

Chapitre 1

Routage dans les réseaux locaux maillés sans fil

1.1 Introduction

De nos jours, les réseaux locaux sans fil connaissent un succès certain. Ils sont désormais omniprésents et sont déployés dans les bureaux, les cafés, les universités et les aéroports. Ils offrent également plusieurs perspectives d'application liées notamment à la mobilité des personnes, à la sécurité des personnes, etc.

Les réseaux locaux sans fil conventionnels ont néanmoins quelques limitations, notamment, le besoin d'une infrastructure filaire (généralement Ethernet) reliant chaque Point d'Accès (PA). En effet, l'extension de leur couverture devient coûteuse et peu pratique. Les réseaux maillés sans fil ont dernièrement été proposés afin de répondre à cette limitation. Libre de toute exigence d'infrastructure, les routeurs peuvent être ajoutés comme la situation le demande, offrant une excellente flexibilité. Le réseau peut ainsi se prolonger sur plusieurs kilomètres, et offrir un accès sans fil à Internet.

Ces réseaux maillés sans fil définissent des nouveaux protocoles et métrique de routage pour tenir compte des nouvelles exigences autres que la consommation d'énergie et la mobilité. Ces nouvelles exigences sont principalement l'augmentation de la capacité des nœuds et des chemins.

Dans ce qui suit, nous présentons une étude détaillée des réseaux mesh, leurs caractéristiques et les standards conçus. Ensuite, nous nous intéressons aux réseaux WLAN maillés et nous présentons la norme IEEE 802.11s et les protocoles de routage utilisés.

1.2 Présentation des réseaux maillés

1.2.1 Définition

Les réseaux maillés sans fil WMN (Wireless Mesh Networks) [7, 8] forment une architecture à deux niveaux basée sur la technologie multi-sauts (voir figure 1.1). Un WMN est composé de nœuds clients et de points d'accès sans fil (routeurs). Les routeurs s'organisent de façon autonome afin de former un réseau fédérateur maillé (Backbone). Ils maintiennent la connectivité, effectuent le routage et constituent l'épine dorsale sans fil. Ces routeurs constituent une infrastructure sans fil de routeurs interconnectés qui fournissent des services aux

utilisateurs et aux réseaux. Ils sont équipés, en général, de plusieurs interfaces radios pour le maillage et une interface radio pour la connexion avec les terminaux et les réseaux. Un routeur maillé équipé d'un Gateway et d'un pont, peut intégrer des fonctionnalités d'accès à plusieurs réseaux comme le réseau Internet assurant ainsi l'interconnexion entre eux. Le maillage du réseau devient alors plus fin, sans avoir à installer une infrastructure de télécommunication supplémentaire. Le concept des réseaux maillés représente une avancée importante dans la quête de la connexion permanente aux autres réseaux comme l'Internet, Wi-Fi, cellulaires et sensor. Le fait de déployer des réseaux maillés permet de couvrir un réseau assez étendu d'où l'utilisation de ces réseaux dans l'extension des réseaux locaux. Aussi, cette nouvelle technologie permet de communiquer plusieurs réseaux locaux sans fil situés dans des emplacements différents. Il suffit que les routeurs mesh dans les différents lieux soient tous à la portée l'un de l'autre.

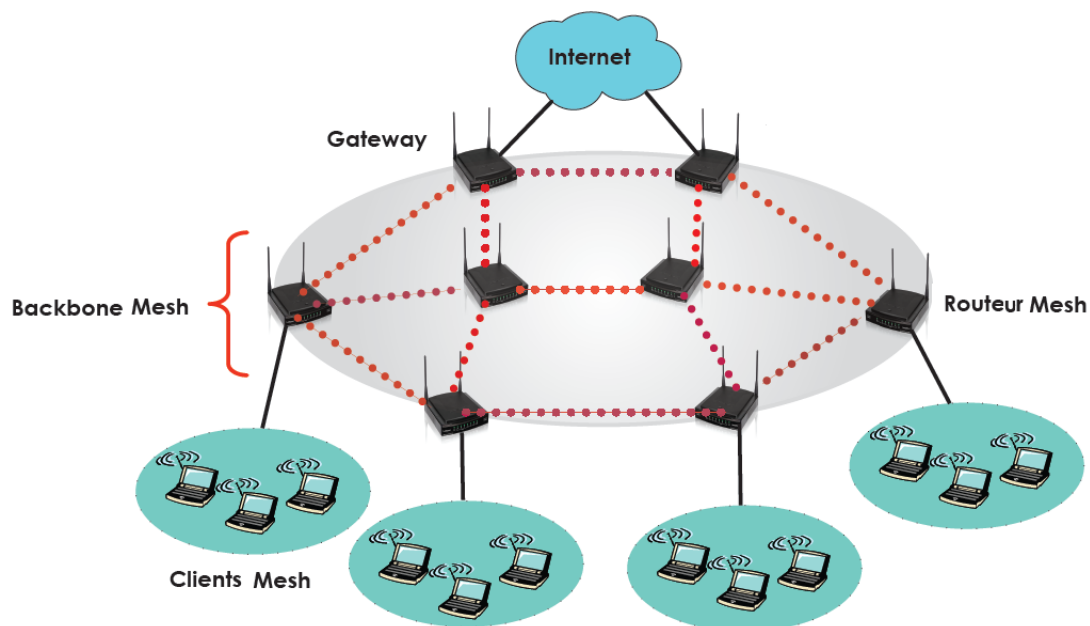


FIGURE 1.1: Architecture d'un réseau mesh

1.2.2 Caractéristiques

Les caractéristiques des réseaux mesh sont les suivantes [7] :

Réseau multi-sauts : l'objectif principal des réseaux maillés est d'élargir la zone de connectivité (couverture) offerte par les autres types de réseaux sans fil sans sacrifier la capacité du réseau. Par conséquent, le style multi-sauts du réseau maillé est indispensable pour réaliser cet objectif. Ce style offre un débit important en utilisant des liens de courtes distances et qui présentent moins d'interférence et en déployant des canaux de transmission différents.

