

La mobilité dans les réseaux sans fil

Le GSM devrait céder sa place aux services GPRS et l'UMTS qui offrent des débits plus élevés et d'autres modes de communications en plus de la voix. Comme indiqué dans son nom, l'UMTS se veut universel. Il faut cependant se rendre à l'évidence : principalement à cause de sa bande passante assez limitée, cette 3ème génération ne sera pas la dernière, loin de là. L'usage de la solution WLAN nécessite une utilisation d'une bande de fréquence jusque là consacrée à la défense national, la migration de celle-ci vers de nouvelles bandes de fréquence est lente, ce qui empêche le WLAN de se développer librement. Dans ce contexte et afin de mieux positionner cette thèse, nous faisons une classification des réseaux mobiles et sans fil selon l'étendue géographique et la topologie. Cette classification va nous permettre d'introduire la notion d'une structure hiérarchique des réseaux mobiles et sans fil dans le chapitre suivant. Nous nous intéressons à l'aspect de l'évolution des systèmes sans fil et leurs caractéristiques pour mieux comprendre le besoin d'une nouvelle génération.

2.1 Historique, évolution et applications des réseaux sans fil

L'histoire des communications radio-mobiles peut être découpée en trois grandes phases. La première concerne les découvertes théoriques et la mise en évidence de l'existence des ondes radios. Cette phase débute en 1678 avec les travaux de Huygens sur les phénomènes de réflexion et de réfraction de la lumière. C'est Fresnel qui, en 1819 en démontre la nature ondulatoire. En 1865, Maxwell établit les célèbres formules unifiant phénomènes électrique, magnétiques et lumineux mais ce n'est qu'en 1887 que Hertz met en évidence pour la première fois la possibilité d'émission/détection d'une onde électromagnétique entre deux points distants de quelques mètres. À la fin du siècle, en 1897, Ducretet étend cette distance en établissant une liaison radio de quelques kilomètres de portée. Après avoir montré la possibilité de communications radio-mobile entre un bateau et une île en 1898, Macroni met en place la première radio trans-Atlantique entre l'Europe et les Etats-Unis trois ans plus tard. Il marque ainsi le point de départ des premiers systèmes de communications radio.

La seconde phase est constituée par le développement et l'évolution des équipements et des techniques mais pour des usages encore réservés à certaines catégories de la population. Les stations radio d'émission/réception sont au début du 20^e siècle de taille imposante. Par exemple en 1902, une station radio militaire pour le télégraphe était constitué d'un moteur à essence pour

tracer le système de communications consistant en générateur de 1kW monté sur une remorque suivie d'une seconde remorque pour l'émetteur et le récepteur. C'est l'évolution des techniques et des équipements (taille, poids, la portée des communications et les services radiotéléphonie) qui permettra aux systèmes radios d'acquiescer la dimension mobile. La seconde guerre mondiale va accélérer le développement des systèmes qui vont, dans les années 1950, se multiplier pour les applications civiles (compagnies de taxis et ambulances par exemple). Les équipements restent cependant encore lourds et occupent une place importante puisqu'ils sont généralement installés dans les coffres des véhicules.

Les progrès techniques et développement des systèmes de communications vont faire entrer les systèmes de communications sans fil et mobiles dans le domaine grand public (la troisième phase). Les premiers types de systèmes de communications disponibles au plus grand nombre sont les systèmes cellulaires. Conçu comme réponse à l'augmentation de la demande et à la faible disponibilité du spectre radio, les systèmes cellulaires analogiques se développent dans la décennie 1970. En 1979, le premier système cellulaire AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*) est installé à Chicago, suivi en 1980 par le HCMTS (*Hight Capacity Mobile Telephone System*) à Tokyo. La décennie 1980 va voir ainsi se généraliser l'implantation de systèmes cellulaires analogiques dans de nombreux pays. Parallèlement, les systèmes sans cordon, se développent et connaissent des taux de croissance impressionnants. Toutefois, c'est réellement le système cellulaire numérique GSM (voir section 2.3.1), avec les services de type RNIS (*Réseau Numérique à Intergration de Services*) et la possibilité de roaming international, qui constitue le représentant le plus significatif de la révolution des mobiles de la décennie 1990. Les systèmes sans fil et mobiles vont progressivement tous les domaines d'activités économiques et intégrer peu à peu tous les types de services de télécommunications.

Comme on l'a déjà mentionné, plusieurs facteurs ont contribué à l'évolution rapide de ces dernières années. En effet, la miniaturisation des composants a permis de réduire la taille des produits électroniques sans fil en général (GPS, téléphone sans fil, ...) et le matériel informatique en particulier. Les ordinateurs portables sont de plus en plus légers et puissants en même temps, génération après génération. Cette miniaturisation s'est accompagnée avec une évolution d'autonomie et une baisse de consommation. Un autre facteur important qui aide beaucoup à rendre la technologie sans fil plus populaire est la baisse des prix ainsi que la disponibilité des bandes radios ISM (*Industrial Scientific and Medical*) et UNII (*Unlicensed National Information Infrastructure*) à 800 MHz, 2.4 GHz et 5 GHz, qui peuvent être utilisées gratuitement et sans autorisation (malgré quelques différences dans la législation d'un pays à un autre).

Avec la récente évolution des technologies de communication sans fil. On s'attend à un développement rapide des réseaux locaux sans fil et leur utilisation sera de plus en plus fréquente. Bien que les projets aient souvent débuté dans un cadre militaire pur, le domaine d'application des réseaux sans fil s'étend bien au-delà. En effet, les réseaux sans fil offrent une grande flexibilité ainsi qu'une rapidité et facilité de mise en place. Ils seront d'un grand apport lors des catastrophes naturelles, des incendies, où il sera indispensable de disposer rapidement d'un réseau pour organiser les secours et les opérations de sauvetage.

Les réseaux sans fil sont plus faciles à implanter dans des bâtiments, où il est impossible d'installer des câbles convenablement ; tel que les vieux bâtiments, les sites classés (exemple : châteaux et monuments historiques), lors des manifestations temporaires (congrès, foires, salons, expositions, le tour de France, et autre manifestation sportives). On peut aussi avoir recours à ce type de réseau lorsqu'on veut interconnecter des bâtiments à moindre coût (i.e., sans location d'une liaison spéciale chez un opérateur). On peut imaginer une application industrielle, où les nœuds seront en fait des robots mobiles qui pourront se déplacer librement dans l'usine. Ou bien encore,

dans des environnements hostiles à l'homme tels que des cratères de volcans pour surveiller leur activités ou bien le long d'une faille géologique. Dans les campus universitaires, l'utilisation des réseaux sans fil peut être très utile pour les étudiants qui pourront se connecter sur leurs comptes et travailler à partir de la bibliothèque ou leurs chambres.

