

Généralités sur Concepts généraux

Sommaire

1.1 Concepts généraux	19
1.1.1 Notions de base	19
1.1.2 Les systèmes de communications mobiles étudiés	25
1.1.3 Présentation de l'UMTS	26
1.1.4 Présentation de HSDPA	30
1.1.5 Présentation de IEEE 802.16e (WiMAX)	32
1.2 Travaux existants	35

Concepts généraux

L'objectif de ce chapitre est de présenter quelques notions de base, des systèmes de communications mobiles et les travaux antérieurs qui ont une relation avec cette thèse. Nous y présentons, dans cette première sous section (1.1.1), quelques types de techniques d'accès multiples, le codage et la modulation adaptatif, les systèmes de communication mobile étudiés dans cette thèse (UMTS, HSDPA et WiMAX). Enfin, dans la deuxième sous section (1.2), nous terminons par la présentation de quelques travaux contextuels déjà existant dans la littérature.

1.1.1 Notions de base

Dans cette section, nous allons présenter quelques méthodes d'accès radio de base (Smith et Collins, 2002).

FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) : La technique d'accès multiple à division fréquentielle, FDMA, représente la technique la plus utilisée dans les réseaux mobiles de première génération. Avec cette méthode, le spectre est divisé en plusieurs

canaux radio (aussi appelées voies ou bandes incidentes, sous-bandes de fréquences) avec une largeur de bande fixée, voir la figure 1.1 (a). Quand un utilisateur désire effectuer un appel, un des canaux est alors exclusivement alloué à cet utilisateur pendant toute la durée de la communication. Un canal de garde se situe entre chacun de ces canaux pour éviter l'intermodulation. Cette technique s'applique principalement aux signaux analogiques.

TDMA (*Time Division Multiple Access*) : La technique d'accès multiple à division de temps, TDMA, est surtout utilisée dans les systèmes de deuxième génération, tels que le GSM. Par cette technique, une même bande de fréquences est partagée par un certain nombre d'utilisateurs qui se voient attribués un intervalle (appelé *slot* ou *IT*) de temps unique, voir la figure 1.1 (b). L'ensemble des IT mis ensemble forment une trame. Dans le cas de la norme européenne GSM, chaque canal de 200 kHz est divisé en huit tranches de temps, tandis que selon la norme américaine IS-136, chaque canal de 30 kHz est divisé en trois tranches de temps. Ces systèmes permettent d'avoir, dans des conditions réelles d'utilisation, une capacité en terme de nombre d'utilisateurs 3 à 6 fois supérieure à celle des systèmes qui se basent sur le FDMA.

CDMA (*Code Division Multiple Access*) : La technique CDMA constitue une méthode d'accès où tous les utilisateurs partagent la même bande de fréquences simultanément et tout le temps, comme le montre la figure 1.1 (c). La technique d'étalement de spectre est utilisée pour affecter à chaque utilisateur un code, ou séquence, unique qui détermine les fréquences et la puissance utilisées. Le signal contenant l'information de l'émetteur est modulé avec la séquence qui lui est attribuée, ensuite le récepteur recherche la séquence en question. En isolant toutes les séquences provenant des autres utilisateurs (qui apparaissent comme du bruit), le signal original de l'utilisateur peut alors être extrait.

W-CDMA (*Wideband-Code Division Multiple Access*) : Il s'agit de la même technique que CDMA, en utilisant des canaux large de 5 Mhz en UMTS. Le protocole WCDMA se base principalement sur le processus d'étalement du spectre à séquence directe DS-SS-CDMA (*Direct Sequence-CDMA*). Dans ce type d'étalement de spectre, le signal d'information est directement modulé par une séquence ou code appelé « code d'étalement ». La figure 1.2 illustre le fonctionnement de cette technique ; la figure 1.2 a) montre les principaux éléments d'un émetteur DS-SS-CDMA. Parmi ces éléments, on trouve principalement un générateur de codes d'étalement et un « multiplicateur ». Le code généré constitue une séquence de longueur fixe dont chaque élément constitue un « chip ». Le processus d'étalement est illustré dans la figure 1.2 b), qui montre le code d'étalement du k -ième utilisateur qui est représenté par la séquence de chips $c_k^{(p)}$, où $p = 1, 2, 3, \dots, M$ et où M représente la longueur du code ($M = 4$ dans cet exemple). Chaque chip a une durée T_c et une amplitude égale à +1 ou -1. Le débit avec lequel varie l'information étalée est appelé débit *chip* (ou *chip rate*) que l'on notera B_{spr} . Ce débit est égal à $1/T_c$, exprimé en chips par seconde (cps).

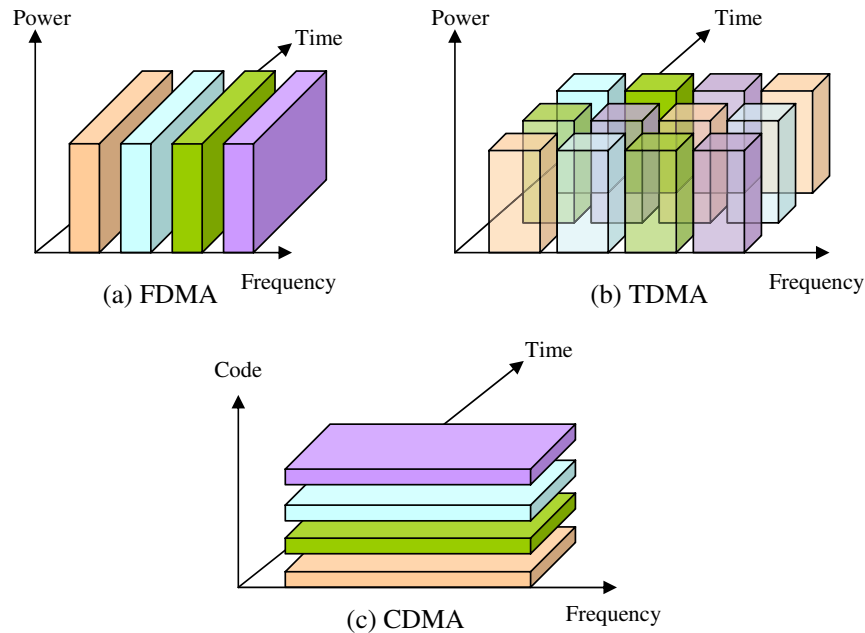


FIGURE 1.1 – Méthodes d'accès multiples (Alwis, 2005).

D'autre part, le n -ième symbole du message d'information de l'utilisateur k est noté $d_k^{(n)}$, où $n = 1, 2, \dots$. Ainsi, et de manière similaire, nous pouvons aussi noter la durée de chaque symbole par T_s , à partir de laquelle nous pouvons également formuler le débit symbole $B_s = 1/T_s$ exprimé en symboles par seconde (sps). Il est important de constater que ce débit symbole est variable dans un système DS-CDMA, car il dépend du service offert (voix, vidéo ou données), tandis que le débit *chip* B_{spr} est constant et fixé à 3.84 Mcps (Millions de chips par seconde).

Le rapport entre le débit du signal étalé et le débit du signal non étalé est appelé facteur d'étalement SF (*Spreading Factor*). Il représente une propriété importante de l'étalement de spectre et s'exprime par : $SF = \frac{B_{spr}}{B_s} = \frac{1/T_c}{1/T_s} = \frac{T_s}{T_c}$

Par conséquent, le facteur d'étalement dans un système DS-CDMA est égal au nombre de chips utilisés pour étaler un symbole d'information. Après la génération des codes, le processus d'étalement se déroule simplement en multipliant le message par +1 ou -1. Selon la figure 1.2 b), il apparaît clairement que $T_s > T_c$, d'où $B_{spr} > B_s$. On comprend alors comment on passe d'un signal à bande étroite vers un signal à large bande. Finalement, le signal subit une modulation en fréquence et il est mis sur une fréquence porteuse avant d'être envoyé. Au niveau de la réception, il suffit de reprendre la chaîne dans l'ordre inverse, notamment en démodulant dans un premier temps le signal reçu, pour ensuite le multiplier par le même code d'étalement utilisé lors de l'émission. À la suite de cette multiplication, nous obtiendrons le message d'information « désétalé » (exprimé en débit symbole).

