sous-canal j au flux i ayant la plus grande métrique.

Sous LTE-Sim, la procédure d'ordonnancement peut être résumée par les étapes suivantes :

- 1) L'eNB crée une liste de flux en sens DL ayant des paquets de données à transmettre (grâce à la classe **FlowsToSchedule**) c'est-à-dire les flux pouvant être ordonnancés pour la sous-trame courante.
- 2) Les paramètres de qualité du canal (CQI) et la longueur des files d'attente de la couche MAC sont enregistrés pour chaque flux.
- 3) Selon la stratégie d'ordonnancement, la métrique choisie est calculée pour chaque flux de la liste précédente.
- 4) L'eNB attribue chaque sous-canal au flux ayant la métrique maximale sur ledit sous-canal. Il est important de noter que durant la procédure d'allocation, l'eNB prend en compte le volume de données déjà transmis par chaque flux. Par conséquent, lorsque les paquets constituant un flux sont vidés de la file d'attente, ce flux est immédiatement retiré de la liste des flux dont l'ordonnancement est possible.
- 5) Pour chaque flux ordonnancé, l'eNB calcule la taille du block de données à transmettre, c'est -à-dire le volume de données qui sera transmis au niveau de la couche MAC pendant un TTI. L'eNB utilise le module AMC pour faire correspondre la qualité du canal (CQI) de chaque flux au schéma de modulation et de codage approprié.

A la fin de la procédure d'allocation, l'eNB appelle la fonction **Bearer ::Dequeue ()** de tous les flux ordonnancés afin d'estimer le nombre de paquets restant dans les files d'attente de la couche MAC.

Afin d'obtenir la métrique, les ordonnanceurs ont généralement besoin de connaître le débit moyen de transmission $\bar{R}_i$ du flux i , et le débit instantané disponible pour

l'UE sur le sous-canal j . Cette approche est importante lorsque la métrique prend en compte les performances antérieures des flux ordonnancés afin d'équilibrer la distribution des ressources entre les UEs. En particulier, à chaque TTI, l'estimation de $\bar{R}_i$ est donnée par :

$$\bar{R}_i(k) = 0.8\bar{R}_i(k-1) + 0.2R_i(k)$$

Où $R_i(k)$ est le débit alloué au flow i pendant le $k^{\text{ème}}$ TTI et $\bar{R}_i(k-1)$ est l'estimation du débit moyen de transmission au $(k-1)^{\text{ème}}$ TTI.

De ce qui suit, voici une description des algorithmes d'ordonnancement implémentés sous LTE-Sim.

5. L'algorithme PF (Proportional Fairness)

Cet ordonnanceur associe les ressources radio en prenant en compte conjointement la qualité du canal et le débit achevé par chaque utilisateur dans les TTIs antérieurs.

L'objectif de cet algorithme est de maximiser le débit total du réseau et de garantir une équité (*fairness*) entre les flux. Pour cet algorithme, la métrique $w_{i,j}$ est définie comme le rapport entre le débit instantané disponible pour le flux i ($r_{i,j}$) et le débit moyen (calculé à l'instant $k-1$) du flux i .

$$w_{i,j} = \frac{r_{i,j}}{\bar{R}_i}$$

La valeur de $r_{i,j}$ est calculée par le module AMC en considérant la valeur du CQI sur le sous-canal j envoyé par l'UE à qui est destiné le flux i .

6. L'algorithme M-LWDF (Modified Largest Weighted Delay First)

Cet ordonnanceur supporte ou prend en charge un utilisateur pouvant demander multiples services avec des exigences en QoS différentes. Pour chaque flux temps réel, en considérant le délai maximal τ_i , la probabilité δ_i est définie comme la probabilité maximale pour que le délai du premier paquet de la file d'attente $D_{HOL,i}$ excède le délai maximal fixé. A rappeler LTE-Sim implémente uniquement des files d'attente de type FIFO (First In First Out).

Afin de donner la priorité aux flux temps réel ayant le plus grand délai (délai du premier paquet de la file d'attente) et ayant les meilleures conditions de propagation sur le canal radio, la métrique a été définie dans cet ordonnanceur par :

$$w_{i,j} = \alpha_i D_{HOL,i} \frac{r_{i,j}}{\bar{R}_i}$$

Où $r_{i,j}$ et $\bar{R}_i$ ont les mêmes significations que dans les paragraphes précédents et α_i est donné par :

$$\alpha_i = -\frac{\log \delta_i}{\tau_i}$$

Pour les trafics non temps réel ou nRTPS, métrique est calculé à partir de l'équation fournit par l'algorithme PF.

Dans la version actuelle de LTE-Sim, l'algorithme M-LWDF est implémenté de telle façon que les paquets appartenant à un flux temps réel sont supprimés de la file d'attente de la couche MAC s'ils ne sont pas transmis avant l'expiration du délai maximal d'attente. Cette opération est nécessaire pour éviter le gaspillage de la bande passante. Cette implémentation n'est pas réalisée dans l'algorithme PF vu qu'il n'est pas conçu pour les services temps réel.

