

L'ENTREPRISE

Projets de Recherche et Développement
(Crédit d'impôt en faveur de la recherche)

Exercice 2014

SOMMAIRE

1. SYNTHÈSES TECHNIQUES	3
1. Création d'un routeur de nouvelle génération 4G/LTE	3
1.1 Objet du projet.....	3
1.2 Contexte de l'opération.....	4
1.3 État de l'art.....	7
1.4 Incertitudes scientifiques et techniques, verrous technologiques et problèmes à résoudre.....	13
1.5 Description des travaux effectués.....	14
1.6 Progrès scientifiques et résultats.....	20

SYNTHÈSES TECHNIQUES

1. Création d'un routeur de nouvelle génération 4G/LTE

1.1 Objet du projet

1.1.1 Objectif visé

La 4ème génération/Long Term Evolution, ou 4G/LTE, est la dernière évolution des standards pour la téléphonie, permettant l'accès aux services du web et aux applications mobiles à très haut débit.

Elle succède à la 2G (GSM) et à la 3G, et permet des débits théoriques supérieurs à 100Mb/s. Concrètement, la 4G/LTE est censée offrir une utilisation plus aisée des différents services proposés sur les réseaux mobiles. Grâce à la 4G/LTE, les services les plus gourmands en bande passante, comme le streaming vidéo par exemple, sont rendus accessibles aux utilisateurs sans les désagréments qui pouvaient avoir lieu avec la génération mobile précédente : ralentissements, qualité de l'image pas toujours maximale, ...etc.

L'objectif de ce programme de R&D est de concevoir deux nouveaux modèles de routeurs qui outre les fonctionnalités déjà supportées par nos produits, implémentent les technologies de la 4G/LTE et les intègre de façon souple et évolutive.

On peut distinguer pour ce projet les 3 sous-objectifs suivants :

- Construction d'un routeur compatible avec la nouvelle technologie 4G/LTE. La technologie 4G/LTE nécessite le changement de toute l'infrastructure réseaux/équipements. L'un de ces changements est la création d'une nouvelle génération de routeurs 4G capables de supporter les nouvelles spécifications techniques en termes de débits, QoS ... de ce nouveau réseau.
- Basculement automatique et auto-compatibilité avec de multiples autres technologies d'accès WAN (Fibre optique, SHDSL, AVDSL...). Changer toute l'infrastructure réseau pour y intégrer la 4G est relativement coûteux. En l'état, la 4G/LTE ne pourra donc pas couvrir toutes les zones. Pour pallier ce problème il faut prévoir une auto-compatibilité avec d'autres technologies en cas d'absence de couverture 4G.

- Rendre possible l'alimentation POE avec le port Ethernet du routeur 4G, permettant ainsi de garantir l'alimentation de l'intégralité du routeur. Cet objectif est important puisqu'il va faciliter l'implémentation des antennes externes (dans le cadre de la technologie MIMO utilisée avec la 4G/LTE) sans nécessiter d'autre alimentation de ces dernières.

1.1.2 Performances à atteindre

- Assurer pour la 4G un débit très élevé de l'ordre de 100 Mb/s théorique en lien descendant, et 50 Mb/s théorique en lien montant.
- Garantir un routage rapide et optimisé des paquets dans le réseau 4G.

Le document contenant l'ensemble des performances requises pour le produit final est disponible en **annexe 1.1** (Product Requirements).

1.2 **Contexte de l'opération**

1.2.1 Contexte économique

Depuis les années 80, avec l'arrivée des premiers téléphones mobiles à destination des particuliers, les réseaux et terminaux mobiles n'ont cessé d'évoluer vers des performances en débit, interactivité, qualité de service, toujours accrues, donnant lieu à l'établissement de nouvelles normes que l'on peut regrouper chronologiquement en « générations ».