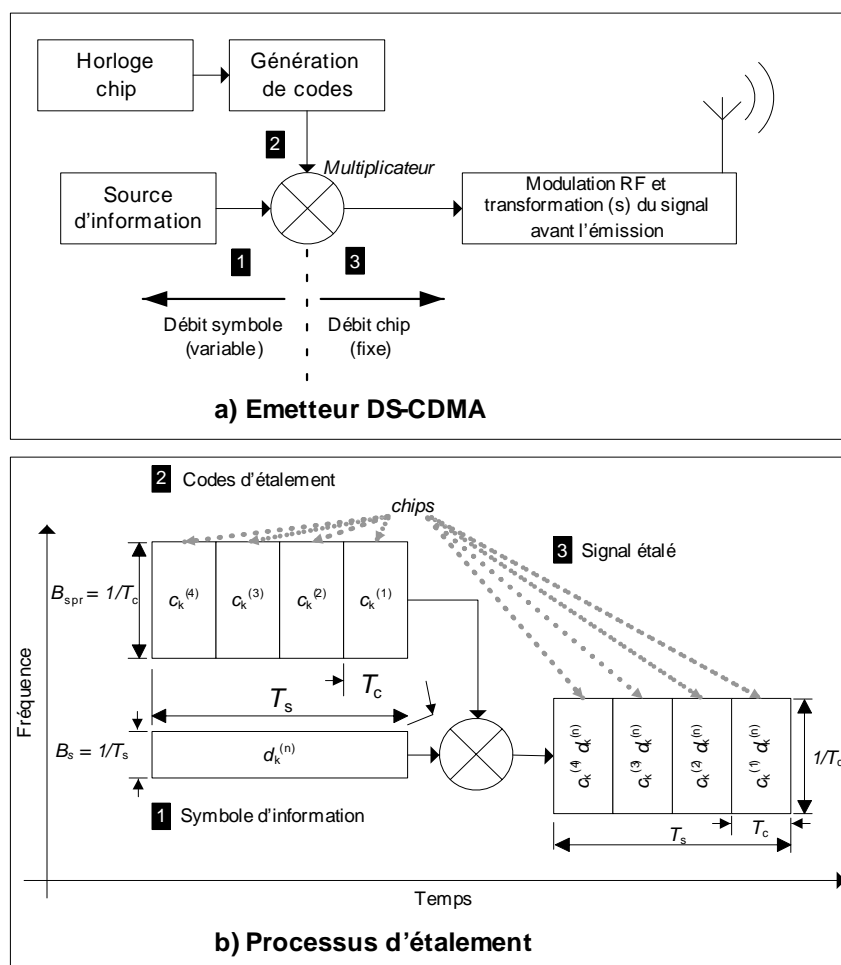


FIGURE 1.2 – Étalement à séquence directe DS-SS-CDMA.

OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) : Dans la technique OFDMA, l'ensemble des sous porteuses d'un symbole OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiple*) (Andrews, 2007) est divisé en sous ensembles de fréquences, ces derniers peuvent être affectés à différents utilisateurs. L'OFDMA apporte une nouvelle dimension lors de l'allocation des ressources : il faut affecter les différentes fréquences aux utilisateurs pendant un même *slot* comme le montre la figure 1.3. Durant un même *slot*, plusieurs utilisateurs peuvent occuper des fréquences différentes et ces mêmes fréquences peuvent être assignées aux mêmes utilisateurs durant les prochains *slots* en fonction de leurs besoins. Ces fréquences sont espacées par les canaux de garde ce qui annule les interférences entre les utilisateurs ou intra cellule. Pour des applications fixes ou nomades où les canaux ne varient que faiblement, l'avantage indiscutable de l'OFDMA sur les autres méthodes à accès multiple est sa capacité d'exploiter la niche des terminaux utilisateurs embarqués. La technique OFDMA est la base du réseau sans fil IEEE802.16e (WiMAX) comme défini dans le standard (IEEE Std 802.16e, 2005).

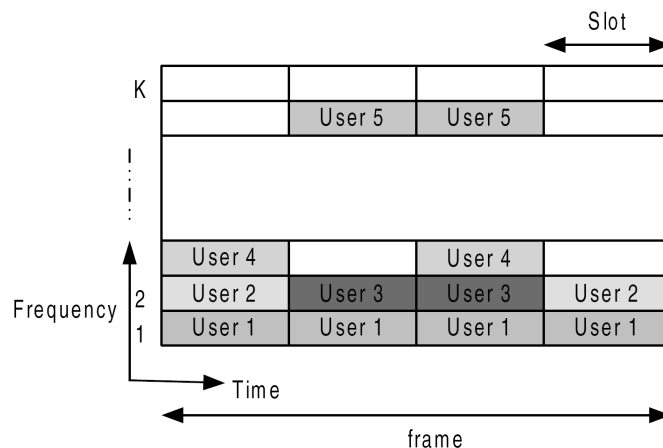


FIGURE 1.3 – Trame OFDMA.

Codages et modulations adaptatifs

Dans les réseaux mobiles, la qualité d'un signal reçu par un terminal dépend de plusieurs facteurs, comme la distance entre la station de base ou la perte de propagation due aux obstacles ou aux trajets multiples. Dans le but d'améliorer la performance d'un système, en termes de débit de données et de fiabilité de la couverture radio, le signal transmis vers et par un utilisateur particulier est modifié de façon à prendre en compte les variations de la qualité du signal à travers un processus connu sous le nom d'«adaptation au lien radio» (*link adaptation*), connu également sous le nom de «AMC» (*Adaptive Modulation and Coding*).

Une des techniques majeures introduites dans le WCDMA est le contrôle de puissance. L'idée est d'augmenter la puissance de transmission quand la qualité du signal reçu est faible et de la diminuer quand la qualité du signal en réception atteint un seuil donné. Ceci permet une communication fiable entre l'émetteur et le récepteur. Ainsi la technique de contrôle de puissance réduit les interférences intra et inter-cellules causées par une puissance de transmission trop importante, la capacité du système est ainsi augmentée. Une technique alternative au contrôle de puissance en faisant face aux effets variables du canal dans le temps est de compenser les évanouissements. Au lieu de garder une qualité de signal constante au niveau du récepteur, on peut changer la modulation et le code du signal transmis de telle façon que le plus d'informations soit transmis lorsque l'état du canal est bon et le moins possible lorsque le canal est détérioré. Cette technique est l'AMC. Comparé à la technique conventionnelle de contrôle de puissance, l'AMC apporte une capacité beaucoup plus élevée pour les systèmes radio à transmission de paquets comme HSPA (*High Speed Packet Access*) et WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*). Un autre avantage de l'AMC est que la puissance d'émission est fixe pendant toute la durée de la trame, ainsi les interférences provenant des autres utilisateurs sont significativement réduites. En plus de la modulation de base de la technique WCDMA définie dans la *Release 99* QPSK, des nouvelles modulations sont proposées dans les *Release 5, 6 et 7* (Holma et al., 2007), la modulation

16-QAM et la modulation 64-QAM pour la technique HSPA.

Mais, contrairement à la modulation QPSK, celles-ci sont optionnelles et dépendent du type de terminal utilisé. La modulation 16-QAM soutient 4 bits/symbole au lieu des 2 bits/symbole de la modulation QPSK. Ainsi, la modulation 64-QAM soutient 6 bits/symbole au lieu des 4 bits/symbole. Les débits sont ainsi augmentés de manière significative. La modulation 16QAM requiert de bonnes conditions de canal et une bonne performance des récepteurs comparée à la modulation QPSK. La décision d'une transmission en 64-QAM ou 16-QAM ou QPSK est faite dans le réseau en utilisant la qualité du canal d'information provenant du mobile via un canal de contrôle montant. En effet, les mobiles HSDPA effectuent des mesures de la qualité du canal physique descendant et transmet un indicateur de qualité de canal CQI (*Channel Quality Indicator*) dans le canal de contrôle montant HS-SCCH. Il faut noter que l'introduction d'un ordre de modulation plus élevé est accompagnée d'une plus grande complexité dans les terminaux mobiles, qui doivent estimer l'amplitude relative des symboles reçus. Cette estimation d'amplitude est nécessaire pour que le terminal puisse séparer tous les points de la constellation 16-QAM et 64-QAM telles qu'illustrés par la figure 1.4. Étant donné que cette estimation devient plus difficile lorsque la qualité du signal reçu est mauvaise, il est alors plus judicieux d'utiliser la modulation la plus faible dont la constellation est moins dense.

