

Chapitre 1

Réseaux ambiants – généralités

1.1. Introduction

Nous voyons émerger ces dernières années de nouvelles terminologies telles que l'informatique omniprésente (*Pervasive computing*), l'informatique universelle (ou *Ubiquitous computing*), l'Intelligence ambiante (ou *Ambient intelligence*), l'informatique vestimentaire (ou *Wearable computing*), la sensibilité au contexte (ou *Context awareness*) et le concept toujours bien servi (ou *ABS – Always Best Served*). On ne sait plus quel mot trouver pour parler de ce fameux troisième âge de l'informatique : celui où l'informatique disparaît puisqu'elle est partout. Cependant l'ambition et la vision sont toujours les mêmes et consistent à nous aider à mieux vivre dans notre environnement en créant, de façon transparente pour l'utilisateur, une relation physique avec le monde de l'informatique et des télécoms. L'environnement va devenir plus conscient, adaptatif, attentif par rapport à l'utilisateur.

Ce chapitre introduit l'intelligence ambiante et les différentes problématiques associées et met l'accent spécialement sur un aspect très important qui est l'aspect réseaux de communication. Les réseaux ambiants représentent un environnement permettant à des utilisateurs d'accéder aisément à différents services riches et variés au travers d'un ou plusieurs réseaux d'accès souvent sans fil. Ces réseaux fournissent une connectivité globale, sont complètement transparents et ne laissent transparaître qu'un ensemble de fonctionnalités accessibles par une simple personne et de manière transparente.

Le chapitre est organisé comme suit. La section 2 introduit l'intelligence ambiante et les problématiques en recherche qui lui sont propres. La section 3 présente les réseaux ambiants et ses différentes composantes allant des différentes technologies de réseaux sans fil (réseaux locaux - WLAN, réseaux personnels - WPAN, etc.), l'intégration de ces différentes technologies, les réseaux ad hoc, les réseaux de capteurs ainsi que la découverte de services disponibles. Finalement, la section 4 conclut le chapitre.

1.2. Intelligence ambiante

L'intelligence ambiante fait référence à un nouveau paradigme de la technologie de l'information dans lequel le traitement de l'information est réparti sur tous les objets du réseau et de l'environnement des personnes, qui peuvent ainsi être assistées par une intelligence ambiante apportée par cet environnement. L'intelligence ambiante est un joli nouveau nom, dont le but est de créer un espace quotidien intelligent, immédiat d'utilisation, intégré dans les murs de nos maisons, dans nos bureaux et partout. Un exemple de salon ambiant et de salon non-ambiant est donné par la Figure 1.1.



Figure 1.1. (a) salon non-ambiant (b) salon ambiant (source : HomeLab Philips).

Offrir une telle facilité aux utilisateurs requiert des recherches dans différents domaines de l'informatique. Comme le montre la Figure 1.2, l'intelligence ambiante se base sur trois technologies : (i) l'informatique universelle¹ (ou *Ubiquitous Computing*), qui consiste à intégrer des microprocesseurs dans les objets de la vie quotidienne ; (ii) la communication universelle (ou *Ubiquitous Communication*), qui

1. Informatique universelle par *Marquez Weiser* : c'est le strict opposé de la notion de réalité virtuelle. Alors que la réalité virtuelle immerge les individus à l'intérieur d'un monde généré par ordinateur, l'*ubiquitous Computing* force les dispositifs informatiques à s'intégrer au sein de la vie quotidienne des gens. La réalité virtuelle est principalement un problème de puissance de calcul; l'informatique universelle est le résultat d'une difficile intégration des facteurs humains, des technologies de l'information, et des sciences sociales.

permet à ces objets de communiquer entre eux et avec l'utilisateur par un réseau sans fil; et (iii) les interfaces homme-machine intelligents qui permettent aux usagers de contrôler et d'interagir avec ces objets de la manière la plus naturelle possible.

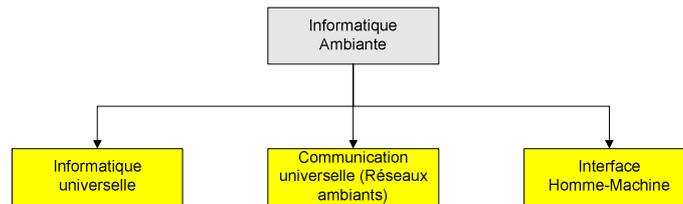


Figure 1.2. Composantes de l'Intelligence Ambiante.

L'intelligence ambiante nous promet un monde parsemé de petits éléments électroniques, pas coûteux, interconnectés, autonomes, sensibles au contexte et ayant un certain degré d'intelligence, tout cela dans notre environnement quotidien qu'il soit personnel ou professionnel (dans nos voitures, dans les bâtiments, dans les arbres, dans la rue, etc.). Leurs utilités seraient multiples : de la prévention (incendies, accidents) à l'assistance (guidage, contrôle à distance) en passant par le confort (cf. l'exemple de la Figure 1.1). Une de leur grande qualité serait leur totale transparence : ils seraient présents, mais complètement invisibles à nos yeux, l'interaction avec eux devrait être aussi transparente.

L'ISTAG (IST Advisory Group) [ISTAG] a publié en 2001 un document intitulé : « des scénarios pour une intelligence ambiante en 2010 ». Il regroupe un ensemble de quatre scénarios, montrant ce que pourrait être un monde de ambiant. Le premier scénario « Maria, road warrior », raconte la facilité de voyager grâce à l'intelligence ambiante. Celle-ci permet d'éviter les formalités aux frontières, dialoguant toute seule avec la douane, d'utiliser une voiture louée sans besoin de clés, qui de plus comporte un système de guidage automatique. La chambre d'hôtel est personnalisée (température, musique, luminance). Les trois autres scénarios sont intitulés : « *Dimitrios and the digital me (D-Me)* », « *Annette and solomon in the ambient for social learning* » et « *Carmen : traffic, sustainability and commerce* ».

1.2.1. Problématiques propres à la recherche en intelligence ambiante

L'intelligence ambiante n'est pas réellement un domaine de recherche en soi. Elle se situe à la jonction de plusieurs domaines de recherche, souvent peu habitués à coopérer. Du fait des nombreux domaines auxquels l'intelligence ambiante fait appel, seuls des grands organismes sont aptes à mener des recherches sur le sujet. Ainsi, des consortiums se sont mis en place depuis quelques années entre

laboratoires et grandes entreprises afin de promouvoir la recherche dans ce domaine (projet ITEA Ambience [AMB] par exemple).

Ces domaines sont cependant organisés en trois axes principaux [BAS 03] :

- Les agents ambiants de l'intérieur (informatique universelle) ;
- Interaction entre agents ambiants numériques (réseaux ambiants) ;
- Interface entre agents humains et agents ambiants (interface homme-machine).

1.2.1.1. *Les agents ambiants de l'intérieur*

Un système ambiant est constitué généralement de plein de petits systèmes interconnectés. Ils doivent être petits, peu coûteux et aussi simples que possible. Ces aspects très particuliers aux systèmes ambiants sont traités essentiellement au niveau hardware et concernent les domaines de recherche suivants : l'architecture des machines (électronique, énergétique, nanotechnologies, etc.) et les agents logiciels au sens large (IA, logique, etc.). Les objets communicants et intelligents doivent parfaitement s'intégrer et s'adapter à la vie quotidienne des personnes. Un bon exemple est celui de la caméra dans le film « Minority Report » qui en analysant la rétine de l'œil de l'acteur, elle arrive à identifier et lui envoyer en fonction de ses habitudes de consommation une publicité ciblée.

