
Le IEEE802.16 principe et structure

1.1.1 Objectif

Le standard IEEE802.16 vise à offrir un moyen de communication sans-fil à la fois innovant, rapide à déployer et à bas coût. En plus de cela, il entretient une interopérabilité complète avec l'ensemble des produits existants chez tous les constructeurs respectant les normes de l'IEEE. De par ses fonctionnalités, ce type de standard est un outil puissant facilitant la compétition des fournisseurs d'accès à l'internet sans-fil en fournissant une alternative performante aux méthodes d'accès filaires.

Par ailleurs, le standard est implicitement destiné à étendre le marché des solutions d'accès sans-fil en prenant en compte, dans son principe même, le caractère mobile des données multimédia ainsi que de leur usagers. Ainsi, le standard IEEE802.16 cherche principalement à combler l'écart existant entre les solutions de communication sans-fil haut débit et celles de bien plus faible débit, mais qui assurent une gestion efficace de la mobilité.

1.1.2 Structure

Le standard IEEE802.16 décrit un système de communication avec infrastructure. Les échanges des données sont ainsi centralisés par un organe principal. Cette organisation est caractéristique d'une architecture cellulaire. Les unités communicantes, souvent nombreuses et relativement limitées en puissance et capacité de calcul, dialoguent exclusivement avec cet organe central. Les unités obtiendront un accès avec l'extérieur ou avec une autre unité de la cellule uniquement par le biais de cet élément principal.

La figure 1.1 illustre le modèle de référence de la norme et précise les blocs fonctionnels qui relèvent spécifiquement du standard.

La couche MAC se compose de trois sous-couches. La sous-couche de convergence des services (CS) assure la transformation, et la représentation des informations réseaux extérieures reçues via le point d'accès de service (SAP). Ces informations proviennent en fait des unités de données de services (SDU) reçues par la deuxième composante de la couche MAC : sous-couche commune MAC (CPS). Cette sous-couche de convergence introduit la classification des unités de données des services réseaux extérieurs, et les associe à ses identifiants propres de flux de service MAC (SFID), ainsi qu'à ses identifiants de connexions (CID). De plus, cette sous-couche prend en charge certaines fonctions telles que la suppression des entêtes de données (PHS). De nombreuses spécifications sont disponibles pour cette sous-couche afin de la rendre interfaçable avec un grand nombre de protocoles. Le format des données issues de la sous-couche de convergence lui est propre, et la couche MAC commune (CPS) ne doit pas nécessairement pouvoir interpréter tout ou partie de ces données.

La seconde composante de la couche MAC est la sous-couche commune MAC (CPS). Elle fournit les principales fonctionnalités de la couche MAC en gérant l'accès au canal,

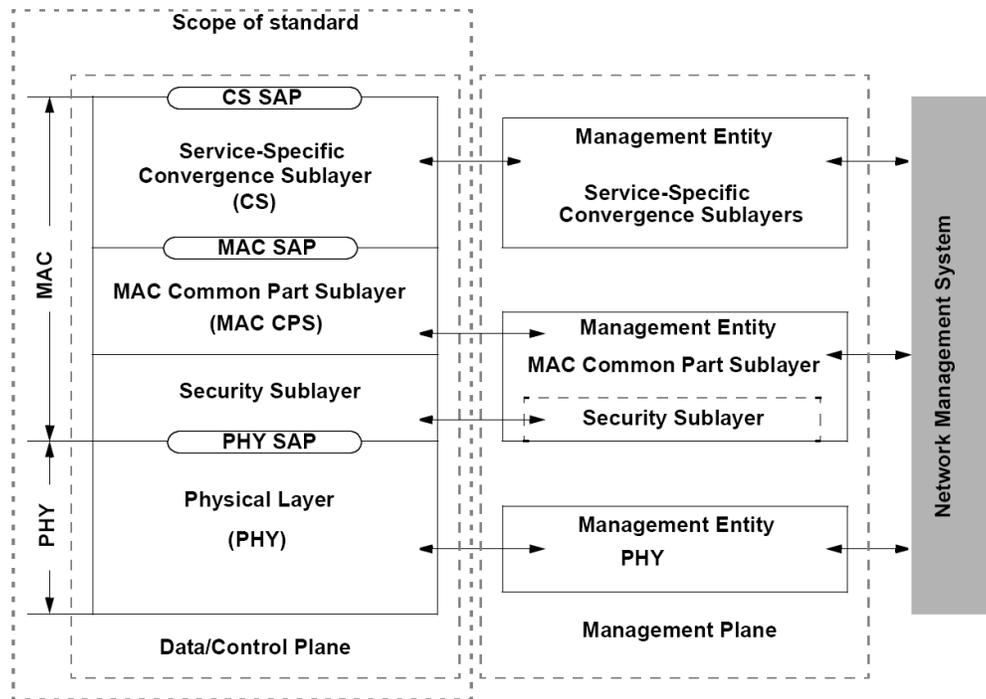


FIGURE 1.1 – Structure en couche du standard IEEE802.16 (Forum, 2004)

l'allocation de bande passante, l'établissement et la maintenance des connexions. La sous-couche commune reçoit par exemple toutes les données utiles à la sous-couche de convergence des services.

La couche MAC présente aussi une sous-couche de sécurité assurant l'authentification, l'échange sécurisé des clés de chiffrement, et le chiffrement des informations elles-mêmes.

Suivant une approche différente, le standard définit aussi les spécifications de la couche physique (PHY). Le rôle de cette couche est de formaliser les moyens d'échange des données entre la couche MAC et les éléments de la topologie. Cette couche intègre, entre autres, les différentes méthodes de consommation et d'utilisation de la ressource radio. Plus spécifiquement, la section 1.2 identifie les éléments de la couche physique qui nous intéressent. Enfin, il est à noter qu'une approche inter-couche est possible car la couche physique et la couche MAC peuvent s'échanger des informations via un module de point d'accès de service physique (PHY SAP).

1.1.3 Chronologie

La formalisation du standard IEEE802.16 correspond à un travail de longue durée. Le standard s'est en premier lieu fixé des objectifs principaux pour après définir ses premières propriétés et caractéristiques. Par la suite, des objectifs de plus en plus ambitieux ont abouti à la distinction de versions, chacune améliorant la précédente en

lui intégrant des fonctionnalités additionnelles. Le tableau 1.1 établit l'évolution chronologique de la norme, de son début jusqu'à la période d'engagement de la présente étude.

Version	Caractéristiques	Date
IEEE 802.16	Fréquences supérieures à 10 GHz	octobre 2002
IEEE 802.16a	Fréquences comprises entre 2 et 11 GHz	octobre 2003
IEEE 802.16b	Fréquences comprises entre 10 et 60 GHz	Fusionné avec la version <i>a</i>
IEEE 802.16c	Fréquences libres	janvier 2003
IEEE 802.16d	Intégrant tous les standards antérieurs	octobre 2004
IEEE 802.16e	Intègre la gestion de la mobilité	février 2006

TABLE 1.1 – Historique du standard IEEE802.16

1.2 Couche physique

Cette section traite de la couche physique définie par le standard IEEE802.16e. Le standard permet l'utilisation de différentes couches physiques en fonction de l'utilisation visée par le système de communication : portée, débit, tolérance aux obstacles... L'étude menée ici traite uniquement de la version de couche physique assurant l'accès multiple par division de fréquences orthogonales (OFDMA) initialement développé par Sari et Karam (Sari et Karam, 1995). Cette technique d'exploitation efficace du spectre est destinée aux transmissions sans ligne de vue directe (NLOS) et pour des fréquences inférieures à 11 GHz. Ces fréquences étant soumises à des organismes de gestion des ressources radio (ART en France par exemple), les fréquences utilisées doivent être acquises via des licences d'autorisation. La ressource radio se trouvant ainsi limitée à un spectre borné, les ressources devront être partagées entre les utilisateurs.

1.2.1 Structure de trame

L'exploitation du canal dans le standard IEEE802.16e se fait par une division combinée en temps et en fréquence. La trame est construite par les séquences de transmission de la station de base (BS) et des clients mobiles (SS). Chaque trame se décompose en deux sous-trames : chronologiquement, le lien descendant (DL) et le lien montant (UL). La figure 1.2 représente le schéma structurel d'une trame telle que définie dans le standard IEEE802.16e dans un mode de fonctionnement TDD-OFDMA.