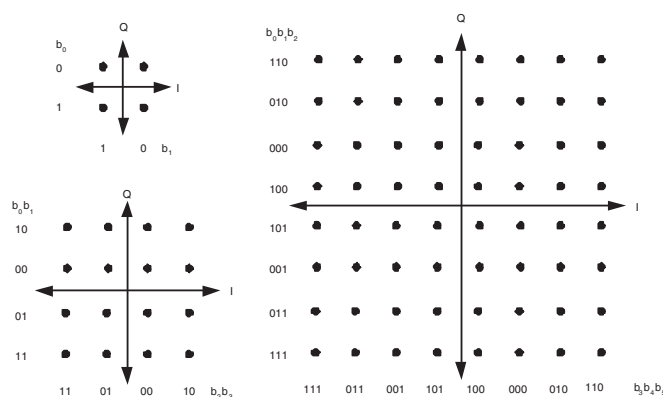


FIGURE 1.4 – Points de quantstellation pour QPSK, 16-QAM et 64-QAM.

En combinant le type de modulation, le taux de codage et le nombre de codes supportés, nous obtenons plusieurs combinaisons, appelées également schéma de modulation et de codage MCS (*Modulation and Coding Scheme*), qui ont été proposées par le 3GPP dans la *Release 5*. Ainsi, un utilisateur qui serait proche d'une station de base pourrait se voir attribué, par exemple, une modulation 64-QAM avec un taux de codage de 3/4 et dont le terminal supporte 15 codes en parallèles. Cette combinaison lui permettrait de bénéficier d'un débit plus élevé sur le lien descendant. L'AMC a été intégré aux fonctionnalités des Node B supportant la technologie HSDPA. Par conséquent, la station de base a la responsabilité de sélectionner l'algorithme de modulation et de codage approprié. Selon le nombre de codes parallèles pouvant être supporté par le terminal, nous obtenons plusieurs classes de terminaux HSPA spécifiées dans la *Release 5* avec un to-

tal de 12 catégories. Ces catégories permettent d'avoir des débits pics allant de 0.9 à 14.4 Mbits/s. En outre, ce même principe de schéma de modulation a été adopté par le standard du réseau WiMAX (IEEE802.16e), comme le montre le tableau 1.1.

Modulation	Taux de codage	Bits/symbole	SNR (dB)
64-QAM	3/4	4.5	24.4
64-QAM	1/2	4	22.7
16QAM	3/4	3	18.2
16QAM	1/2	2	16.4
QPSK	3/4	1.5	11.2
QPSK	1/2	1	9.4
BPSK	1/2	0.5	6.4

TABLE 1.1 – Modulations et taux de codages adaptatifs sur le IEEE802.16e

1.1.2 Les systèmes de communications mobiles étudiés

Évolution des standards de communication

Depuis les premières expériences de Marconi à la fin du XIXe siècle, les communications sans fil entre deux éléments mobiles ont été limitées à des applications professionnelles et ce, jusqu'à la fin des années soixante dix. Il a fallu attendre les années quatre vingt avant de voir la naissance des systèmes de téléphonie mobile cellulaire, de première génération, entièrement analogiques comme le NMT (*Nordic Mobile Telephony*), l'AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*), le TACS (*Total Access Cellular System*) ou le *Radiocom2000*. Néanmoins, les ressources spectrales réduites, la courte durée de vie des batteries et le coût du terminal, ont été des obstacles qui ont restreint les débuts du développement des téléphones portables de première génération. La seconde génération des systèmes cellulaires est apparue au début des années 90 avec le DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*), le GSM (*Global System for Mobile communications*, Europe), le PDC (Japon), et le PCS (États-Unis). Prévus initialement pour des applications de transport de la parole et de données à faibles débits (9600 bits/s) autour des fréquences (935-960 MHz) ou (890-915 MHz), cette norme a permis l'essor des communications mobiles. Les performances (efficacité spectrale, sécurité, fonctionnalités) de la seconde génération de systèmes cellulaires sont plus importantes que celles de la première génération. Un important apport à ces systèmes a consisté en la modification de la méthode d'accès aux données, et a donné lieu à la naissance de la génération intermédiaire nommée 2.5G, incarnée par le système GPRS (*General Packet Radio Service*). Une autre forme d'évolution des systèmes cellulaires de seconde génération est incarnée par les systèmes EDGE (*Enhanced Data rate for GSM Evolution*); ils utilisent une nouvelle modulation, optimisant le débit efficace à l'interface GSM, permettant d'atteindre des débits de 384 Kbits/s au maximum. Les différents continents ont développé des systèmes assez similaires dans le principe, mais parfois différents dans leur réalisation. C'est donc dans le cadre d'une homogénéisation globale des standards qu'est née l'idée

d'une troisième génération de systèmes cellulaires. La troisième génération (3G) de systèmes cellulaires, souvent assimilée en Europe à l'UMTS (*Universal Mobile Telecommunication Services*), a été principalement conçue et imaginée afin de satisfaire l'acheminement de données multimédia (accès à Internet, aux réseaux d'entreprise, à des services de messageries, de visioconférence, de jeux, ...). Au même titre que le GPRS et EDGE ont permis, sans modifier le principe de base des communications, à leur génération de systèmes cellulaires d'évoluer en terme d'efficacité. Le HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*) est déjà considéré comme le standard 3.5G des télécommunications mobiles. Alors que le débit maximum permis sur une liaison UMTS est de 2 Mbits/s pour une bande passante de 5MHz, le HSDPA, grâce à sa modulation en 16-QAM, autorise des débits de 10 Mbits/s. Ainsi, grâce à l'introduction de la nouvelle modulation 64-QAM dans la *Release 7*, le débit théorique de 14 Mbits/s est possible par le réseau HSDPA. Dans ce même sens, le réseau IEEE802.16 (WiMAX) dit 4G permet un débit théorique de 70 Mbits/s sur un rayon de 50 km maximum tout en se basant sur des modulations différentes en fonction de l'état du canal radio et de nouvelles méthodes d'accès au canal. Les performances du système en termes du débit sont beaucoup plus importantes que celles fournies par les systèmes antécédents, grâce à ces modulations (QPSK, 16-QAM, 64-QAM). La norme WiMAX Mobile permet des services comme la communication en VoIP (Téléphonie sur Réseau IP) sur téléphone portable ou encore l'accès à des services mobiles en hauts débits. Son équivalent en Europe est le HiperMAN. De plus, le but principal des nouvelles technologies de communication est de supprimer les câbles et de permettre la transmission (voix, données, ...) via une liaison radio. La figure 1.5 résume l'évolution des réseaux sans fil.

Ainsi, le développement rapide des communications sans fil et l'émergence des nouveaux standards sollicitent la convergence vers la quatrième génération de communications mobiles. Initialement prévue pour les années 2010, elle semblerait présenter ses toutes premières réalisations commerciales légèrement plus tôt. Cette avance par rapport aux prévisions est notamment due au fait que la quatrième génération ne sera pas l'issue d'une révolution dans les communications (comme c'est le cas de la deuxième et la troisième génération), mais plutôt la convergence de différents standards, applications et produits. En effet, il semble pertinent de considérer la 4G comme la convergence des standards et des technologies couverts par la 3G et les réseaux locaux sans fil (WLAN). Le but de la 4G est d'améliorer les performances de la troisième génération, sans changer fondamentalement le contenu ni les applications prévues au départ pour la 3G.

1.1.3 Présentation de l'UMTS

L'UMTS est un réseau mobile de troisième génération capable d'offrir des bénéfices significatifs à l'utilisateur en terme de services à valeur ajoutée, tels que l'accès Internet à haute vitesse, le téléchargement de fichiers (audio et vidéo) ou alors la visioconférence. L'UMTS se base principalement sur la technique d'accès multiple large bande WCDMA pour y offrir ce type de service. Le système universel UMTS a été choisi dans le but de faire une distinction avec les systèmes de première et de deuxième génération qui sont