1.2.1.2. *Interaction entre agents ambiants numériques (réseaux ambiants)*

Cet axe concerne le concept de la communication universelle et donc le fait de connecter « tout à tout » et rendre communicants tous les agents ambiants. Ces agents pourront transmettre de l'information par l'intermédiaire d'un support de communications sans fil. L'idée de l'informatique universelle peut ainsi se combiner avec celle de la communication universelle, traitement et transmission d'information devenant partie intégrante de tous les objets de la vie courante. C'est, ne l'oublions pas, en ayant en vue de telles applications potentielles que l'espace d'adressage du protocole IPv6 a été dimensionné.

Un des premiers objectifs est donc de généraliser et banaliser les réseaux de communications sans fil et de rendre toute la technologie qui est derrière invisible à l'utilisateur. Un deuxième objectif est de lui rendre l'accès à l'information plus transparent vis à vis du lieu et du contexte actuel.

Pour atteindre ces objectifs, une partie importante de la recherche s'intéresse spécialement aux réseaux locaux et réseaux personnels sans fil (WLAN, WPAN), les réseaux ad hoc et les réseaux de capteurs. Une autre partie s'intéresse plus spécifiquement aux architectures de systèmes logiciels distribués visant à permettre l'accès à l'information et aux services depuis tout terminal, en tout lieu. Ces recherches traitent les architectures de systèmes distribués (ou middleware) ; ce qui

requiert notamment la définition de standards (UpnP, HAVi et JINI par exemple) permettant l'interopérabilité entre les constituants d'un réseau ambiant.

C'est cet axe qui nous intéresse dans ce chapitre et sera donc détaillé dans la section 3.

1.2.1.3. Interface entre agents humains et agents ambiants numériques

Enfin, le troisième axe concerne les domaines étudiant les interactions entre les êtres humains, et les agents ambiants. En particulier, le domaine de conception des IHM, le traitement automatique du langage ainsi que les aspects sociologiques des relations entre la société humaine et la société numérique. Le but est que cette interaction soit plus conviviale et par conséquent plus naturelle.

1.3. Réseaux ambiants

Le réseau ambiant, comme le montre la Figure 1.3, est un environnement spontané, qui permet à des utilisateurs (terminaux de n'importe quels types) d'accéder à des services riches et composables au travers d'un ou plusieurs réseaux d'accès fixes ou sans fil (intégration des infrastructures filaires et non filaires). Ce type de réseau doit fournir une connectivité globale et s'affranchir de sa nature informatique pour ne plus laisser transparaître qu'un ensemble de fonctionnalités accessibles de manière intuitive.

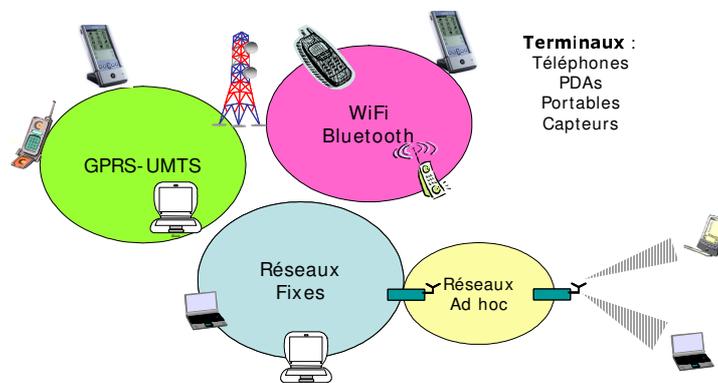


Figure 1.3. Réseaux ambiants.

Le fait que ce réseau soit « ambiant » implique qu'il doit également assister l'utilisateur à l'aide d'un ensemble de fonctionnalités s'adaptant à ses préférences, à son emplacement courant, au contexte courant et aux capacités de son terminal. Pour

réaliser de tels objectifs, plusieurs aspects sont à prendre en considération [AND 03] :

– *les terminaux sans fil* : on trouve de plus en plus d'appareils dans notre vie quotidienne (téléphone, PDA - Personal Digital Assistant, capteur, etc.) reliés par l'intermédiaire de différents types de réseaux souvent sans fil. Plusieurs travaux sont en cours afin de permettre de rendre ces terminaux moins coûteux, plus simples d'utilisation, plus petits et consommant moins d'énergie. Nous verrons dans la section 3.3 une catégorie de ces terminaux : les capteurs.

– *les liaisons* : les réseaux ambiants utilisent des liaisons de différents types et différentes caractéristiques (largeur de bande, délai, couverture). Actuellement, différents réseaux coexistent sans une vraie intégration. Les terminaux auront le choix entre différentes technologies filaires (DSL par exemple) ou sans fil telles que les WLAN (802.11b, 802.11a, 802.11g), les WPAN (Bluetooth, 802.15) ou l'UMTS/GPRS. Nous allons présenter ces différentes technologies sans fil dans la section 3.1.

– *l'intégration des réseaux ambiants* : l'utilisateur, profitant d'une connectivité omniprésente offerte par les réseaux ambiants, exige un bon fonctionnement des applications en dépit de son déplacement d'un endroit à un autre ou lors d'un changement de terminal. Le réseau doit négocier des communications au nom de l'utilisateur et configurer les services découverts tout en considérant les contraintes QoS de l'application. Le processus entier devrait être conçu avec une intervention minimale de l'utilisateur. Toutefois l'intégration de ces réseaux ambiants, la gestion de la mobilité (handover vertical entre ces différentes technologies), la gestion d'une qualité de service et la sécurité demeurent toujours des questions ouvertes. Ces problématiques sont détaillées dans la section 3.4.

– *les réseaux ad hoc* : la plupart des réseaux sans fil sont basées sur une infrastructure fixe. Pour prolonger la couverture, de nouvelles solutions de communication sans fil sont en train de naître. Parmi ces principales solutions, et qui éliminent le besoin d'infrastructure fixe pour communiquer, on trouve les réseaux ad hoc. L'ambition vouée des réseaux ad hoc est d'étendre les notions de mobilité pour permettre l'accès à l'information et à la communication « n'importe où et n'importe quand ». Un des grands challenges dans de tels réseaux est le routage puisque chaque station peut être mise à contribution par d'autres stations pour effectuer le routage de données. Les réseaux ad hoc sont étudiés dans la section 3.2.

– *la découverte de service* : une fois qu'un réseau ambiant est mis en place, il devrait alors offrir un ensemble de services. Les appareils, dans un réseau ambiant, peuvent proposer leurs services tandis que d'autres peuvent découvrir quels services sont disponibles. Ces aspects sont étudiés dans la section 3.5.

1.3.1. Les liaisons sans fil

Les terminaux dans un environnement ambiant ont le choix entre différentes technologies sans fil. Nous allons dans ce paragraphe parler des réseaux cellulaires GPRS/UMTS, des micro-réseaux, communément appelés réseaux locaux sans fil (Wireless LAN - WLAN) et les nanoréseaux, mieux connus sous le nom de réseaux personnels sans fil (Wireless Personal Area Network - WPAN).