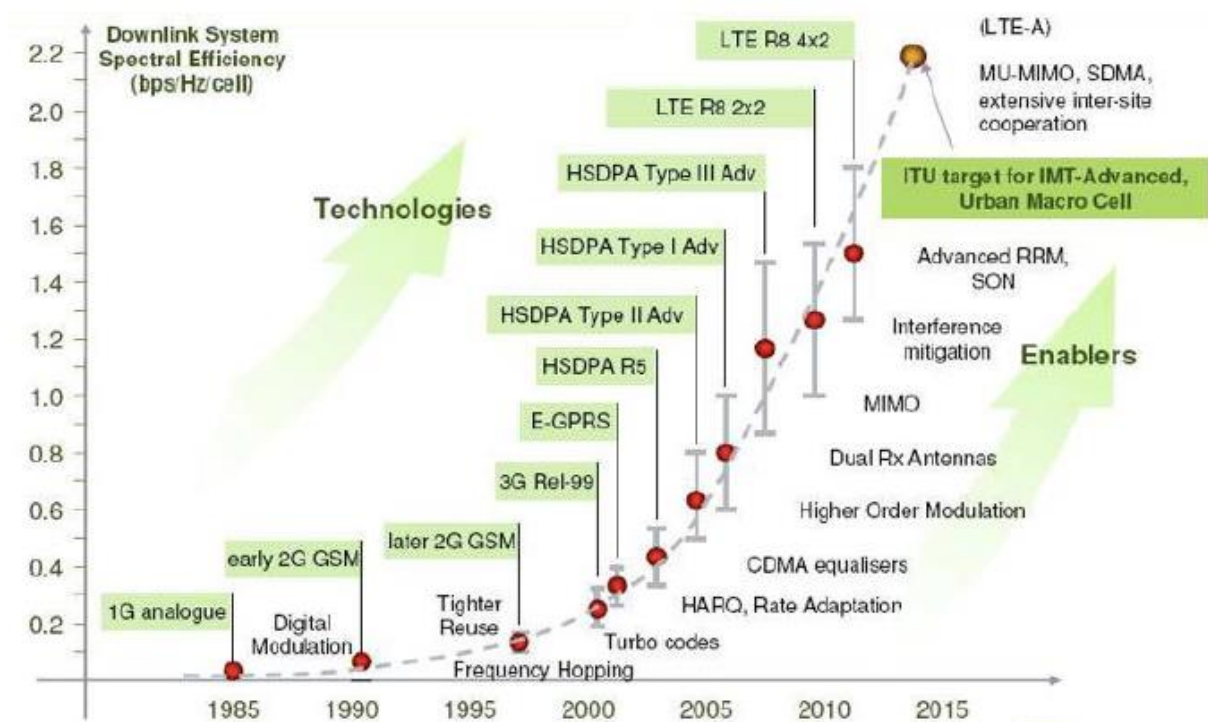


Figure 1.1. : Evolution des performances de la 1G à la 4G/LTE.

La commercialisation de la 4G/LTE (4^{ème} génération mobile) pour les particuliers a débuté en France à petite échelle avec SFR et Orange, respectivement en Novembre 2012 et Février 2013, mais l'arrivée de Bouygues Telecom sur ce marché le 1er Octobre 2013 a marqué le véritable lancement à grande échelle de la technologie. Dès lors, chaque opérateur s'est lancé dans une campagne de publicité autour de ses offres 4G.

Aujourd'hui, les offres 4G de tous les opérateurs mobiles sont solidement implantées sur le territoire, et la bataille qu'ils se livrent porte désormais principalement sur la couverture géographique.

Etant donné les débits offerts par le 4G, susceptibles de permettre une navigation internet quasiment aussi rapide qu'avec des accès de type DSL, il devient intéressant d'implémenter ces technologies sur des routeurs. Ceci permet d'assurer une connexion alternative au réseau internet en cas de rupture de la connexion par les liaisons traditionnelles.

1.2.2 Contexte scientifique

L'arrivée de la 4G sur la scène mondiale des télécoms marque l'adoption par l'ensemble de ses acteurs de toutes les innovations scientifiques qui y sont intégrées.

Initialement, le réseau 4G/LTE reposait sur l'utilisation des fréquences 800MHz. Ces basses fréquences ont la particularité de traverser avec plus de facilité les obstacles, assurant ainsi une meilleure couverture à l'intérieur des bâtiments. Elles peuvent

également se propager sur une plus grande superficie. Ainsi, il faudra installer moins d'antennes 800MHz pour couvrir une même zone. Si cet avantage s'avère intéressant pour la couverture des zones rurales, il implique plus de contraintes pour les zones urbaines. En effet, couvrir une zone de population dense suppose un nombre de connexions élevé, ce qui provoquera sans nul doute la saturation permanente de l'antenne. C'est pourquoi la bande de fréquence 2600 MHz (à portée plus faible) a été retenue pour permettre une meilleure couverture des grandes agglomérations.

Chaque opérateur développe son réseau 4G/LTE ville par ville, tout en gardant l'actuel réseau 3G. Le déploiement de la 4G/LTE suppose la modification des antennes-relais déjà existantes (ajout de cellules compatibles 4G et raccordement à la fibre optique) et/ou l'installation de nouvelles antennes 4G/LTE. Pour cela, les opérateurs demandent une autorisation à l'Association Nationale des Fréquences (ANFR). Au 1er mai 2013, celle-ci a observé une hausse de plus de 70 % d'autorisations dans la bande 2600 MHz.

Une autre particularité de la 4G est d'avoir un « cœur de réseau » basé sur IP et de ne plus offrir de mode commuté (établissement d'un circuit pour transmettre un appel "voix"), ce qui signifie que même les communications téléphoniques utilisent la voix sur IP (en mode paquet).

Les deux principales technologies réseaux que porte la 4G sont le « LTE-Advanced » et le « Gigabit WiMAX ».

Les avantages de l'évolution de la LTE en LTE-Advanced sont :

- Des débits plus élevés sur les liens descendants et optionnellement les liens montants, grâce à l'agrégation de porteuses (en anglais : Carrier Agregation) qui permet d'utiliser un spectre hertzien (continu ou pas) pouvant atteindre 100 MHz de largeur (à comparer à 20 MHz maximum en LTE);
- Des performances radios accrues au niveau d'une cellule pour pouvoir servir plus de terminaux mobiles, grâce, entre autres, aux évolutions de la technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output).
- La possibilité de déployer des relais radio annexes à coûts plus faibles qui viennent étendre la couverture des cellules principales.
- De meilleures performances dans les zones mitoyennes de 2 cellules grâce aux techniques de micro-synchronisation entre cellules appelée « CoMP » (Coordinated Multi-Point) et SON (Self-Organizing Network) et grâce au beamforming actif permis par les antennes MIMO.

C'est dans ce contexte d'évolution des réseaux mobiles vers la 4G que notre projet se situe. En fait, pour participer à l'évolution de la 4G, notre rôle est de développer une gamme de routeurs capables d'acheminer les paquets vers leurs destinations avec une vitesse de transfert compatible avec les spécifications de la 4G.

Le principal avantage de ces routeurs est qu'ils offrent un accès internet assuré en cas de défaillance de la connexion WAN de type AVDSL, SHDSL ou fibre optique.