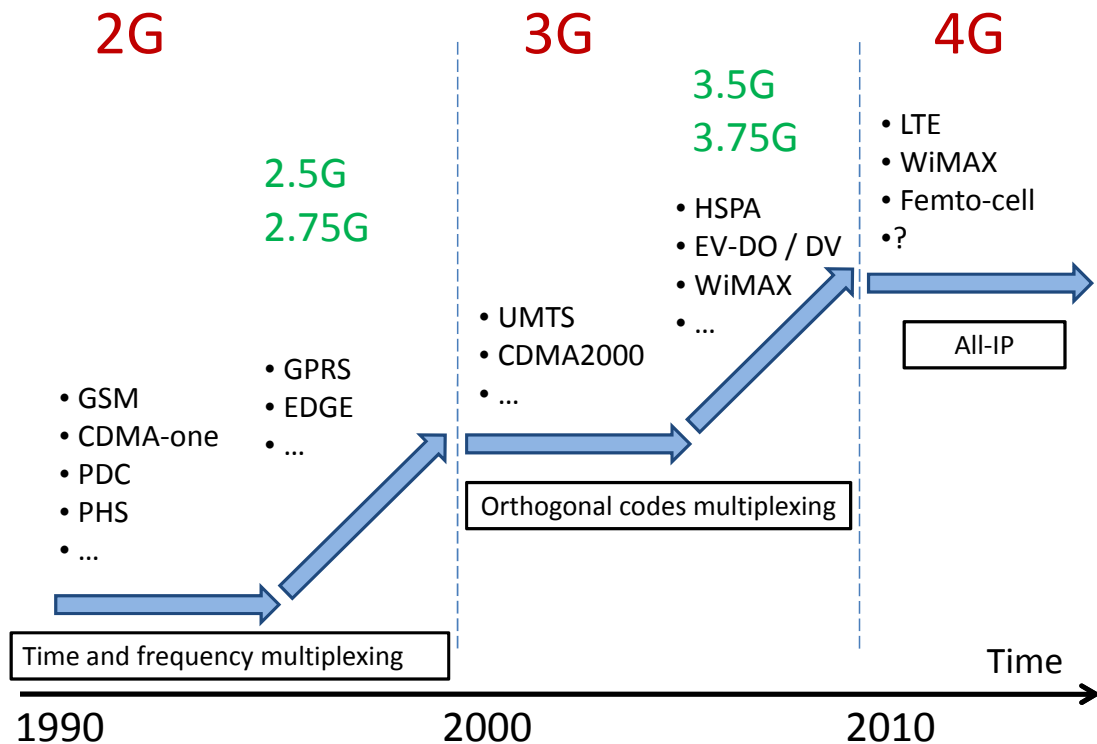


FIGURE 1.5 – Evolution des réseaux sans fil.

considérés comme des systèmes axés principalement sur le service de la voix. Dans cette section, nous allons présenter les catégories de services pouvant être offerts par un réseau UMTS. Puis, nous verrons son architecture en général. Nous verrons également les couches de protocoles radio de l'interface d'accès ainsi que la description des canaux de transport. Le 3GPP a rendu obligatoire l'utilisation du codeur de parole AMR (*Adaptative Multi Rate*) (Holma et Toskala, 2001) dans le réseau UMTS - alors qu'il est optionnel en GSM. Ce codec voix à débit adaptatif propose huit débits différents allant de 4,75 kbps à 12,2kbps, contrôlés par le réseau d'accès et ne dépendant pas de l'activité vocale. Le codeur AMR fonctionne sur des trames de voix de 20 ms, correspondant à 160 échantillons, échantillonnés à une fréquence de 8khz (théorème de Shannon), le système de codage employé par le codeur AMR est appelée ACELP (algebraic code excited linear prediction coder). Par extension, le codeur ACELP à un débit adaptatif est appelé MR-ACELP (*multi-rate ACELP*). Durant une conversation téléphonique, chaque participant parle en moyenne la moitié du temps, chaque sens de transmission est utilisé donc 50% du temps. La technique AMR prend en compte cette caractéristique spécifique des communications vocales en proposant les quatre fonctions suivantes :

- détection de l'activité vocale au niveau de l'émetteur ;
- évaluation du bruit de fond au niveau de l'émetteur afin de transmettre les paramètres correspondants au destinataire ;
- transmission du bruit de " confort " au destinataire au moyen d'une trame spécifique, envoyée périodiquement ;

- génération du bruit de confort au niveau du destinataire durant les périodes pendant lesquelles aucune trame de voix n'est reçue. La technique AMR possède une fonctionnalité de dissimulation des erreurs (*error concealment*). Le but de substitution de trames est de masquer les effets de la perte de trames. Le débit peut être modifié par le réseau d'accès en fonction de charge de l'interface air et de la qualité de bout en bout des communications vocales, aux heures chargées, pendant lesquelles la charge du réseau est forte. Il est possible d'utiliser un débit AMR plus faible afin d'offrir une capacité plus importante, tout en réduisant quelque peu la qualité vocale. D'autre part, lorsqu'un mobile quitte la zone de couverture d'une cellule et qu'il utilise déjà sa puissance maximale de transmission, un débit moins important peut être utilisé pour étendre artificiellement la zone de couverture de la cellule. Grâce à ce codec AMR, il est possible de réaliser un compromis entre la capacité du réseau, la couverture et la qualité vocale en fonction des besoins des opérateurs.

Classes de services et QoS définies par l'UMTS : Le 3GPP (*3rd Generation Partner Project*) (3GPP, 2000) a défini les classes de services que l'UMTS peut offrir et qui dépendent de la QoS (*Quality of Service*) désirée par l'utilisateur. La qualité de service est généralement définie par les critères suivants :

- délai : temps écoulé entre l'envoi d'un paquet par un émetteur et sa réception par le destinataire. Le délai comprend les délais de propagation, de transmission, de traitement et d'attente dans les systèmes intermédiaires ;
- gigue sur le délai : variation du délai de deux paquets consécutifs ;
- bande passante minimum : taux de transfert minimum pouvant être maintenu entre deux points terminaux ;
- fiabilité : taux moyen d'erreurs d'une liaison.

Ces classes de services sont définies par 3GPP comme suit :

1. *services conversationnels (Conversational class)* : les services de cette catégorie permettent de transmettre principalement du son et des images entre deux personnes ou groupes de personnes. Leur qualité est donc assez sensible à des délais dans la transmission, ces délais pouvant être facilement perceptibles par les utilisateurs. Parmi ces services, nous pouvons citer la téléphonie en mode circuit, la téléphonie en mode paquet utilisant le protocole VoIP (Voice over IP) et la vidéophonie. Néanmoins, cette dernière est moins tolérante aux erreurs que la téléphonie et requiert généralement un débit plus important ;
2. *services streaming (Streaming class)* : on retrouve dans cette classe les services qui traitent l'information au niveau du terminal de façon continue, c'est à dire au moment même où elle est reçue (avant de la recevoir dans sa totalité). Ce type de service est unidirectionnel. Ces services sont assez récents et offrent un potentiel d'application assez vaste. Le streaming audio et vidéo sont des exemples d'applications typiques. À la différence des services conversationnels, les services de type streaming sont assez asymétriques (on ne reçoit pas au même débit que l'on émet) et on peut tolérer dans ce cas des délais importants ;

3. *services interactifs (Interactive class)* : ce type de service est caractérisé par le fait que le terminal ayant envoyé un message/commande attend une réponse du destinataire dans un certain intervalle de temps. Par conséquent, un paramètre clé pour identifier la QoS des services interactifs est le temps d'aller-retour, c'est à dire le temps écoulé entre le moment où le message/commande est émis et celui où la réponse arrive. Comme exemple, nous pouvons citer le commerce électronique ainsi que les services de localisation qui se développent de plus en plus ;
4. *services en arrière-plan (Background class)* : il existe des services qui ne posent, ou presque, aucune contrainte de temps dans le transfert de l'information qu'ils génèrent. Ils peuvent s'exécuter en «arrière-plan». Parmi ces services, nous pouvons trouver l'envoi d'un courrier électronique, d'un message court SMS (*Short Message Service*) ou alors le téléchargement d'un fichier. Le paramètre pour quantifier la QoS de ce type de service est principalement le taux d'erreurs qui doit être souvent assez faible.

Architecture de l'UMTS : Le réseau UMTS repose sur une architecture flexible et modulaire. Cette architecture n'est associée ni à une technique d'accès radio, ni à un ensemble prédéfini de services, ce qui assure sa compatibilité avec d'autres réseaux mobiles de deuxième et troisième génération et garantit son évolution. L'architecture peut être adaptée en fonction des besoins des opérateurs de télécommunications. Une telle architecture, comme l'illustre la figure 1.6, est composée de trois «domaines» : le domaine de l'équipement de l'utilisateur UE (*User Equipment*), celui du réseau d'accès radio «universel» UTRAN (*Universal Terrestrial Radio Access Network*) et celui du réseau coeur CN (*Core Network*) (Holma et Toskala, 2001; Javier et Mamadou, 2004). Les domaines du réseau d'accès et du réseau coeur constituent le domaine de l'infrastructure. Chaque domaine réalise une fonction bien précise dans le réseau, tandis que des points d'échange, dénotés par U_u et I_u , servent d'interfaces permettant les échanges entre les différentes parties du réseau.

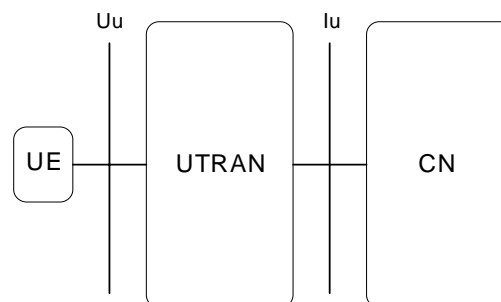


FIGURE 1.6 – Architecture globale du réseau UMTS.