2.2 Problèmes des transmissions radios et des réseaux sans fil

Les ondes radios (notées *RF* pour *Radio Frequency*) se propagent en ligne droite dans plusieurs directions. La vitesse de propagation des ondes dans le vide est de $3 \cdot 10^8$ m/s. Lorsqu'une onde radio rencontre un obstacle, une partie de son énergie est absorbée et transformée en énergie (thermique par exemple), une partie continue à se propager de façon atténuée et une dernière peut éventuellement être réfléchi. L'atténuation augmente avec l'augmentation de la fréquence ou de la distance. De plus lors de la collision avec un obstacle, la valeur de l'atténuation dépend fortement du matériel composant l'obstacle. Généralement les obstacles métalliques provoquent une forte réflexion, tandis que l'eau absorbe le signal.

Les réseaux sans fil utilisent des ondes radios ou infrarouges afin de transmettre des données. Les transmissions radios dans les réseaux sans fil sont toutefois soumises à de nombreuses contraintes, liées à la nature de la propagation des ondes radios et aux méthodes de transmissions, rendant ce type de transmission non suffisante. Le signal transmis est sujet à nombreux phénomènes dont la plupart ont un effet de dégradation sur la qualité du signal. Cette dégradation se traduit en pratique par des erreurs dans les messages reçus qui entraînent des pertes d'informations pour l'utilisateur ou le système. Ces contraintes sont notamment :

- ☞ débit plus faible que celui du filaire. La bande passante est une ressource rare, il faut minimiser la portion utilisée pour la gestion du réseau, afin de pouvoir laisser le maximum de bande passante pour les communications ;
- ☞ les brouillages dus aux interférences : les liens radios ne sont pas isolés, deux transmissions simultanées sur une même fréquence ou, utilisant des fréquences proches peuvent interférer. De plus, les interférences peuvent venir d'autres types de machines non dédiées aux télécommunications. Par exemple, les fréquences utilisées dans les fours à micro-ondes sont dans les fréquences de la bande ISM ;
- ☞ les brouillages dus au bruit ambiant (que nous distinguons des interférences), provenant d'émission d'autres systèmes par exemple ;
- ☞ les évanouissements (ou *fadings*) dans la puissance du signal dus aux nombreux effets induits par le phénomène de multitrajets ;
- ☞ erreurs de transmission : les erreurs de transmission radio sont plus fréquentes que dans les réseaux filaires ;
- ☞ liens versatiles : les transmissions radios sont très sensibles aux conditions de propagation, ce que les rend versatiles. Un contrôle de la qualité des liens est obligatoire afin de pouvoir les exploiter convenablement pour les communications radios ;
- ☞ puissance du signal : la puissance du signal diminue avec la distance, et la puissance utilisée est sévèrement réglementée par les autorités compétentes des pays ;
- ☞ les pertes de propagation dues à la distance parcourue par l'onde radio, ou affaiblissement de parcours (*pathloss*) ;

- ☞ les atténuations de puissance du signal dues aux effets de masques (shadowing) provoqués par les obstacles rencontrés par le signal sur le trajet parcouru entre l'émetteur et le récepteur ;
- ☞ nœuds cachés : ce phénomène est très particulier à l'environnement sans fil. Les nœuds qui ne s'entendent pas, à cause d'un obstacle qui empêche la propagation des ondes, peuvent provoquer des collisions ;
- ☞ impossibilité de détecter les collisions au cours d'une transmission. Pour détecter une collision, une station doit être capable de transmettre et d'écouter en même temps. Or, dans les systèmes radios, il ne peut y avoir transmission et écoute simultanées ;
- ☞ consommation d'énergie : qui dit sans fil, dit aussi mobilité, et donc autonomie. Pour maximiser la durée de vie des batteries, il faut économiser autant que possible les transmissions inutiles ;
- ☞ sécurité : les détecteurs des signaux et les récepteurs passifs peuvent espionner les communications radio si ces dernières ne sont pas protégées ;
- ☞ mobilité et topologie dynamique : la disparition ou l'apparition d'un nœud ou un lien entre deux nœuds peut être le résultat d'un déplacement, c'est aussi parce que la batterie est épuisée ou lorsqu'une panne survient.

2.3 Les réseaux mobiles et sans fil

Les termes mobile et sans fil sont souvent utilisés pour décrire les systèmes existants, tels que le GSM, IS95, IEEE 802.11, Bluetooth, etc. Il est cependant important de distinguer les deux catégories de réseaux que recoupent les concepts de mobile et de sans fil de façon à éviter toute confusion. Prenez l'exemple (tiré de [7]) du téléphone sans cordon de résidence. Ce téléphone donne accès au RTC (réseau téléphonique commuté), le réseau classique de téléphone, ou au RNIS (Réseau numérique à intégration de services). Le support de communication utilise l'interface radio pour qu'un abonné puisse appeler depuis son jardin ou sa cuisine, mais ce dernier doit toujours rester au voisinage de son réseau d'abonnement. En cas de mobilité dépassant ces limites, l'utilisateur est contraint de contacter un opérateur local pour souscrire un nouvel abonnement ce genre de systèmes offrent le sans fil sans la mobilité.

Un utilisateur mobile est défini théoriquement comme un utilisateur capable de communiquer à l'extérieur de son réseau d'abonnement tout en conservant une même adresse. Certains systèmes tels que le GSM, IS95, UMTS offrent la mobilité et sans fil simultanément.

Un autre type de mobilité est celui mis en œuvre dans un réseau IP Mobile [8,9]. Le protocole IP Mobile est une extension d'IP permettant à un nœud de rester accessible avec la même adresse, tout en étant mobile dans différents réseaux. C'est-à-dire, le nœud mobile maintient son adresse permanente de réseau d'origine (*Home Address*) pour l'identification des connexions de la couche transport (par exemple *TCP*), et utilise une adresse temporaire (*Care-of-Address*) de réseau visité qui permet de router les paquets jusqu'à lui à son point d'attachement actuel sur Internet. L'adresse temporaire change à chaque fois que le mobile change de réseau d'attachement.

Il est possible de classer les réseaux sans fil de plusieurs manières, selon que nous nous intéressons à un critère ou à un autre. La figure suivante présente une classification possible selon les critères suivants : l'étendue géographique, la topologie et l'infrastructure utilisée.