1.3 État de l'art

1.3.1 État de l'art

A. Les routeurs

Le déploiement massif de l'accès Internet haut débit et permanent par l'ADSL ou le câble a entraîné la multiplication de réseaux locaux à la maison (ou dans les entreprises). Il existe de nombreux équipements qui permettent le déploiement simple et rapide d'un accès à Internet. Ce déploiement peut néanmoins être largement complexifié pour certains cas particuliers (jeux en réseau, téléphone, accès à des machines à distance, etc. ...). La plupart de ces équipements comportent un routeur dont il faut comprendre le principe de fonctionnement pour le configurer correctement.

Internet n'est pas un réseau de machines mais un réseau de réseaux, d'où le nom d'INTER NETwork. Ces réseaux sont interconnectés entre eux par des programmes spécialisés, souvent intégrés dans un boîtier autonome dénommé routeur comme indiqué sur le dessin ci-dessous.

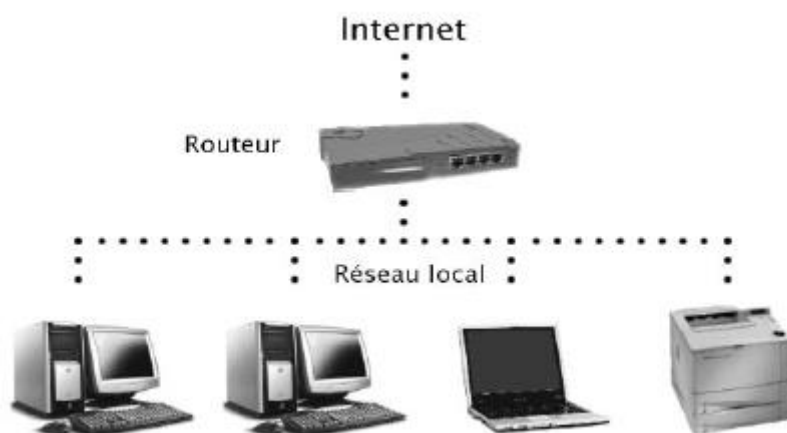


Figure 1.2. : Connexion d'un réseau local à Internet via un routeur.

Un routeur est un élément intermédiaire dans un réseau informatique assurant le routage des paquets. Son rôle est de faire transiter des paquets d'une interface réseau vers une autre en respectant un ensemble de règles. Il agit au niveau de la couche réseau (par exemple IP) :

- Dans un petit réseau d'entreprise ou chez les particuliers, tous les ordinateurs sont reliés directement et accèdent à Internet en passant par un routeur.
- Lorsque l'entreprise est importante, établie sur différents sites, elle dispose de plusieurs réseaux, reliés entre eux par des routeurs.

- Internet, réseau des réseaux, est constitué de milliers de routeurs, capables d'acheminer l'information d'un ordinateur à un autre.

La fonction principale d'un routeur est le routage, nous distinguons généralement deux types d'algorithmes de routage :

- Les routeurs de type vecteur de distance (distance vector) établissent une table de routage recensant en calculant le "coût" (en termes de nombre de sauts) de chacune des routes puis transmettent cette table aux routeurs voisins. A chaque demande de connexion le routeur choisit la route la "moins coûteuse".
- Les routeurs de type link state (link state routing) écoutent le réseau en permanence afin de recenser les différents éléments qui l'entourent. A partir de ces informations chaque routeur calcule le plus court chemin (en temps) vers les routeurs voisins, puis diffuse l'information sous formes de paquets de mise à jour. Chaque routeur construit sa table de routage en calculant les chemins les plus courts vers tous les autres routeurs.

Les routeurs fonctionnent donc grâce à des tables et des protocoles de routage. Techniquement parlant si la machine de destination n'appartient pas au même réseau local, il faut connaître l'adresse locale du routeur qui se chargera de l'acheminement des paquets : c'est le paramètre passerelle. Le dernier paramètre est l'adresse d'un DNS (serveur de nom) pour faire la conversion d'adresse symbolique en adresse IP si nécessaire.

B. La 4G

Le réseau 4G (4ème génération) est proposé comme future génération des réseaux mobiles après la 3G. Il s'insère dans le panel technologique mis à disposition des utilisateurs pour leur garantir un accès à l'information digitale en tout lieu (à l'intérieur des bâtiments avec les technologies Bluetooth, UWB ou Wifi..., à l'extérieur avec l'UMTS ou le WiMAX...).

Les débits supposés sont entre 20 et 100 Mb/s à longue portée et en situation de mobilité, et 1 Gb/s à courte portée vers des stations fixes. Par définition, la 4G assure la convergence de la 3G avec les réseaux de communication radio fondés sur le protocole IP. La connexion devra être possible quel que soit le mode de couverture. Les deux technologies retenues pour la 4G sont :

- LTE-Advanced (Long Term Evolution Advanced) poussée par les Européens, avec Ericsson en tête suivi de Nokia et Siemens.
- WiMAX-Advanced soutenu par Intel sachant que le WiMAX a été ajouté à la liste des standards 3G par l'ITU le 19/10/2007.

L'UMB (Ultra Mobile Broadband) soutenu par le fondeur américain Qualcomm (fabriquant des puces) ayant été abandonné.

La 4ème génération vise à améliorer l'efficacité spectrale et à augmenter la capacité de gestion du nombre de mobiles dans une même cellule. Elle tente aussi d'offrir des débits élevés en situation de mobilité et une mobilité totale à l'utilisateur en établissant l'interopérabilité entre différentes technologies existantes. Elle vise à rendre le passage entre les réseaux transparent pour l'utilisateur, à éviter l'interruption des services durant le transfert intercellulaire, et à basculer l'utilisation vers le tout-IP.

