

# l'intelligence ambiante à la robotique ubiquitaire Principes, technologies et défis

---

## Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>L'intelligence ambiante</b>	<b>5</b>
<b>2.3</b>	<b>Composition des environnements d'Intelligence Ambiante</b>	<b>7</b>
2.3.1	Artefacts intelligents	7
2.3.2	Accessoires et Vêtements Intelligents	8
2.3.3	Implants intelligents	9
2.3.4	Identification	10
2.3.5	Localisation	11
2.3.6	Robots de services	13
2.3.7	Vers la robotique ubiquitaire	16
<b>2.4</b>	<b>Défis de l'intelligence ambiante et de la robotique ubiquitaire</b>	<b>17</b>
<b>2.5</b>	<b>Discussion et objectifs de la thèse</b>	<b>22</b>

---

## 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous introduisons tout d'abord les paradigmes de l'intelligence ambiante et des systèmes ubiquitaires, en considérant leurs intérêts pour l'émergence d'une nouvelle génération de robots de service appelés robots ubiquitaires. Dans la suite du chapitre, nous dressons un panorama des technologies actuelles et analysons les défis de la recherche concernant ces systèmes. Enfin, dans la dernière partie, nous esquissons les contours de nos travaux de recherche et synthétisons les objectifs de la thèse en termes d'amélioration des fonctions cognitives des systèmes à intelligence ambiante et les robots ubiquitaires pour la reconnaissance du contexte et l'adaptation à ce dernier.

## 2.2 L'intelligence ambiante

La diversité des outils numériques utilisés dans nos activités quotidiennes, leur nombre, leur degré de sophistication sont en croissance perpétuelle. Ces

## Chapitre 2. De l'intelligence ambiante à la robotique ubiquitaire : Principes, technologies et défis

---

dispositifs (terminaux de poche ou téléphones à écran tactile, tablettes numériques, etc. ou même robots domestiques) sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne. Ils constituent des outils d'assistance, de service, de communication et d'information, devenus à présent incontournables pour beaucoup d'entre nous.

Ces évolutions technologiques permettent d'imaginer des systèmes intelligents offrant une multitude de fonctions accessibles, à n'importe quel moment, et à n'importe quel endroit, et selon une multitude de modes d'interactions et de média. On parle dans ce cas de systèmes ubiquitaires ou omniprésents. En effet, la particularité de ces systèmes réside dans leur capacité à adapter continuellement et automatiquement la même fonction ou service (par exemple le rappel de rendez-vous), à différents contextes et modes d'usage (affichage d'un message textuel sur le PC de travail de l'utilisateur si ce dernier est sur son lieu de travail, annonce d'un message vocal depuis le téléphone portable de l'utilisateur si ce dernier est dans sa voiture et qu'il est en train de conduire, etc.). Ces systèmes possèdent aussi la propriété de découvrir dynamiquement les objets immatériels (services d'informations divers) ou physiques (robots, capteurs, actionneurs, équipements multimédia, etc.) disponibles dans l'environnement, puis de les exploiter pour fournir des services aux usagers. Dans un tel environnement, le monde réel et le monde virtuel se mélangent pour transformer les dispositifs et équipements que nous utilisons dans notre vie quotidienne en objets communicants offrant pro-activement des services d'assistance à valeur ajoutée. Par exemple, grâce aux technologies d'identification par radio-étiquettes (tags) RFID et aux réseaux de communications sans fil à faible consommation électrique, des objets communicants représentant un capteur, un actionneur ou un objet physique quelconque, deviennent accessibles à large échelle selon le paradigme de l'Internet des objets. Cette déclinaison thématique de l'informatique ubiquitaire est appelée, intelligence ambiante ou Ambient Intelligence (AmI). Le terme intelligence ambiante a été introduit pour la première fois en 1998 par la société Philips dans le cadre d'une analyse prospective sur l'évolution de l'électronique grand public. En 2001, l'ISTAG (Information Societies Technology Advisory Group) a publié un document regroupant un ensemble de quatre scénarii, illustrant ce que pourrait être un monde à "Intelligence Ambiante" à l'horizon de 2010 [38]. L'objectif de ce travail était d'une part, d'alimenter sur un long terme la recherche et d'autre part, d'évaluer les recherches européennes dans ce domaine émergent.