Le lien descendant contient les envois de la BS à l'ensemble des SS de sa cellule. Chronologiquement, le lien descendant contient une carte de la sous-trame du lien descendant (DL-MAP), puis une autre du lien montant (UL-MAP). Ces informations sont entre autres visibles sur la figure 1.2. DL-MAP et UL-MAP sont positionnées en début de la sous-trame du lien descendant. Notez que la UL-MAP figure ici à l'intérieur du «DL-burst #1», destinés à tous les utilisateurs. Ainsi, les SS prennent connaissance

des espaces temps-fréquences (ou sous-porteuses) qui leur sont destinés ou alloués respectivement pour recevoir et émettre leur données de trafic. Cet ensemble de sous-porteuses définit un sous-canal de transfert de données assigné à la seule connexion de la SS qui l'a engagée. La sous-trame du lien descendant se compose, ensuite, de l'ensemble des espaces de transmission (DL burst) tels que définis par la DL-MAP.

Le lien montant se compose des émissions des SS vers la BS. Cette ressource devant se partager entre toutes les SS, l'émission sur lien montant obéit au procédé DAMA : accès multiple par demande assignée. Ce procédé sera décrit dans la section 1.3. Les SS transmettent donc leur données via leur espace alloué (UL burst), information obtenue par lecture de la UL-MAP. Il est à noter que la sous-trame de lien montant contient un espace de fréquence intitulé *Ranging Subchannel*, par lequel les SS effectuent leur signalisations montantes de contrôle.

Afin de maintenir une bonne synchronisation entre les SS et l'architecture, les deux sous-trames DL et UL sont espacées par un temps TTG : espace de transition émetteur/receveur. De plus, deux trames complètes sont elles-mêmes séparées par un temps RTG : espace de transition receveur/émetteur.

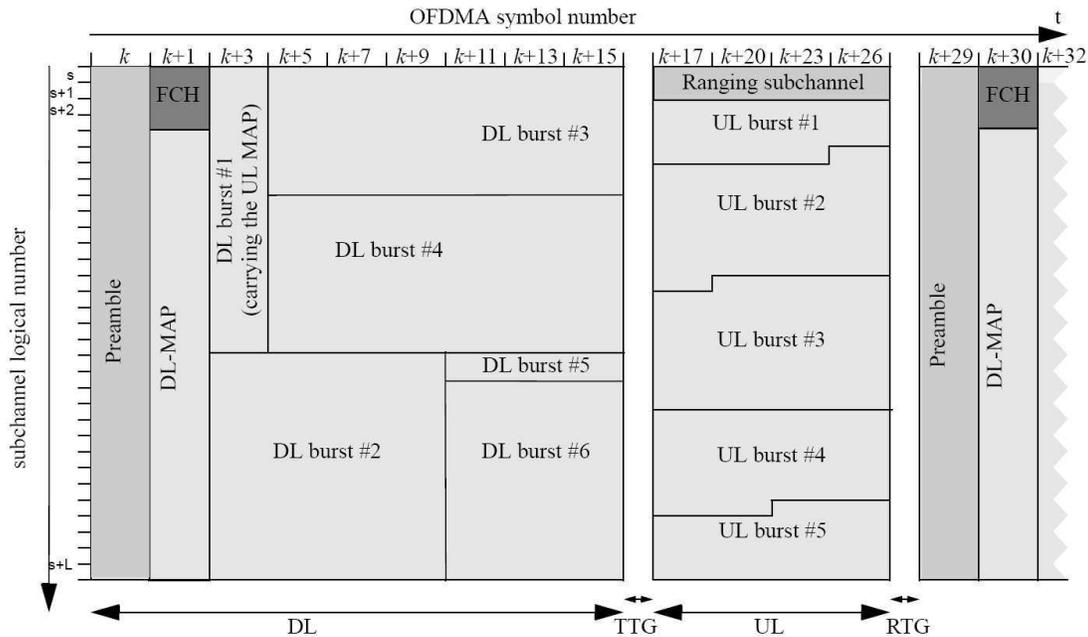


FIGURE 1.2 – Structure d'une trame IEEE802.16e-OFDMA (Forum, 2004)

1.2.2 Signalisation montante de contrôle

Afin de signaler des événements spécifiques, les SS émettent des signalisations (*Ranging*) en direction de la BS. Ces signalisations sont de différentes natures en fonction du type d'événement à signaler. Le standard IEEE802.16e établit quatre catégories de si-

gnalisation : l'initialisation de connexion (*Initial Ranging*), la demande de migration de cellule (*Hand-Over Ranging*), la demande de bande passante (*Bandwidth Request Ranging*) et la demande périodique (*Periodic Ranging*).

De manière générale, l'espace temps-fréquence (*Ranging Channel*) de ces signalisations se situe dans le lien montant de la trame IEEE802.16e (voir figure 1.2). Ce *Ranging Channel* se compose d'un groupe ou plus de six sous-canaux, tous adjacents. La position de ces groupes est renseignée aux SS via l'UL-MAP. 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 utilisateur désirant 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).

- **Initialisation de connexion** : l'initialisation de connexion (ou Initial Ranging) est utilisée par une SS dès lors qu'elle désire se synchroniser pour la première fois à une BS. Ce message est envoyé sur un premier intervalle de contention : intervalle de signalisation d'initialisation (Initial Ranging Interval).
- **Demande de migration de cellule** : ce type de *Ranging* demande l'engagement d'une procédure de Hand-Over afin que la SS 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 : Initial Ranging Interval.
- **Demande de bande passante** : ce type de *Ranging* est la première étape à l'engagement d'un flux de service vers la BS. Par ce type de requête, la SS demande à la BS 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 (voir la sous-section 1.3.5). Les mécanismes liés à ce type de signalisation sont détaillés dans la section 1.3.4.
- **Demande périodique** : ce type un peu particulier constitue des signalisations de contrôle. La SS est amenée à émettre ce type de signalisation sur demande de la BS afin de pouvoir engager des opérations de maintenance : adaptation du débit, mesure de puissance, changement de modulation,

1.2.3 Codage et Modulation Adaptatifs

Le principe de communication en point à multipoint du standard IEEE802.16e définit une architecture cellulaire décomposée en secteurs. La figure 1.3 présente un exemple de décomposition d'une cellule IEEE802.16e en secteur, ces secteurs correspondent aux différentes modulations et taux de codage accessibles aux SS et à la BS de la cellule. Cette représentation en secteurs concentriques est un exemple de formalisation valable

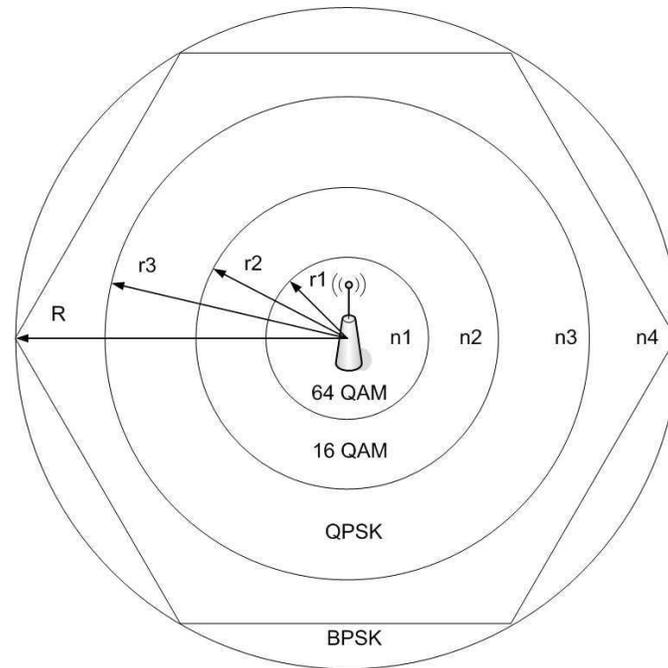


FIGURE 1.3 – Décomposition en secteur d'une cellule IEEE802.16e

uniquement lorsqu'on considère un modèle de propagation basé sur le *path loss*. Dans ce type de modèle, l'affaiblissement du signal dépend essentiellement de la distance entre émetteur et récepteur et non des obstacles à la propagation des ondes radios. Aussi, suivant ce modèle de propagation, les seuils de rapport signal sur bruit définissent les rayons respectifs des secteurs. Néanmoins, il est important de préciser que d'autre modèle de propagation peuvent être considéré. D'une manière générale, le profil de modulation et de codage dépend directement du rapport signal-bruit (SNR) du récepteur. Les éléments IEEE802.16e peuvent ainsi adapter leur modulation et leur codage à la qualité du canal de transmission, afin d'optimiser l'utilisation des ressources radio tout en conservant un taux de perte acceptable. Le tableau 1.2 présente les différents codages et modulations possibles dans le standard. Ces paramètres de transmission assurent un taux de perte de blocs de donnée (BLER) inférieur à une perte d'un bloc pour un million transmis.