Le domaine UE comprend tous les équipements terminaux et permet à l'abonné l'accès à l'infrastructure et à ses services par le biais de l'interface U_u . Le domaine UE est constitué de deux domaines : celui de l'équipement mobile ME (*Mobile Equipment*) et

celui du modèle d'identité des services de l'abonné ou carte USIM (*Universal Subscriber Identity Module*).

Le domaine UTRAN est composé d'un ensemble de sous-systèmes nommés RNS (*Radio Network Subsystem*) et peuvent être connectés entre eux grâce à l'interface Iur, comme le montre la figure 1.7. Le RNS se scinde en deux éléments : celui du Node-B (ou plusieurs Node-B) et celui du RNC (*Radio Controller Network*) où s'interface avec le domaine CN, généralement à un MSC et à un SGSN grâce aux interfaces Iu CS et Iu PS. Le RNC commande un ou plusieurs Node-B via l'interface Iub. Le Node-B gère principalement la couche physique de l'interface air (le codage du canal, l'entrelacement, l'adaptation du débit et l'étalement). L'UTRAN fournit à l'UE les ressources radio et les mécanismes nécessaires pour accéder au réseau coeur. Il contrôle les fonctions liées à la mobilité et à l'accès au réseau.

Enfin, le réseau coeur CN regroupe l'ensemble des équipements assurant les fonctions telles que le contrôle d'appels, le contrôle de la sécurité et la gestion de l'interface avec les réseaux externes. Ces derniers se scindent en deux catégories : celle des réseaux circuit (Réseau Numérique à Intégration de Service RNIS) et celle des réseaux paquet (réseau Internet), voir la figure 1.7.

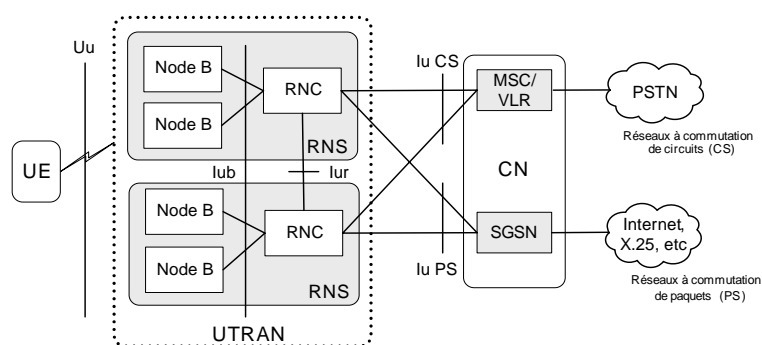


FIGURE 1.7 – Eléments de réseau d'accès UMTS (Holma et Toskala, 2001).

1.1.4 Présentation de HSDPA

Pour offrir des services (de type *interactive, streaming et background*) à haut débit supérieurs à 2 Mbits/s par l'UMTS, le 3GPP a défini HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) dans la *Release 5*. Il s'agit d'une technologie d'accès radio qui permet d'atteindre des hauts débits dans le lien descendant supérieurs à 10 Mbits/s. La technique HSDPA n'est que l'évolution logicielle de la technologie WCDMA de la *Release 99*. Elle est dotée d'un ensemble de propriétés dont la combinaison permet d'améliorer la capacité du réseau ainsi que le débit de données jusqu'à plus de 10 Mbits/s. Parmi ces propriétés, nous retrouvons des techniques connues et utilisées dans des standards d'évolution tel que le GSM/EDGE et que l'on résume dans la figure 1.8 et l'on définit par les points suivants :

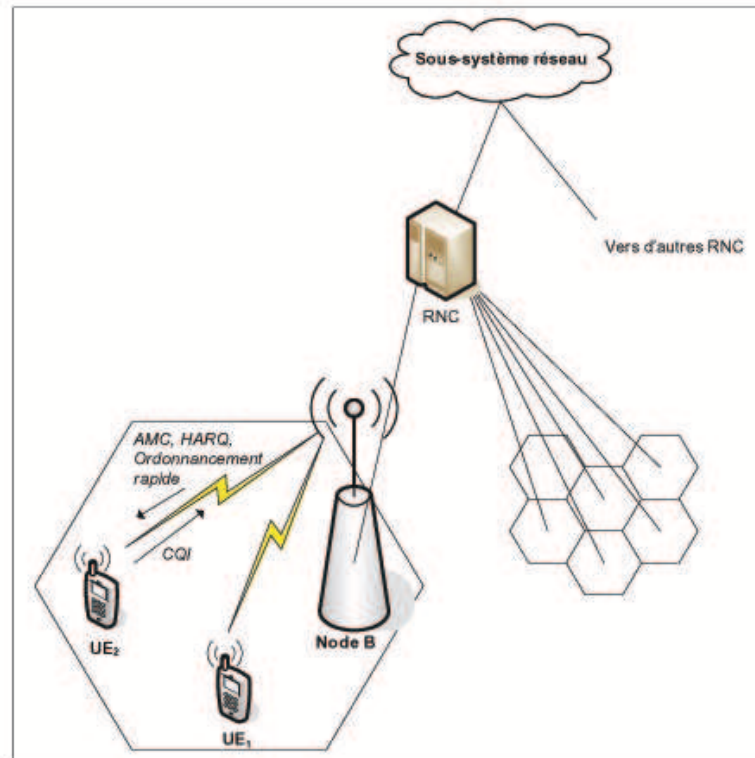


FIGURE 1.8 – Architecture système avec le HSDPA.

1. la technique de modulation et de codage adaptatif AMC permet la variation du débit de transmission de manière adaptative pour pallier les dégradations du signal dues aux conditions de propagation. Cependant, les performances de cette technique sont assez sensibles à des erreurs dans l'estimation des conditions du canal et aux retards implicites de sa transmission vers le Noeud-B;
2. une méthode de retransmission hybride rapide appelée H-ARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*) : la méthode H-ARQ est vue comme un complément à la précédente AMC en apportant la possibilité d'ajuster le débit de transmission de manière plus fine. Le Node-B transmet un paquet de données au mobile. Si au bout d'un certain temps ce dernier n'envoie pas un acquittement positif (ACK, *Acknowledgement*) ou si l'acquittement est négatif (NACK, *Negative-Acknowledgement*) alors, le Noeud-B considère que le paquet n'a pas été reçu convenablement et il renvoie à nouveau le même paquet. Le mobile le garde et le combine avec les paquets retransmis par la suite. Ce type de retransmission est appelée *soft combining* et il existe un autre type qui s'appelle *Incremental Redundancy* (Javier et Mamadou, 2004). Ce qui augmente la probabilité de décoder correctement l'information ;
3. des algorithmes d'ordonnancement rapide de paquets (*Fast Packet Scheduling*) : les deux techniques précédentes permettent d'améliorer les performances de la liaison radio en faisant changer le débit de transmission en fonction des caractéristiques instantanées du canal. Les algorithmes d'ordonnancement permettent

de sélectionner les utilisateurs de cellule auxquels il faut allouer le canal de transmission de donnée HS-DSCH (*High Speed-Downlink Shared Channel*) pendant un interval de temps de transmission ITT (*Interval Time Transmission*). Parmi les stratégies d'allocation de ressources radio appelées *scheduling* on trouve le Max C/I, le PF (*Proportional Fair*) et le FFTH (*Fast Fair Throughput*), pour plus de détails sur ces algorithmes voir ([Ameigeiras et al., 2004](#)).

1.1.5 Présentation de IEEE 802.16e (WiMAX)

Le Wimax est une technologie principalement utilisé pour les MAN (*Metropolitan Area Network*). Il permet, notamment, aux zones rurales de se doter d'une connexion internet haut débit. L'objectif du WiMAX est de fournir une connexion internet à haut débit sur une zone de couverture de plusieurs kilomètres de rayon. Les débits théoriques du WiMAX sont de 70 Mbits/s avec une portée de 50 kilomètres. En pratique dans le pire des cas, c'est-à-dire en NLOS «*Non Line Of Sight*» le débit atteint 12 Mbits/s jusqu'à 4,5 kilomètres. Le WiMAX fonctionne en mode point-multipoint, c'est-à-dire le mode infrastructure que l'on connaît pour le Wifi ou encore le même fonctionnement que les technologies 2G, 3G de téléphonie mobile. Ainsi comme en 2G une station de base nommée BTS (Base Transeiver Station) ou BS (Base Station) émet vers les clients et réceptionne leurs requêtes puis les transmet vers le réseau du fournisseur d'accès. Plusieurs variantes de standard ont été proposées, modifiées et ratifiées comme le résume le tableau 1.2.