Support des fonctionnalités des réseaux ad hoc : ces fonctionnalités sont essentiellement la capacité d'auto-configuration et d'auto-organisation. Les réseaux mesh améliorent les

Sec. 1.2 Présentation des réseaux maillés

performances des réseaux ad hoc par la flexibilité de l'infrastructure, le déploiement facile, la tolérance à la rupture de lien, la connectivité et la communication multipoint à multipoint. De ce fait, l'installation et l'extensibilité d'un réseau mesh sont faciles.

Mobilité dépendante de type de nœud : les routeurs sont généralement fixes ou de faible mobilité alors que les clients peuvent être stationnaires ou mobiles.

Plusieurs types d'accès réseau : dans les réseaux maillés, deux types d'accès sont supportés : l'accès de l'infrastructure à Internet et la communication pair-à-pair entre les routeurs mesh (peer to peer communication). De ce fait, les WMNs peuvent s'intégrer avec d'autres types de réseaux sans fil et peuvent fournir des services aux utilisateurs finaux de ces réseaux.

Contraintes d'énergie : généralement, les routeurs mesh n'ont pas de contraintes d'énergie, par contre, les clients mobiles doivent exécuter des protocoles de conservation d'énergie

En se basant sur ces caractéristiques, les réseaux mesh, ont été généralement considérés comme un type de réseaux ad hoc à cause de l'absence de l'infrastructure filaire. Par ailleurs, Les réseaux mesh nécessitent des techniques plus sophistiquées en plus des techniques ad hoc. Les réseaux mesh visent à diversifier les services des réseaux ad hoc. Par conséquent, les réseaux ad hoc peuvent être considérés comme un type de réseau mesh. Pour illustrer cet aspect d'appartenance mesh-ad hoc, nous menons cette comparaison entre réseau ad hoc et réseau mesh.

Infrastructure sans fil L'infrastructure sans fil des réseaux mesh offre une couverture plus large et une connectivité durable. Néanmoins, la connectivité dans les réseaux ad hoc dépend des contributions individuelles des clients et peut ne pas être durable.

Intégration Les réseaux mesh comportent les clients conventionnels qui ont la même technologie mesh que les routeurs. Par ailleurs, les réseaux mesh permettent aussi l'intégration de différents types de réseaux existants à travers des fonctionnalités de pont/passerelle au niveau des routeurs (Gateway). Par conséquent un utilisateur, dans un type de réseau particulier, peut acquérir les services offerts par un autre réseau. De ce fait, L'architecture d'un réseau mesh ressemble à celle d'un réseau Internet puisque la localisation physique de l'utilisateur est moins importante comparée à la capacité du réseau.

Routing et configuration consacrés aux routeurs Dans les réseaux ad hoc, les clients réalisent des fonctionnalités de routage et de configuration. Dans un réseau mesh ce sont les routeurs qui s'occupent de ces fonctionnalités. La charge des clients est énormément allégée ce qui permet plus de conservation d'énergie et des meilleurs services pour les applications.

Multi-interfaces Les routeurs mesh peuvent être équipés de plusieurs interfaces radio pour assurer le routage et l'accès aux clients. Ces interfaces peuvent être configurées sur des canaux différents. Ceci permet la séparation entre deux types de trafic. En effet, pendant que les routeurs réalisent le routage et la configuration, les clients se connectent aux routeurs ce qui permet d'augmenter la capacité du réseau. Par ailleurs, les routeurs mesh dans l'infrastructure maillée, en utilisant plusieurs canaux peuvent envoyer et recevoir en même temps ce qui augmente les performances du réseau en termes de débit et de nombre d'utilisateurs. Dans les réseaux ad hoc, les nœuds possèdent, généralement, une seule interface radio. Par suite, toutes les communications sont faites avec le même canal ce qui réduit les performances de réseau à cause des interférences.

Mobilité Les clients assurent le routage dans les réseaux ad hoc. De ce fait, la topologie et la connectivité dépendent du mouvement des clients ce qui impose plus de défis pour les protocoles de routage et de configuration. Dans un réseau mesh, la topologie des routeurs est stable. Le routage et la configuration sont plus simples et sont assurés la plupart du temps par les routeurs.

La qualité de service Les réseaux maillés sans fil permettent d'intégrer plusieurs technologies sans fil et ont donc pour vocation de jouer le rôle d'un réseau d'accès vers l'Internet ou vers différents types de réseaux sans fil. Ils sont donc amenés à être le support de communication d'une grande diversité d'applications ayant des exigences différentes de qualité de service (QoS). Ces besoins peuvent être exprimés en termes de débit, délai, taux de perte, etc...Les réseaux ad hoc trouvent des difficultés pour garantir une QoS minimale à cause des problèmes de mobilité, partage de la bande passante et limitation des ressources. Par ailleurs, les réseaux Wi-Fi souffrent aussi des problèmes de liaison filaire entre les points d'accès. De ce fait, les réseaux maillés sans fil semble plus adapté pour offrir la QoS. En effet, les réseaux maillés sont caractérisés par une infrastructure stable à l'inverse des réseaux ad hoc où les nœuds sont constamment mobiles.

1.2.3 Normalisation

Le succès commercial des réseaux Wi-Fi et les avancées dans les technologies sans fil ont encouragé le développement de réseaux sans fil maillés. Le point fort des réseaux mesh provient des avantages des techniques mesh. Ces avantages se résument dans l'extensibilité de la couverture, la robustesse, l'auto-configuration, la maintenance facile et le coût faible. Le tableau 1.1 présente les normes émergentes dans le cadre des réseaux mesh. Dans la suite, nous présentons les activités de standardisation des réseaux WMN commençant par les réseaux maillés sans fil personnel WPAN en passant par les réseaux maillés sans fil locaux WLAN jusqu'au réseaux maillés sans fil métropolitain WMAN.