1.3.1.1. GPRS/UMTS

1.3.1.1.1. GPRS

Le réseau GPRS (General Packet Radio Service) est une évolution du GSM pour le mode paquet. Il se superpose au réseau GSM : il tire profit de la même interface radio mais possède un nouveau réseau cœur adapté au transfert de paquet. L'idée est d'utiliser des slots libre de la trame TDMA du GSM pour transporter des paquets. Le débit théorique varie de 9.6 à 171.2 Kbps selon le nombre de slot dédié au mode paquet. Mais en pratique, pour différentes raisons, le débit utile est d'environ 10Kbps vers le réseau et de 30 à 40 Kbps en réception. Le service GPRS permet des connexions point-à-point en mode connecté ou non et multipoint en mode broadcast ou multicast. Il offre un accès standardisé à Internet ainsi qu'une taxation au volume de données échangées.

Le GSM et le GPRS peuvent être associé à EDGE : un nouveau système plus performant de modulation de l'interface radio. Les débits bruts sont alors trois fois supérieurs. Mais le déploiement de EDGE est plus coûteux : les modifications matérielles sont plus importantes et peuvent réduire la portée des stations de base BTS (Base Transceiver Station). Le E-GPRS est l'application principale d'EDGE : il respecte le cahier des charges de la troisième génération pour des coûts moindres que l'UMTS. Il se pose alors comme une solution de transition vers la troisième génération.

1.3.1.1.2. UMTS

La troisième génération de réseau mobile n'est pas encore définitivement définie. L'organisme de normalisation UIT (Union Internationale de Télécommunications) a lancé un programme mondial sous forme d'un appel à proposition, l'IMT 2000, pour définir une norme mondiale. L'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) est une des propositions retenues, et est soutenue entre autres par l'Europe et le Japon (3GPP). Les Etats-Unis soutiennent eux le CDMA 2000.

L'UMTS, dans sa version actuelle, utilise le réseau cœur du GSM/GPRS : cela correspond à un souci de compatibilité et de rentabilité. L'architecture reste

globalement la même. Le domaine utilisateur reste composé d'un terminal avec une carte à puce (U-SIM). Les différences premières se trouvent dans le domaine radio : les antennes ou stations de base sont appelées Node B (au lieu de BTS) et les concentrateurs de Node B sont des RNC (BSC - Base Station Controller).

Les débits théoriques ont bien sûr augmenté : de 144 Kbps en campagne jusqu'à 2 Mbps pour une mobilité faible avec de bonnes conditions radio (en pratique ils sont inférieurs). Mais cette version de l'UMTS, la release 99, est considérée comme trop lourde et les suivantes visent à réduire cette complexité. À terme, la troisième génération ne devrait plus se baser sur l'architecture de la deuxième génération mais progressivement sur une architecture tout-IP. Le Node B, la passerelle vers le RTC ainsi qu'un certain nombre de serveurs seront interconnectés directement sur un même réseau IP.

1.3.1.2. *Micro-réseaux sans fil (WLAN)*

Un micro-réseau sans fil (WLAN) est un réseau où les stations, le composant, ne sont plus reliées entre elles physiquement mais par l'intermédiaire d'un support sans fil. Même s'il n'y a plus de lien physique entre les différentes stations d'un WLAN, celui-ci garde les mêmes fonctionnalités que les LAN : l'interconnexion de machines capables de partager des données, des services ou encore des applications. Le WLAN n'est pas une alternative au LAN : il n'est pas sensé le remplacer. Plus généralement, le WLAN sera utilisé en tant qu'extension à un LAN déjà existant. Il existe actuellement deux standards WLAN issus de deux différents organismes de normalisation et donc incompatibles entre eux : Hiperlan et IEEE 802.11.

1.3.1.2.1. Les réseaux 802.11

L'IEEE 802.11 [BAI 97] [LAN 99] est le premier standard des WLAN depuis 2001. Il connaît actuellement un grand succès grâce à sa facilité d'installation, ses performances et son coût concurrentiel. Il s'appuie sur la technique MAC de l'IEEE 802, avec toutefois une technique d'accès au canal différente CSMA/CA². Dans la bande sans licence des 2.4 Ghz, ce réseau local sans fil a une architecture cellulaire représentée par la Figure 1.4. Un groupe de stations, généralement un ou plusieurs ordinateurs (portables ou fixes) équipés d'une carte d'interface réseau 802.11, s'associant pour établir des communications entre eux, forme un ensemble de services basiques ou Basic Set Service (BSS). La zone occupée par les stations d'un BSS est une Basic Set Area (BSA) ou une cellule. Les différents AP sont reliés entre eux par n'importe quel réseau filaire ou sans fil.

2. CSMA/CA : Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance.

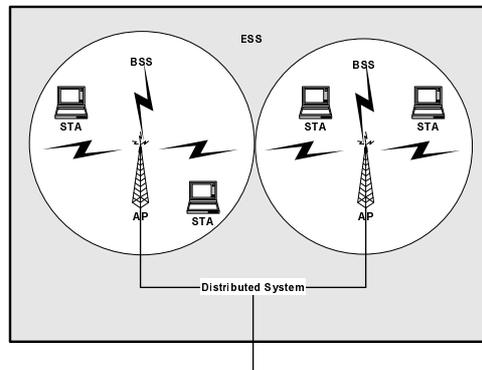


Figure 1.4. Architecture d'un réseau 802.11.

La version la plus répandue est le 802.11b, appelée également Wi-fi (Wireless Fidelity). Cette version offre un débit de 11 Mbps et ne propose pas de réel mécanisme de handover. La sécurité est aussi un point faible : il est possible d'écouter les porteuses et ainsi d'intercepter tout trafic du réseau (des mécanismes de sécurité existent mais sont insuffisants). Mais cette technologie est assez récente et elle évolue rapidement vers des versions de plus en plus performantes. Le 802.11a, appelé également Wi-fi 5, offre une communication jusqu'à 54 Mbps dans la bande des 5 GHz, le 802.11e propose d'introduire de la qualité de service et une meilleure sécurité.

1.3.1.2.2. Hiperlan

Le standard Hiperlan (High Performance Radio LAN), d'origine européenne (ETSI - l'European Telecommunication Standards Institute) est souvent citée comme concurrent direct de l'IEEE 802.11, qui en a repris d'ailleurs certains aspects. Les normalisateurs ont privilégié des interfaces ATM ce qui explique peut être l'avantage pris par 802.11, basé sur Ethernet.

Le standard actuel définit deux types d'Hiperlan utilisant tous les deux la bande des 5 GHz ratifiée lors de la Conférence Européenne des Postes et Télécommunication (CEPT) : Hiperlan 1 et Hiperlan 2. Hiperlan 1 permet d'atteindre des vitesses comprises entre 10 et 20 Mbps alors que Hiperlan 2 devrait atteindre des débits de l'ordre de 54 Mbps. C'est un standard mieux conçu que 802.11 mais il reste cher et tarde à arriver.

1.3.1.3. Nanoréseaux sans fil (WPAN)

Le groupe IEEE 802.15, intitulé WPAN, a été mis en place en 1999 pour réfléchir aux nanoréseaux ou réseaux ayant une portée d'une dizaine de mètres et

ayant comme objectif de réaliser des connexions entre les différents terminaux d'un même utilisateur ou de plusieurs utilisateurs. Le réseau peut interconnecter un PC portable, un téléphone portable, un assistant personnel PDA ou toute autre machine de ce type.