Standard IEEE802.16	Bande de fréquence (BF)	Date
IEEE std 802.16	réseaux métropolitains sans fil BF supérieure à 10 GHz.	octobre 2002 obsolète
IEEE std 802.16a	réseaux métropolitains sans fil BF comprise entre 2 et 11 GHz.	octobre 2003 obsolète
IEEE 802.16b	réseaux métropolitains sans fil BF comprise entre 10 et 60 GHz.	fusionné avec 802.16a
IEEE std 802.16c	réseaux métropolitains sans fil dans les bandes BF libres.	juillet 2003
IEEE 802.16d (IEEE std 802.16-2004)	révision intégrant les standards 802.16, 802.16a et 802.16c.	octobre 2004
IEEE std 802.16e	réseaux métropolitains sans fil avec des clients mobiles.	février 2006
IEEE std 802.16f	réseaux sans fil maillés (mesh network).	

TABLE 1.2 – Historique du standard IEEE802.16

Signalisation montante de contrôle : Nous nous intéressons par le standard IEEE802.16e ([IEEE Std 802.16e, 2005](#)) qui utilise dans sa couche physique la méthode OFDMA initialement développée par Sari et Karam ([Sari et Karam, 1995](#)) comme une méthode d'ac-

ces multiple. Afin de signaler des événements spécifiques, les mobiles émettent des signalisations (*Ranging*) en direction de la station de base. Ces signalisations sont de différentes natures en fonction du type d'événement à signaler. La transmission des signalisations utilise un ensemble de 256 codes orthogonaux (*codes CDMA*) codés sur 144 bits. Ces codes sont distribués entre les quatre types de signalisation possibles. Un mobile désirent émettre une de ces signalisations choisit aléatoirement un des codes disponibles dans le sous-ensemble propre à sa famille de signalisation. Ce code est alors transmis via une modulation par phase binaire (BPSK). Le standard IEEE802.16e établit quatre catégories de signalisation : l'initialisation de connexion IR (*Initial Ranging*), la demande de migration de cellule HR (*Hand-Over Ranging*), la demande de bande passante BR (*Bandwidth Request Ranging*) et la demande périodique PR (*Periodic Ranging*). Ces signalisations sont définies comme suit :

1. initialisation de connexion IR (*Initial Ranging*) : l'initialisation de connexion est utilisée par un mobile dès lors qu'elle désire se synchroniser pour la première fois à une station de base. Ce message est envoyé sur un premier intervalle de contention : intervalle de signalisation d'initialisation (*Initial Ranging Interval*) ;
2. demande de migration de cellule HR (*Hand-Over Ranging*) : ce type de *Ranging* demande l'engagement d'une procédure de *Hand-Over* afin que le mobile puisse se rattacher à une autre BS tout en conservant la pérennité des services en cours. Ce message est envoyé sur le même intervalle que ceux d'initialisation de connexion ;
3. demande de bande passante BR (*Bandwidth Request Ranging*) : ce type de *Ranging* est la première étape à l'engagement d'un flux de service vers la station de base. Par ce type de requête, le mobile demande à la station de base de lui allouer un nombre déterminé de fréquences et d'unités de temps qui définiront son sous-canal de transmission. La plage temps-fréquence demandée, et les détails de la connexion dépendront du type de service voulu ;
4. demande périodique PR (*Periodic Ranging*) : ce type un peu particulier constitue des signalisations de contrôle. Le mobile est amené à émettre ce type de signalisation sur demande de la station de base afin de pouvoir engager des opérations de maintenance : adaptation du débit, mesure de puissance, changement de modulation, . . .

Classes de services et QoS définies par le standard IEEE802.16 : Les services d'ordonnancement consistent en les mécanismes supportés par la couche MAC (*Medium Access Control layer*) pour le transport de données. Chaque connexion est associée à une unique classe de service. Ces classes de service impliquent un ensemble particulier de paramètres définissant la QoS associée à la connexion. Quatre classes de services sont proposées dans le standard ([IEEE Std 802.16, 2004](#); [IEEE Std 802.16e, 2005](#)) : le service à acceptation non-sollicitée (UGS), le service temps réel (rtPS), le service de transfert de données (nrtPS) et trafic interactif (BE). En outre, une dernière classe a récemment intégré le standard constituant une extension du service temps réel (ertPS). Elles sont définies comme suit :

1. service à acceptation non-sollicitée UGS (*Unsolicited Grant Services*) : la classe UGS

est destinée à supporter les flux de données temps réel caractérisés par une taille fixe de paquets reçus périodiquement. Cette classe est donc destinée aux services T1/E1 et la voix sur IP (VoIP) sans suppression de silence. Les paramètres de QoS associés sont alors le débit maximum et minimum à réserver pour le trafic (souvent les mêmes), le délai maximum, la gigue tolérée, la politique de mise à jour. Le mobile conserve un délai optimal par le fait qu'aucune requête n'est envoyée dans le sous canal de contention une fois le service engagé. Cette classe de trafic élimine donc les données et délais induits par des requêtes de bande passante répétées. La BS réserve alors périodiquement au mobile une partie des ressources radio disponibles. La quantité réservée est initialement égale au débit maximum demandé. Cette classe est dédiée aux flux en temps réel. Les trames sont de taille fixe et émettent régulièrement ;

2. service temps réel rtPS (*real-time Polling Services*) : la classe rtPS est destinée à traiter les trafics temps réel pour lesquels la taille des paquets de flux de données est variable et à intervalle régulier. Aussi, cette classe est utilisée pour les trafics vidéo tels que le MPEG, H.263, . Les paramètres de Qualité de Service s'articulent autour d'un débit minimum réservé pour le trafic vidéo, d'un débit maximum acceptable, d'un délai maximum et enfin d'une périodicité de mise à jour. Le mobile engageant un trafic rtPS a la possibilité de mettre à jour ses paramètres de performances en incorporant périodiquement de nouvelles requêtes de ressources en queue des paquets de données. Durant l'intervalle de contention. Cette classe respecte donc les trafics sensibles au délai en évitant aux requêtes de mise à jour, les collisions impliquées par l'intervalle de contention. Par ailleurs, le mobile a tout loisir d'indiquer à la BS quelle périodicité de mise à jour requière le trafic engagé. Elle permet les flux temps réel. Les trames sont de taille variable et l'émission peut être irrégulière. Cette classe convient, par exemple, à un flux vidéo ;
3. extension du service temps réel ertPS (*extended real time Polling Service*) : la classe ertPS est destinée à supporter les flux de données temps réel caractérisés par une taille variable de paquets reçus périodiquement. Cette classe est donc destinée aux services de voix sur IP (VoIP) avec suppression de silence. Les paramètres de Qualité de Service s'articulent autour d'un débit minimum réservé pour le trafic vidéo, d'un débit maximum acceptable, d'un délai maximum mais sans indicateur de périodicité de mise à jour. La SS engageant un trafic ertPS a la possibilité de mettre à jour ses paramètres de performances en incorporant, quand cela est nécessaire, de nouvelles requêtes de ressources en queue des paquets de données ou durant l'intervalle de contention. Cette classe respecte donc les trafics sensibles au délai en évitant aux requêtes de mise à jour les collisions impliquées par l'intervalle de contention. Par ailleurs, cette classe de trafic réduit le trafic de signalisation et le délai d'évolution pour les ressources allouées dynamiquement. De plus, l'allocation variable des ressources pour les appels ertPS permet d'éviter le gaspillage de ressource sur lien montant, comme cela peut être le cas sur les appels UGS ;
4. service de transfert de données nrtPS (*non real time Polling Service*) : la classe nrtPS doit quant à elle permettre la bonne gestion des trafics insensibles au délai mais requérant un débit minimum. La taille des paquets peut donc être variable, ainsi

que le délai entre deux transmissions de paquets. Cette classe est donc tout à fait adéquate au protocole de transfert de fichiers (FTP). Les paramètres de Qualité de Service sont : un débit minimum de trafic à réserver, le débit maximum possible pour la connexion et une priorité de trafic. Une fois la connexion engagée, la SS devra impérativement émettre une nouvelle requête de bande passante pour pouvoir prétendre à un autre débit ;

5. service interactif BE (*Best Effort*) : la classe BE est dédiée aux trafic n'exigeant pas de niveau de performance particulier. Les paramètres de QoS sont uniquement liés au maximum de débit possible pour la connexion, à la priorité de trafic et à la politique de renouvellement de requête. Comme pour la classe précédente, la classe engage une nouvelle connexion pour tout nouveau besoin de ressource. Dans cette classe rien n'est garanti on envoie les données sans garantie de réception. Convient bien à la navigation Internet.