C. 4G/LTE

LTE (Long Term Evolution of 3G) est la norme de communication mobile la plus récente qui est proposée par l'organisme 3GPP dans le contexte de la 4G. Comme l'IEEE 802.16m, elle propose des débits élevés pour le trafic temps-réel, avec une large portée. Théoriquement, la technologie LTE peut atteindre un débit de 50 Mb/s en lien montant et 100 Mb/s en lien descendant.

En réalité, l'ensemble de ce réseau s'appelle EPS (Evolved Packet System), et il est composé des deux parties : le réseau évolué d'accès radio LTE, et le réseau cœur évolué appelé SAE (System Architecture Evolution). Le seul inconvénient de cette nouvelle technologie est l'installation de ses nouveaux équipements qui sont différents de ceux des normes précédentes, et le développement des terminaux adaptés.

Pour offrir des débits élevés, le LTE emploie la technologie OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) dans le sens descendant, et le SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) dans le sens montant.

Le LTE respecte les délais requis par le trafic temps-réel. Cette technologie prend en charge la mobilité des utilisateurs en exécutant le Handover à une vitesse allant jusqu'à 350 km/h. Le LTE prend également en charge l'interconnexion et l'interopérabilité avec les normes 2G et 3G, et les réseaux CDMA-2000.

Contrairement à la 3G qui nécessite d'allouer une bande de fréquence de 5 MHz, le LTE propose plusieurs bandes de fréquences allant de 1.25 jusqu'à 20 MHz. Cela lui permettra de couvrir de grandes surfaces. Par ailleurs, contrairement aux normes 2G et 3G qui proposent deux domaines de commutation (circuit et paquet), SAE ne propose seulement le domaine de commutation de paquets fondé sur l'IP et appelé EPC (Evolved Packet Core).

Il y a deux types de communication au niveau de SAE : « Default bearer » qui est une connectivité permanente sans garanti de débit entre un abonné et son réseau SAE d'attachement ; et « Dedicated bearer » qui est une connectivité avec garantie de débit et d'une certaine QoS dans le cas de l'utilisation d'un trafic temps-réel sensible au délai.

En comparaison aux normes 2G et 3G, l'architecture de l'EPS est plus simple. En témoigne, par exemple, la nouvelle entité eNodeB qui remplace les fonctions des deux composants NodeB et RNC définis dans la 3G.

L'EPS est composé de :

- **UE** : Equipement Utilisateur.
- **eNodeB** : responsable de la transmission et de la réception radio avec l'UE.
- **MME (Mobility Management Entity)** : MME est responsable de la gestion de la mobilité et l'authentification des utilisateurs. Elle est responsable aussi du Paging lorsque l'utilisateur est en état inactif. Elle sélectionne les composants dédiés aux types de la communication de l'utilisateur. Elle gère le Handover inter-domaines et inter-réseaux. Et enfin elle s'occupe de la signalisation.
- **Serving GW (Serving Gateway) ou UPE (User Plane Entity)** : joue le rôle d'une passerelle lors du Handover inter-domaines et inter-réseaux. Responsable du routage des paquets.
- **PDN GW (Packet Data Network Gateway) ou IASA (Inter-Access System Anchor)** : chargé de la mobilité entre différents systèmes, il est composé de l'élément 3GPP Anchor qui permet d'exécuter la mobilité entre le LTE et les technologies 2G/3G, et l'élément SAE Anchor qui permet d'exécuter la mobilité entre le système 3GPP et les systèmes non 3GPP (WIFI, WIMAX, etc.). Sachant que l'élément SAE Anchor ne prend aucune décision concernant la mobilité, il exécute seulement les décisions prises par l'UE. Responsable de l'attribution des adresses IP aux utilisateurs.
- **HSS (Home Subscriber Server)** : base de données évoluée du HLR de la 3G. Elle contient les informations de souscriptions pour les réseaux GSM, GPRS, 3G et LTE...
- **PCRF (Policy & Charging Rules Function)** : fournit les règles de la taxation.
- **ePDG (Evolved Packet Data Gateway)** : un élément réseau qui permet l'interopérabilité avec le réseau WLAN en fournissant des fonctions de routage des paquets, de Tunneling, d'authentification, d'autorisation et d'encapsulation/décapsulation des paquets.

L'architecture du réseau EPS est présentée ci-dessous :