Modulation	Codage	bit/symbole	CINR mini.
QPSK	1/2	9.4	5
QPSK	3/4	11.2	8
16-QAM	1/2	16.4	10.5
16-QAM	3/4	18.2	14
64-QAM	1/2	21.2	16
64-QAM	2/3	22.3	18
64-QAM	3/4	24.4	20

TABLE 1.2 – Modulations et taux de codages adaptatifs sur le IEEE802.16e

1.3 Couche MAC

La couche MAC contrôle la manière dont les éléments communicant accèdent et consomment la ressource radio. Le standard IEEE802.16e propose deux modes de fonctionnement : réseau maillé (Mesh) et point à multipoint (PMP). La présente étude porte exclusivement sur le dernier mode. Cette section vise à détailler aussi précisément que possible les mécanismes intervenant dans cette couche réseau. Premièrement, elle décrit le protocole organisant le changement dynamique du profil de modulation et de codage pour les transmissions montantes et descendantes. Par la suite, nous identifions la logique d'adressage ainsi que les principes, caractéristiques et algorithmes des demandes de connexion. De là, nous décrivons les classes de trafic liées à la Qualité de Service (QoS). Notez que la Qualité de Service correspond ici à l'aptitude du système de communication à fournir et entretenir les impératifs de performances associés à un service spécifique (transfert de fichier, téléphonie, vidéos, ...).

1.3.1 Protocole de changement de modulation

Le profil de modulation (Burst profil) sur les liens descendants et montants est géré indépendamment par chaque SS. Il est donc à la charge des SS de maintenir le profil le plus efficace sur ses voix de transmissions. Ceci permet de réduire la consommation des ressources. Ainsi, les SS évaluent continuellement le rapport entre la puissance reçue de la porteuse avec les interférences et bruits de réception (CINR). La SS le compare alors avec la plage des CINR acceptables pour le profil de modulation actuellement utilisé. Si le CINR sort de la plage permise, la SS demande alors à la BS un changement de profil de modulation. Si la SS demande l'utilisation d'un profil plus robuste (modulation de moindre débit), elle informe la BS via une demande de changement de profil de modulation sur le lien descendant (DBPC request) ou envoie une requête sur l'intervalle de temps réservés aux initialisations de connexion. Le message DBPC est envoyé en queue de paquet du service en cours. Dans le cas où la SS demande un profil moins robuste, seul l'envoi d'un message de type DBPC est possible. Par ailleurs, les processus de changement diffèrent en fonction du sens de changement du profil : les figures 1.4 et 1.5 présentent les chronogrammes de changement du profil de modulation vers, respectivement, un profil plus robuste et un profil plus rapide. De plus, les figures 1.6 et 1.7 montrent respectivement les algorithmes d'envoi et de traitement de la réponse opérés par les SS.

Notons que pour toutes ces figures, les profils de modulation X, Y et Z sont classés par ordre décroissant de robustesse. De plus les *timer* T_{28} et T_{29} sont des comptes à rebours enclenchés pour les demandes de changements de modulation ; respectivement vers un profil moins et plus robuste. La figure 1.7 montre que ces deux comptes à rebours sont initialisés suite à un refus venant de la station de abse. Aussi, avant toute nouvelle demande de changement de profil, la SS doit s'assurer qu'un certains temps s'est écoulé entre les deux demandes. Enfin, le *timer* T_{30} correspond au temps autorisé pour l'attente de la réponse de la BS pour un changement de modulation. Par ailleurs, le

passage d'un profil à un autre de moindre robustesse est possible sans attendre l'autorisation de la BS. En effet, ce changement n'implique pas une consommation supplémentaire des ressources radio. Par contre, le cas inverse nécessite une autorisation explicite de la BS, attestant ainsi que le canal radio dispose d'assez de ressources libres pour supporter un tel changement. Dans cet optique, la demande de changement requiert logiquement l'envoi d'une requête explicite de type *ranging request*.

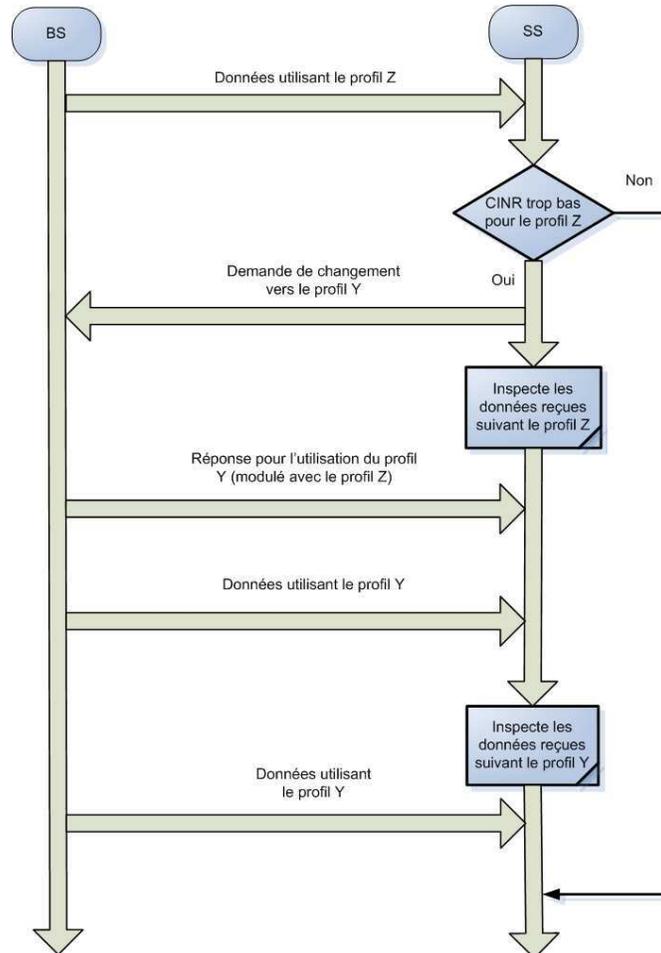


FIGURE 1.4 – Chronogramme pour un changement de profil de modulation plus robuste

1.3.2 Mode Point à Multi-Point

Dans le mode Point à Multi-Point, seule la station de base communique directement avec les éléments mobiles au travers du lien descendant. Aussi, deux éléments mobiles désirant échanger des informations passent impérativement par la station de base. Le standard IEEE802.16e se base sur une architecture cellulaire dont la station de base est le centre. La cellule est décomposée en secteurs. Tous les mobiles reçoivent les mêmes informations via le lien descendant, exclusivement diffusées par la station de base sur

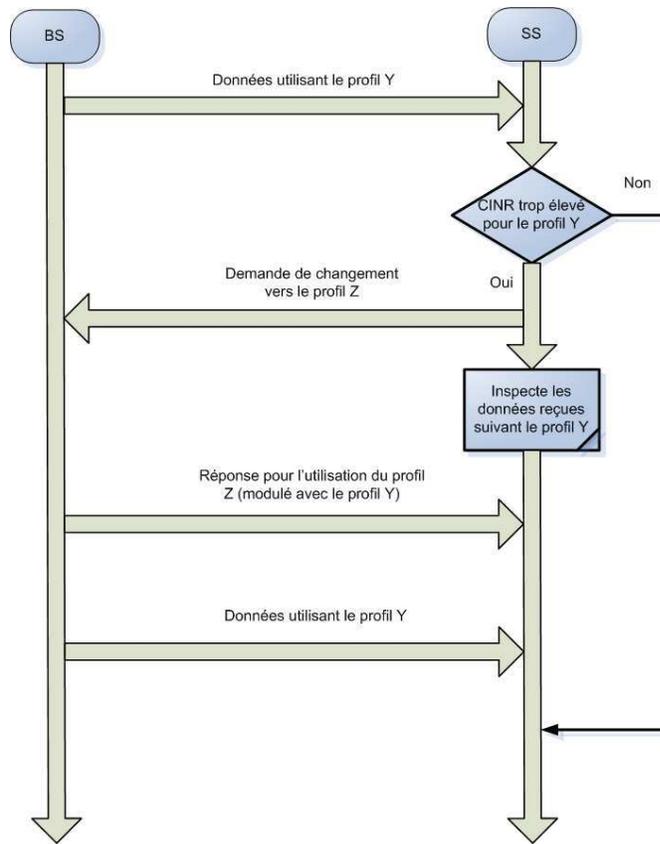


FIGURE 1.5 – Chronogramme pour un changement de profil de modulation moins robuste

toute la cellule. Les mobiles accèdent aux informations qui leur sont destinées en y recherchant leur identifiants de connexion (CID). Le lien montant est quant à lui formé par la réunion des émissions singulières et synchronisées de chaque élément mobile en activité. Toute émission sur le lien montant doit être préalablement autorisée par la station de base, qui entre autres y associe les droits spécifiques d'accès au canal : les mobiles peuvent disposer d'un droit d'accès continu ou soumis à des demandes répétées périodiquement. Les différents régimes d'autorisation seront détaillés dans la section 1.3.5.