Le concept cellulaire consiste à diviser une zone de couverture relativement grande, généralement appelée réseau sans fil large (*WWAN*, pour *Wireless Wide Area Network*) en plusieurs zones

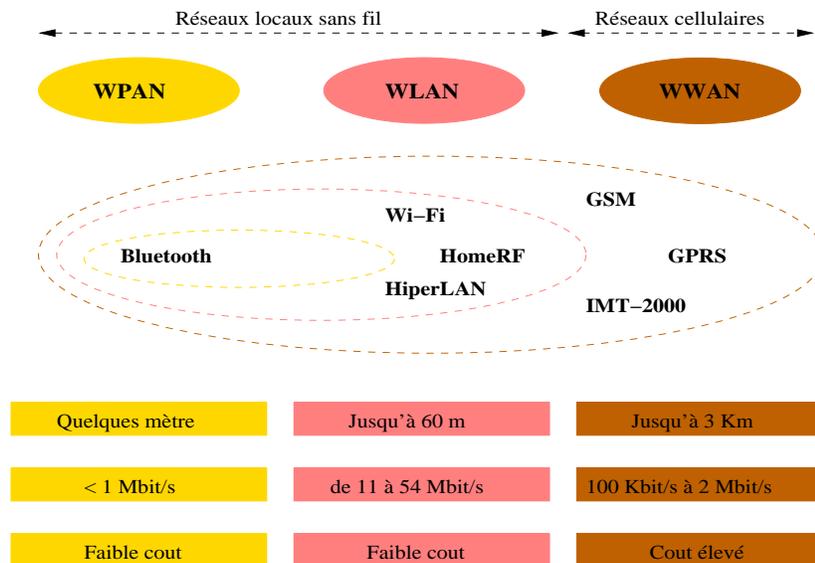


FIG. 2.1 – Les réseaux sans fil.

plus petites appelées cellules. Chaque cellule possède sa propre station de base (ou antenne relais). Chaque station de base utilise une bande de fréquence spécifique et gère l'ensemble des nœuds se trouvant dans la cellule. Les systèmes de communication cellulaires se sont développés en plusieurs générations. La première génération était analogique. La deuxième génération (2G) est numérique mais orienté mode circuit avec le standard le plus répandu dans le monde GSM (Global System for Mobile communication) qui offre un service de voix de 9,6kbits/s et qui permet un transfert de données à faible vitesse. Il existe une génération dite deux et demi (2G+) avec le GPRS (*General Packet Radio Service*) qui est une évolution du système GSM qui permet en agrégeant plusieurs canaux de voix d'offrir une commutation en mode paquet allant jusqu'à 115kbits/s. La troisième génération (3G) permet d'utiliser la commutation en mode paquet dans contexte multimédia. Le nom générique pour les différentes normes 3G est IMT-200 qui regroupe : (i) l'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) en Europe qui promet un transfert des données avec un débit théorique allant jusqu'à 2 Mbps dans les configurations à courte portée (picocellules) mais généralement 100kbit/s avec des cellules plus grande (micro-cellules), (ii) CDMA2000 aux Etats-Unis qui est une évolution de CDMAOne (*Code Division Multiple Access*) et W-CDMA (*WideBand CDMA*) au Japon, et (iii) EDGE (Enhanced Data rates for Global Evolution) parfois appelé E-GPRS (*Enhanced GPRS*) qui est une évolution du GPRS et du TDMA. Les propositions de la troisième génération ont été normalisées par les 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) et 3GPP2 [10].

Le concept du réseau local sans fil est né du besoin d'offrir par le sans fil les services habituellement accessibles par voie filaire (*Ethernet*). Au sein des entreprises ou des laboratoires, ces réseaux sont souvent utilisés en complément des réseaux filaires existants. Du réseau personnel (WPAN, pour *wireless Personnel Area Network*) au réseau local (WLAN, *Wireless LAN*), plusieurs standards existent : Bluetooth, IEEE 802.11, HiperLAN. Ces standards permettent aux mobiles de communiquer entre eux dans un même réseau d'accès, mais ils ne sont pas prévus généralement pour permettre de passer d'un réseau d'accès à un autre comme les systèmes mobiles cellulaires. Ils sont donc plus adaptés à des réseaux locaux dans des lieux identifiés tels qu'une salle de confé-

rence, un campus universitaire et des lieux de passage : aéroports, gares, etc.

2.3.1 Les réseaux cellulaires

La propriété d'atténuation, caractéristique de l'interface radio, a permis de développer le concept *cellulaire*. Dans ce modèle, la zone de couverture est divisée en cellules, à chaque cellule est affectée à une bande de fréquence. Du fait de la rareté du spectre hertzien, cette bande de fréquence est étroite, d'où la faible capacité de l'ensemble du système.

Pour faire face à l'augmentation ininterrompue du nombre d'utilisateurs des réseaux cellulaires, il a fallu tout à la fois accroître la capacité du système, diminuer la dimension des cellules et installer un nombre plus important de relais. Le GSM est le premier système cellulaire de téléphonie mobile efficace, économique et universel. Il a été très rapidement adopté par les utilisateurs ces dix dernières années. Le GSM évolue constamment vers le transfert de données (GPRS).

Le GSM

Le GSM (*Global System for Mobile communication*) [11] est un standard Européen établie par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute), qui est conçu essentiellement pour la téléphonie mobile sans fil, mais il peut supporter des transferts de données à faible débit (14.4 Kbits/s de base). Les mobiles ne communiquent pas directement entre eux mais ils doivent passer par la station de base, même s'ils sont proches. Le réseau global est formé d'une multitude de stations de base, chacune couvrant une cellule indépendante. Les cellules adjacente doivent utiliser des fréquences différentes pour éviter les interférences entre les communications.

Le GSM utilise la méthode d'accès F-TDMA (*Frequency Time Division Multiple Access*). Chaque mobile doit réserver un slot dans une première phase de contrôle avant de pouvoir commencer la communication. Le GSM utilise deux plages de fréquences différentes, la première est réservée pour les communications des mobiles vers les stations de base (890-915 MHz et 1710-1785 MHz pour le GSM 1800) et la deuxième dans le sens des stations de base vers les mobiles (935-960 MHz et 1805-1880 MHz pour le GSM 1800).

Certains choix technique du GSM sont fait en conséquence, notamment en matière d'architecture réseau et de mise en forme des ondes (modulation, codage, etc). Ces choix se révèlent toutefois contraignantes pour les services de données (transfert de fichier, vidéo, etc). Pour pallier ces limitations, le standard du GSM évolue sans cesse. Dans un premier temps, le GSM a standardisé des règles pour réaliser un transfert de données en utilisant les circuits de voix. Avec le HSCSD (High Speed Circuit Switched Data), on assiste à un premier développement du standard vers des débits supérieurs, mais toujours en mode circuit.

Pour améliorer encore l'efficacité de transfert de données, une évolution majeure du GSM est normalisée sous le nom de GPRS (*General Packet Radio Service*). Fondée sur l'interface radio du GSM, mais développant un partage de ressources dynamique adapté au trafic sporadique, le GPRS introduit une architecture réseau en mode paquet. Si l'utilisateur téléphone, l'information transite par le réseau cœur de type circuit téléphonique. Si l'utilisateur émet des paquets, ces derniers sont acheminés par le réseau cœur de type paquet. Enfin, EDGE (*Enhanced Data for GSM Evolution*) propose des débits supérieurs par l'introduction d'une modulation plus efficace, applicable à la fois au HSCSD et au GPRS.

L'association du GPRS et d'EDGE est souvent considérée comme un system 2.5, intermédiaire entre les systèmes 2G (GSM, etc) et 3G (UMTS, CDMA2000, etc).