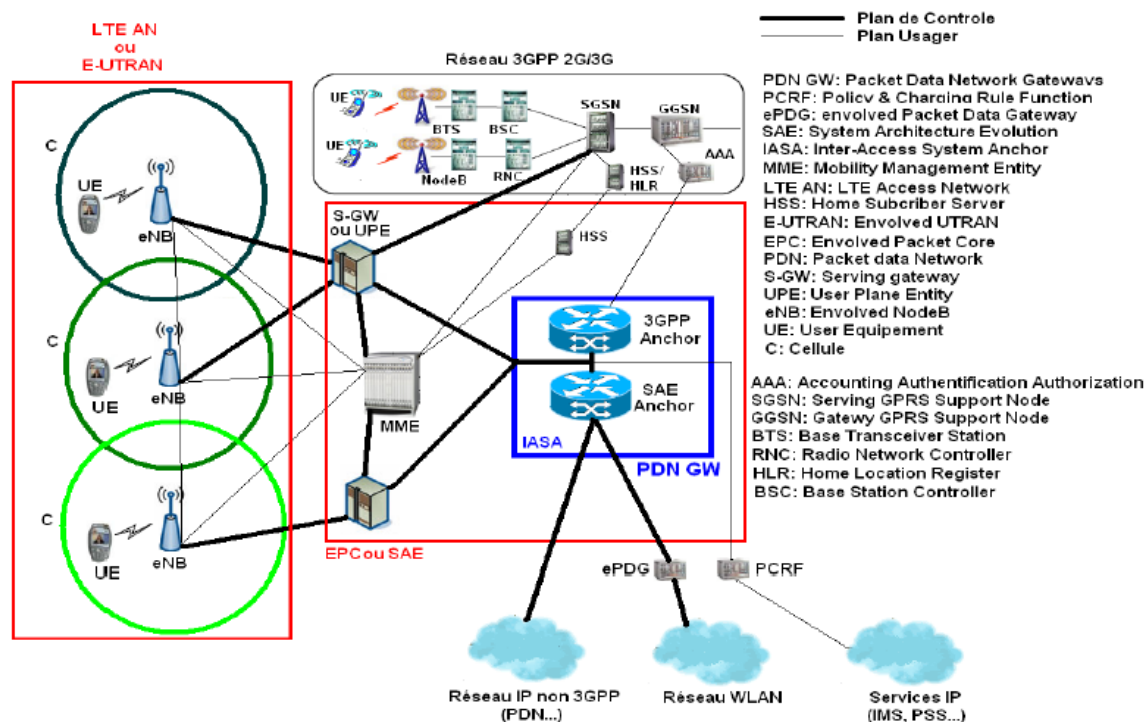


Figure 1.3. : Architecture de l'EPS.

1.3.2 Bibliographie et sitographie

- [1] Magdalena Nohrborg, The Mobile Broadband Standard, site internet : <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte/> thème: LTE.
- [2] LTE les réalités d'une infrastructure mobile moderne, site Internet : <http://alainbaritault.wordpress.com/2009/09/14/lte-les-realites-d'une-infrastructure-mobile-moderne-1ere-partie/> 2009.
- [3] Yannick Bouguen, LTE et les réseaux 4G, Eyrolles (Blanche), octobre 2012.
- [4] Etude de l'UFC-Que Choisir, un indispensable et urgent encadrement du déploiement de la 4G en France, 5 Novembre 2013. [5] Etude Isuppli IHS ; Prévision à travers le monde micro serveur d'expédition, aout 2012.
- [6] Cours Introduction au monde Linux, site Internet : <http://www.nanotechnologies.qc.ca/propos/linux/documentation/taolive/fr/ch-installation.html>
- [7] Futur Sciences, <http://www.futura-sciences.com/magazines/high-tech/infos/dico/d/high-tech-routeur-1306>, 2013.
- [8] Académie de Lyon, le Routage, http://sen.arbezcarne.free.fr/_techno/2.21-TR-Routage/Le%20routage.pdf
- [9] Plone et Python, Résumé sur le routage à vecteur de distance, Site internet : http://cisco.goffinet.org/s2/vecteur_distance#Uvz61WJ5Png/ 2010.
- [10] Laurent Ouakil, Guy Pujolle ; Téléphonie sur IP SIP, H.323, MGCP, QoS et sécurité, Asterisk, VoWiFi, architecture IMS .., Eyrolles2008.

- [11] D. Christian, « La Convergence se jouera entre WiMAX, LTE et UMB », In-Stat, Article rédigé dans www.generation-nt.com, 2007.
- [12] M-A. Delalande, « L'ITU reconnaît officiellement WiMAX comme une technologie 3G », Article rédigé dans www.reseaux-telecoms.net, 2007.
- [13] Mustafa Ergen, « Mobile Broadband Including WiMAX and LTE » 2009, livre, 640 p. 311 illus. Hardcover ISBN: 978-0-387-68189-4, Springer, 2009.
- [14] H. Wang, L. Kondi, A. Luthra, S. Ci, « 4G Wireless Video Communications », Wiley Series on Wireless Communications and Mobile Computing, ISBN: 978-0-470-77307-9 Hardcover. Livre, Avril 2009.
- [15] Motorola, « Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview », Technical White Paper, 2007.
- [16] U. Barth, « 3GPP Long-Term Evolution / System Architecture Evolution Overview », Alcatel, Technical white paper, Septembre 2006.
- [17] G. Fritze, « SAE – The Core Network for LTE », Ericsson, Technical white paper, 2008.
- [18] Larmo, A.; Lindstrom, M.; Meyer, M.; Pelletier, G.; Torsner, J.; Wiemann, H , « The LTE link-layer design », Communications Magazine, IEEE Volume 47, Issue 4, pp. 52 – 59, Avril 2009.
- [19] Man Hung Ng; Shen-De Lin; Li, J.; Tatesh, S., « Coexistence studies for 3GPP LTE with other mobile systems », Communications Magazine, IEEE, Volume 47, Issue 4, pp. 60 – 65, Avril 2009.