Pour répondre à ces objectifs, des groupements industriels se sont mis en place, comme Bluetooth ou HomeRF.

1.3.1.3.1. Bluetooth

Soutenue par plusieurs milliers de constructeurs, la technologie Bluetooth est en passe de devenir la norme des WPAN. Une puce Bluetooth intègre tous les composants sur une surface de 9mm sur 9mm, et ce pour un coût très faible. Elle utilise des fréquences dans la bande sans licence des 2.4 Ghz. Les terminaux s'interconnectent pour former un piconet (maximum 8 terminaux), qui eux peuvent s'interconnecter pour former un scatternet (cf. Figure 1.5).

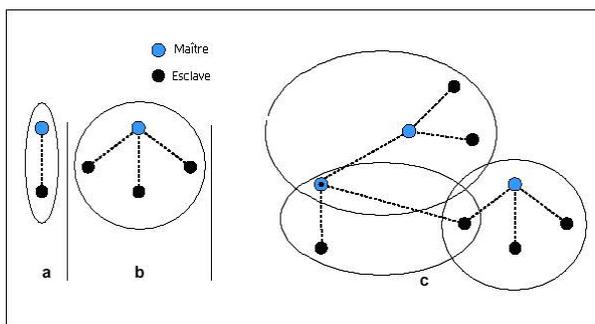


Figure 1.5. Architectures d'un réseau bluetooth (a) piconet à un seul esclave (b) piconet avec plusieurs esclaves et (c) scatternet.

La version 1.0 de Bluetooth permet une communication entre deux terminaux avec un débit maximum de 1 Mbps, ce qui peut être insuffisant pour certaines applications. Le groupe de travail 2.0 a pour but d'augmenter ce débit et de mettre en place des améliorations (handover, optimisation du routage, coexistence avec les autres réseaux de la bande des 2.4 Mhz).

1.3.1.3.2. HomeRF

Une autre technologie, plutôt issue de la domotique, concurrence Bluetooth : HomeRF. Une station de base communique avec différentes entités dans une portée de 50 mètres également dans la bande des 2.4 Ghz. Le débit de base est de 1.6 Mbps mais devrait augmenter. Les caractéristiques sont comparables mais elle est soutenue par beaucoup moins de constructeurs que Bluetooth.

1.3.2. Réseaux ad hoc

Vu le grand succès commercial des réseaux locaux sans fil, le développement d'équipements mobiles n'a pas cessé de prendre de l'ampleur. Grâce aux assistants personnels PDA et aux ordinateurs portables, l'utilisateur devient de plus en plus nomade. Dans ce contexte, de nouvelles solutions de communication sans fil, de plus en plus performantes, sont en train de naître. Parmi ces principales solutions, et qui éliminent le besoin d'infrastructure fixe pour communiquer, on trouve les réseaux ad hoc.

Les réseaux ad hoc sont des architectures un peu particulières de réseaux locaux sans fil, basées sur des technologies comme le Wi-Fi. Mais, alors que chaque utilisateur d'un réseau Wi-Fi se connecte via une borne radio, dans un réseau ad hoc, les terminaux peuvent aussi communiquer entre eux, sans intermédiaire, donc sans infrastructure. Ils peuvent même servir de relais les uns aux autres. C'est une sorte « d'architecture molle », évolutive et automatique. À la clef : souplesse et autonomie, puisque le réseau évolue en fonction des accès et des utilisateurs du moment. Il peut même être totalement indépendant de toute infrastructure. En outre, la portée du signal est démultipliée par le nombre d'utilisateurs, et les débits peuvent être préservés, alors qu'ils sont obligatoirement partagés avec une borne radio Wi-Fi.

Chaque station peut être par ailleurs, mise à contribution par d'autres stations pour effectuer le routage de données. De ce fait, lorsqu'une station émettrice est hors de portée de la station destinataire, la connectivité du réseau est maintenue par les stations intermédiaires. Un exemple de réseau ad hoc est illustré par la Figure 1.6 dans laquelle une station émettrice communique avec une station réceptrice en utilisant les nœuds intermédiaires.

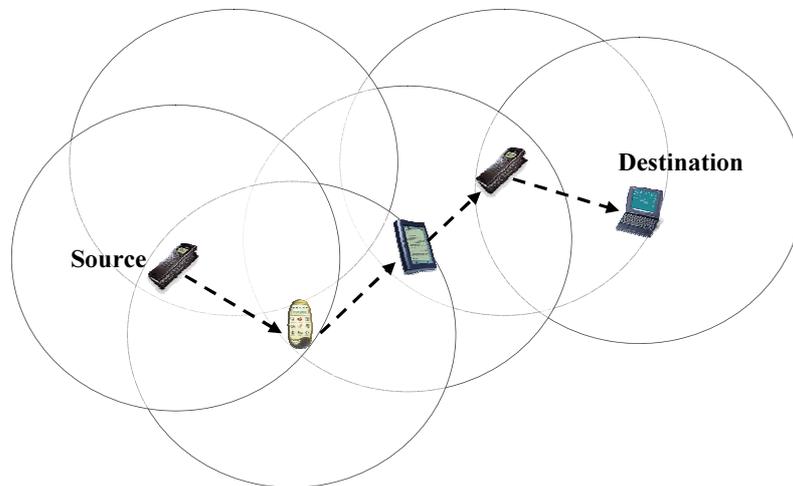


Figure 1.6. Exemple de réseau ad hoc (Les cercles représentent la portée radio de chaque station ad hoc)

Globalement, on distingue deux familles de protocoles de routage ad hoc : les protocoles de routage dits « proactifs », qui anticipent la demande d’acheminement de paquets et les protocoles de routage dits « réactifs » qui réagissent à la demande. Entre ces deux familles, une autre approche commence à émerger, il s’agit des protocoles dits « hybrides » qui s’inspirent à la fois des protocoles proactifs et des protocoles réactifs. Nous donnons, ci-après, une vue globale de ces protocoles et de leurs caractéristiques essentielles.

1.3.2.1. Protocoles proactifs

Les protocoles de routage proactifs pour les réseaux mobiles ad hoc, sont basés sur le même principe des protocoles de routage utilisés dans les réseaux filaires. Les deux principales méthodes utilisées sont la méthode « état de lien » (ou Link State) et la méthode « vecteur de distance » (ou Distance Vector). Ces deux méthodes exigent une mise à jour périodique des données de routage qui doit être diffusée par les différents nœuds de routage du réseau. Les protocoles les plus importants de cette classe sont LSR (Link State Routing) [HUI 95], OLSR (Optimized Link State Routing) [CLA 03] et DSDV (Dynamic destination-Sequenced Distance Vector) [PER 94].

1.3.2.2. Protocoles réactifs

Les protocoles de routage appartenant à cette catégorie, créent et maintiennent les routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d’une route, une procédure de découverte de routes est lancée. Les protocoles les plus importants de cette classe

sont DSR (Dynamic Source Routing) [JOH2 03] et AODV (Ad hoc On demand Distance Vector) [PER 03].

L'ambition vouée des réseaux ad hoc est d'étendre les notions de mobilité pour permettre l'accès à l'information et à la communication « n'importe où et n'importe quand » (Anywhere and Anytime). L'activité du groupe MANET [MANET] de l'IETF³ montre que le développement de ces réseaux sans fil et sans infrastructure est en plein essor. Les industriels imaginent déjà toutes sortes d'applications : militaires bien sûr pour la création de réseaux tactiques mobiles, mais aussi civiles pour les interventions d'urgence, les communications avec les automobiles, la reconfiguration de réseaux sans câblage dans les entreprises ou bien la création de réseaux temporaires autour d'événement. Sans conteste, les atouts majeurs de cette nouvelle génération de réseaux mobiles sont la flexibilité et leur faible coût.