Notons ici que les communications PMP assurent aisément les diffusions larges (Broadcast) à tous les mobiles, à des groupes spécifiques (Multicast), ou encore à un mobile en particulier (Unicast).

Le point primordial caractérisant les communications du standard IEEE802.16e est qu'elles sont orientées connexion. Ainsi, toute transmission sera associée à l'établissement préalable et l'entretien d'une connexion. Ce procédé assure, à chaque type de transmission, une connexion associée offrant une qualité de service (QoS) adéquate.

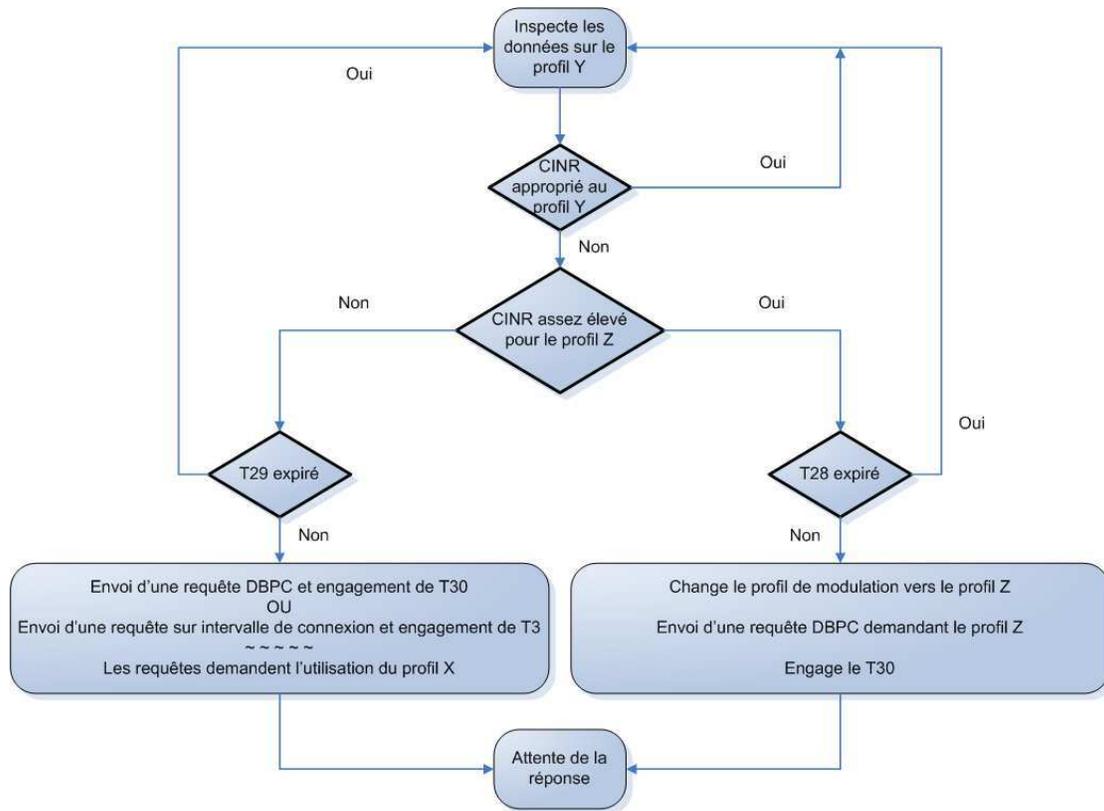


FIGURE 1.6 – Algorithme d'envoi d'une requête de changement de profil de modulation

1.3.3 Logique d'adressage

Chaque SS dispose d'une adresse MAC universelle codée sur 48 bits, telle que définie par le standard IEEE802 - 2001 (Forum, 2001). Cette adresse unique identifie une SS vis à vis de tous les fabricants et équipements existant. Cette adresse est utilisée à la première connexion (*Initial Ranging*). Elle peut ainsi faire partie d'un mécanisme d'authentification de la SS par la BS.

Les connexions sont quant à elles caractérisées par un identifiant codé sur 16 bit : le CID. Notons ici que les CID définissent une connexion full duplex en établissant simultanément un sens montant et descendant. Une SS dispose donc d'un CID pour chacune de ses connexions. Ces CID lui servent alors à identifier la connexion concernée par une éventuelle actualisation des ressources requises.

1.3.4 Mécanismes de demande de ressources

L'accès au canal du standard IEEE802.16e se base sur des connexions de type DAMA. Le DAMA, ou accès multiple sur demande est une technologie utilisée afin d'assigner une ressource à un utilisateur qui n'en aura pas besoin indéfiniment. La BS, en se ba-

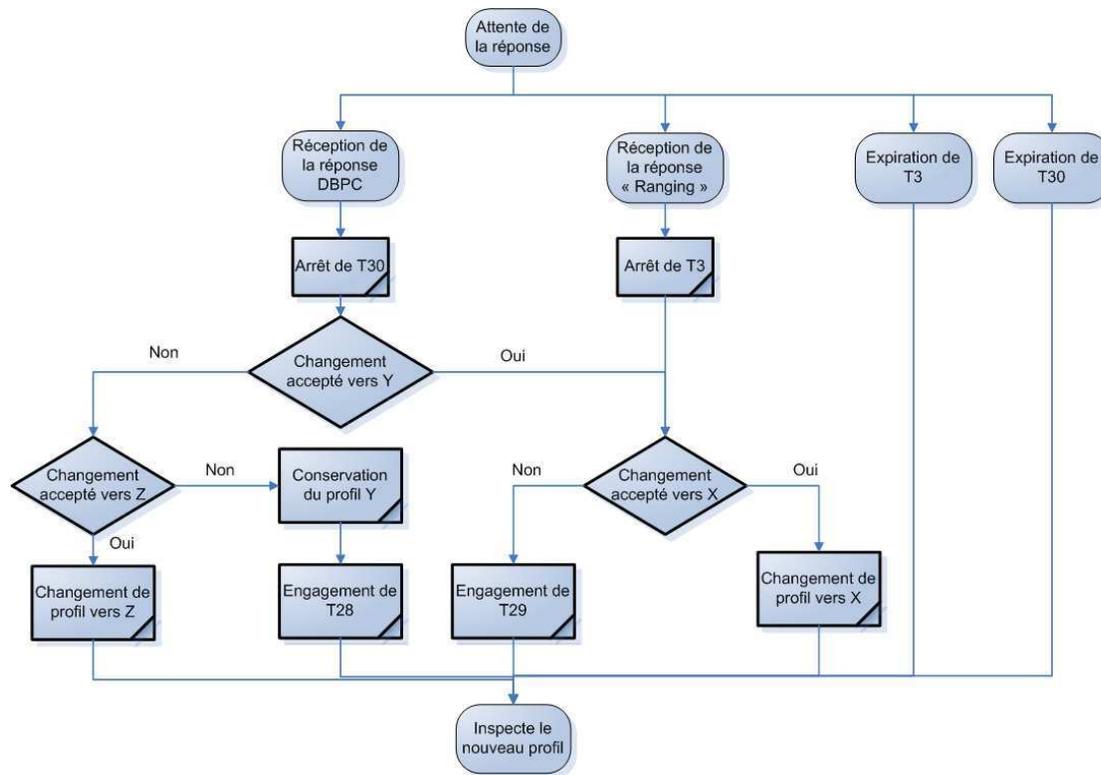


FIGURE 1.7 – Algorithme de traitement des réponses de changement de profil de modulation

sant sur le DAMA, alloue donc une ressource à la suite d'une requête émise par une SS. Quand cette ressource n'est plus utilisée, la BS a alors tout le loisir de l'assigner à une nouvelle connexion.

Requête sur intervalle de contention

Dès lors qu'une station mobile a un besoin en ressource de transmission, elle engage une requête (BWR), la classe de service désirée et les paramètres qui y sont associés. Cette requête est transmise via l'intervalle de demande de bande passante (*bandwidth request ranging interval*). Cet intervalle est soumis à la compétition entre toutes les SS désirant faire de même. Néanmoins, tel qu'indiqué dans la sous-section 1.2.2, les SS utilisent pour cela le principe d'accès multiple par codes orthogonaux (CDMA). Le grand nombre de codes disponibles diminue fortement les risques de collision. Pour cela, la SS désirant émettre une telle requête conserve la plage totale de codes, ceux réservés aux signalisations de demande de bande passante. Parmi ces codes, la SS sélectionne aléatoirement et de manière uniforme un de ces codes orthogonaux. Ce code servira à la modulation de la requête. Les codes étant tous orthogonaux entre eux, la requête n'interférera pas avec une autre requête utilisant un autre code.