À travers ce paradigme, l'objectif est de créer des environnements ou des écosystèmes intelligents permettant d'améliorer l'environnement de vie des usagers. Ainsi, dans le cadre des applications de maintien à domicile des personnes âgées ou dépendantes, un système à intelligence ambiante (SIAM) peut offrir une multitude de services réactifs ou proactifs permettant d'améliorer la qualité de vie et l'état physique, mental, et le bien-être social des usagers. Ces services peuvent être de plusieurs types : Assistance à la mobilité, assistance cognitive, sécurité, surveillance médicale, maintien du lien social, etc. Il est ainsi possible d'imaginer une multitude

de services comme : Rappeler à l'utilisateur de prendre ses médicaments, envoyer une alarme au corps hospitalier ou aux proches en cas d'accident (chute, intoxication, électrocution, brûlure, complication médicale, etc.), etc. D'autres exemples de services d'assistance au quotidien et agissant sur le long terme peuvent être envisagés pour permettre à l'utilisateur de maintenir une bonne hygiène de vie, afin de prévenir ou réduire les effets d'éventuelles maladies chroniques (coaching d'activités physiques, stimulation cognitives, etc.). D'autres types de services peuvent être conçus comme ceux agissant sur l'environnement pour répondre aux préférences et aux besoins des usagers : Fermer/ouvrir les volets, allumer/éteindre la lumière, régler le confort ambiant, chercher un objet égaré, etc.

Il existe dans la littérature plusieurs définitions qui sont dans le fond assez similaires. Selon l'ISTAG [38], l'intelligence ambiante consiste à créer des environnements capables de prendre en compte les caractéristiques de chaque usager, de s'adapter et de répondre intelligemment à ses besoins spécifiques, d'agir de manière non intrusive et le plus souvent invisible, de permettre à l'utilisateur d'accéder aux services de la façon la plus naturelle et intuitive possible, en exploitant la reconnaissance vocale, gestuelle ou la manipulation d'objets tangibles. Selon *Reignier* [112], l'intelligence ambiante est un paradigme résultant de l'intersection de l'informatique ubiquitaire et de l'intelligence artificielle. L'objectif consiste à exploiter les capacités de perception offertes par tous les capteurs afin d'analyser l'environnement, les utilisateurs et leurs activités, et de permettre au système de réagir en fonction du contexte. Une caractéristique importante de ce paradigme est la faculté d'analyse du contexte et l'adaptation dynamique aux changements de contexte. Ces notions seront développées dans la suite de ce chapitre.

## 2.3 Composition des environnements d'Intelligence Ambiante

Dans ce qui suit, nous dressons tout d'abord un panorama des technologies actuelles permettant de mettre en œuvre des systèmes à intelligence ambiante.

### 2.3.1 Artefacts intelligents

Un artefact intelligent correspond à n'importe quel objet physique fonctionnel de la vie quotidienne associant capteurs, unité de traitement, unité de communication et mémoire. Il est capable de percevoir son environnement, communiquer avec d'autres artefacts et éventuellement réagir selon une base de règles définie a priori. À travers sa capacité d'interaction direct avec un humain, un artefact intelligent peut assister une personne dans ses tâches quotidiennes en lui offrant des modes d'interaction intuitifs [166]. Contrairement aux dispositifs médicaux mobiles, les fonctionnalités médicales supplémentaires des artefacts intelligents ne sont généralement pas visibles de l'extérieur. Dans ce domaine, on peut citer

## Chapitre 2. De l'intelligence ambiante à la robotique ubiquitaire : Principes, technologies et défis

---

l'exemple de *Smart Pillow*, un oreiller intelligent développé par la société Philips. Ce système surveille les paramètres vitaux de l'utilisateur, tels que la température, la respiration, le pouls, et en cas d'urgence ou de maladie, avise le personnel médical [100]. Dans le domaine de l'assistance cognitive, on peut citer les travaux menés au laboratoire DOMUS de l'université de Sherbrooke-Canada. Le domicile est considéré comme une prothèse cognitive capable d'assister une personne ayant des déficits cognitifs (problèmes d'attention, de mémoire, de planification, etc.), par exemple en lui rappelant les tâches à réaliser, ou en l'aidant à gérer son temps ou à se préparer pour des rendez-vous [108]. Nous pouvons citer également les travaux de l'équipe *STARS* de l'*INRIA* sur l'analyse des comportements des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer [154].