Type de réseau mesh	Standard correspondant
WIMAN (WiMAX)	IEEE 802.16a
WLAN Mesh (Wi-Fi)	IEEE 802.11s
LR-WPAN Mesh (Zigbee)	IEEE 802.15.5

TABLE 1.1: Les standards des réseaux maillés sans fil

1.2.3.1 Standard pour les réseaux maillés WPAN

La norme IEEE 802.15.4 [4], a été publiée en octobre 2003, puis complétée au mois de juin 2006. Cette norme décrit les communications point-à-point sur des réseaux personnels PAN et définit la couche PHY (Physique) et la couche MAC (Medium Access Control) pour des transmissions radio fiables caractérisées par une faible consommation et un débit réduit. La portée de ces transmissions varie généralement de 10 à 30 mètres en intérieur et peut atteindre 150 mètres en extérieur. ZigBee est une pile de protocoles normalisée basée sur les couches PHY et MAC de la norme IEEE 802.15.4. ZigBee a différentes applications comme l'éclairage, le chauffage, la sécurité et les dispositifs de surveillance des appareils. Basée sur la communication point-à-point via la norme IEEE 802.15.4, la pile ZigBee permet l'implémentation d'un

Sec. 1.2 Présentation des réseaux maillés

réseau personnel de nœuds ZigBee. Trois topologies de réseau sont envisageables : en étoile, en arbre ou maillé. Chaque réseau personnel ZigBee nécessite un coordinateur, qui l'initialise et lui affecte un identifiant PAN. Les coordinateurs sont toujours en mesure d'effectuer le routage de paquets. Les réseaux en arbre et maillés comportent systématiquement plusieurs nœuds dotés de la fonctionnalité de routeur ZigBee. Ces nœuds routeurs peuvent transférer des paquets de données à d'autres nœuds ZigBee, ce qui permet de les transporter par sauts d'un expéditeur à un destinataire sur l'ensemble du réseau ZigBee. Les nœuds terminaux ZigBee ne communiquent qu'avec leur nœud parent FFD (Full Function Devices), qui est soit un coordinateur soit un routeur (voir figure 1.2). Dans la mesure où ils n'ont pas de routage à effectuer, ces nœuds terminaux sont dotés de fonctionnalités limitées, d'où leur nom RFD (Reduced-Function Devices).

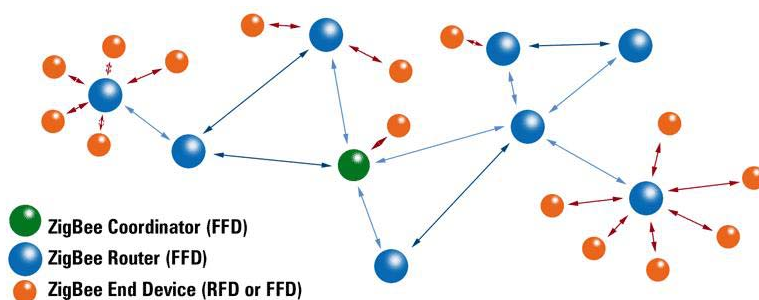


FIGURE 1.2: Exemple de réseau maillé WPAN

1.2.3.2 Standard pour les réseaux maillés WLAN

Actuellement, les réseaux sans fil IEEE 802.11 réalisent un débit maximal de 11 Mbits/s (802.11b) et 54 Mbits/s (802.11a/g). Des travaux de recherches sont menés afin d'améliorer le débit (IEEE 802.11n). Toutefois, beaucoup d'utilisateurs ne bénéficient pas de ce débit additionnel à cause des limitations de DSL. Par ailleurs, les entreprises espèrent réduire les problèmes de connexion filaire de Ethernet. Un groupe de travail nommé IEEE 802.11s a été formé pour définir une couche MAC et une couche physique pour les WMN permettant d'étendre la couverture du réseau [1, 2]. Le groupe de travail IEEE 802.11s est formé en Mai 2004 pour standardiser la technologie utilisée pour déployer les réseaux mesh WLAN. Un appel à proposition est lancé en Janvier 2005. Lors de la réunion de mois de Mars en 2006, deux soumissions parmi 15 ont été retenues et ont été combinées dans un seul Draft. Ces propositions sont :

- SEE-Mesh (Simple, Efficient and Extensible Mesh) : proposé par Nokia, Intel, Motorola.
- Wi-Mesh Alliance : développé par Philips, Thomson. . .

Les premières discussions dans le groupe IEEE 802.11s visent la définition des WMN, les cas d'utilisation, les architectures, la qualité de service, la sécurité, les protocoles de routage et le développement d'une nouvelle couche MAC qui supporte le multicast, le broadcast et l'unicast et utilise des métriques tenant compte de l'environnement radio. Les réseaux WLAN maillés seront détaillés dans la suite de ce rapport. La finalisation du draft était prévue pour la fin de l'année 2008 et jusqu'à la date de rédaction de ce rapport, la version finale n'est pas encore apparue.