1.2 Travaux existants

Cette partie décrit les travaux de littérature déjà existants dans lequel le travail engagé dans cette thèse tire ses motivations. Elle traite des travaux proposant différents modèles de performances, de calcul de capacité, de gestion de mobilité et de mécanisme de contrôle d'admission dans les axes de recherche étudiés le long de cette thèse qui concernent les systèmes WCDMA, HSDPA et WiMAX. Certains de ces travaux présentent des formulations théoriques adéquates et éprouvées aux enjeux de notre présente étude. D'autres se caractérisent par leurs conclusions qui contribuent fortement à l'approfondissement des nouvelles pistes de recherche ayant motivé cette thèse. Ainsi d'autres travaux associés aux modèles de capacité et de contrôle d'admission abordent les principaux moyens et outils de modélisation de la capacité d'une cellule HSDPA et IEEE802.16 avec ou sans la gestion des ressources par rapport à la mobilité des utilisateurs.

De nombreux travaux ont été développés dans la littérature pour étudier la capacité des réseaux sans fil. Dans (Gilhousen et al., 1990), Gilhousen et al. analysent les interférences venant des autres cellules sur la capacité multi-cellulaires CDMA dans laquelle il y a un même nombre constant de mobiles par cellule qui se distribue de façon continue dans chacune d'elles. Dans (Viterbi et Viterbi, 1993), les auteurs étendent le travail développé dans (Gilhousen et al., 1990) en modélisant le système CDMA par une file d'attente de type $M/G/\infty$ dont le nombre de mobiles actifs par cellule est un variable aléatoire qui suit la loi de Poisson dont le paramètre est le trafic moyen offert dans chaque cellule. Cependant, les auteurs utilisent les limites de Chernoff et les approximations gaussiennes pour le calcul de la probabilité de mauvaise liaison (*outage probability*). Également, ils prennent en considération l'effet des interférences inter-cellulaires sur les performances du système CDMA.

Dans (Evans et Everitt, 1999), Evans et al. analysent la capacité du trafic du lien montant des réseaux cellulaires CDMA en incluant les interférences venant des mobiles d'autres

cellules sous forme de puissances comme des points intéressants dans leur développement afin qu'ils analysent le trafic. Chaque mobile a une position aléatoire à l'intérieur de sa cellule qui génère une interférence comme variable aléatoire sous forme de puissance sur les autres mobiles au niveau de leurs station de base, le nombre de mobile par cellule est un variable aléatoire suit la loi de Poisson au lieu d'être un nombre constant. Ensuite, ils modélisent le système CDMA comme une file d'attente $M/G/\infty$ et donnent une nouvelle limite de la capacité CDMA en terme de probabilité de mauvaise liaison. Ils calculent cette probabilité par les deux techniques d'approximation : celle de l'approximation gaussiennes et celle du calcul des limites de Chernoff. Ils considèrent dans leur analyse l'effet des interférences de type *shadowing lognormal* et le contrôle de puissance. Signalons que les travaux mentionnés précédemment ne traitent que le service voix. Donc, offrir d'autres services comme le multimédia par le réseau CDMA, demande une qualité de service acceptable par les mobiles.

Les auteurs dans (Zhang et Yue, 2001) présentent une méthode pour calculer la capacité d'Erlang du lien montant (*uplink*) du système WCDMA en se basant sur le modèle LCH (*Lost Call Held*) décrit dans (Viterbi, 1995). Les auteurs prennent en considération différents facteurs, tels que le niveau d'interférence, les erreurs de contrôle de puissance, le rapport signal sur interférences plus bruit, etc. Cette méthode calcule l'occupation de la capacité du système UMTS/WCDMA sur la base de la probabilité de *outage*. Ainsi, les auteurs donnent une forme explicite de la capacité d'Erlang pour un seul type de trafic (voix) et également pour des trafics mixtes (voix et données). En outre, dans les travaux développés dans (Mandayam et al., 1997), la capacité du lien montant est étudiée en présence de deux trafics : le trafic en temps réel est transmis continuellement, et le non-temps réel est transmis en temps partagé. Dans (Altman, 2002), l'auteur calcule la capacité du lien montant de systèmes CDMA avec un contrôle de puissance idéalisé qui contient des applications de type *best-effort*, c'est à dire des applications dont le taux de transmission peut être contrôlé. Un appel de type *best effort* qui arrive est supposé avoir une quantité fixe de données à transmettre, ce qui fait que le débit de transmission qui lui est alloué par le système détermine la durée de cet appel. L'auteur permet une variété de services et donc des terminaux mobiles peuvent avoir des qualités requises de services différentes selon le type d'appel. Il garantit la qualité de service d'appels en cours en supposant qu'il y a un contrôle d'accès exercé afin d'empêcher un nouvel appel d'arriver quand le système est saturé. Les auteurs dans (Hegde et Altman, 2003) étendent la notion de capacité définie dans (Altman, 2002) à d'autres type de la QoS. Ils considèrent deux types de trafics à savoir, le trafic temps réel et *best effort*. Puis, ils étudient l'impact de la bande passante fixée par appel de type *best effort* sur la capacité d'Erlang du système et montrent qu'une très faible bande passante réservée aux appels *best effort* indique une durée d'appels très longue. La capacité correspondante aux appels *best effort* pour un certain temps de séjour est définie comme le taux d'arrivée de ces appels que le système peut gérer avec la contrainte que leurs délais moyens de transmission prévue ne dépassent pas un seuil fixé par l'opérateur de télécoms.

Dans (Kelif et Altman, 2004), les auteurs considèrent le système WCDMA en présence de deux trafics, temps réel (RT) et non temps réel (NRT) . Ils supposent que les appels en RT ont des ressources dédiées par le système, par contre les appels en NRT partagent

des ressources libres. Ils étudient la probabilité de blocage des nouveaux appels du trafic RT et le temps de séjour prévu pour les appels du trafic NRT sur les deux liens de transmission montant et descendant (*uplink et downlink*) avec et sans macro diversité. Puis, ils proposent un contrôle d'admission CAC (*call admission control*) afin d'avoir une QoS pour les deux trafics et donnent une extension de leurs travaux en incluant le *handover*.

Dans (Bonald et Proutière, 2005) un modèle général a été proposé pour analyser la capacité des réseaux cellulaires en se basant sur une prédiction par la théorie de l'information. Ce travail est premièrement applicable dans les systèmes qui utilisent la méthode de multiplexage temporelle (*time-multiplexed*) comme CDMA 1xEV-DO, UMTS HSDPA et fréquentielle (*frequency-multiplexed*) comme OFDM. Une comparaison a été effectuée avec la capacité maximale obtenue par la théorie de l'information. Le modèle décrit une relation entre les taux de transmission de données et la quantité des ressources utilisées en terme du niveau de puissance dans les systèmes cités ci-dessus. Les auteurs présentent des résultats qui accentuent l'importance de modéliser le système en prenant en considération les arrivées et les départs dynamiques d'appels. La principale contribution de ces auteurs est le développement d'une relation récursive entre les états du système. En se basant sur cette relation pour obtenir les limites inférieures et supérieures, des probabilités de blocage sont établies quand le contrôle d'admission est basé sur un taux minimum de transmission de données.

Dans (Fodor et Telek, 2005), les auteurs définissent une nouvelle méthode en étendant la formule classique de Kaufman-Roberts dans le système CDMA supportant des services *best effort*. Les services de cette classe peuvent adapter dynamiquement leur taux de transmission en fonction des interférences. Les auteurs utilisent la formule de Kaufman-Roberts pour calculer l'état d'équilibre en fixant des taux de transmissions dans le système. Ils donnent une approximation d'une chaîne de Markov irréversible par celle réversible et obtiennent des limites inférieures et supérieures de probabilités de blocages des nouveaux appels dans l'état d'équilibre.

Le CAC décide d'accepter un nouvel appel s'il ne dégrade pas la QoS des appels en cours (Tang et Goldsmith, 2001; Leong et Zhuang, 2002). Le CAC dans le réseau de troisième génération UMTS a fait également l'objet de plusieurs travaux de recherche (Elayoubi et al., 2004, 2005, 2006) pour le lien montant et descendant. Les auteurs ont en particulier calculé la capacité du système pour trois types de récepteurs, à savoir le Filtre Adapté (*Matched Filter*), MMSE (*Minimum Mean Square Error*) et le Décorrélateur (*Decorrelator*). En plus du rapport signal sur interférence plus bruit SINR (*signal to noise plus interference ratio*), ils prennent en compte d'autres contraintes, telles que la couverture et la mobilité. Ils ont également mis en oeuvre plusieurs algorithmes de contrôle d'admission d'appels, qui gèrent les priorités entre les nouveaux appels et ceux en *handover* ou en mobilité, tout en considérant le trafic voix et données dans leur étude. Ils ont utilisé deux approches : celle proactive, fondée sur mesure et celle réactive, basée sur la compression du trafic de données. Tous ces travaux nous ont encouragé à proposer d'autres méthodes efficaces qui nous permettent de trouver explicitement les performances du système (voir les chapitres 2 et 3).