7. L'algorithme EXP (Exponential Fair)

Cet ordonnanceur a été conçu pour améliorer la priorité des flux temps réel tout en permettant aux trafics non temps réel de bénéficier d'un minimum de satisfaction. Le paquet d'entête de file d'attente de ces flux a un délai très proche du délai maximal. Pour les flux temps réel, la métrique est calculée en utilisant les équations suivantes:

$$w_{i,j} = \exp\left(\frac{\alpha_i D_{HOL,i} - \chi}{1 + \sqrt{\chi}}\right) \frac{r_{i,j}}{\bar{R}_i}$$

Où les symboles ont les mêmes significations que précédemment et la valeur de χ est donnée par :

$$\chi = \frac{1}{N_{rt}} \sum_{i=1}^{N_{rt}} \alpha_i D_{HOL,i}$$

Avec N_{rt} le nombre de flux en temps réel actif dans le sens DL. Par ailleurs, la métrique des trafics non temps réel sont calculés avec la métrique de l'algorithme PF. Dans l'algorithme EXP, Les paquets temps réel dont le délai à excéder le délai maximal avant la transmission sont supprimés de la file d'attente dans la couche MAC.

Il faut noter qu'il est possible d'intégrer de nouveaux algorithmes d'ordonnancement dans LTE-Sim en suivant les étapes suivantes :

- i) Créer une nouvelle class d'ordonnancement ou faire une extension d'une des classes existantes.
- ii) Hériter les méthodes à partir d'une classe virtuelle en C++
- iii) Définir les méthodes pour l'implémentation des fonctions d'ordonnancement. Se référer au dossier *lte-sim-r4_0/src/flows/QoS*.

VII. Implémentation du canal radio et de la couche PHY sous LTE-Sim

La simulation d'une couche PHY complète n'est pas compatible avec des scénarios complexes, en effet, la simulation d'une couche PHY complète de transmission entre 2 nœuds dans un réseau LTE peut prendre des heures (3 heures environs). Cette difficulté a été contournée dans LTE-Sim a adopté une approche basée sur un modèle analytique. Cette approche a été adoptée de même avec succès dans les simulateurs comme ns-3 pour le Wimax, ns-2 pour l'UMTS, le module Numbat dans le simulateur Omnet++ et bien d'autres.

La classe **channel** et la classe **Phy** ont été implémentées sous LTE-Sim pour modéliser le canal et la couche PHY LTE respectivement.

1. Canal radio mobile sous LTE-Sim

La **classe channel** gère la transmission des paquets, et prend en compte le modèle propagation.

Pour gérer séparément les transmissions en sens UL et DL, un couple de canaux doit être défini pour chaque cellule. En plus, chaque objet physique (UE et eNB) sauvegarde dans les variables **m_dowlinkChannel** et **m_uplinkChannel** un pointer sur l'ensemble des canaux créés pour la cellule à laquelle il appartient.

La **classe channel** contient une structure privée nommée **m_devices** qui gère tous les objets physiques qui lui sont connectés.

2. Modèle de propagation sous LTE-Sim

La **classe PropagationLossModel** modélise le canal de propagation au niveau de l'interface E-UTRAN. Cette classe a été implémentée pour calculer les pertes liées à la propagation du signal transmis.

Afin de supporter plusieurs configurations (microcellules et macro-cellules en environnement urbain, macro-cellules et microcellules en environnement suburbain, macro-cellules en milieu rural etc.), une **classe virtuelle ChannelRealization** a été développée afin de fournir une implémentation basique du modèle de propagation et du modèle de canal. Elle permet d'estimer les conditions du canal en termes de pertes et d'interférence. Pour chacune de ces configurations, une classe héritée de la classe **ChannelRealization** a été développée.

L'estimation des conditions du canal sous LTE-Sim prend en compte quatre principaux phénomènes :

- Les pertes de propagation : modélisées suivant le type de configuration.
- Les pertes de pénétration : Valeur fixée par défaut à 10 dB dans LTE-Sim.

- Les évanouissements du signal dû au phénomène de multi trajet : Modélisés par une distribution de loi normale logarithmique de moyenne 0 et de déviation standard égal à 8 dB.

Ces valeurs peuvent être modifiées suivant le type d'environnement de simulation de la cellule.

La variable ***m_channelRealization*** définie dans la **classe *PropagationLossModel*** enregistre les conditions de canal de propagation pour chaque couple d'équipements rattachés à un canal. Pendant la transmission des paquets, sachant l'adresse de la source et de la destination, un objet ***ChannelRealization*** est sélectionné et leur sont rattaché formant la variable ***m_channelRealization***. Ensuite, la méthode ***ChannelRealization::ComputePropagationLoss ()*** est utilisée pour calculer les pertes de propagation.

Dans la version actuelle de LTE-Sim, l'évanouissement du signal a été modélisé avec le modèle de Jakes, pour tous les modèles de propagation implémentés.

Il est possible sous LTE-Sim d'ajouter de nouveaux modèles de canaux par extension de la classe ***ChannelRealization***.

Il faut remarquer que la technologie MIMO n'est pas implémentée sous LTE-Sim.

Références

- [1] Giuseppe Piro, Luigi Alfredo Grieco, Gennaro Boggia, Francesco Capozzi, “Simulating LTE Cellular Systems: an Open Source Framework”, Octobre 2010.
- [2] 3rd GenerationPartnership Project TR 25.814 V7.0.0, Juin 2006, Valbonne-France
- [3] Yannick Bouguen, Eric Hardouin, François-Xavier Woff, “LTE et les réseaux 4G”, 2012, Editions EYROLLES, Paris