L'UMTS

L'apparition d'une troisième génération de réseaux de mobiles a pour origine tout à la fois la saturation des systèmes actuels et le besoin d'une couverture universelle ainsi que de services évolués tendant vers ceux offerts par les infrastructures fixes. Il faudrait ajouter à ces raisons une certaine volonté émanant de pays n'ayant pas forcément d'infrastructure fixe adéquate ou ayant raté le train du GSM d'entrer rapidement dans la troisième génération.

L'UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) [12] est un système cellulaire de troisième génération qui fait partie de la famille IMT-2000 (International Mobile Telecommunication system 2000) et dont les spécifications techniques sont développées au sein du 3GPPP. L'architecture de ce système est composé essentiellement d'un réseau terrestre d'accès radio, l'UTRAN (*Universal Terrestrial Radio Access Network*) et d'un réseau cœur dérivé de celui spécifié pour la phase 2G+ du GSM. L'UTRAN utilise deux modes d'accès fondés sur la technologie CDMA large bande : l'UTRA/FDD (*Universal Terrestrial Radio Access/Frequency Duplex Division*) et l'UTRA/TDD (*Universal Terrestrial Radio Access/Time Duplex Division*).

L'UMTS est le résultat de plusieurs années de recherche qui ont été menées en Europe à partir de la fin des années 1980 et qui se poursuivent aujourd'hui à l'échelle mondiale. RACE (*Research of Advanced Communication Technologies in Europe*) a été le premier programme européen de recherche qui avait pour objectif de définir les principes techniques de l'UMTS [13]. Le Programme ACTS (*Advanced Communication Technologies and Services*) est venu prendre le relais à partir de 1995.

L'UMTS est conçu pour pouvoir s'interconnecter et interagir avec le GSM dans toutes ses phases d'évolution. Aussi, l'UMTS peut être considéré comme l'étape la plus porteuse en terme d'innovations technologiques. Ce système se distingue en effet de ses prédécesseurs HSCSD, GPRS et EDGE, par des débits plus élevés, une couverture plus large, une capacité en termes de nombre d'abonnés plus grande et des services plus variés.

2.3.2 IP Mobile

IP Mobile [8, 9] est basé sur la distinction de l'identification du mobile et son attachement physique à un réseau d'accès IP. Lorsqu'un utilisateur change de sous-réseau, il est nécessaire de modifier son préfixe pour que les routeurs puissent acheminer l'information au nouveau sous-réseau. Dans cette optique, le mobile possède deux adresses : son adresse permanente liée à son réseau d'abonnement (*Home Address*) est utilisée pour identifier les connexions des couches les plus élevées (par exemple TCP, UDP), tandis qu'une adresse temporaire (*Care-of-address*) liée au réseau visité permet de router les paquets jusqu'à lui via son point d'attachement actuel sur Internet. L'adresse temporaire change chaque fois que le mobile change de réseau d'attachement. Le protocole IP Mobile définit deux types d'entités réseau chargées de gérer la mobilité :

- **Home Agent (HA)**. Routeur dans le réseau d'abonnement (*Home Network*) du mobile, qui met à jour une information de localisation du mobile et qui envoie par un tunnel les paquets destinés à ce mobile, lorsque ce dernier est en dehors de son réseau d'abonnement.
- **Foreign Agent (FA)**. Routeur situé dans le réseau visité (*Foreign Network*) par le mobile. Il décapsule et relaie les paquets destinés au mobile visiteur.

Le fonctionnement d'IP Mobile est caractérisé par trois étapes essentielles (cf. figure 2.2, tirée de [14]) :

- ☞ Obtention d'une adresse temporaire (*COA : Care-Of-Address*) pour les nœuds mobiles permettant leur localisation.

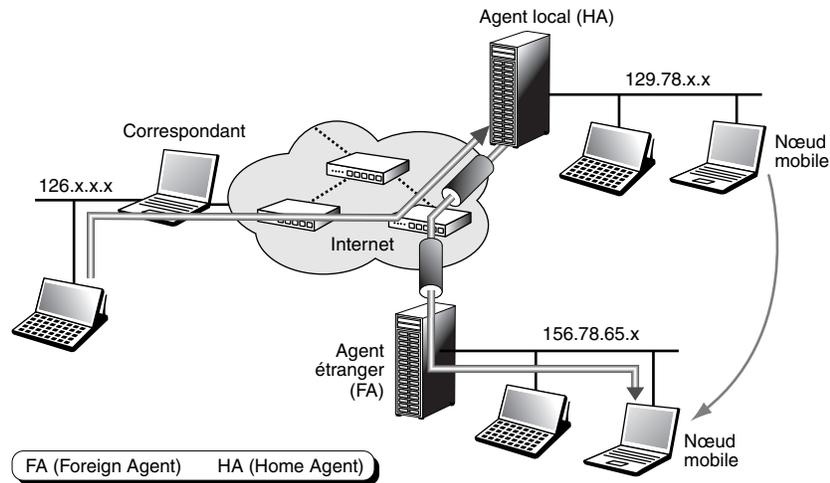


FIG. 2.2 – IP Mobile.

- ☞ Enregistrement de cette adresse auprès du Home Agent.
- ☞ Encapsulation des paquets arrivant au réseau d'abonnement en utilisant cette adresse temporaire.

À chaque changement de point d'accès (c'est-à-dire, *Handoff* au niveau de la couche liaison) le mobile détecte son déplacement dans le nouveau sous-réseau, reçoit une *COA* et doit s'enregistrer auprès de son *Home Agent*. Durant cette période, soit les paquets sont perdus parce que le précédent point d'accès n'a pas de route pour joindre le mobile ou celle-ci n'est plus valide, soit les paquets sont transmis par le point d'accès précédent au nouveau point d'accès comme proposé dans [15]. Ceci est appelé *smooth handoff* et suppose que le point d'accès précédent est averti du déplacement du mobile.

Le routage des paquets vers la nouvelle localisation de l'utilisateur est peu optimal du fait du passage des paquets par le réseau d'abonnement de l'utilisateur. Une optimisation de la route est proposée pour réduire la signalisation engendrée par IP Mobile dans le réseau Internet [16].

Dans un réseau micro-cellulaire (ex. *Wi-Fi*) et pico-cellulaire (ex. *Bluetooth*) où chaque point d'accès couvre une zone géographique relativement petite, il faudrait s'attendre à ce que les mobiles exécutent très souvent des *Handoffs* IP Mobile. Ceci dégraderait les performances du réseau et la continuité du service au niveau de ces mobiles. Pour pallier ces problèmes et rendre IP Mobile plus rentable, la gestion de la mobilité est divisée en macro-mobilité et micro-mobilité. La macro-mobilité désigne le déplacement inter-domaine, c'est-à-dire d'un domaine administratif IP à un autre (par exemple, entre réseaux d'accès sans fil étendus) par contre la micro-mobilité représente le déplacement intra-domaine, c'est-à-dire à l'intérieur d'un même domaine administratif IP (voir figure 2.3).