Le concept d'artefacts intelligents a été étudié et développé dans des applications autres que les médicales. *Smart Sofa* est un canapé instrumenté qui a été développé par le Trinity College de Dublin-Irlande. Il permet d'identifier les personnes assises dessus et de fournir des services personnalisés basés sur ces informations [68]. Les ustensiles intelligents de cuisine sont des exemples d'artefacts mis en œuvre au Massachusetts Institute of Technology [77] : (i) une casserole, équipée d'une puce, qui indique si elle est trop chaude pour être manipulée ; (ii) une cuillère qui fournit des informations sur la température et la viscosité de la nourriture ; (iii) une bouilloire qui informe l'utilisateur du temps d'attente pour la préparation de son thé [31]. D'autres prototypes d'artefacts intelligents ont été développés dans la même logique comme la tasse de café qui communique le type de café et la température du liquide qu'elle contient ; ou bien encore, la nappe interactive qui permet de saisir une commande dans un restaurant [106].

### 2.3.2 Accessoires et Vêtements Intelligents

Concernant les technologies mobiles pour la santé et l'autonomie, deux grands courants de la recherche sont devenus prédominants au cours des dernières années : Les accessoires intelligents et les vêtements intelligents.

Concernant la première catégorie, l'exemple le plus marquant est le projet Google Glass, une paire de lunettes intelligente qui offre des services de communication et de navigation à l'utilisateur mobile. *Starnner et al.* [43] ont développé *Gesture Pendant*, un pendentif qui reconnaît des gestes prédéfinis de l'utilisateur et exécute des actions de contrôle correspondantes. *Kikin-Gil et al.* ont développé des accessoires intelligents pour permettre la communication non-verbale au sein de petits groupes d'adolescents [61]. Les montres ou bracelets sont des accessoires populaires qui sont de plus en plus utilisées dans des applications de surveillance médicale. Plusieurs modèles de montres intelligentes sont déjà disponibles dans le commerce à l'image de *Actiwatch* de la société Cambridge Technology. Cette montre est équipée d'un accéléromètre miniature qui mesure l'activité physique de son porteur. La combinaison de ce capteur avec d'autres capteurs a permis d'étendre les fonctionnalités

de la montre à la surveillance des troubles du sommeil : Insomnie, humeur, dépense d'énergie, mouvements périodiques des membres pendant le sommeil [71]. Il existe d'autres exemples de montres-bracelets offrant d'autres types de fonctionnalités, telles que la détection de chute<sup>1</sup>, le test de fibrose kystique [5], la mesure de glycémie [141], la surveillance de l'oxygénation du sang [147], l'envoi d'appels d'urgence [159].

Le concept de vêtement intelligent (wearable computing- informatique à porter) repose sur l'idée qui consiste à avoir des ordinateurs miniatures comme partie intégrante des vêtements qui nous habillent ou des accessoires que nous portons. Les vêtements intelligents sont des artefacts portables destinés à accompagner l'utilisateur dans ses déplacements. Dans cette catégorie, on peut citer le projet *Smart Shirt* développé à Georgia Institute of Technology [1], où différents types de capteurs ont été intégrés dans la conception d'une chemise intelligente, pour permettre le suivi de paramètres vitaux comme la fréquence cardiaque, l'électrocardiogramme (ECG), la respiration, la température, etc. [46] et [33]. Un autre exemple de système portable de surveillance de paramètres physiologiques est la veste intelligente (*Smart Vest*) développée par Pandian et al. [99]. Le système permet de surveiller des paramètres physiologiques tels que l'ECG, la pression artérielle, la température du corps et la fréquence cardiaque. Ces paramètres ainsi que la géo-localisation du porteur sont transmis aux stations de surveillance [98]. Certains systèmes sont déjà commercialisés tels que le gilet LifeShirt de la société VivoMetrics. Ce système permet d'effectuer de manière non-invasive une pléthysmographie respiratoire inductive pour surveiller des paramètres cardiorespiratoires (mesure des variations de volume du thorax et de l'abdomen dues aux mouvements respiratoires) [50]. *Actibelt*, est une ceinture intelligente qui est équipée d'un accéléromètre tridimensionnel intégré dans sa boucle. Ce capteur permet d'analyser l'activité physique du porteur sur une longue période [129]. On peut trouver dans la littérature d'autres exemples de vêtements intelligents : Protections actives de la hanche [132], chaussures intelligentes [58], genouillères intelligentes [95].