1.2.3.3 Standard pour les réseaux maillés WMAN

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [5] est le standard des réseaux sans fil métropolitain. C'est le nom commercial de la norme IEEE 802.16. L'objectif du WiMAX est de fournir une connexion Internet à haut débit sur une zone de couverture de plusieurs kilomètres de rayon. Ainsi, le WiMAX permet théoriquement d'obtenir des débits montants et descendants de 70 Mbits/s avec une portée de 50 kilomètres. Le standard WiMAX possède l'avantage de permettre une connexion sans fil entre une station de base BS (Base Station) et des milliers d'abonnés SSs (Stations) sans nécessiter de ligne visuelle directe NLOS. Un des usages possibles du WiMAX consiste à couvrir la zone dite du « dernier kilomètre » (last mile), encore appelée boucle locale radio, c'est-à-dire fournir un accès à internet haut débit aux zones non couvertes par les technologies filaires classiques (lignes ADSL, Câble, lignes spécialisées). Ce mode est appelé le mode point à multipoint PMP (Point to Multi-Point). Une autre possibilité d'utilisation consiste à utiliser le WiMAX comme réseau de collecte (backhaul) entre des réseaux locaux sans fil (figure 1.3), utilisant par exemple le standard Wi-Fi. Ainsi, le WiMAX permettra à terme de relier entre eux différents hotspots afin de créer un réseau maillé. Le mode utilisé dans ce cas est le mode mesh.

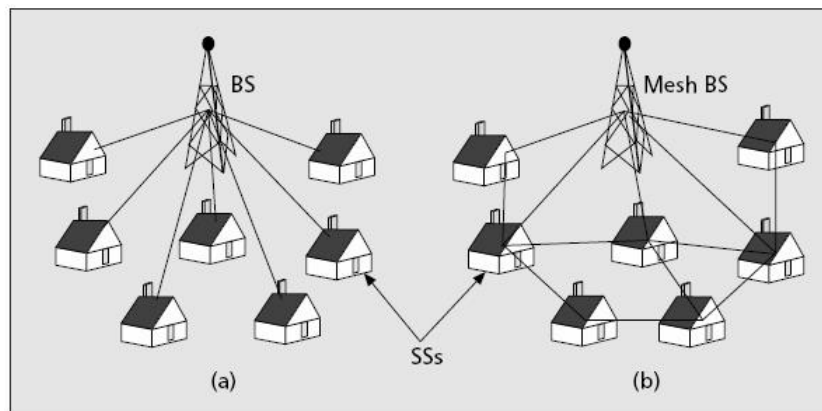


FIGURE 1.3: Exemple de réseau maillé WMAN : (a) mode PMP, (b) mode mesh

1.2.4 Applications

Les recherches qui s'intéressent aux WMN ont permis le développement d'un nombre important d'applications utilisant les réseaux maillés sans fil (WMAN, WPAN ou WLAN) [7, 9]. L'application Broadband Home Networking (des réseaux à large bande à domicile) est implémentée présentement à travers le protocole IEEE 802.11. Les difficultés rencontrées en réalisant cette application sont les zones non couvertes et l'installation coûteuse des AP (Access Point) multiples. Grâce aux WMN, ces problèmes peuvent être résolus en remplaçant les APs par des MPs (Mesh Point) et en utilisant plus de ces MPs dans les zones non couvertes. Le déploiement de WMN dans une zone métropolitaine a plusieurs avantages. En premier lieu, le taux de transmission dans la couche physique est plus élevé que pour n'importe quel autre réseau cellulaire actuel. En second lieu, l'utilisation des WMNs est moins coûteuse pour les réseaux métropolitains sans fil à large bande d'accès si on la compare aux réseaux câblés ou optiques. En dernier lieu, à travers NLOS et les multiples-sauts parmi les nœuds, une zone de service plus large est offerte. Nous constatons de même que les réseaux WMNs sont parfaits

pour les applications de contrôle des immeubles, car celles-ci sont composées d'équipements électroniques comme lumière, ascenseur, climatisation, etc. Il y a aussi d'autres applications appropriées à l'utilisation des WMNs, comme les systèmes de transport, le système médical, l'accès public à Internet, etc.

1.3 Les réseaux maillés IEEE 802.11s

L'idée principale derrière la mise en place d'un réseau mesh [1, 2, 10, 11, 14, 15] est d'offrir une infrastructure d'accès déployable facilement et qui s'appuie sur des réseaux locaux sans fil. Cette infrastructure aura pour mission, comme tout autre réseau d'accès, le support des échanges de données, de la voix et de la vidéo.

Les réseaux WLAN maillés sont des réseaux locaux décrits par la future norme IEEE 802.11s. Ils permettent la communication entre les clients connectés au réseau mesh tout en leur permettant d'accéder à des destinations se trouvant à l'extérieur du réseau. Le réseau WLAN mesh joue le rôle de réseau de collecte (backhaul) pour assurer l'accès aux utilisateurs. Dans ce qui suit, nous présentons ces réseaux et la problématique de routage dans cet environnement.

1.3.1 Architecture

Le groupe de travail IEEE 802.11s a spécifié une extension de la couche MAC IEEE 802.11 pour résoudre le problème d'interopérabilité en définissant une architecture et des protocoles qui supportent l'envoi broadcast, multicast et unicast des données en utilisant une métrique radio dans une topologie multi-saut auto-configurable. L'architecture d'un réseau WLAN IEEE 802.11s est présentée dans la figure 1.1 :

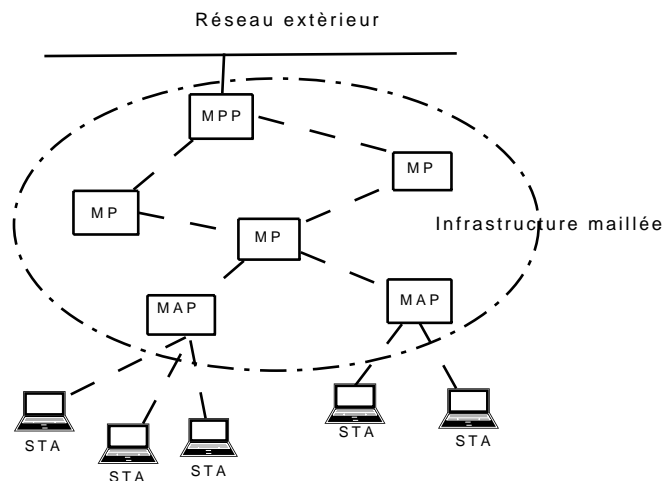


FIGURE 1.4: Architecture d'un réseau IEEE 802.11s

MP (Mesh Point) : c'est un nœud dédié à faire suivre les paquets vers des nœuds qui ne sont pas à sa portée de communication. Un MP doit effectuer les opérations suivantes :