1.4 Incertitudes scientifiques et techniques, verrous technologiques et problèmes à résoudre

La création des nouveaux prototypes de routeurs compatibles 4G/LTE s'est accompagnée de nombreux défis techniques et verrous qu'il nous a fallu identifier et lever. C'est principalement la compatibilité des technologies 4G avec les contraintes physiques et de performances propres à nos produits qui est à l'origine de ces verrous techniques. Voici la liste des principaux :

- Le nouveau routeur doit respecter le modèle en couches supérieures et inférieures de la technologie LTE. Les couches inférieures : physique et liaison fixées par la technologie LTE doivent communiquer, suivant des règles standardisées mises en vigueur par le consortium 4G afin d'augmenter le débit, avec les couches supérieures : réseau et application. Ces couches et leurs modèles de communication innovants (puisque la 4G est toujours en cours de test) devaient être pris en compte lors de la programmation du nouveau routeur.
- La rétrocompatibilité entre 4G et 3G niveau routeur doit être prise en compte obligatoirement, puisqu'initialement la 4G ne couvre pas toutes les zones. Donc mis à part la partie qui a été programmée au niveau routeur pour la 4G, il fallait prévoir l'implémentation en parallèle de la partie 3G, et en tenir compte dans la limitation matérielle (en termes de processeur, mémoire... du routeur). Il fallait également prévoir le basculement automatique entre les 2 technologies suivant le réseau auquel passe un utilisateur mobile.
- Le routeur 4G doit être compatible et flexible avec la technologie complexe MIMO utilisée pour augmenter le débit grâce à une grande concentration d'antennes. La programmation du routeur doit tenir compte de l'utilisation de la technologie MIMO avec plusieurs combinaisons possibles d'antennes en émission et en réception afin d'augmenter le débit en émission et en réception.
- Implémentation de l'auto-compatibilité avec l'IPv4 et l'IPv6 combinés à la 4G. L'IPv4 était déjà pris en compte par les anciens routeurs, mais il s'agissait de l'adapter avec le réseau 4G. Par contre, l'adaptation avec le format IPv6 fut plus difficile à réaliser, puisque ce dernier n'est pas encore utilisé, mais il fallait quand même l'adapter avec la 4G pour une utilisation ultérieure.
- Le routeur doit prendre en compte les modules CLI (Commande Line Interface) et SNMP pour le contrôle et l'administration à distance. En termes de 4G, le contrôle et l'administration à distance du routeur nouvelle génération sont des étapes importantes. Pour cela il fallait développer tous les modules permettant de contrôler les routeurs via leurs identifiants MIB pour chaque composant du routeur.

- Le fonctionnement et la performance du nouveau routeur 4G sont fortement liés aux bandes de fréquences utilisées. Or, les bandes de fréquences dédiées à la 4G diffèrent d'un pays à l'autre (bien sûr dans le cadre des pays qui sont passés à la 4G/LTE), ce qui nécessite une auto-adaptation non évidente à mettre en place, afin de synchroniser le routeur avec la bande de fréquence 4G d'un pays.
- Enfin, la compatibilité de notre routeur 4G/LTE avec d'autres routeurs appartenant à d'autres constructeurs est un point crucial qui doit se résoudre en collaboration avec les constructeurs des routeurs 4G. Ceci afin de définir les règles d'utilisation et de coopération entre des routeurs 4G de constructeurs différentes, mis en place dans un même réseau 4G.

Une dernière contrainte intéressante à préciser, et qui concerne spécifiquement le module PoE, est celle de la puissance électrique fournie par l'alimentation. Les mesures réalisées sur le matériel utilisé nous ont permis d'établir que le système devait requérir pour son fonctionnement moins de 11W de puissance. La puissance maximale disponible étant de 12,95W, cela signifie que le système doit présenter une efficacité d'au moins 85%.

1.5 Description des travaux effectués

1.5.1 Travaux de conception

Dans ce projet, le principal objectif était de concevoir et mettre en place un routeur de nouvelle génération compatible avec la 4G/LTE. Dans ce contexte, **la première étape** à réaliser était de créer le modèle en couches du routeur compatible avec la technologie 4G/LTE.

Le modèle en couches conçu pour le routeur 4G est illustré ci-dessous :

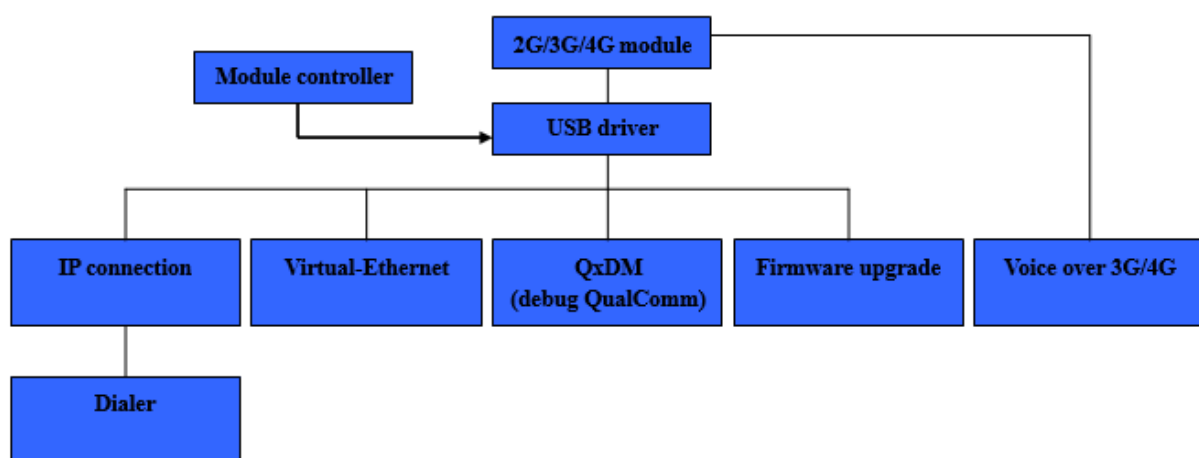


Figure 1.4. : Modèle en couche du routeur nouvelle génération.