IP Mobile est bien adapté pour la gestion de la macro-mobilité, mais il est beaucoup moins pour la gestion de la micro-mobilité. De nombreuses propositions sont faites pour assurer la gestion de la micro-mobilité classées en trois catégories : (i) Protocoles basés sur une hiérarchie des agents [17]. Le domaine visité est structuré en une hiérarchie d'agents. Ces protocoles sont caractérisés par l'utilisation de l'encapsulation IP pour la communication entre les différentes parties de la hiérarchie. Le mobile utilise une care of address locale au domaine visité ; (ii) Protocoles basés sur un marquage de route. Ces protocoles utilisent un acheminement IP par marquage de route

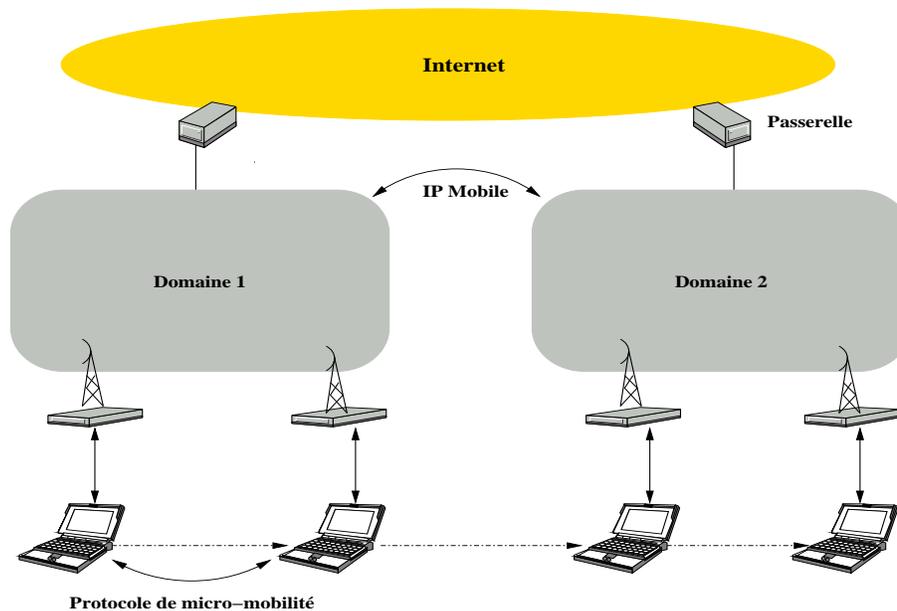


FIG. 2.3 – Macro-mobilité et Micro-mobilité.

dans le réseau d'accès. L'établissement de la route se fait par la transmission de proche en proche de paquets spécifiques d'un mobile vers la passerelle. Cette transmission permet aux nœuds intermédiaires de retenir le chemin de manière à l'utiliser en sens inverse pour joindre le mobile. En général le mobile garde sa *Care-of-Address* enregistrée auprès de son *Home Agent*. Parmi ces protocoles on trouve le IP cellulaire [18–20], HAWAII [21, 22] et TeleMIP [23]; (iii) Protocoles basés sur les réseaux MANET (*Mobile Ad hoc NETWORK*). Ces protocoles sont conçus pour les réseaux d'accès ad hoc, où les hôtes et les routeurs sont mobiles. Le routage est multi-sauts et s'adapte au fur et à mesure que le mobile se déplace et que la topologie change.

2.3.3 Les réseaux privés sans fil

Les réseaux locaux sans fil se sont des réseaux géographiquement limités, dans lesquels les terminaux se trouvent tous dans un milieu restreint en taille, correspondant soit à une entreprise, soit à un environnement personnel. Plusieurs possibilités peuvent être envisagées pour la réalisation de ces réseaux : soit la communication hertzienne s'effectue sur l'ensemble du site, soit les communications s'effectuent à l'intérieur de petites cellules reliées entre elles. Les communications entre les équipements terminaux peuvent s'effectuer directement ou par le biais d'une borne intermédiaire. Quant aux communications entre bornes de concentrations, elles peuvent s'effectuer de façon hertzienne ou par câble.

Les réseaux locaux sans fil connaissent actuellement d'important développement de fait de la flexibilité de leur interface, qui permet à un utilisateur de se déplacer dans son entreprise, tout en restant connecté. Plusieurs gammes de produits sont actuellement commercialisées, et plusieurs tendances se dégagent : les réseaux sans fil, qui desservent les équipements d'un seul utilisateur (les réseaux personnels, ou PAN : *Personal Area Network*), ceux qui desservent une entreprise et ceux qui connecte des utilisateurs sur une distance métropolitaine. Ces réseaux peuvent atteindre des débits de plusieurs mégabits par seconde, voire de plusieurs dizaines de mégabits par seconde.

La normalisation devrait avoir un fort impact sur les réseaux locaux sans fil. Aux États-Unis,

ce sont principalement deux groupes de travail de l'IEEE (*Institut of Electrical and Electronics Engineers*), l'IEEE 802.11 et l'IEEE 802.15, qui sont en charge de cette normalisation, tandis que le groupe HiperLAN (*High Performance Local Area Network*) s'en occupe en Europe.

Bluetooth

Le standard Bluetooth [24] a été initié par Ericsson et un groupe de travaille réunissant plusieurs grands industriels (dont 3Com, IBM, Nokia, Toshiba, etc). C'est une technologie peu onéreuse grâce à la forte intégration des composants électroniques. Les fréquences utilisées sont comprises entre 2400 et 2483,5 MHz. La même gamme de fréquences se retrouve dans la plupart des réseaux sans fil utilisés dans un environnement privé, que ce dernier soit personnel ou d'entreprise. Cette bande ne demande pas de licence d'exploitation.

Bluetooth est destiné à un usage qui remplacera les câbles de connexion entre les machines ou entre les machines et leurs accessoires (par exemple : connexion entre un ordinateur, le clavier, ou bien la souris, ou encore l'imprimante, etc ; ou encore communication entre la télévision et le lecteur DVD). Plus généralement Bluetooth permet de construire des petits réseaux personnels de quelques dizaines de mètres de portée.

Le réseau de base appelé *piconet*, est formé d'un maître et plusieurs esclaves (jusqu'à sept esclaves). C'est le maître qui se charge de gérer les communications comme dans le cas des réseaux à station de base. Plusieurs *piconets* peuvent être interconnectés pour former un scatternet, d'après le mot anglais *scatter*, dispersion. Dans ce scatternet, un esclave peut être l'esclave de plusieurs maîtres à la fois, en plus, un maître d'un *piconet* peut devenir un esclave du maître d'un autre *piconet*. La figure 2.4 tirée de [7], donne un exemple de connexion de terminaux Bluetooth.