### 2.3.3 Implants intelligents

Les implants dentaires constituent probablement la forme la plus largement répandue des implants médicaux. Un système de télémétrie et des capteurs sont généralement intégrés à l'intérieur de la bouche du patient dans une dent artificielle ou une couronne. L'un des premiers prototypes d'implants dentaires a été développé dans le cadre du projet Européen Saliwell et était destiné aux patients souffrant de déficience de production de salive. Le prototype, basé sur un capteur de salive, surveille en permanence l'état de sécheresse de la bouche et restaure automatiquement la production de salive naturelle au moyen de l'électrostimulation [131]. Le système IntelliDrug est un autre exemple de prothèse dentaire qui comprend un dispositif automatisé d'injection de doses de médicaments [131]. Cet implant est

---

1. <http://www.cleode.fr>

destiné aux personnes souffrant de pharmacodépendance ou de maladies chroniques. Le projet Européen Healthy Aims vise l'élaboration d'implants médicaux incluant des capteurs et des microsystèmes à l'échelle nano-matériel : Implant rétinien pour restaurer la vision pour des patients atteints de certains types de cécité, implant cochléaire destiné à rétablir l'audition, implant pour la stimulation électrique fonctionnelle (FES) des muscles des membres inférieurs, capteur de glaucome, capteur de pression intracrânienne pour le diagnostic des malades souffrant d'hydrocéphalie, capteur de mouvement pour la surveillance de l'activité physio-électrique de l'organisme<sup>2</sup>.

### 2.3.4 Identification

Parmi les systèmes embarqués capables d'identifier ou de suivre une personne ou un objet, on peut citer l'identification à base de radiofréquences appelée communément RFID (Radio Frequency IDentification). Cette technologie, actuellement mature, connaît une véritable explosion, en particulier grâce aux efforts multiples et continus de miniaturisation des circuits intégrés. Son principe consiste en des radio-étiquettes (tags) RFID qui sont capables d'émettre un signal contenant un identifiant en réponse à une requête envoyée par un lecteur. On distingue deux types d'étiquettes : Les étiquettes passives et les étiquettes actives. Les étiquettes passives (sans batterie ou pile) sont alimentées par le champ électromagnétique généré par le lecteur à l'émission d'une requête. Les étiquettes actives, quant à elles, sont alimentées par une batterie ou une pile. Outre l'identification, les étiquettes actives peuvent potentiellement être utilisées comme télémètres basés sur la mesure de la puissance du signal Radiofréquence. On dénombre quatre bandes principales de fréquences dédiées pour les applications de la technologie RFID : Les basses fréquences, aux alentours de 125 kHz, les hautes fréquences à 13,56 MHz, la bande UHF, entre 800 et 900 MHz et enfin les hyperfréquences avec des fréquences à 2,45 GHz et 5,8 GHz.

La figure 2.1 représente le robot EL-E, un prototype de robot d'assistance développé au Georgia Institute of Technology. L'identification RFID permet au robot de percevoir et de comprendre sémantiquement son environnement, d'interagir avec des utilisateurs et de manipuler des objets identifiés par leurs labels [36]. Des antennes de longue portée sont utilisées pour détecter la présence d'un objet ou d'une personne dans un espace (chambre, cuisine, etc.). Les antennes de courte portée permettent au robot de détecter la présence d'un objet à proximité de sa main.