Dans (Assaad, 2006), Assaad et al étudient l'impact du TCP (Transmission Control Protocol) sur la capacité et la performance du système UMTS-HSDPA. Les auteurs proposent une méthode analytique pour l'évaluation de cet impact et une méthode de réduction de l'effet du protocole TCP relatif au débit binaire sur le réseau mobile sans fil UMTS en utilisant des canaux partagés.

Puisque la qualité du signal varie en fonction de la distance du mobile par rapport à sa station de base, et donc le mobile aura un débit qui se dégrade quand il s'éloigne de la station de base. Plusieurs chercheurs ont axé leur étude sur ce problème en subdivisant la zone couverte par la cellule en un nombre fini de région concentriques. Dans (Bonald et Proutière, 2003), les auteurs considèrent un réseau sans fil de données où le nombre de mobiles actifs est dynamique et les mobiles partagent les ressources radio du lien descendant dans les systèmes CDMA/HDR. Ils développent analytiquement les performances du système comme la probabilité de blocage et le débit total, ainsi que la taille de la cellule et la densité du trafic, tout en se basant sur le dimensionnement de la zone couverte par la station de base en un nombre fini de régions.

Dans (Chahed et al., 2008), les auteurs présentent un modèle pour étudier la capacité du système HSPA en combinant les deux liens de transmissions montant et descendant avec la présence de deux classes de service temps réel et *best effort*. La dernière classe est gouvernée par le protocole TCP dans la couche de transport et dont les paquets sont transmis sur le lien descendant et ACKs sur le lien montant. Les appels temps réels ont des ressources dédiées et ceux en *best effort* partagent équitablement les ressources libres. Les appels *best effort* restent longtemps dans le système s'il y a moins de ressources libres et le quittent rapidement quand ils ont plus de ressources libres. Les auteurs analysent le système HDR/HSDPA en offrant les performances du système et proposent un contrôle d'admission pour les appels *best effort* dans les deux liens de transmission.

Les auteurs dans (Li et Sampalli, 2007) développent un contrôle d'admission sur lien descendant du réseau haut débit WiMAX et HSDPA en se basant sur l'adaptation du lien radio de l'interface air. Ils décomposent la cellule en nombre fini de régions prenant en compte un modèle simple de propagation opérant avec uniquement un *path loss* en fonction de la distance entre le mobile et la station de base. Ils considèrent dans leur étude une seule classe de service et modélisent le système par le réseau de files d'attente de type BCMP (Baskett et al., 1975; Chao et al., 2001) dont le nombre d'utilisateurs actifs est fixe. Les auteurs supposent que les taux d'arrivée d'appels dans chaque région uniquement en fonction du nombre moyen de mobile qui se déplacent dans cette région. Ainsi, ils considèrent que le temps moyen de service dépend seulement du temps que le mobile reste dans la région.

Les auteurs dans (Horrich et al.) s'intéressent à la gestion de ressource des réseaux HSDPA et WiMAX en tenant compte de la mobilité. Ils présentent trois schémas RRM (Radio Resource Management) de gestion de ressources dans un système coopératif contenant HSDPA et WiMAX et comparent les performances dans ces schémas en termes de probabilité de blocage des nouveaux appels, de perte d'appels en cours et de temps de transfert de fichiers. Les auteurs se basent sur un modèle de Markov avec la

théorie des jeux pour la gestion de ressources en présence de plusieurs régions d'efficacité de modulation. Ces travaux font la motivation principale de notre contribution développée dans le chapitre 4.

La gestion de la qualité de service et l'évaluation de performances dans la couche MAC du réseau IEEE 802.16e ont été largement effectuées en simulation ; et peu de résultats analytiques ont été prouvés dans la littérature. Dans (Won et al., 2003), les auteurs analysent les performances du protocole d'accès aléatoires dans un environnement OFDMA-CDMA utilisant les intervalles de contention pour l'engagement des connexions, en fonction du délai moyen MDT. Dans (Seo et al., 2004), les auteurs définissent un modèle de performance basé sur un contrôle adaptif de la taille de chaque famille de codes : l'initilisation de connexions (IR), la demande périodique (PR) et la demande de bande passante (BR), afin d'améliorer l'efficacité des accès à compétition. De nombreuses études antérieures partent du principe que les paquets, ou les appels, arrivent dans le système en suivant un processus de Poisson. Ceci, en vue de la simplification du modèle analytique. De plus, ils considèrent que les processus des arrivées de tout type d'appels ou paquets sont indépendents. Néanmoins, puisque dans le WiMAX, tous les mobiles partagent un nombre fini de codes CDMA, les arrivées de ces appels devraient être dépendents, comme prouvé par (Peyre et al., 2008). En effet, dans (Peyre et al., 2008), les auteurs développent un modèle d'accès en couche MAC des requêtes de signalisation en se basant sur les différentes classes de priorités utilisant la différenciation des paramètres *backoff* et les codes libres pour ces classes. Ils considèrent le cas de la classification des connexions basée sur les codes de partitionnement entre les classes d'appels avec une sous plage de codes réservée pour la classe temps réel et une autre sous plage de codes partagée avec celle non temps réel.

Le travail développé dans (Wongthavarawat et Ganz, 2003), définit une architecture de QoS associant un planificateur et un algorithme de contrôle d'admission. De manière plus riche et subtil, l'étude (Wang et al., 2005) développe un algorithme de contrôle d'admission aboutit et dynamique afin d'assurer la qualité de service de chaque classe de trafic du standard IEEE802.16e. L'algorithme réserve sur les ressources disponibles celles demandées par les trafics non temps-réel. Ces derniers seront alors refusés si la capacité de la cellule est dépassée par la nouvelle demande de ressources. En parallèle, les autres types de trafic partageront les ressources restantes. En outre, le principe d'allocation proposé ici introduit une évolution dynamique dite de dégradation de ressource. En effet, l'arrivée de nouveaux appels temps réels aboutira à la réduction progressive et adaptative des ressources restantes partagées entre les appels non temps réel. Ainsi, l'auteur assure la plus grande priorité aux trafics UGS et rtPS tout en maximisant le débit global par une attribution adaptative de la bande passante aux autres trafics. Ce principe, faisant autorité dans la littérature, sert de base à l'élaboration du contrôle d'admission développé au chapitre 5. En outre, nous voyons au travers de (Benameur et al., 2001), une base théorique menant à un partage efficace et équitable des ressources radio disponibles. En effet, ce travail constitue la base des algorithmes évolués de contrôle d'admission. Il propose une gestion indépendante des trafics temps réel et non temps réel. Les premiers reçoivent en priorité les ressources demandés, les autres se partagent équitablement la bande passante laissée libre. Par contre aucun des

deux trafics n'obtiendra une nouvelle connexion si les trafics non temps réel ne disposent plus d'un minimum de bande passante. Ce principe vise à empêcher la famine de ressource pour les trafics non temps réel. Dans une toute autre approche, nous présentons les travaux de (Ball et al., 2005). Ce travail propose un ordonnancement innovant de l'allocation de ressources entre les trafics. Le principe de TRS (ordonnancement par omission temporisée) attribut les ressources en fonction de l'efficacité de modulation de chaque utilisateur. Partant du constat que les utilisateurs ayant le plus mauvais rapport signal bruit (SNR) engendrent un plus grand gaspillage des ressources radio, il se verront allouer peu de ressources de communication et uniquement à des intervalles espacés. Ce mécanisme part du principe que la mobilité des utilisateurs leur permettront à terme de profiter pleinement des ressources qui leurs sont nécessaires. Ce mécanisme original d'allocation de ressource aboutit à un gain important d'efficacité spectrale. Par conséquent, les communications issues des régions proches sont rapidement servies, et dans le contexte d'un réseau non-saturé, ceci aboutit indirectement à une meilleure prise en charge des communications des régions plus périphériques. Ce travail a la particularité de prendre en compte l'efficacité spectrale des utilisateurs vis à vis des ressources radio qui leurs sont allouées. Ce dernier critère nous semble un des critères primordiaux caractérisant un algorithme d'admission et d'allocation performant.