Cependant, cette absence d'infrastructure fixe pose un certain nombre de problèmes non triviaux tels que la sécurité, adoption de politiques de gestion globale du réseau (facturation, offrir de la QoS) et l'autonomie des batteries [SEN 03].

1.3.3. Réseaux de capteurs

La technologie réseaux de capteurs (sensor networks) est encore immature, la miniaturisation insuffisante, mais la tendance est là : des pots de fleurs aux véhicules, des structures des ponts aux chaînes de productions, on trouvera progressivement des capteurs partout, chargés de mesurer un grand nombre de signaux et de les communiquer via des réseaux sans-fil à des centres de contrôle. Parmi les applications de ces réseaux on peut les imaginer partout où la collecte permanente de données peut trouver son utilité : la santé, la guerre, la climatologie, le contrôle de processus et la sismologie. En fait, les capteurs peuvent fonctionner à l'intérieur de grandes machines, au fond d'un océan, dans des endroits biologiquement ou chimiquement contaminés, dans un champ de bataille au delà des lignes ennemies, dans un bâtiment ou une maison.

Pour en arriver là, les défis restent considérables. Pourtant à côté, des laboratoires et des entreprises commencent à émerger dans le secteur.

Mais au fait, qu'est-ce qu'un nœud capteur ? Comme le montre la Figure 1.8, un nœud capteur est constitué de quatre composantes de base : une unité de détection, une unité de calcul, une unité de communication, et une batterie. Il peut y avoir également d'autres composantes telles qu'un système de localisation, un générateur d'énergie et un moteur. L'unité de détection est souvent composée de deux sous-

3. IETF : Internet Engineering Task Force.

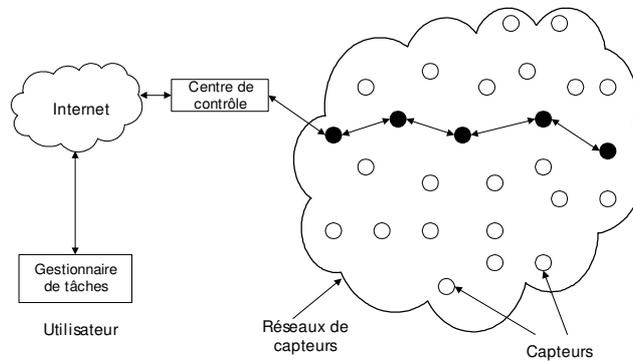


Figure 1.8. Architecture d'un réseau de capteurs.

Les différences entre les réseaux de capteurs et les réseaux ad hoc présentés dans la section précédente sont résumées ci-après :

- Le nombre de noeuds est bien plus important dans les réseaux de capteurs que dans les réseaux ad hoc. Ainsi, dans un réseau de capteurs la distance entre les noeuds est souvent inférieure à 10 mètres et la densité peut dépasser les 20 noeuds/m³ ;
- Les noeuds capteurs sont déployés soit aléatoirement et en masse soit placés un par un par un robot ou un humain ;
- Les capteurs sont amenés à tomber en panne (épuisement de l'énergie, dégâts physiques, interférences, etc.). Cette panne ne devrait pas affecter la tâche globale du réseau de capteurs. Ainsi, la fiabilité et la tolérance aux fautes sont les principales caractéristiques d'un réseau de capteurs ;
- La topologie d'un réseau de capteurs change très fréquemment ;
- Les noeuds capteurs utilisent principalement une communication en diffusion, tandis que la plupart des réseaux ad hoc sont basés sur une communication point-à-point (unicast) ;
- Les capteurs sont des noeuds limités en puissance, en capacités de calcul et en mémoire.

Ainsi contrairement aux réseaux ad hoc, la conception d'un tel réseau de capteur est fortement influencée par différents facteurs tels que la tolérance aux fautes, la mise à l'échelle, les coûts de production qui doivent être minimales, l'environnement, la topologie du réseau, les contraintes matérielles, le médium de transmission ainsi que la consommation de l'énergie.

Les auteurs dans [AKY 02] donne l'architecture en couche d'un réseau de capteurs et qui comprend normalement une couche physique, une couche liaison de

données, une couche réseau, une couche transport et une couche application. Pour les auteurs, la consommation de l'énergie est le principal facteur à prendre en considération pour chacune de ces couches. Par exemple pour le routage, les routes sont souvent tracées selon des métriques basées sur l'énergie. Il énumèrent différents algorithmes dont voici les plus importants :

- Routage basé sur l'énergie résiduelle : dans ce type de routage, la route choisie est celle ayant le maximum des sommes des énergies résiduelles (E_r) des nœuds de la route ;

- Routage basé sur l'énergie de transmission : dans ce type de routage, la route choisie est celle ayant le minimum des sommes des énergies de transmission nécessaires (E_t) des liens de la route.

Les auteurs énumèrent également un ensemble de thématiques de recherche à développer pour chacune de ces différentes couches protocolaires.

Sans conteste les atouts majeurs de ces réseaux sont la flexibilité, la tolérance aux fautes et la rapidité de déploiement. Ces atouts vont rendre ces réseaux faisant partie intégrale de notre vie. Cependant, de nouvelles techniques sont exigées vu la spécificité des contraintes dans ce type de réseaux.

1.3.4. Interopérabilité entre les réseaux ambiants

Les différents réseaux ambiants forment une hiérarchie de cellules de tailles et de débits différents (Wi-Fi, UMTS, Bluetooth, etc.). En un point géographique, un ou plusieurs de ces réseaux seront disponibles. Ce concept de hiérarchie est apparu clairement pour la première fois dans l'article « *the case for wireless overlay network* » [KAT 96]. La promesse consiste à arrêter d'avoir de la concurrence entre ces réseaux et de les faire coexister pour prendre la meilleure technologie pour chaque type d'application. Quant un utilisateur voulant utiliser un service, il choisit non pas l'un des réseaux d'accès disponibles mais le plus adéquat et satisfaisant au mieux ses besoins. Il pourra aussi changer de réseau quand quelque chose de meilleur devient disponible. Ce processus devrait être conçu avec une intervention minimale de l'utilisateur. Cette philosophie a donné naissance à ce qu'on appelle ABC, pour « *Always Best Connected* » ou « utilisation de la meilleure connexion disponible ».

Pour bien illustrer le concept, on prend l'exemple classique que l'on trouve dans la majorité des articles traitant cette problématique et donné par la Figure 1.9 [GUS 03].

Laetitia se réveille le matin, et relie son ordinateur portable à l'Internet en utilisant une connexion DSL (fournie par son fournisseur de service Wanadoo). Elle veut vérifier ses e-mails, et se connecte ainsi à son réseau d'entreprise via une connexion VPN (*Virtual Private Network*). Elle peut ainsi lire et envoyer des e-mails.

Laetitia commence un téléchargement sur son ordinateur portable, mais elle réalise qu'elle est en retard pour une réunion au travail. Elle débranche son ordinateur portable du modem DSL et sort de la maison. Quand l'ordinateur portable est débranché du DSL, il commute automatiquement vers le réseau d'accès disponible, qui s'avère être GPRS (fourni par Orange). La connexion VPN est maintenue, et le téléchargement continue.