- Découverte de voisinage : Pour construire le réseau maillé, un MP doit découvrir les MPs qui se trouvent dans son voisinage, pour cela il utilise un mécanisme de découverte de topologie. Ce dernier peut être passif (écoute des trames) ou actif (" Probe Request " et " Probe Response ") [1, 2].

- Etablissement des liens : A l'issue de la phase de découverte, un MP va établir des liens avec d'autres MPs (authentification et association) et le choix de ces MPs dépend de la qualité du signal reçu. Un MP doit être au moins relié à l'un des MPs du WLAN maillé.

MAP (Mesh Access Point) : c'est un noeud particulier qui fournit l'accès des stations clientes à l'infrastructure maillée. Un MAP a au minimum deux interfaces. Une interface pour assurer l'accès des stations et une autre pour assurer la connexion à l'infrastructure maillée du réseau.

MPP (Mesh Portal Point) : c'est un MP particulier qui fonctionne comme un pont ou une passerelle pour permettre l'accès aux réseaux extérieurs comme Internet et WiMAX. Un MPP assure aussi les fonctionnalités d'un MP.

STA (Station) : ce sont des stations clientes connectées via les MAP au réseau mesh.

L'architecture protocolaire des ces différents types de noeuds est illustrée par la figure 1.5. Le MAC IEEE 802.11s est développé en se basant sur le MAC 802.11 existant et le protocole de routage mesh réside dans la couche MAC. Dans le MPP, un protocole de routage de niveau réseau est nécessaire pour la sélection des chemins à partir du réseau mesh vers le réseau extérieur et inversement.

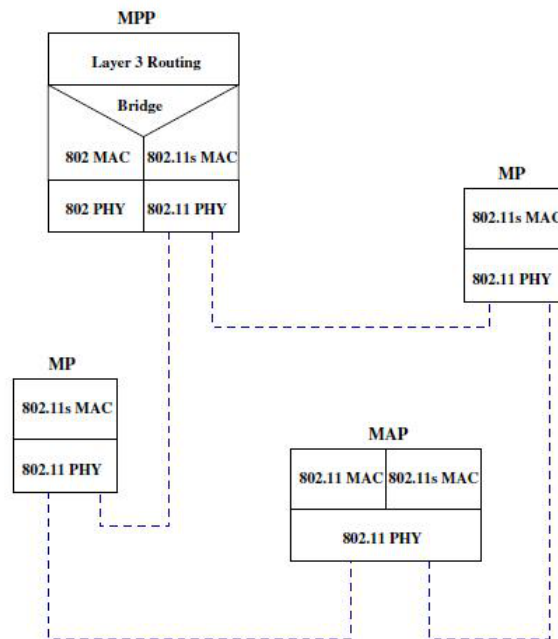


FIGURE 1.5: La pile protocolaire IEEE 802.11s

1.3.2 Architecture logicielle

Les réseaux mesh WLAN permettent un débit de transmission élevé dû à la courte distance de communication, l'augmentation de la capacité du réseau à travers la réutilisation des canaux et l'auto-configuration. Cependant, les réseaux sans fil multi-sauts invoquent plusieurs problèmes. Ainsi, leurs performances peuvent être affectées par le phénomène d'interférence ce qui engendre une dégradation de débit [12]. Par ailleurs, ce type de réseau souffre d'un

Sec. 1.3 Les réseaux maillés IEEE 802.11s

problème de surcharge des noeuds (congestion). Ces problèmes dépendent du protocole de routage utilisé, la méthode d'accès au médium et les techniques de gestion des ressources implémentées au niveau de la couche MAC. Différentes problématiques restent à résoudre dans les réseaux mesh dans des niveaux différents de l'architecture logicielle comme le montre la figure 1.6. De même, le standard présente des spécifications incomplètes des protocoles au niveau de la couche MAC pour résoudre les principales problématiques tels que le routage, la sécurité et la qualité de service.

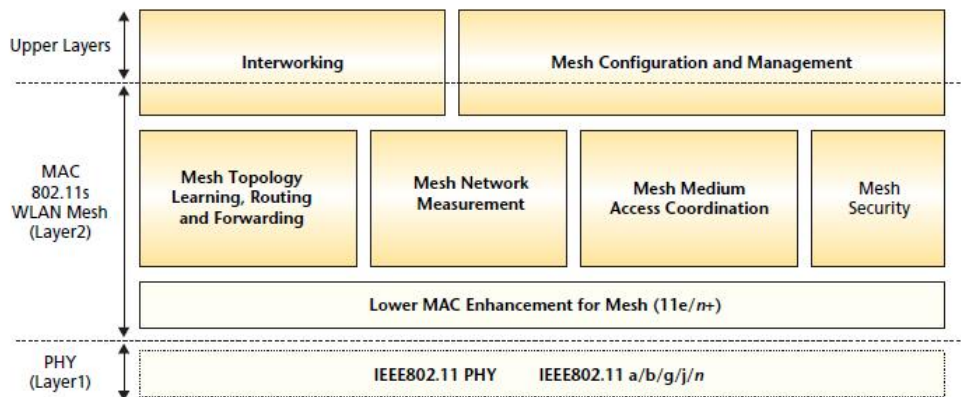


FIGURE 1.6: Architecture logicielle des réseaux IEEE 802.11s

Mesh Topology Learning, Routing, and Forwarding Cette sous couche contient une fonction de découverte des voisins, une fonction pour obtenir la métrique radio qui donne des informations sur la qualité des liens sans fil et les protocoles de routage pour déterminer les routes en utilisant les adresse MAC comme identifiant. Afin de permettre une utilisation optimale des ressources radio, le protocole de routage doit utiliser la métrique radio et plusieurs canaux de transmission.