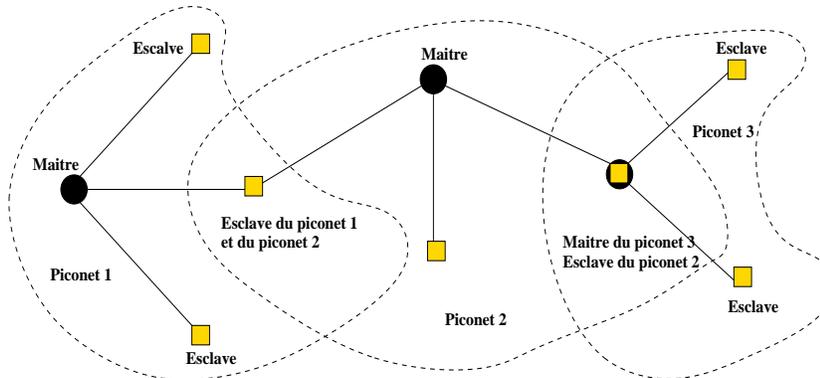


FIG. 2.4 – Schéma de connexion de terminaux Bluetooth.

Le débit à l'intérieur d'un *piconet* peut atteindre près de 1 Mbps entre les terminaux participant à la communication. Le temps est découpé en slots égaux. Un terminal utilise une fréquence et un slot puis, par un saut de fréquence (*Frequency Hop*), il change de fréquence sur la tranche de temps suivante, et ainsi de suite. C'est le maître qui sollicite ses esclaves pour parler d'une façon synchronisée.

La proposition de Bluetooth a été prise en compte par l'IEEE dans le groupe de travail IEEE 802.15 qui s'occupe de la standardisation des réseaux personnels (*PAN : Personal Area Network*). D'autres sous-groupes de travail de l'IEEE 802.15 se concentrent sur des applications particulières. Par exemple, Car Profile s'intéresse aux communications à l'intérieur d'une voiture, et le sous-

groupe AV (Audio/Video) à la problématique du transport de parole de bonne qualité ou de CD audio ainsi qu'à l'échange de vidéo.

Le Bluetooth souffre de quelques problèmes liés à la faiblesse de : débit, peu attrayant, la technique de partage de l'interface radio et en fin la concurrence très vive de la norme IEEE 802.11.

L'IEEE 802.11

La norme 802.11 est le standard IEEE décrivant les caractéristiques d'un réseau local sans fil (*WLAN*) [25, 26]. Cette norme est connue sous l'appellation commerciale Wi-Fi qui signifie Wireless Fidelity. La norme 802.11 est le standard des couches inférieures à IP le plus utilisé dans les réseaux ad hoc (section 2.4). Dans cette section nous décrivons les différents modes de fonctionnement de cette norme. Dans un réseau IEEE 802.11, deux types d'architecture sont définis et correspondent à deux modes de fonctionnement :

- **Le mode infrastructure.** Dans ce mode, les mobiles communiquent directement avec un point d'accès fixe. Ces points d'accès sont analogues aux stations de bases des réseaux cellulaires et sont généralement reliés entre eux par un réseau filaire ou hertzien. Un point d'accès est le point de passage obligé pour qu'un mobile puisse communiquer avec un autre mobile. Les mobiles peuvent se déplacer tout en restant dans la zone de couverture du point d'accès.
- **Le mode ad hoc.** Dans ce mode, les mobiles communiquent directement entre eux sans avoir recours à une tierce station, à condition qu'ils soient à portée radio. Dans la figure 2.5, si un nœud *A* sort de la portée radio d'un autre nœud *B*, il ne pourra pas communiquer avec *B*.

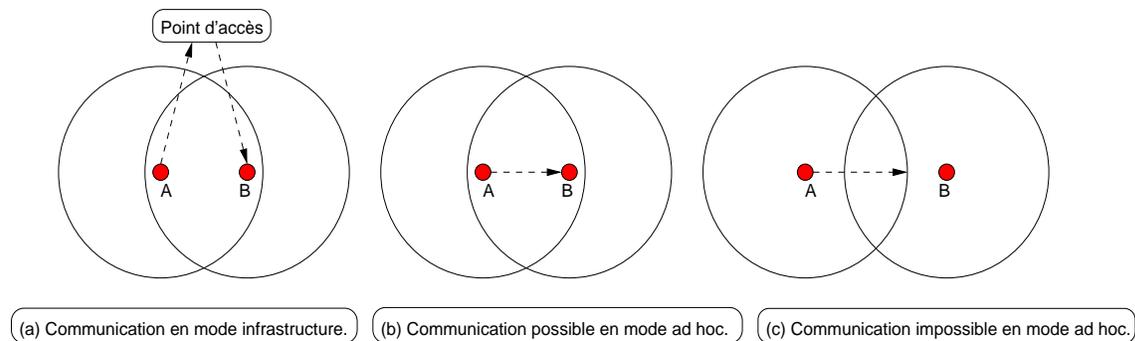


FIG. 2.5 – Exemple de modes d'opération du IEEE802.11.

Comme tous les standards de l'IEEE, l'IEEE 802.11 couvre les deux premières couches du modèle Open System Interconnection (*OSI*). Une des caractéristiques essentielle du standard est qu'il définit une couche Medium Access Control (*MAC*) commune à toutes les couches physiques. Ainsi de futures couches physiques pourront être ajoutées au standard sans que de nouveaux changements soient apportés à la couche *MAC*.

La couche *MAC* 802.11 d'un réseau ad hoc utilise la méthode d'accès au medium appelée *DCF* (*Distributed Coordination Function*). *DCF* est basée sur la technique *CSMA/CA* (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*) et offre d'autres fonctions qui sont confiées normalement aux couches supérieures, comme la fragmentation, les retransmissions et les accusés de réception. Dans un environnement sans fil, les collisions ne sont pas détectées du fait qu'un émetteur ne

peut pas transmettre et écouter en même temps. Pour éviter les collisions, le CSMA/CA utilise différents mécanismes, tels que l'écoute du support physique, l'algorithme de backoff pour gérer l'accès au canal, la réservation du canal et les trames d'acquiescement positif.

Dans l'IEEE 802.11, l'écoute du support se fait à la fois au niveau de la couche physique avec le PCS (*Physical Carrier Sense*) et au niveau de la couche MAC avec le VCS (*Virtual Carrier Sense*). Le PCS détecte la présence d'autres stations 802.11 en analysant toutes les trames passant sur le support hertzien et en détectant l'activité sur le support grâce à la puissance relative du signal des autres stations. Le VCS est un mécanisme de réservation basé sur l'envoi de trames RTS/CTS (*Request To Send/Clear To Send*) entre une station source et une station destination avant tout envoi de données.