Ce mécanisme de connexion est celui suivi par n'importe quelle nouvelle connexion,

quel que soit sa classe de trafic. Néanmoins une autre méthode existe. Dérivée de la précédente, elle est utilisée par les trafics demandant une modification des ressources qui leur sont allouées. Spécifiquement utilisé par les trafics non-interactifs, UGS, ertPS et rtPS (voir section 1.3.5); ce mécanisme consiste à attacher, en fin de paquet de transmission, la demande de mise à jour des ressources désirées (*piggyback request*). Cette modification assure au trafic une prise en charge immédiate de la requête par la BS en évitant tout risque de collision sur l'intervalle de contention.

Mécanismes d'attente et de retransmission

Dans la mesure où la requête est correctement reçue par la BS, la BS formalisera une réponse en fonction de son contrôle d'admission des connexions (CAC) et des ressources demandées par la SS. La réponse sera diffusée au travers de la UL-MAP d'une des trames MAC suivantes. Afin que chaque SS reconnaisse sa propre réponse, celle-ci est identifiée par le couple adresse MAC de la SS et CID qu'il lui a été donné. Notons ici que ce protocole de demande de ressource impose à la BS la réalisation d'une longue séquence d'action. Cette séquence se compose de déchiffrement de toutes les requêtes émises simultanément par les SS de la cellule, vient alors la consultation des ressources disponibles, suivi par la classification des demandes en accord avec la politique de contrôle d'admission de la BS et enfin la formulation des différentes réponses. Toutes ces étapes demandent un certain temps de traitement susceptible de prendre plusieurs millisecondes. Aussi, la réponse à une requête se situe toujours à plusieurs trames MAC de celle ayant servi à l'envoi de la requête. Cette caractéristique sera un des éléments importants de la présente étude.

Le standard IEEE802.16e offre la possibilité d'obtenir des ressources en faisant plusieurs tentatives d'envoi de requête. En premier lieu, la SS venant d'émettre une requête laisse le temps à la BS de traiter et de formuler sa réponse. Ce temps d'attente est borné par un compte à rebours intitulé T_3 dans le standard. Au delà de ce temps, la SS considère que sa demande est rentrée en collision avec d'autres sur le canal de contention. Il est, par ailleurs, possible que la demande soit correctement arrivée à la BS, mais que celle-ci n'ait pas été retenue par le module de traitement des requêtes. Dès lors que la SS ne reçoit pas de réponse, elle engage alors un algorithme incrémental exponentiel de *backoff*. Ce processus s'opère de la même manière que dans le standard IEEE802.11. En d'autres termes, la SS définit une fenêtre de temps pour ensuite attendre durant un temps aléatoire et uniformément réparti sur cette fenêtre. A expiration de ce temps, la SS engage l'émission d'une nouvelle requête. A chaque échec consécutif, la SS multiplie la fenêtre de temps du *backoff*. En outre, le standard définit un nombre maximal d'essais au bout duquel la demande de connexion est abandonnée. Dès lors qu'une tentative de connexion est satisfaite, la fenêtre de temps est réinitialisée, ainsi que le décompte des retransmissions autorisées.

La figure 1.8 suivante présente l'algorithme suivi par les SS dans une cellule IEEE-802.16e. La figure décrit le comportement des SS visant à établir une connexion avec la BS.

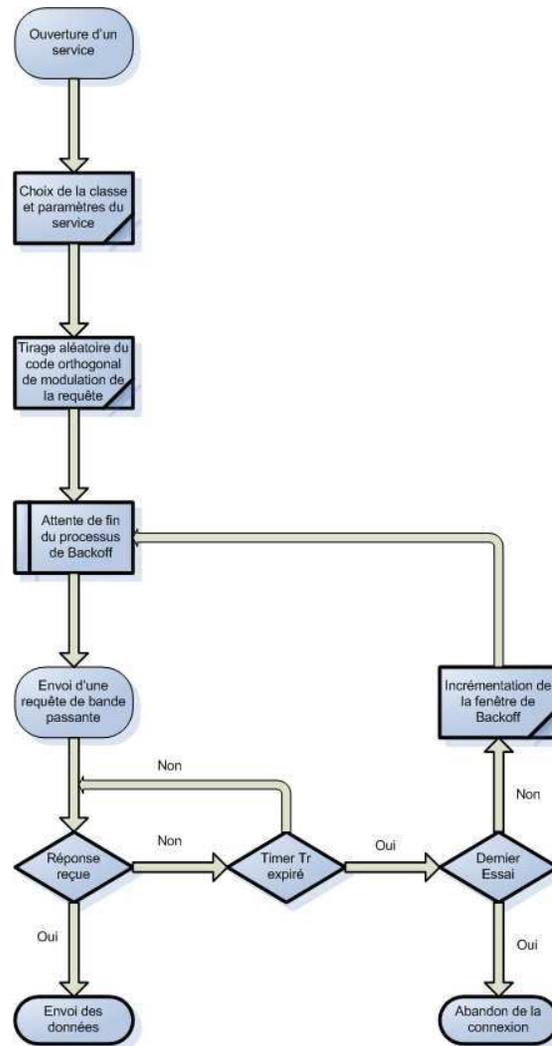


FIGURE 1.8 – Algorithme d’ouverture d’un service sur voix montante

1.3.5 Ordonnancement

Les outils d’ordonnancement sur couche MAC ont pour but d’assurer une gestion efficace des différents appels en accord avec les classes de service auxquelles ils sont rattachés. Le planification des ressources liées à un appel s’appuie alors sur un ensemble déterminé de critères de Qualité de Service. Chaque appel est associé à une classe de service. A ce jour, quatre classes de service sont proposées dans le standard : 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).

- **UGS (Unsolicited Grant Service)** : la classe UGS est destinée à supporter les flux de données temps réel caractérisés par une taille fixe de paquets reçus pé-

riodiquement. 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 et la périodicité désirée des opportunités de transmission. La SS 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 à la SS une partie des ressources radio disponibles. La quantité réservée est initialement égale au débit maximum demandé.

- **rtPS (real time Polling Service)** : la classe rtPS est destinée à traiter les trafics temps réel pour lesquels la taille des paquets de flux de données sont variables 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 du débit désiré. La SS, engageant un trafic rtPS, a la possibilité de mettre à jour ses paramètres de performance en incorporant périodiquement de nouvelles requêtes de ressource 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, la SS a tout loisir d'indiquer à la BS quelle périodicité de mise à jour requiert le trafic engagé.
- **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. En fait, cette classe propose une alternative entre les trafics UGS et rtPS.
- **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.

- **BE (Best Effort)** : la classe BE est dédiée aux trafics n'exigeant pas de niveau de performance particulier. Les paramètres de QoS sont uniquement liés au maximum de débit possible pour la connexion et à la priorité de trafic. Comme pour la classe précédente, la classe engage une nouvelle connexion pour tout nouveau besoin de ressource.

1.4 Etudes antérieures

Ce chapitre décrit les éléments de littérature dans lequel le travail engagé dans cette thèse puise ses motivations. Une première partie recense les études dites contextuelles. Elles analysent et identifient les forces et faiblesses du standard IEEE802.16, ainsi que les différentes perspectives et projections futures sur l'importance et la rapidité de déploiement de cette technologie. Une seconde partie traite des travaux proposant différents modèles de performances. Certains de ces travaux présentent des formulations théoriques adéquates et éprouvées aux enjeux de la présente étude. D'autres se singularisent par leur conclusions qui contribuent fortement à la déclaration et l'approfondissement des nouvelles pistes de recherche ayant motivé cette thèse. Une troisième partie élargit le champ d'étude vers les articles associés aux modèles de capacité et de contrôle d'admission dans le standard IEEE802.16. Ces travaux abordent les principaux moyens et outils de modélisation de la capacité d'une cellule IEEE802.16 avec ou sans la gestion de la mobilité des utilisateurs. Par ailleurs, les algorithmes de contrôle d'admission, qui y sont proposés et étudiés, apportent les premiers éléments pouvant constituer un algorithme de contrôle abouti et général pour ce standard. En outre, ces travaux mettent aussi en évidence les problèmes subsistant dans tout contrôle d'admission, et qui demandent encore d'être résolus. Enfin, une dernière partie traite succinctement des perspectives de coopération et d'interaction du standard IEEE802.16 (WiMAX) avec le IEEE802.11 (Wi-Fi), ainsi que le HSDPA. Ces travaux ont pour but de formaliser la capacité du WiMAX à fonctionner de pair avec les autres technologies de communication existantes. Cette partie apporte ainsi des éléments supplémentaires motivant et orientant le présente étude.

1.4.1 Etudes contextuelles

Dans un premier temps, nous mettons en évidence les analyses globales du standard IEEE802.16. Différentes études proposent en effet une appréciation qualitative et quantitative des projections faites sur ce standard.