Mesh Network Measurement Cette sous couche contient les fonctions nécessaires pour calculer les métriques radio utilisées par le protocole de routage. Elle contient aussi des mécanismes pour mesurer les paramètres radio utilisés dans la sélection des canaux.

Mesh Medium Access Coordination Cette sous couche contient les fonctions pour éviter la dégradation des performances à cause du problème des stations cachées et exposées et les fonctions pour assurer le contrôle d'accès au médium, le contrôle de congestion et le contrôle d'admission.

Mesh Security Cette sous couche contient les fonctions pour assurer la sécurité afin de protéger les trames de données et les trames de gestion. Elle assure l'utilisation des mécanismes définis par IEEE 802.11i.

Interworking Cette sous couche contient une fonction de pont/passerelle implémentée dans les MPP situés en bordure du réseau pour se connecter à d'autres réseaux.

Mesh Configuration and Management Cette sous couche inclut les fonctions pour la configuration automatique des paramètres radio des MP telles que la puissance de transmission, la fréquence des transmission, etc.

Nos travaux de thèse se situent dans les modules de routage « Mesh Topology Learning, Routing, and Forwarding » et le module de mesure « Mesh Network Measurement »

Remarques Notons que la technologie mesh ne cesse d'évoluer. Des nouveaux travaux présentent l'architecture de l'infrastructure du réseau comme étant formée par des stations mesh (Mesh STA) [3, 16]. Ces Mesh STA peuvent être des Portal, Point d'accès ou station ordinaire.

1.4 Routage dans les réseaux IEEE 802.11s

Dans le contexte des réseaux IEEE 802.11s, le routage est appelé sélection des chemins (path selection) car il est effectué au niveau de la couche liaison de données. Le routage dans 802.11s définit une nouvelle métrique ALM (Airtime Link Metric) et propose deux protocoles de routage HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) et RA-OLSR (Radio Aware Optimized Link State Routing) [1, 2, 27, 28].

1.4.1 Métrique de routage

ALM (Airtime Link Metric) est la métrique par défaut utilisée par les protocoles de routage pour sélectionner un chemin en tenant compte de l'état radio des liens. Cette métrique reflète le délai consommé pour transmettre une trame à travers un lien particulier et elle est calculée comme suit :

$$C_a = \left[O + \frac{B_t}{r} \right] \frac{1}{1 - e_f} \quad (1.1)$$

Paramètre	Valeur recommandée	Description
O	IEEE 802.11b : $699\mu s$ IEEE 802.11a : $185\mu s$	Overhead d'accès au médium
B_t	8192 bits	Nombre de bits dans la trame de test

TABLE 1.2: Les paramètres de ALM

Les valeurs de O et B_t sont des constantes, r est le débit de lien et e_f est le taux d'erreurs sur une trame de test de taille fixe B_t . Le tableau 1.2 résume les valeurs des constantes définies par le draft[1].

La figure 1.7 présente un exemple de mesure de la métrique. Chaque lien est caractérisé par son débit de transmission et son taux de pertes PER (Packet Error Rate). Nous supposons que chaque noeud a deux interfaces utilisant la même technologie sans fil (IEEE 802.11a). Nous voulons déterminer le meilleur chemin entre A et D. Pour cela, nous mesurons dans le tableau 1.3 la valeur de ALM sur chaque lien.

Sec. 1.4 Routage dans les réseaux IEEE 802.11s

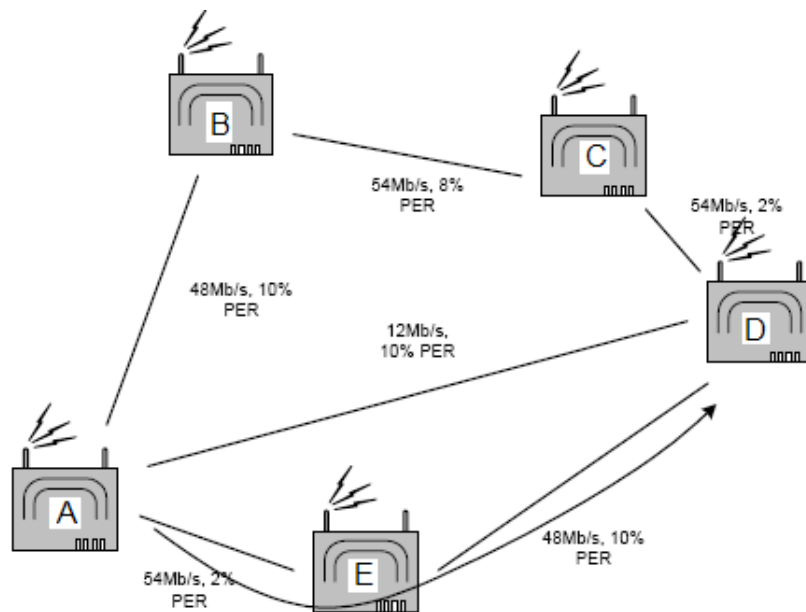


FIGURE 1.7: Exemple de mesure de la métrique ALM

Le chemin sélectionné entre une source et une destination est celui qui présente la valeur minimale de la métrique ALM calculée comme étant la somme des valeurs de cette métrique des liens formant le chemin. Le tableau 1.4 donne la valeur de ALM pour chaque chemin entre A et D. Dans le cas de l'exemple de la figure 1.7, le meilleur chemin entre A et D est AED.