Dans le métro parisien, Laetitia démarre une conversation en NetMeeting avec des collègues en Hollande, en utilisant son PDA. Le PDA est relié en utilisant GPRS. En raison des capacités limitées du PDA et du réseau GPRS, NetMeeting s'adapte et donne accès à des services de voix/texte seulement.

Quand Laetitia arrive au bureau, elle transfère la session NetMeeting de son PDA à son ordinateur portable, qui est maintenant relié au WLAN du réseau d'entreprise. En raison des capacités de l'ordinateur portable et du WLAN qui sont bien meilleures, NetMeeting s'adapte en ajoutant un service vidéo.

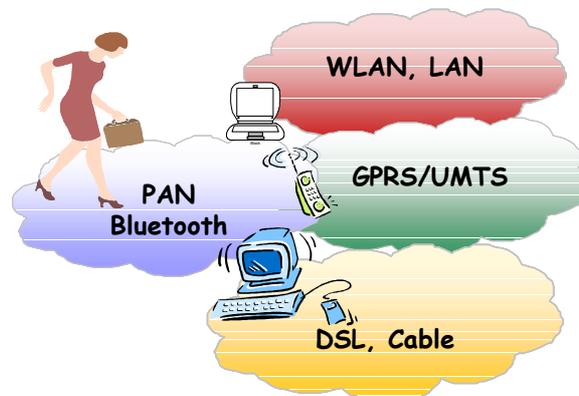


Figure 1.9. Scénario applicatif du concept ABC.

Le concept ABC permet ainsi une meilleure connectivité de la personne en utilisant les terminaux et les technologies d'accès les plus adaptés aux besoins et au contexte. Cependant, un scénario ABC, où on permet à une personne de choisir les meilleurs réseaux d'accès et terminaux disponibles, génère une grande complexité non seulement technique, mais également en termes de politiques entre les différents

opérateurs d'accès et fournisseurs de service. Ainsi, un certain nombre d'aspects doivent être considérés [GUS 03] : l'expérience d'utilisateur, les rapports/accords entre ces opérateurs d'accès et les fournisseurs de service et les solutions techniques pour le terminal et pour le réseau.

1.3.4.1. *Expérience utilisateur*

L'expérience d'utilisateur concerne la manière de fournir le service ABC aux utilisateurs. Plusieurs points ont été identifiés [GUS 03] : (i) l'abonnement ou le paiement du service ABC, (ii) la remise de l'information, (iii) la gestion de la mobilité, et (iv) l'interaction avec l'utilisateur.

– *abonnement* : le scénario le plus simple est que l'utilisateur ait seulement un seul abonnement à un opérateur d'accès, ce qui va simplifier largement la facturation. Ainsi, un identificateur unique est associé à l'utilisateur pour tous les réseaux ambiants visités. Ceci est similaire au système d'itinérance (roaming) dans les réseaux cellulaires. En revanche, ça implique que c'est les réseaux d'accès qui vont communiquer l'information d'authentification et d'autorisation par le biais d'une infrastructure AAA (Authentication, Authorization and Accounting) adéquate.

– *remise de l'information* : une grande partie de l'expérience utilisateur est liée aux comportements de l'application. Les applications doivent s'adapter aux changements de l'environnement de sorte que la remise de l'information soit la plus rapide et ajustée aux capacités du terminal et à la technologie du réseau d'accès en optimisant la présentation de l'information. Les applications peuvent, par elles-mêmes ou en utilisant le profil utilisateur, demander une certaine qualité de service (QoS) afin de fournir une exécution optimale.

– *gestion de la mobilité* : sous sa forme la plus simple, le service ABC fournit à l'utilisateur la possibilité d'accéder à différentes technologies de réseau mais sans aucune gestion de mobilité derrière. Ainsi, un autre service à considérer consiste à offrir la possibilité à un terminal de se déplacer entre les différentes technologies, tout en maintenant les connexions en cours. C'est ce qui est appelé un handover vertical et fait l'objet de la section 3.4.3. D'autres services pourraient également permettre à l'utilisateur de transférer une session à partir d'un terminal à un autre, sans aucune perte de données ni devoir remettre en marche l'application (cf. l'exemple de Laetitia donné ci-dessus).

– *interaction avec l'utilisateur* : l'utilisateur devrait être équipé d'outils fournissant les informations ABC nécessaires en lui donnant également la possibilité de changer l'accès manuellement par exemple. Ces outils doivent être très simples et faciles à utiliser par une personne non experte.

1.3.4.2. *Rapports/accords entre les acteurs ABC*

L'utilisateur peut passer d'un réseau à un autre. Ceci implique qu'il y est des accords entre les opérateurs d'accès pour gérer cette itinérance, des accords entre l'opérateur d'accès et le fournisseur de service, accords entre l'opérateur d'accès et le réseau d'entreprise et entre d'opérateur et/ou le fournisseur de service ABC. Un autre point à considérer est la gestion des abonnements, des profils utilisateurs et des AAA (Authentication, Authorization and Accounting).

1.3.4.3. *Solutions techniques pour les terminaux et pour les réseaux*

Parmi les entités affectées lors de la mise en place d'une solution ABC on trouve les terminaux, les serveurs réseaux, les applications et les services. En fait, l'utilisateur aurait besoin d'un terminal plus intelligent et ayant la capacité d'accéder à plusieurs réseaux : un terminal multi-interfaces, appelé aussi multi-modes. Certains travaux [KAT 98] proposent de n'avoir qu'une seule interface parmi celles présentes qui communique à un instant donné, afin d'optimiser le temps de latence de changement de réseau. D'autres travaux plus récents traitent de la réception simultanée de données sur des interfaces différentes. Cette approche est donc techniquement possible, mais elle pose certains problèmes comme par exemple la consommation de la batterie.

On trouve différentes architectures physiques pour réaliser ces terminaux multi-interfaces [ARE 01], [KON 00]. La plus simple consiste à disposer, comme le montre la Figure 1.10 (a), différentes interfaces radios en parallèle. Mais de cette façon, le terminal n'est pas du tout évolutif : il ne peut s'adapter à l'arrivée d'un nouveau réseau. À l'opposé, et comme le présente la Figure 1.10 (c), une seule interface programmable peut se connecter sur n'importe quelle fréquence avec n'importe quel traitement du signal reçu. Cette solution est évidemment la plus flexible. Une solution intermédiaire existe et est présentée dans la Figure 1.10 (b) : un nombre fixe de récepteur de radio-fréquence est piloté par une unique unité de traitement du signal, configurée par les paramètres nécessaires. Ces différentes approches sont encore actuellement discutées selon des critères économiques, de performances et d'adaptabilité. Un critère capital est la consommation d'énergie, qui est primordiale dans les terminaux portables [STE 96].