Dans ce modèle :

- Le module de contrôle est l'élément principal. Il sert à faire le lien entre les autres modules, sert de base de données d'information pour le reste des modules demandant des informations et détecte toutes les défaillances concernant les autres modules.
- Le module Virtual Ethernet : est le responsable de la transmission des données en utilisant l'interface QMI Ethernet. Elle supporte les deux formats : IPv4 et IPv6.
- Le module Driver USB permet de détecter les supports USB et d'orienter les communications aux couches supérieures en utilisant les points USB.
- Le module Dialer est le module responsable de l'enregistrement des connexions durant la communication avec l'OS (système d'exploitation). Il est capable de le faire en mode 2G, 3G et 4G.
- Le module IP connection est une interface IP (seulement IPv4) permettant de fournir les adresses IP des utilisateurs en utilisant les protocoles PPP, DirectIP et QMI sur un canal IP.
- Le module DebugQualcomm tourne avec le logiciel conçu par Qualcomm. Son objectif est de garder des traces qui seront délivrées à Qualcomm afin d'analyser certains problèmes techniques.
- Le module Firmware upgrade rend possible aux modules basés sur Sierra Wireless la mise à jour du firmware dans les modules 2G/3G/4G.
- Le module Voice over 3G/4G a pour but de rendre possible l'utilisation des réseaux 3G/4G pour la transmission des appels téléphoniques sans apporter de modification majeure du firmware embarqué dans le routeur.

La deuxième étape de réalisation concerne le CLI et le protocole SNMP pour l'administration et le contrôle à distance. Dans ce contexte, le CLI a été conçu de façon à être adapté pour supporter de multiples contextes PDP (établissement de connexion IP) pour la méthode de configuration Virtual-Ethernet. D'autre part, le protocole SNMP est extensible pour supporter les sorties avec MIB.

Ci-dessous est illustrée l'architecture de fonctionnement avec le CLI :

Figure 1.5. : Schéma de l'architecture fonctionnelle avec le CLI.

La troisième étape de réalisation de ce projet touche à la conception de l'alimentation POE ; dans ce cadre, deux cartes mères sont embarquées contre 12v d'alimentation.

Le schéma de l'architecture hardware de ce système est disponible en **annexe 1.2**.

Enfin, **la dernière étape** concerne la conception et la fixation des dernières spécifications techniques du routeur pour gérer tous les problèmes de compatibilité :

- Différents modules radios sont supportés
- Mise en place des Firmwares pour la carte 4G à travers le CLI.
- Différentes fréquences supportées : Europe, Asie, Asie du sud-est et Australie/Nouvelle Zélande. Les fréquences de la 4G sont (Band 20 (800MHz), Band 8 (900MHz), Band 3 (1800 MHz), Band 1 (2100MHz), Band 7 (2600 MHz).
- Etablissement de la compatibilité complète avec la 3G : bandes passantes supportées : > 1 Ghz (10, 15 et 20 Mhz) et < 1 Ghz (5 et 10 Mhz).
- Technologie des antennes supportée : MIMO 2*2 (2 antennes en réception et 2 antennes et diffusion).
- Support de la mobilité de l'utilisateur entre LTE et la 3G (UTRAN).
- Mise en place de LED capables d'indiquer le statut du lien radio (2 leds) et 4 leds pour indiquer la puissance du signal radio.

1.5.2 Prototypage

Après avoir créé son architecture globale, nous avons conçu le prototype de notre routeur de nouvelle génération compatible avec la technologie 4G/LTE, avec des spécifications techniques lui permettant de gérer le débit élevé, la compatibilité avec d'autres technologies, le routage en mode ultra-rapide, etc.



Figure 1.6. : Photo du prototype routeur 4G/LTE.

Ce prototype intègre une carte PoE qui assure l'alimentation du routeur via le port Ethernet :

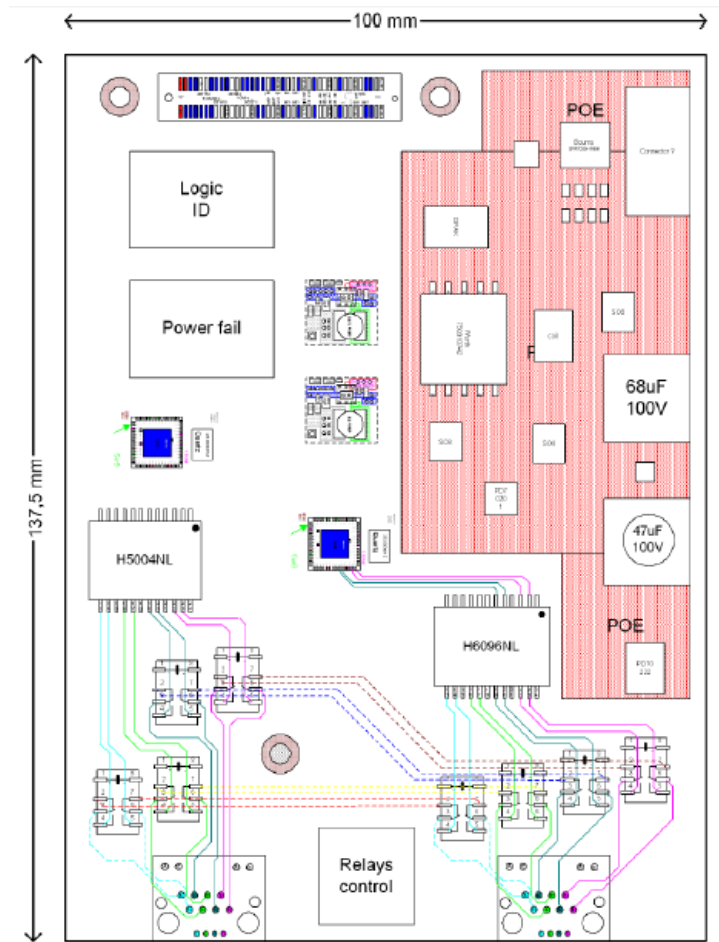


Figure 1.7. : Architecture de la carte fille PoE du prototype..