Différents travaux abordent en effet une analyse qualitative générale de la technologie IEEE802.16, en la comparant souvent avec les spécificités des autres technologies majeures déjà existantes. Ainsi, (Barry et al., 2005) présentent et résument les principales originalités et principes du standard IEEE802.16. Les auteurs y intègrent une dimension économique, ainsi que les perspectives d'évolution ayant conduit à la réalisation de la version -e- du standard. Suivant une logique similaire d'étude, (Ma et Jia, 2006) présentent une analyse intelligente dite «SWOT», des forces et faiblesses du standard vis à vis de ses aptitudes de compétition et de coopération avec les autres principales techniques de communication sans-fil. Cette étude exprime que le standard présente des perspectives plus complémentaires que concurrentielles. Les auteurs précisent, entre autres, que les performances des systèmes de communication de troisième et quatrième génération (3G et HSDPA) demeureront, à court et moyen terme, les technologies prédominantes. Mais ils mettent également en avant les forts avantages de considérer le standard IEEE802.16e comme la technique majeure d'interconnexion de toutes ces technologies entre elles. Il en résulte un intérêt grandissant pour les travaux relatifs à la coopération, l'interconnexion et la possibilité de migration dynamique de technologie (handover vertical).

Dans une approche plus quantitative, d'autres études exploitent les caractéristiques propres au standard afin de mettre en évidence les perspectives de performance, de compétitivité et de déploiement. Par exemple, (Smura, 2004) correspond à une thèse traitant des différents critères de performance caractérisant un système de communication IEEE802.16. Il met particulièrement en avant les relations entre la capacité de couverture, de débit et d'accueil du système, ainsi que ses perspectives tarifaires. L'auteur conclut son étude en indiquant que ces systèmes de communication ne sont pas encore capables de supplanter les accès internet domestiques xDSL ou ceux sur fibre optique (IEEE802.11, ADSL et VDSL), mais qu'ils constituent à ce jour la meilleure alternative aux réseaux étendus, ruraux ou caractérisés par une topologie géographique fortement accidentée. Dans ces dernières conditions, le faible coût de déploiement et le fort débit offert en font la technologie prédominante. En outre, l'auteur précise que les perspectives économiques les plus profitables se basent sur la gestion native de la mobilité et de la Qualité de Service. En effet, ce type de capacité est susceptible de motiver une surtaxation pour tout utilisateur désireux d'en profiter. En parallèle à cela, nous trouvons une étude aussi pertinente : (Ghosh et al., 2005) relative cette fois au standard IEEE802.16d. Elle présente les premiers indicateurs de performances réelles obtenues sur des déploiements opérationnels. L'expérimentation fait état d'un débit maximum de 3 Mbit/s sur une couverture de quelques kilomètres. De plus, l'auteur précise que dans ces conditions d'exploitation, environ 25 % des utilisateurs ne peuvent accéder à plus de 1.5 Mbits/s. Ces observations ont été obtenues sur des interfaces simple antenne et sur une cellule exploitant trois profils de modulation (Burst profiles). Les auteurs rajoutent que l'utilisation de mobile double antenne à l'intérieur d'une cellule décomposée en six secteurs aboutit à un débit maximum de 7 Mbits/s où seulement 2 % des utilisateurs disposent d'un débit inférieur à 1.5 Mbits/s. En conclusion, les auteurs développent différentes perspectives en fonction des améliorations qui peuvent être visées dans le futur de cette technologie.

Enfin, nous trouvons dans la documentation électronique trois éléments clés : ([Forum, 2004](#)), ([Forum, 2005](#)) et ([Forum, 2008](#)). Ces trois références constituent la principale base bibliographique sur le standard IEEE802.16. La première correspond au forum impliquant l'ensemble des communautés libres, industrielles et littéraires travaillant sur le standard. Ce forum représente la base de connaissance primordiale à l'ensemble de cette étude. La seconde ainsi que la dernière référence correspondent aux standards eux-mêmes, respectivement le IEEE802.16d et le IEEE802.16e. Ces deux références sont indissociables car la dernière est en fait composée d'un ensemble de mises à jour de la première. Enfin, des travaux en cours portant généralement sur les techniques de transmissions sans-fil : les références ([Tse et Viswanath, 2005](#)) et ([Smith et Meyer, 2004](#)) constituent une base de connaissance théorique importante. A la manière des références précédentes, ces ouvrages fournissent un grand nombre d'outils théoriques et contextuels relatifs aux techniques de transmissions sans-fil. Le dernier a notamment l'avantage d'explorer les réseaux étendus et cellulaires ainsi que les perspectives et moyens d'interconnexions entre eux.

1.4.2 Modèles de performance

La littérature propose tout un ensemble de modèles de performance originaux ou inspirés de travaux antérieurs. Néanmoins, certaines références spécifiques apportent une contribution notable et fortement utile dans le champs de recherche de cette thèse. Aussi, nous proposons ici un ensemble sélectionné de références traitant des sujets propres ou annexes au standard IEEE802.16. Ces travaux antérieurs peuvent être décomposés en trois principales catégories présentant néanmoins des éléments communs. La première catégorie contribue aux travaux de recherche par l'élaboration de modèles originaux, qui peuvent servir de base théorique majeure en vue d'établir un modèle propre au standard et à ses spécificités. La seconde, développe des études de performance spécifiques au standard, et centrées sur les mécanismes d'engagement et d'établissement de connexion. Quant à la dernière catégorie, elle s'intéresse aux performances de l'architecture d'un système IEEE802.16. Ces travaux définissent des architectures simples ou multi-cellulaire exploitant ou non le principe de modulation adaptative.

En suivant cette décomposition logique, nous mettons en lumière l'article ([Kumar et al., 2006](#)) portant sur la formulation d'un point fixe de l'analyse connue de Bianchi pour le IEEE802.11 ([Bianchi, 2000](#)). Les auteurs proposent un modèle plus général de l'analyse de Bianchi. L'étude développe alors la solution du problème de point fixe, ainsi que les mesures de performance qui en découlent. Tout en démontrant l'unicité de la solution du problème de point fixe, les auteurs formulent des relations exemptes de toute complexité calculatoire ; mais qui intègrent l'ensemble des paramètres de *backoff* issus du standard IEEE802.11. Dans le cadre d'un régime saturé de transmissions, l'étude explicite la probabilité de collision, le taux de tentative de transmission et le débit. Ce travail a été par la suite élargi au travers de ([Ramaiyan et al., 2008](#)). Ce dernier article est une extension de l'analyse du point fixe de la référence précédente. Ici, les auteurs admettent, et propose différents schémas de différenciation

tion de service au travers des paramètres de *backoff* utilisés par chaque mobile. Les auteurs prouvent l'existence de points fixes stables et multiples. Ils développent alors une analyse des performances générales sur le IEEE802.11. Afin d'établir une première approche théorique des performances sur le standard IEEE802.16e, nous remarquons aussi la référence (Wangt et al., 2005). Ce travail constitue un des premiers éléments d'étude des performances propres à la version *e* du standard IEEE802.16 dans un mode de fonctionnement à division de temps (TDD). Les auteurs comparent ces performances avec celles atteintes par les autres technologies prédominantes sur les réseaux urbains (MAN) : 3GPP, UMTS et HSDPA. Bien que ce travail ne propose pas un modèle de performance théorique, ils expriment des résultats de simulation attestant d'un gain d'efficacité spectrale allant de 40 à 50 %. Cette étude est complétée par (Seo et al., 2004) portant sur l'analyse des performances du protocole d'accès aléatoire dans un environnement OFDMA-CDMA, utilisant des intervalles de contention pour l'engagement des connexions. L'étude se base sur la critique du délai moyen.