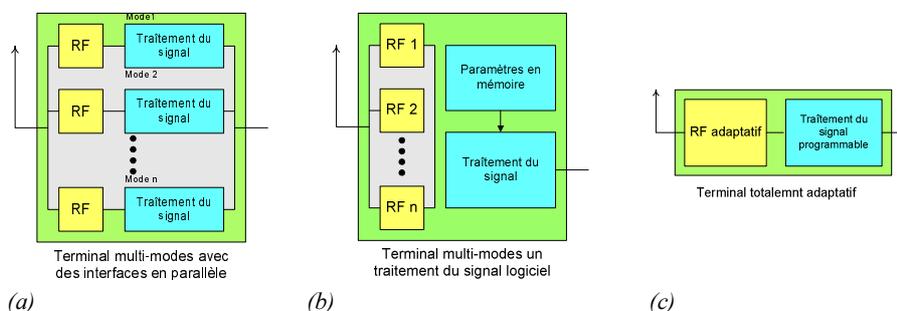


Figure 1.10. Les différentes architectures de terminaux multi-interfaces.

On appelle le changement d'interface un handover vertical : le terminal change de réseaux d'accès sans forcément changer de position géographique comme c'est le cas dans le handover classique, dit horizontal (changement de station de base dans une même technologie d'accès). Ce changement doit s'effectuer de manière transparente à l'utilisateur, sans perturbation de ses services en cours.

Plusieurs travaux ont été réalisés. Le premier article sur ce sujet [KAT 98] expose les différents problèmes à prendre en compte : temps de latence, problème d'énergie lié aux interfaces devant rester active, la surcharge, etc. Cette étude considère le meilleur réseau comme le plus bas dans la hiérarchie, c'est à dire celui possédant le plus grand débit. Mais le choix du meilleur réseau est plus complexe et doit prendre en compte d'autres critères. C'est l'objet d'un deuxième article [WAN 99] qui propose de différencier l'élection du meilleur réseau et le mécanisme de handover. Après avoir récolté les paramètres sur les différents réseaux disponibles et les préférences de l'utilisateur, le terminal exécute une fonction de coût pour chaque réseau et retient le meilleur. L'utilisateur intervient très peu : il privilégie seulement certains aspects comme le coût ou la performance. Mais les besoins des applications en terme de paramètres de qualité de service ne sont pas pris en compte.

La gestion des interfaces multiples est souvent vue comme un cas particulier de Mobile IP [PER 96], [JOH1 03] ou plus généralement comme un problème de mobilité. Au lieu de n'avoir qu'une adresse IP temporaire par terminal, on en a soit plusieurs, soit une seule adresse multicast temporaire. Ainsi un changement d'interface correspond à un changement d'adresse temporaire. Chaque article [WAN], [KAT 98], [ZHA 98], [CHE 96] définit une extension du protocole Cellular IP, Mobile IP ou un système proche « Mobile IP-like » permettant d'effectuer la gestion multi-interfaces et la gestion de la mobilité.

1.3.5. Découverte de service

Un des objectifs des réseaux ambiants est de permettre à des utilisateurs mobiles d'accéder et de fournir des services indépendamment du temps et de la localisation. Partant de cela, une nouvelle nécessité (fonction) est apparue, celle de découvrir automatiquement et sans intervention externe l'ensemble des services désirés disponibles dans le domaine actuel du terminal mobile. Une nouvelle fonction appelant un nouvel outil, plusieurs projets sont menés en ce sens dans les contextes industriel et recherche, introduisant ainsi les protocoles de découverte de services ou Service Discovery (SD).

Un protocole de découverte de services est un procédé fournissant les mécanismes automatiques et spontanés pour la localisation des services offerts dans un réseau. Il permet aux serveurs de publier, ou notifier, leurs services et aux clients de découvrir ces services réalisant, ainsi, une sorte d'auto configuration nécessaire.

Pour bien illustrer la nécessité des protocoles de découverte de services, on peut donner l'exemple classique que l'on trouve dans chaque spécification de ces protocoles. Imaginons un terminal mobile qui entre dans un réseau pour la première fois et qui souhaite imprimer un document. Il doit donc localiser les imprimantes du réseau, les comparer en fonction de leurs capacités (imprimer des documents postscript, imprimer en couleur, imprimer le plus vite possible, etc.) et en choisir une pour son document. Les protocoles de découverte de services permettent de réaliser cette tâche de localisation, spontanément, sans l'intervention d'un administrateur. La Figure 1.11 illustre l'exemple d'une salle de réunion où un nouveau conférencier souhaite projeter sa présentation et également l'imprimer afin de distribuer des copies aux différents participants de la réunion.

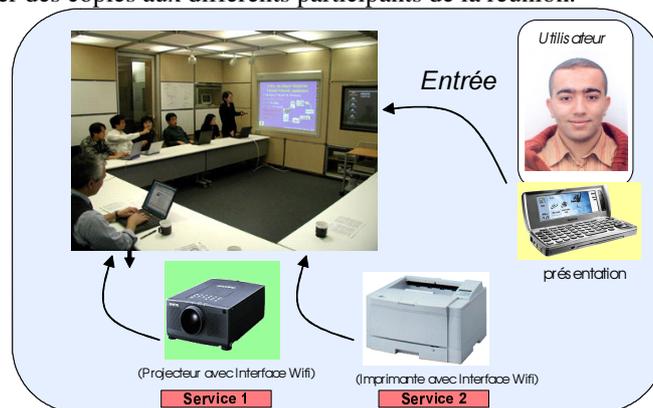


Figure 1.11. Découverte d'une imprimante et d'un vidéo-projecteur.

Les protocoles de découverte de services éliminent la nécessité de connaître le nom ou l'adresse de l'équipement abritant le service. L'utilisateur n'a plus qu'à nommer le service, en donnant son type, et à fournir une liste d'attributs exprimant ses souhaits. Le protocole de découverte s'occupera de faire le lien entre cette description et l'adresse du service adéquat, fournissant, ainsi, un mécanisme de configuration automatique pour les applications dans le cadre des réseaux locaux.

Il existe différentes approches pour la conception des protocoles de découverte de service : (i) approche réactive et (ii) approche proactive.

1.3.5.1. *Approche Réactive*

C'est un concept « à la demande », où le processus de découverte ne s'effectue que sur une requête du client demandant un service précis. Nous trouvons deux variantes : (i) une approche distribuée, et une (ii) une approche centralisée.

Dans l'approche réactive distribuée, une requête est diffusée sur le réseau (en multicast par exemple) spécifiant les souhaits de l'utilisateur demandant un service particulier. Du côté service, un agent service, restant à l'écoute permanente du réseau, entend cette demande et y répond (unicast) dans le cas, bien sûr, où elle correspond au service qui l'implémente. Le client n'a plus qu'à faire son choix parmi toutes les réponses obtenues. Cette méthode est plus adaptée aux petits réseaux, pas très étendus. Elle présente les inconvénients liés à la diffusion dans les réseaux sans fils.

L'approche réactive centralisée, quant à elle, nécessite la présence d'un « répertoire des services ». Chaque service disponible s'enregistre auprès de ce répertoire par l'envoi d'une requête d'enregistrement au démarrage. Dès que le client a besoin d'un service spécifique, il lui suffit de notifier ce nœud central de sa demande pour recevoir l'information désirée et ainsi pouvoir communiquer avec le service adéquat. Dans le cas où plusieurs services sont disponibles, le choix peut être fait soit au niveau du répertoire soit par le client. Comme toute technologie implémentant la philosophie centralisée, cette approche présente l'inconvénient des pannes.

Les protocoles de découverte de service SLP (Service Location Protocol) et Jini sont des exemples de protocoles réactifs.