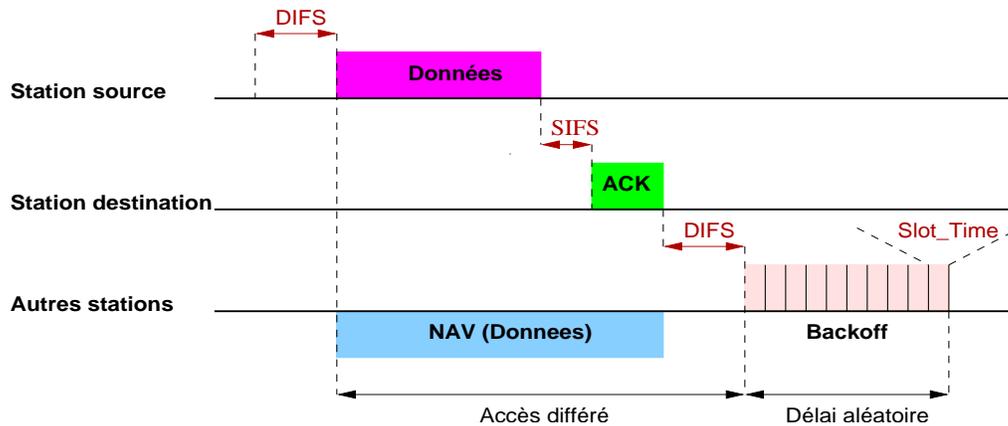


FIG. 2.6 – La méthode de base de transmission des données.

La méthode de base de transmission d'un paquet par une station 802.11 (*two-way handshake scheme*) n'utilise pas le mécanisme de réservation. Lorsqu'une station source veut transmettre des données à une station destination, elle vérifie si le support est libre. Si aucune activité n'est détectée pendant une période de temps correspondant à un DIFS (*Distributed InterFrame Space*) alors la station source transmet ses données immédiatement. Si le support est toujours occupé, la station continue de l'écouter pendant une période plus longue qu'un DIFS, jusqu'à ce qu'il soit à nouveau libre. Dès que le support est enfin libre pendant un temps correspondant à un DIFS, la station retarde encore sa transmission pendant un temps backoff généré aléatoirement puis transmet ces données vers la station destination. Si les données envoyées ont été reçues de manière intacte (la station destination vérifie le CRC de la trame de données), la station destination attend pendant un temps équivalent à un SIFS et émet un ACK pour confirmer la bonne réception des données. Si ce ACK n'est pas détecté par la station source ou si les données n'ont pas été reçues correctement ou encore si ce ACK n'a pas été reçu correctement, alors on suppose qu'une collision s'est produite et les données sont re-transmises après un certain temps aléatoire. Pendant toute la durée de la transmission entre la station source et la station destination, les autres stations mettent à jour leur NAV (*Network Allocation Vector*), en incluant le temps de transmission de la trame de données, le SIFS ainsi que le ACK. En plus, pour éviter la monopolisation du canal, la station 802.11 doit attendre un temps backoff aléatoire entre la transmission de deux nouveaux paquets (paquets ne font pas parti de la même session). La figure 2.6 montre le mécanisme de base *two-way handshake*.

Le VCS permet de réserver le support entre deux stations avant tout envoi de données (*four-way handshake scheme*). Lorsqu'une station source veut transmettre des données, elle envoie tout d'abord une trame de réservation RTS. Toutes les stations entendant cette trame, lisent le champ

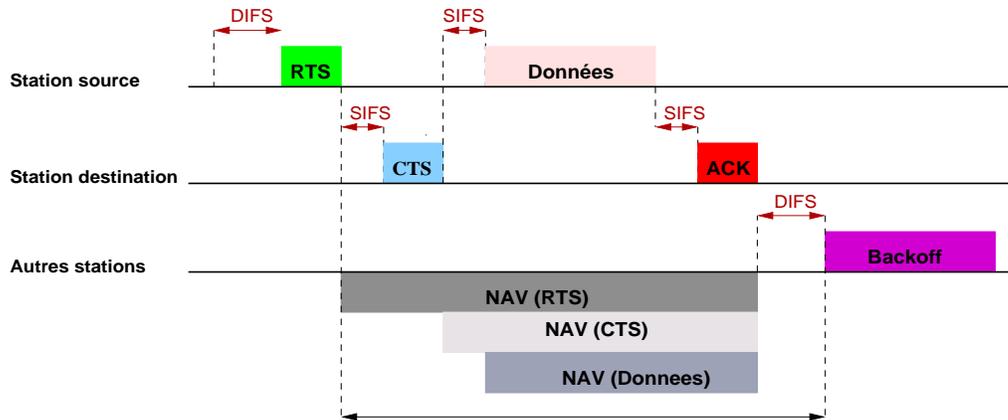


FIG. 2.7 – Transmission de données en utilisant les trames RTS/CTS.

de durée du RTS et mettent à jour leurs NAV. Dans la figure 2.7, lorsque la station destination reçoit le RTS, elle répond, après avoir attendu pendant un SIFS, en envoyant une trame CTS. Les autres stations entendant le CTS, lisent le champ de durée du CTS et mettent à nouveau à jour leur NAV. Après la réception du CTS par la station source, celle-ci est assurée que le support est stable et réservé pour sa transmission des données qui peut alors débiter.

Ce mécanisme permet ainsi à la station source de transmettre ces données ainsi que de recevoir le ACK sans qu'il n'y ait aucune collision. Comme les trames RTS/CTS réservent le support pour la transmission d'une station, elles sont utilisées habituellement lorsque l'on a de grosses trames à envoyer pour lesquelles une retransmission serait trop coûteuse en terme de bande passante. Les stations peuvent choisir d'utiliser le mécanisme RTS/CTS que lorsque la trame à envoyer excède une variable $RTS_Threshold$.

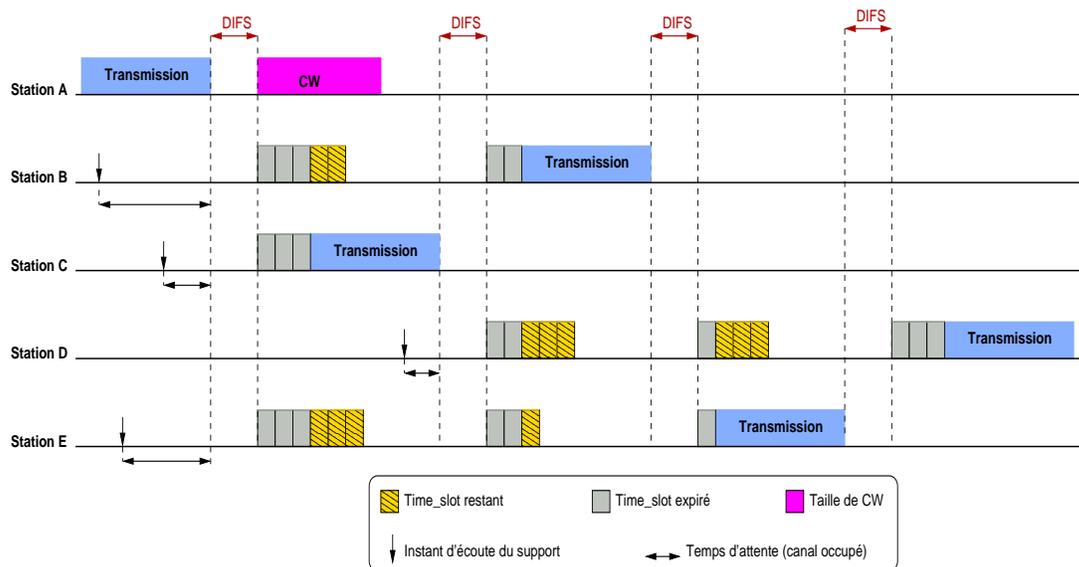


FIG. 2.8 – L'algorithme de backoff.