Cet espace d'éléments théoriques nous amène à considérer les mécanismes véritablement spécifiques au standard IEEE802.16, et particulièrement à son procédé d'établissement de connexions. Ce mécanisme constitue un des éléments primordiaux des performances générales d'un tel système de communication. Dans ce domaine, nous trouvons premièrement (Lee et Morikawa, 2006). Ce travail traite spécifiquement du processus d'établissement de connexion (*ranging process*) dans le IEEE802.16e. Les auteurs s'intéressent à la faculté de la station de base à détecter, identifier et séparer les codes utilisés simultanément sur un intervalle de contention. Ils identifient les principaux facteurs influençant cette faculté de détection. En conclusion de cette étude, les auteurs proposent une amélioration de l'algorithme de détection de requête prenant en compte l'ensemble des résultats obtenus. Partant des constats de cette étude, notre recherche bibliographique s'étoffe aux travers de plusieurs travaux qui analysent à la fois ce mécanisme de connexion, et étudient l'influence des variations de ses composantes. Ainsi, (Doha et al., 2006) fournit un ensemble d'éléments de conclusion majeurs. Premièrement, l'analyse présente l'impact de la taille de l'intervalle de contention sur le délai d'accès des appels aux ressources demandées. Deuxièmement, les auteurs développent un modèle de performance visant à définir l'impact de ce délai sur le délai total des transmissions. Enfin, l'étude définit les moyens d'optimisation du délai et débit possibles en adaptant la taille de l'intervalle de contention (*ranging subchannel*) par rapport aux arrivées de trafics. Par ailleurs, (Won et al., 2003) aborde la répartition des codes CDMA entre les familles des requêtes sur intervalle de contention. Les auteurs définissent et analysent un modèle de performance, afin de contrôler dynamiquement la taille de chaque famille de code (voir section 1.2.2). Ce travail vise à améliorer l'efficacité des accès à compétition. Enfin, (You et al., 2005) étudient la capacité d'accueil d'un intervalle de contention, en prenant en considération les interférences induites par les accès multiples des autres utilisateurs. Se basant sur une unique cellule IEEE802.16d, ils caractérisent la probabilité d'erreur d'une requête de ressource en fonction du nombre d'arrivées. De plus, ils identifient un nombre d'utilisateurs limite caractérisant une probabilité d'erreur maximale acceptable.

A la suite de ces travaux, quelques approches nouvelles apparaissent telles que

(Yan et Kuo, 2006), qui développent un modèle intercouche adaptant la taille de l'intervalle de contention au nombre d'utilisateurs, ainsi qu'au délai et débit demandés par les classes. Ainsi que (Ciconetti et al., 2007) qui proposent un premier bilan de performance du standard IEEE802.16-OFDMA en mettant cette fois-ci en évidence l'impact de la durée des trames MAC sur le débit des transmissions et le délai des connexions. L'étude témoigne alors que ce paramètre avantage l'une des métriques autant qu'il pénalise l'autre. Aussi, en permettant la fluctuation de la durée de trame MAC, le standard permet de donner différentes orientations d'exploitation de la technologie. Par ailleurs, cette même étude quantifie l'impact du trafic de signalisation (*overhead* PHY et MAC) induit par un grand nombre d'utilisateurs. Ces considérations aboutissent à un autre élément de conclusion intéressant : le délai d'établissement d'une connexion est un facteur primordial du délai global subi par les classes de trafic temps réel (UGS et rtPS).

Nous abordons maintenant une dernière catégorie de travaux visant à caractériser les performances globales des systèmes architecturés en cellules. Premièrement, nous y spécifions les travaux (Tarhini et Chahed, 2006) et (Tarhini et Chahed, 2007b). (Tarhini et Chahed, 2006) représentent une première approche de modèle de performance MAC pour le standard. Les auteurs réalisent un modèle de performance des communications sur une seule cellule IEEE802.16e. L'étude se base sur un modèle continu, sans mobilité ni sectorisation de la cellule ainsi que sur un algorithme de contrôle d'admission minimaliste. Parallèlement, (Tarhini et Chahed, 2007b) présentent une analyse de la capacité d'un système IEEE802.16 exploitant une modulation adaptative (AMC). Le contrôle d'admission du système considéré se base sur une réservation prioritaire des ressources pour les trafics temps réel (UGS et rtPS), et sur le partage des ressources restantes pour les autres types de trafic (nrtPS et BE).

Fort de ces éléments initiaux de recherche, nous identifions deux nouveaux travaux. Le premier, (Liu et al., 2005), constitue une étude ingénieuse qui caractérise les services des paquets de donnée en fonction de la modulation adaptative utilisée (AMC). Le modèle définit et prouve que l'état du système se caractérise par une chaîne de Markov à états finis (FSMC). Un état de cette chaîne se définit par la longueur de file d'attente et l'état du serveur. Avant de conclure, les auteurs décrivent un mécanisme inter-couche visant à optimiser l'ensemble des métriques de performance. Le second, (Elayoubi et al., 2007), correspond à un travail relatif au WCDMA, une technique très proche de celle utilisée dans le IEEE802.16e. En particulier, cette étude établit un modèle de performance et de contrôle d'admission incluant la mobilité, ainsi qu'une division de la cellule de communication en différents secteurs concentriques. Parmi les éléments clés de cette étude, nous identifierons en particulier son mécanisme de contrôle d'admission associant la différenciation des services ainsi que la prise en compte de l'efficacité de modulation de chaque secteur. Par ailleurs, ce travail exploite et valide une modélisation basée sur une approche Markovienne à temps discret (DTMC). Finalement, l'ensemble de ces éléments sont exploités et approfondis au travers de (Tarhini et Chahed, 2007a), dans lequel les auteurs étudient la capacité d'un lien descendant sur le IEEE802.16-OFDMA en présence de deux types de trafic : flux continu (*streaming*) et interactifs (élastique). Ils mettent en avant l'impact

de la modulation et du codage adaptatifs, ainsi que les interférences inter-cellule. En conclusion, les auteurs identifient les gains de performance obtenus par l'utilisation d'un partitionnement des fréquences entre les cellules adjacentes entre elles. Et enfin, (Elayoubi et al., 2006) présentent un modèle de charge des canaux de transmission du standard IEEE802.16. Les auteurs se basent sur un environnement multi-cellulaire avec réutilisation des fréquences. L'étude développe un modèle analytique complet aboutissant aux collisions et pertes de symboles OFDMA. Les modèles définissent le profil d'occupation des sous-porteuses en fonction du nombre d'utilisateurs en y appliquant une charge de trafic élastique et adaptative.

1.4.3 Algorithmes de CAC et architectures de QoS

Dans cette section de l'état de l'art, nous abordons les travaux relatifs à la gestion de la QoS sur le standard IEEE802.16. Dans ce domaine, la majorité des travaux s'articulent entre deux axes principaux de recherche : le premier définit des architectures de gestion de la qualité de service associées à un contrôle intelligent et adaptatif des admissions de connexion, ainsi que des alternatives de gestion intercouche ; le second se penche sur les techniques et méthodes de gestion des délais de communication, tout en mettant en évidence l'importance de ces délais vis à vis de la durée de vie et de l'interactivité caractérisant chaque type de trafic.

Parmi le premier axe de recherche cité, nous trouvons des contributions majeures au travers d'une grande variété d'articles. En premier lieu, une étude préliminaire (Settembre et al., 2006) proposent et valident une stratégie d'ordonnancement. L'ordonnancement se fait en fonction des classes de service concernées : WRR pour le rtPS et nrtPS et RR pour le BE. Les auteurs y présentent les gains de performance sur couche MAC par l'utilisation de l'AMC. Dans cette optique, la référence (Delicado et al., 2006) propose l'organisation d'entités nouvelles de gestion d'approvisionnement en ressource. La contribution majeure de ce travail réside dans l'amélioration de la granularité des critères de Qualité de Service. Ainsi, le standard pourrait proposer un éventail plus fin de services et de Qualités de Service associées. Enfin, (Chen et al., 2005) définissent un nouveau mécanisme de gestion des flux, en proposant une gestion dynamique des bandes passantes allouées aux communications de lien montant et descendant. Ce travail vise à améliorer l'efficacité et l'équité d'utilisation des ressources radio dans le cadre de flux montant et descendant inégaux et fluctuant. L'approche intercouche est quant à elle en partie explorée au travers de (Mai et al., 2007). Ce travail vient en complément de ceux développant des mécanismes de gestion de Qualité de Service sur couche MAC. Les auteurs y proposent une architecture de gestion inter-couche liant la couche MAC et la couche réseau qui, elle, n'est pas définie par le standard.

Parmi les travaux traitant du contrôle d'admission, un premier algorithme est proposé dans (Wongthavarawat et Ganz, 2003). Ils définissent une architecture de Qualité de Service associant un planificateur et un algorithme de contrôle d'admission. De manière plus riche et subtile, l'étude (Wang et al., 2005) développe un algorithme de contrôle d'admission complet 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 temps-réel. Ces derniers seront alors refusés si la capacité de la cellule est dépassée par la nouvelle demande de ressource. 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. 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 demandées, 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 la référence (Ball et al., 2005). Ce travail propose un ordonnancement innovant de l'allocation de ressource entre les trafics. Le principe de TRS (ordonnancement par omission temporisée) attribue les ressources en fonction de l'efficacité de modulation de chaque utilisateur. Ce travail a la particularité de prendre en compte l'efficacité spectrale des utilisateurs vis à vis des ressources radio qui leur sont allouées.