1.3.5.2. *Approche proactive*

C'est une approche dite « préparée » qui anticipe les requêtes des clients. Chaque agent de service diffuse périodiquement un message indiquant sa présence sur le réseau. Ainsi, à chaque instant, tout élément présent dispose d'une liste complète et

mise à jour des services disponibles. Tout nouveau client dans le réseau recevra cette liste sur simple écoute et pourra donc, utiliser les services directement au moment venu, sans obligations supplémentaires.

Cette approche est distribuée et se distingue par des temps de réponse très courts. En effet, dès que l'utilisation d'un service est nécessaire, il suffit de consulter la liste en local pour l'obtenir. Mais en contre partie, elle consomme beaucoup de bande passante diminuant, ainsi, les performances du réseau.

Le protocole de découverte de service UPnP (Universal Plug and Play) est un exemple de protocoles proactifs.

En résumé, si notre objectif est d'avoir des temps de réponses courts, cette approche semble la plus adaptée. Par contre, si notre souci principal est d'économiser la bande passante, le mieux est d'utiliser une méthode réactive.

1.4. Conclusion

L'intelligence ambiante est un joli nom, représentant un nouveau paradigme de la technologie de l'information et regroupant une multitude de technologies. Les personnes dans un monde ambiant sont assistées par un environnement numérique sensible, adaptatif et responsable de leurs besoins, habitudes, mouvements et émotions.

L'intelligence ambiante se situe ainsi à la jonction de plusieurs domaines de recherche souvent peu habitués à coopérer (IA, IHM, télécoms, etc.), et que nous avons introduit dans ce chapitre. Ce nouveau paradigme met en œuvre des technologies de communication innovantes souvent sans fil permettant de former des réseaux ambiants qui contribueront à l'amélioration de la qualité de vie des personnes. Les futurs réseaux de communication vont fournir une connectivité globale et vont ainsi assister, de façon transparente, l'utilisateur avec des services très avancés. Ils vont banaliser toute la technologie qui est derrière et la rendre invisible à l'utilisateur. L'accès à l'information et le contrôle de l'environnement seront plus transparents vis à vis du lieu, du terminal et du contexte (nouveaux interfaces utilisateur, temps de réponse assez rapide, la prise en charge de différents types de terminaux sans fil, disponibilité et sécurité, etc.).

Ce chapitre décrit différents aspects des réseaux ambiants où la satisfaction de l'utilisateur est le facteur le plus dominant : les réseaux de communication sans fil et leurs intégration, la gestion de la mobilité, les réseaux ad hoc, les réseaux de capteurs ainsi que la découverte des services disponibles. Une des grandes qualités de ces réseaux serait leur totale transparence : ils seraient présents, mais

complètement invisibles à nos yeux, l'interaction avec eux devrait être aussi transparente.

Afin d'atteindre tous ces objectifs un peu « futuristes » et promis par les réseaux ambiants, plusieurs questions demeurent encore ouvertes. On attend d'eux qu'ils puissent offrir une connectivité globale et variée avec un coût minimal, une plus grande capacité et des garanties de qualité de service. Les terminaux également devraient être plus sophistiqués, plus simples d'utilisation et munis d'interfaces plus naturelles, multi-modes et auto-configurables. Rajouter ces multiples fonctionnalités procure évidemment un ensemble de challenges et une complexité assez considérable.

1.5. Références

- [AKY 02] I. F. AKYILDIZ, W. SU, Y. SANKARASUBRAMANIAM, AND E. CAYIRCI, « A survey on sensor networks », *IEEE Communications Magazine*, vol. 40(8), pp. 102-114, august 2002.
- [AMB] Projet ITEA Ambience, <http://www.extra.research.philips.com/euprojects/ambience/>.
- [AND 03] ANDRZEJ DUDA, « Ambient Networking », *Smart Object Conference - SOC'2003*, Grenoble, France, may 2003.
- [ARE 01] ARETZ K., HAARDT M., KONHÄUSER W. AND MOHR W. « The future of wireless communications beyond the third generation », *Computer Networks*, vol. 37(1), pp. 83-92, september 2001.
- [BAI 97] BRIAN P. CROW, INDRA WIDJAJA, JEONG GEUN KIM, AND PRESCOTT T. SAKAI, « IEEE 802.11 wireless local area networks », *IEEE Communication magazine*, pp. 116-126, september 1997.
- [BAS 03] Nicolas Baskiotis et Nicolas Ferey, « Cours en introduction à l'intelligence ambiante », 2003.
- [CHE 96] Cheshire S. and Baker M., « Internet Mobility 4x4 », *ACM SIGCOMM*, pp. 318-329, Stanford, august 1996.
- [CLA 03] T. CLAUSEN (ED.), AND P. JACQUET (ED.), « Optimized Link State Routing Protocol », MANET working group, IETF, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>, october 2003.
- [GUS 03] EVA GUSTAFSSON AND ANNIKA JONSSON, « Always Best Connected », *IEEE Wireless Communications*, pp. 49-55, february 2003.
- [HUI 95] C. HUITEMA, *Routing in the internet*, Prentice Hall, 1995.
- [ISTAG] ISTAG - IST Advisory Group, <http://www.cordis.lu/ist/istag.html>.
- [JOH1 03] Johnson D. and Perkins C., « Mobility support in IPv6 », Mobile IP Working Group, IETF Internet-Draft, draft-ietf-mobileip-ipv6-24.txt, june 2003.

- [JOH2 03] D. B. JOHNSON, D. A. MALTZ, Y.-C. HU, « The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR) », MANET working group, IETF Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-09.txt, april 2003.
- [KAT 96] KATZ R.H. AND BREWER E.A. « The case for wireless overlay networks », *Proc. SPIE Multimedia and Networking Conference (MMNC'96)*, San Jose, CA, pp. 77-88, january 1996.
- [KAT 98] KATZ R.H. AND STEMM M. « Vertical Handoffs in wireless overlay networks », *Mobile Networks and Applications*, vol.3, no. 4, pp. 335-350, 1998.
- [KON 00] KONHÄUSER W. AND MOHR W. « Access network evolution beyond third generation mobile communications », *IEEE Communication Magazine*, december 2000.
- [LAN 99] LAN/MAN Standards Committee, ANSI/IEEE Std. 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, *IEEE Computer Society*, 1999.
- [MANET] IETF MANET Working Group (Mobile Ad hoc NETWORKS), www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html.
- [PER 94] C. E. PERKINS AND P. BHAGWAT, « Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing for mobile computers », *ACM SIGCOMM'94*, pp.234-244, october 1994.
- [PER 96] Perkins C., « IP Mobility Support », IETF RFC 2002, october 1996.
- [PER 03] C. E. PERKINS, E. M. BELDING-ROYER, AND S. R. DAS, « Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing », MANET working group, IETF, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>, july 2003.
- [STE 96] STEMM M., GAUTHIER P., HARADA D. AND KATZ R.H., « Reducing power consumption of network interfaces in hand-held devices », *Proc. 3rd Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC-3)*, september 1996.
- [SEN 03] S. SENOUCI, « Application de techniques d'apprentissage dans les réseaux mobiles », thèse de doctorat de l'Université de Pierre et Marie Curie, Paris, octobre 2003.
- [WAN] Wang H. J., KATZ R. H. AND GIESE J., « Policy-enabled handoffs across heterogeneous wireless networks », *Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA '99)*, New Orleans, LA, february 1999.
- [ZHA 98] Zhao X. and al., « Flexible network support for mobility », *MOBICOM'98*, pp. 145-156, october 1998.