Dans 802.11, le temps est découpé en tranche de temps qui correspondent à un Slot_Time. Il représente le temps nécessaire pour détecter la transmission d'un paquet par une autre station.

Donc, il dépend fortement de la couche physique, délai de propagation et le temps pour signaler l'état de canal à la couche MAC.

Sans le mécanisme RTS/CTS, lorsque deux stations accèdent en même temps au support, une collision se produit. Ces deux stations utilisent alors l'algorithme de Backoff pour savoir quand est ce qu'elles vont pouvoir à nouveau accéder au support. L'algorithme de Backoff définit une fenêtre de contention (CW : Contention Window) qui correspond au nombre de time-slots qui peuvent être sélectionnés pour le calcul du temps d'attente (appelé temporisateur de Backoff). Lorsque le support est libre, les stations décrémentent leurs timers jusqu'à ce que le support soit occupé ou jusqu'à ce que le timer atteigne la valeur 0. Si le support devient libre pendant une période supérieure à un DIFS après le blocage de la décrémentation (i.e., le support a été occupé), les stations peuvent à nouveau faire décrémenter leurs Backoff timer. Pour chaque transmission d'un paquet, le Backoff timer est sélectionnée uniformément entre $[0, CW-1]$. La valeur de CW dépend du nombre d'échecs de transmission d'un paquet, c'est-à-dire, pour chaque paquet stocké pour une transmission, la fenêtre CW prend une valeur initial CW_{\min} et elle sera doublé à chaque échec de transmission, jusqu'à une valeur maximal CW_{\max} (les valeurs de CW_{\min} et CW_{\max} sont spécifiées par la couche physique). La valeurs de CW conserve CW_{\max} pour le reste des tentatives. Cet algorithme est appelé le schéma exponentiel du Backoff. Grâce à cet algorithme, les stations ont la même probabilité d'accéder au support car chaque station doit y accéder à nouveau après chaque transmission. Le mécanisme de Backoff est illustré par la figure 2.8.

HiperLAN

HiperLAN (*High performance radio Local Area Network*) est un standard ETSI [27], pour les réseaux locaux. La famille HiperLAN comprend quatre propositions, notamment HiperLAN1, utilisée à l'intérieur des bâtiments sur des distances de l'ordre de 50m. Le déplacement des utilisateurs ne doit dépasser 10m/s. HiperLAN2 étend la distance à 200m, et le débit passe à 23.5Mbps. Le rôle de cette génération est d'accéder aux réseaux ATM. HiperLAN3 permet le point à multi-point. La distance entre stations peut atteindre 5km avec un débit supérieur à 20Mbps par utilisateur. Enfin, HiperLAN4 veut remplacer les liaisons ATM sur des distance de 150 à 200m, avec un débit compatible avec les normes de l'ATM, c'est-à-dire 155Mbps. Il est à noter qu'il n'existe pas de produit commercial conforme à cette norme.

2.4 Résumé

Les systèmes de communication cellulaires se sont développés en plusieurs générations. Le GSM est conçu pour la téléphonie vocale. C'est pourquoi il est fondé sur la commutation de circuits. Pour améliorer encore l'efficacité de transfert de données, une évolution majeure du GSM est normalisée sous le nom de GPRS. GPRS introduit une architecture réseau en mode paquet et permet des débits un peu plus élevés. Mais c'est la troisième génération de réseaux sans fil baptisée UMTS, qui devra réellement imposer la convergence de tous les types de communications avec des débits importants. Ces systèmes offrent la mobilité et sans fil simultanément.

Un autre type de mobilité est celui mis en œuvre dans un réseau IP Mobile. Il permet de router les paquets vers un mobile dans un réseau visiteur sans modifier d'adresse IP. Il est bien adapté pour la gestion de la macro-mobilité, mais il est beaucoup moins pour la gestion de la micro-mobilité.

Les réseaux locaux sans fil se sont des réseaux géographiquement limités. Ils connaissent actuellement d'important développement de fait de la flexibilité de leur interface, qui permet à un uti-

lisateur de se déplacer dans son entreprise, tout en restant connecté. Plusieurs standards existent : Bluetooth, IEEE 802.11, HiperLAN. Ces standards permettent aux mobiles de communiquer entre eux dans un même réseau d'accès.

2.5 Conclusion

Téléphoner avec un mobile GSM ou GPRS aujourd'hui n'apporte aucune différence, les coupures sous les ponts, dans les tunnels et les escaliers ne disparaissent pas et la qualité de la communication n'est ni pire ni meilleure. En revanche, la réception d'e-mails, la visite des sites Wap, la consultation d'information en tout genre et le téléchargement d'applications se trouvent considérablement optimisée par l'utilisation de GPRS. Après un engouement sans précédent en Europe pour le projet UMTS, la mise en œuvre des téléphones mobiles de 3G a commencé. Les réseaux 3G sont compatibles avec les réseaux GSM/GPRS. Ils permettant d'assurer la continuité de service (voix, SMS, MMS, data) dans les zones non couvertes par l'UMTS. Dans la pratique, un téléphone 3G passe en mode GSM dès qu'il se trouve hors d'une zone de couverture UMTS, et inversement. Il est compatible avec les réseaux GSM/GPRS. Le retard pris par le GPRS et l'UMTS a permis au WLAN de se développer rapidement et de présenter une technologie alternative. L'intégration des réseaux 2G/3G et les réseaux WLAN lance un réel challenge. Le prochain chapitre présentera un protocole de handover pour passer d'un réseau cellulaire à un réseau WLAN et inversement ou au sein de même réseau WLAN.

Parallèlement aux réseaux cellulaires, d'autres systèmes ont voulu offrir la mobilité et la transmission sans fil. D'après [7], Le monde de l'IETF a pris en compte le succès de la mobilité universelle du GSM et proposé un protocole IP Mobile. À l'instar du roaming de GSM, IP Mobile garantit à un utilisateur la possibilité de se connecter de n'importe où sur le réseau Internet sans pour autant imposer de changement d'adresse IP. D'autres courants dans l'IETF ont œuvré pour garantir une mobilité sans fil au sein d'une zone relativement limitée.