Lien	AB	BC	CD	AD	AE	ED
ALM	$396\mu s$	$367\mu s$	$344\mu s$	$344\mu s$	$344\mu s$	$396\mu s$

TABLE 1.3: La valeur de ALM pour chaque lien

Chemin	ABCD	AD	AED
ALM	$107\mu s$	$967\mu s$	$740\mu s$

TABLE 1.4: La valeur de ALM pour chaque chemin

1.4.2 Protocole HWMP

Le protocole HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) [1, 2, 27, 28] est un protocole de routage développé pour les réseaux maillés. Il combine les deux approches proactive à base d'arbre et réactive. HWMP utilise un ensemble de primitives et de traitements acquis du protocole AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector) [17, 18]. L'extension de AODV pour les réseaux mesh est adaptée pour faire l'adressage au niveau de la couche 2 (couche liaison) et l'utilisation d'une métrique radio. AODV est le protocole de base pour la version réactive. Cependant, des primitives sont utilisées pour installer un arbre à vecteur de distance pour un routage vers la racine. Le rôle de la racine qui permet la formation d'une topologie en arbre

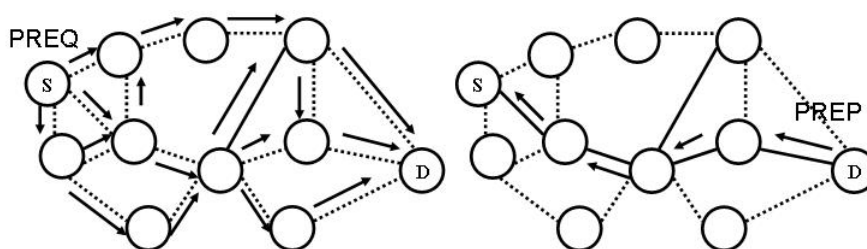
est une option configurable d'un MP. HWMP supporte deux modes opératoires en fonction de la configuration.

1. Mode réactif : dans ce mode, les noeuds créent et maintiennent les routes selon le besoin. Lorsque un nœud a besoin d'une route qui n'existe pas dans sa table de routage, une procédure de découverte globale de routes est lancée.
2. Mode proactif : dans ce mode, lorsqu'un nœud du réseau souhaite communiquer avec un autre nœud, il peut localement interroger la table de routage dont il dispose. Le routage peut ainsi être effectué de proche en proche, à l'image du routage IP. Le mode proactif définit deux sous modes à base d'arbre :
 - Proactive Path REQuest (Proactive PREQ)
 - Proactive Route ANNouncement (Proactive RANN)

1.4.2.1 Mode réactif de HWMP

Si un MP source veut établir un chemin vers un MP destination, alors il diffuse un PREQ (Path REQuest) en insérant la destination recherchée dans la requête et en initialisant le champ métrique à la valeur zéro.

La figure 1.8 présente un exemple de fonctionnement de ce mode. Quand un MP reçoit un PREQ, il crée un chemin vers la source S de la requête (reverse path) ou met à jour le chemin si le PREQ contient un numéro de séquence plus grand que celui enregistré ou si le numéro de séquence est le même et ce PREQ contient une meilleure métrique par rapport au chemin existant. Si un nouveau chemin est créé ou mis à jour, le PREQ sera rediffusé. Avant que le MP rediffuse le PREQ, il met à jour le champ métrique du PREQ afin de refléter la métrique totale du chemin vers la source. Après la création ou la mise à jour du chemin vers la source, la destination D émet un PREP (Path REPLY) en unicast vers la source.



(a) Diffusion de la demande de route PREQ (b) Envoi de la réponse PREP en Unicast

FIGURE 1.8: Routage dans le protocole RM-AODV

Les MP intermédiaires, en recevant le PREP, créent une route vers la destination puis font suivre le PREP vers la source. Lorsque la source reçoit un PREP, elle crée le chemin vers la destination. Si la destination reçoit plus de PREQ d'une même source avec une meilleure métrique, elle met à jour son chemin vers la source et émet un nouveau PREP à la source. Ainsi, un chemin bidirectionnel de bout en bout avec une meilleure métrique sera établi entre la source de la requête et la destination.

1.4.2.2 Mode à base d'arbre de HWMP

Le routage à base d'arbre consiste à configurer un MP particulier comme étant la racine (Root) de l'arbre. Il y a deux mécanismes pour diffuser les informations de routage dans le réseau d'une manière proactive afin d'atteindre le MP Root. La première méthode utilise un message Proactive PREQ (Proactive Path Request) et il permet de créer des routes entre la racine et les autres MP dans le réseau. La deuxième méthode utilise un message RANN (Root Announcement) et elle permet de distribuer les informations de routage pour atteindre la racine. Un MP configuré en tant que racine va envoyer les messages Proactive PREQ et Proactive RANN périodiquement.

Le mécanisme Proactive PREQ La figure 1.9 montre le principe du mode Proactive PREQ de HWMP. Le MP Root émet d'une manière proactive des PREQ avec, comme adresse destination, une adresse de diffusion. Le PREQ contient la métrique du chemin et le numéro de séquence du Root incrémenté à chaque émission. Lorsqu'un MP intermédiaire reçoit un PREQ proactif, il crée ou met à jour le chemin vers le Root, met à jour la métrique du chemin et le nombre de sauts et rediffuse le PREQ mis à jour. Le traitement d'un PREQ proactif reçu est le même que celui du mode routage à la demande. Si le PREQ proactif est émis avec le bit " Proactive PREP " à 0, le MP récepteur peut émettre un PREP si nécessaire (exemple s'il a des données vers le Root et il a besoin d'établir un chemin bidirectionnel). Si le PREQ est émis avec le bit " Proactive PREP " à 1, chaque MP récepteur doit émettre un PREP proactif. Ce PREP proactif établit un chemin entre le Root et le MP émetteur.