Concernant le second axe de recherche, nous identifions en particulier les travaux suivants : une première étude, (Sayenko et al., 2006) propose un ordonnancement des sous-porteuses allouées aux transmissions sur lien montant (UL burst), afin d'affiner le respect de la Qualité de Service de ces transmissions. Les auteurs proposent des mécanismes simples d'attribution d'espace de transmission pour lesquels le positionnement et la répartition sur la trame MAC répondent aux impératifs de Qualité de Service de chaque classe de trafic. Par la suite, nous mettons en avant les études (Niyato et Hossain, 2006) et (Chandra et Sahoo, 2007). Premièrement, (Niyato et Hossain, 2006) est un des rares travaux associant aux délais de communication ceux issus des couches supérieures, non définies par le standard. Les auteurs traitent la stabilité des files d'attente de chaque trafic afin de maintenir une qualité de service de bout en bout de la communication. Ils développent un principe d'allocation de bande passante sur le lien montant, en prenant en compte la taille de la file d'attente des services rtPS, nrtPS et BE. Deuxièmement, (Chandra et Sahoo, 2007) présentent un algorithme de contrôle d'admission ayant la particularité de prendre en compte le délai limite de validité d'une connexion. Ce travail répond en fait à d'autres études montrant l'importance des délais de connexion dans le délai global de la transmission.

1.4.4 Coordination et coopération multi-technologie

Les articles présentés dans ce paragraphe témoignent du potentiel du standard IEEE802.16 quant à la coopération ou à la coexistence de cette technologie avec les autres déjà en cours d'exploitation.

Premièrement, (Berlemann et al., 2006) abordent les possibilités d'interconnexion

entre les systèmes basés sur le standard IEEE802.11 et ceux basés sur le IEEE802.16. Cette étude trouve sa motivation dans le fait que ces deux standards sont amenés à fonctionner sur des gammes de fréquences très proches et en certains points confondues. Aussi, les auteurs proposent des éléments de solution évitant une double occupation spectrale simultanée. Deuxièmement, (Sartori et al., 2007) est un travail visant à développer un modèle analytique de coopération entre le HSDPA et le IEEE802.16. Le but principal est de maximiser le débit global des communications. Ce travail met en avant les gains de performance obtenus par l'intégration des mécanismes de handover vertical dans ces deux technologies.

1.5 Motivations de la thèse

Fort des analyses contextuelles de cet état de l'art, nous percevons l'importance et la portée applicative du standard IEEE802.16. Le WiMAX profite de nombreux atouts de performance qui lui sont propres, ainsi que d'une faculté exceptionnelle à connecter entre eux des réseaux de plus faible zone de couverture (HSDPA, Wi-Fi,...). D'un point de vue technologique, il apparaît que la maîtrise de tels systèmes constituera à l'avenir un élément déterminant de la maîtrise d'une nation à concevoir, exploiter et sécuriser des systèmes de communication de type IEEE802.16. De plus, les perspectives et projections économiques justifient un grand intérêt de la part de tout opérateur civil ou militaire. Ce dernier fait a d'ailleurs été récemment mis en avant avec la concurrence féroce que ce sont livrés les principaux opérateurs mobiles et ADSL français (Free, Neuf, Alice, Orange, ...). En effet, ces derniers ont été amenés à enchérir pour l'achat des licences d'utilisation des fréquences du WiMAX en France. Enfin, la dernière partie de cet état de l'art montre les capacités du standard à s'intégrer parfaitement dans un environnement de transmission hertziennne déjà encombré. Ce dernier point témoigne non seulement de la faculté du standard à s'intégrer dans les différents schémas de communication actuelles, mais aussi de la faisabilité d'un déploiement rapide et efficace sur de large zone de couverture.

L'existant littéraire portant sur les modèles d'évaluation de performance du standard IEEE802.16 témoigne d'un potentiel prometteur dès les premières versions du standard. Néanmoins, il met en valeur un des premiers éléments qui ont motivé ce travail de thèse, nous identifions en particulier le manque de généralité dans les modèles théoriques dressés. Cette observation s'appuie sur le fait que le standard IEEE802.16 se base sur un vaste ensemble d'algorithmes, de mécanismes et surtout de paramètres de configuration. En outre, le standard définit pour chacun de ces paramètres une valeur prise par défaut ainsi qu'une plage de valeurs possibles. Dès lors, il nous semble primordial que les études portant sur ce standard exploite cette capacité de configuration multiple. Par ailleurs, dès lors qu'un paramètre est possible, il en résulte un besoin explicite d'évaluer ou du moins d'apprécier l'impact final des politiques de choix sur ce paramètre. A cela se rajoute l'ambition de définir des politiques nouvelles aboutissant à une amélioration générale des performances du système de communication. En l'occurrence, les études actuelles montrent que les gains de performance les plus forts sont

obtenus au travers de la maîtrise des mécanismes de couche MAC, et tout spécifiquement de ceux inhérents à l'engagement et l'établissement des connexions. Nos motivations dans ce champs de recherche sont donc multiples. Premièrement, il est nécessaire de mettre en place un modèle général des mécanismes de couche MAC en y proposant par ailleurs des mécanismes innovant de différenciation de service. Ce modèle doit se caractériser par une approche la plus générale possible, où tous les éléments contribuant à l'engagement des connexions doivent être représentés. Par ailleurs, au vu des conclusions d'étude décrites dans ce domaine, il apparaît maintenant clairement que les délais d'établissement de connexion constituent le principal frein à l'évolution des performances de ce standard. Aussi, notre second objectif se basera sur l'étude plus approfondie des mécanismes d'envoi et d'acceptation des requêtes de transmission. En y dégageant l'influence propre à chacun des paramètres de ces mécanismes, nous visons à minimiser leur impacts sur le délai d'établissement de connexion. Cette approche doit aboutir à des analyses de comportement liées à l'évolution de ce délai ainsi qu'à des préconisations en fonction des ambitions possibles quant à l'exploitation des systèmes IEEE802.16e.

Les études propres à la gestion de la QoS et à l'élaboration d'algorithmes performants de contrôle d'admission témoignent du fort engouement et potentiel d'amélioration des performances par ce biais. Ces études abordent des implémentations de processus spécifiques sur couche MAC, réseau et inter-couche, même si cette dernière n'est pas formalisée dans le standard IEEE802.16. Or, elles montrent toutes qu'une architecture de gestion de la Qualité de Service sur couche MAC permet d'aboutir à des gains significatifs de performance. En outre, certains travaux témoignent que le nombre et le type de classes de trafic dans le standard peut augmenter, tel que l'atteste la classe ertPS récemment intégrée au standard (voir le paragraphe 1.3.5). Il est donc nécessaire de fournir des outils de gestion de la Qualité de Service. Cette étude vient en complément de celle explorées précédemment, portant sur les performances propres aux utilisateurs. Par ailleurs, ces travaux confirment l'importance des délais d'établissement de connexion vis à vis des délais globaux des communications. Mais ils mettent particulièrement l'accent sur le besoin d'une gestion de l'efficacité spectrale des transmissions, notamment par la prise en compte de la capacité d'adaptation de la modulation (AMC). C'est notamment dans ce but premier que s'articule cette thèse : viser une réduction optimale du délai de connexion pour les trafics qui y sont sensibles, tout en leur assurant une allocation de ressource optimale.

Un autre point de motivation, vient de l'observation qu'une grande partie des travaux développent des études parallèles entre elles : certaines traitent un même sujet suivant des bases théoriques différentes, d'autres proposent continuellement de nouvelles approches sans intégrer ce qui constituaient les contributions des propositions antérieures. Nous désirons donc partir des contributions qui nous semblent les plus fortes en apportant un ensemble d'éléments nouveaux et complémentaires. Notre approche est toujours portée par le souci de généralisation et de fidélité aux spécificités du standard IEEE802.16. Suivant cette approche, nous remarquons que les études portant sur le contrôle d'admission visent à établir un algorithme optimal assurant à la fois de nombreux objectifs : respecter la Qualité de Service des flux de données, faciliter l'ac-

cès aux ressources pour les connexions entrantes, assurer une équité entre les trafics de même type et optimiser l'efficacité d'exploitation des ressources radio. A cela se rajoute dans un dernier temps la capacité d'un système IEEE802.16 à conserver les appels en cours en cas de mobilité intense. Ces différents objectifs définissent la ligne directrice de cette étude, où partant de ces contributions existantes, nous désirons fournir un algorithme complet, efficace et aussi simple que possible.

Enfin, un dernier élément motive l'engagement d'études sur le WiMAX. La WiMAX n'est pas encore déployé à grande échelle. D'ailleurs, la conception et la fabrication des équipements qui s'y rattaches viennent tout juste de s'engager. Aussi, les travaux de recherches menés en amont ont toutes les chances d'avoir un impact réel sur le devenir de cette technologie. De par notre démarche de recherche nous avons espoir de pouvoir influencer la politique d'intégration du standard sur les équipements à venir.