1.5.3 Tests

Les critères d'acceptation du système étaient les suivants :

- Les performances de routing/bridging.
- Le respect des réglementations en ce qui concerne la compatibilité électromagnétique, la sécurité et le critère de survolage k21+.
- La puissance consommée et la dissipation de chaleur.
- Le coût global du produit, fabrication incluse.
- La stabilité du software.

Les tests réalisés par nos équipes R&D se sont scindé en 5 phases :

Phase 1 :

Tester les fonctionnalités des différents modules dans le scénario de configuration « virtual-ethernet ». Les tests exécutés ont été les suivants :

- Etablir, changer, effacer la configuration virtual-ethernet.
- Tester le « datapath » (taille des paquets, bande passante requise ...etc.).
- Affichage des commandes.
- Scénarios avec perte de connectivité.

Phase 2 :

Durant cette phase, l'effort a porté sur le test de la configuration du « dialer » (PSTN) :

- Etablir, changer, effacer la configuration PSTN.
- Test de la connection PPP Asynchrone.
- Scénarios avec perte de connectivité.
- Basculement entre configuration PSTN et virtual-ethernet.
- Affichage des commandes.

Phase 3 :

Il s'agissait de la phase de test du MIB SNMP ainsi que de l'extension du CLI pour assurer le support de multiples contextes PDP (configuration virtual-ethernet uniquement)

Phase 4 :

Même tests que lors de la phase 2, mais désormais le module était programmé (par le module USB de base de données) pour tourner en mode QMI-IP ou en AT-direct IP.

Phase 5 :

Les deux méthodes de mise à niveau du software des modules Sierra (points d'accès QMI ou HIP) ont dû être testés dans cette phase.

A ce stade du projet, tous les modules étaient implémentés et l'ensemble des tests évoqués précédemment ont été réalisés une seconde fois afin de prévenir d'éventuelles régressions.

Bien entendu, la plupart de ces tests ont donnés lieu à des améliorations de notre prototype et ont dû être réitérés de nombreuses fois.

Le tableau ci-dessous présente, par exemple, les résultats de tests menés afin de déterminer le TRP (total Radiated Power) permettant de valider la qualité du signal induit par une antenne isotopique.

Test	Band	Bandwidth	Low channel	Mid channel	High Channel	Results			DUT	Requirement
						Low channel	Mid channel	High channel		
TIS	band 1 - UMTS		10562	10700	10838	-113,1 dBm	-113,5 dBm	-113,4 dBm	O2	-106 dBm
TRP	band 1 - UMTS		9612	9750	9888	20,8 dBm	21,4 dBm	20,7 dBm	O2	18,5 dBm
TIS	band 8 - UMTS		2937	3012	3088	-111,7dBm	-110,4 dBm	-108,6 dBm	O2	-106 dBm
TRP	band 8 - UMTS		2712	2787	2863	22,5 dBm	21,6 dBm	21,0 dBm	O2	18,5 dBm
TIS	band 7 – LTE		2800	3100	3400	-94,5	-97,9	-97	O2	-91 dBm
TRP	band 7 – LTE		20800	21100	21400	18,6 dBm	18,4 dBm	19 dBm	O2	19 dBm
TIS	band 20 - LTE	5Mhz	6200	6300	6400	-91,5	-91,8	-93,5	O2	-90 dBm
TRP	band 20 - LTE		24200	24300	24400	20,5 dBm	20,1 dBm	19,8 dBm	O2	19 dBm
TIS	band 3 - LTE		1250	1575	1900	-97,9	-97,5	-93,9	O2	-90 dBm
TRP	band 3 - LTE		19250	19575	19900	18,6 dBm	18,6 dBm	18,6 dBm	O2	19 dBm

Figure 1.8. : test du TRP.

Ces résultats sont concluants, hormis pour les bandes 3 et 7, pour lesquelles le gain est légèrement inférieur au gain requis. Cette différence n'est néanmoins pas bloquante en vue du bon fonctionnement du produit.

D'autres résultats de tests sont disponibles en **annexe 1.3**

En outre, le routeur 4G a été conçu pour réaliser un autotest complet à l'allumage. Il embarque un firmware capable d'effectuer un test de contrôle de qualité pouvant être optimisé avec le temps.

1.6 Progrès scientifiques et résultats

Le produit final de ce projet se décline en 2 versions de routeurs 4G baptisés Routeur1 et Routeur2. Ces deux versions sont extensibles sur plusieurs configurations qui peuvent être supportées avec les combinaisons suivantes (de point de vu matériel) :

- 4G LTE.
- SHDSL avec 4 paires.
- Une connectivité Ethernet Gigabit (UTP et SFP).
- AVDSL.
- Wifi (versions 802.11b, g, n...), fréquence entre 2,4 et 2,48 Ghz, modulation CCK et OFDM, sécurité : WEP, WPA et TKIP.
- IPv6.

Comme exposé dans le présent document, la création de ces routeurs présentait un grand nombre d'inconnues scientifiques et de difficultés techniques avec lesquelles il nous a fallu composer.