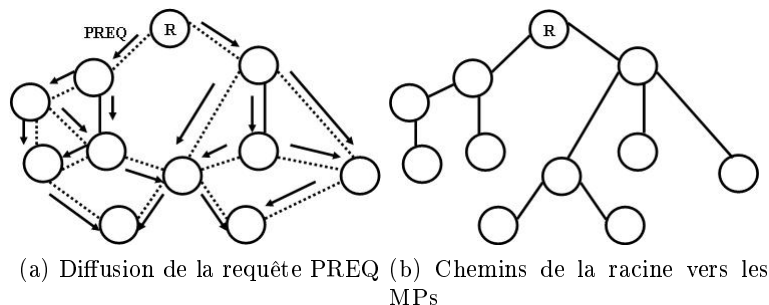


FIGURE 1.9: Routage dans le protocole Proactive PREQ

Le mécanisme Proactive RANN La racine diffuse périodiquement un message RANN dans le réseau (figure 1.10a). L'information contenue dans un message RANN est utilisée pour diffuser la valeur de la métrique du chemin vers la racine. A la réception d'un RANN, chaque MP crée ou met à jour la route vers la racine. Ensuite, il envoie un PREQ en unicast vers le Root via le MP à partir duquel il a reçu le RANN (figure 1.10b). Le PREQ va subir le même traitement que le PREQ à la demande. La racine envoie un PREP comme réponse à chaque PREQ (figure 1.10c). Le message PREQ envoyé en unicast crée la route de la racine vers le MP. Cependant, le PREP crée le chemin de MP vers la racine.

Des travaux de recherche récents [3, 16] présentent des améliorations du mode proactif du protocole de routage HWMP. Le mode proactif est basé sur la construction d'un arbre dans lequel un Mesh STA est configuré comme étant une racine (Root) généralement un Portal.

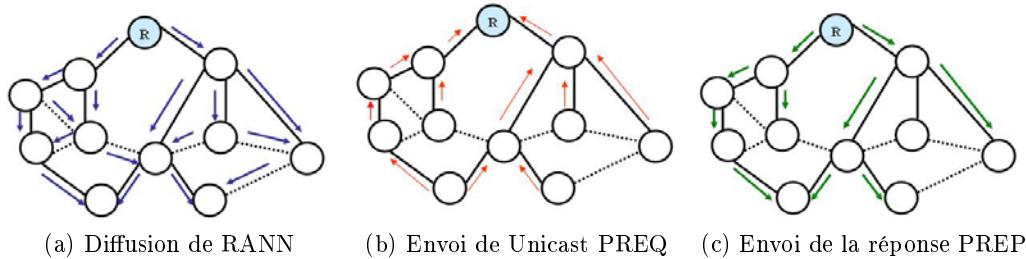


FIGURE 1.10: Routage dans le protocole Proactive RANN

Ce Portal diffuse périodiquement des messages de routage pour établir les liens vers tous les Mesh STA. D'après la figure 1.11, un Mesh STA K qui veut établir une route pour une station source D vers un Mesh STA destination J envoie ses trames vers le Portal Mesh STA C qui les fait suivre vers J (liens en bleu). Entre temps, K va initier une demande réactive de route vers J. Une fois la nouvelle route est établie, la source K peut envoyer ses données directement vers la destination J à travers G et H (liens en gris). Dans la suite de nos travaux de recherches, nous allons utiliser le mécanisme de base de Proactive RANN.

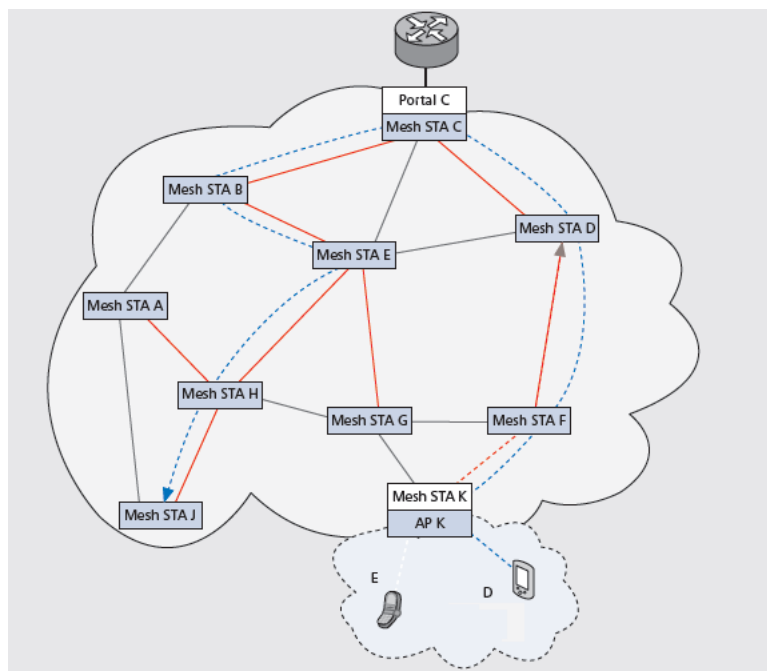


FIGURE 1.11: Amélioration du routage dans les réseaux IEEE 802.11s

1.4.3 Protocole RA-OLSR

Le protocole RA-OLSR est un protocole de routage à état de liens dans les réseaux WLAN maillés basé sur OLSR (Optimized Link State Routing) [19] et FSR (Fisheye State Routing) [22] et utilise une métrique radio (ALM) pour la construction de la table de routage et la sélection des relais multipoints.