La figure 2.2 illustre l'instrumentation d'un appartement dans le cadre du projet PEIS Ecology mené par l'université D'Orebro-Suède. Le système utilise une grille de tags RFID passifs sous le parquet pour guider le robot CentriBot. Ce dernier est équipé d'un lecteur de tags RFID, dont l'antenne s'étend depuis la base.

---

2. <http://www.healthyaims.org/>



FIGURE 2.1 – Robot EL-E, équipé d'un lecteur d'étiquettes RFID UHF, remettant une boîte de médicaments munie d'une étiquette RFID à une personne portant un bracelet équipé d'une étiquette (tag) RFID [36].

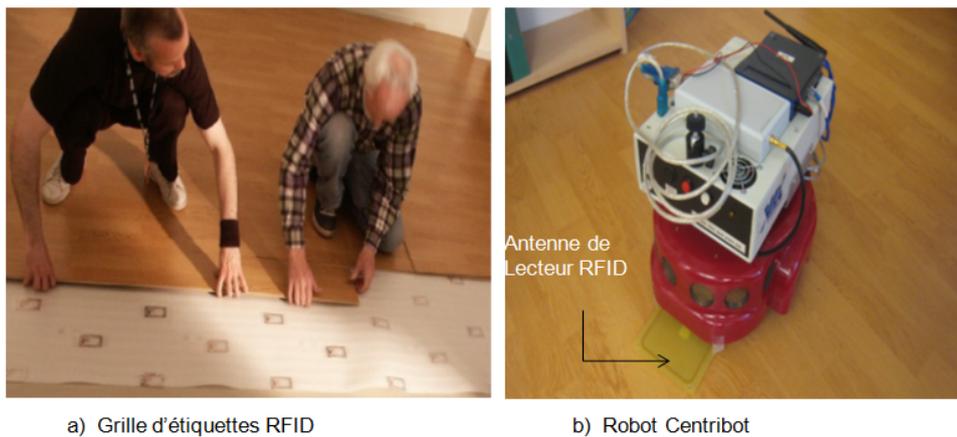


FIGURE 2.2 – Instrumentation du sol d'un appartement par des étiquettes RFID passives [115].

### 2.3.5 Localisation

Dans cette partie, nous nous limitons à l'étude des principaux systèmes de localisation indoor. Dans cette catégorie, on distingue deux types de systèmes [128] :

- Les systèmes WPS (Wifi Positioning Systems) : La localisation par ondes WIFI peut s'effectuer selon différents principes ; le plus simple consiste en une triangulation entre des bornes WIFI. L'un des plus performants en termes de précision utilise la méthode de cartographie ou d'empreinte radio (radio fingerprinting). Parmi les systèmes utilisant ce principe, on peut citer le Système RTLS (Real Time Location

## Chapitre 2. De l'intelligence ambiante à la robotique ubiquitaire : Principes, technologies et défis

---

System) de la société Ekahau qui offre une précision de l'ordre de quelques mètres<sup>3</sup>. La puissance du signal reçu ou RSS (Received Signal Strength) est le paramètre le plus souvent utilisé dans les méthodes de localisation WPS (triangulation, cartographie). Cependant, cette technique fait l'hypothèse que le modèle d'atténuation des lieux (obstacles, murs, etc.) soit bien connu, ou calibré par apprentissage.

- Les systèmes de localisation basés sur les technologies sans fil courte distance. Parmi ces technologies, on peut citer : Bluetooth, Infrarouge, Zigbee, ultra-large bande (Ultra Wideband ou UWB), etc. Les méthodes de localisation utilisées dans les systèmes WPS sont également applicables pour ces systèmes.

Active Badge, est un système de localisation utilisant les ondes infrarouges (IR). Une étiquette portée par une personne émet un signal IR toutes les 10 secondes. Des capteurs placés à des endroits spécifiques du site captent ces signaux et les envoient à un ordinateur en réseau qui estime la position de l'étiquette [150]. Active Badge possède une précision relativement faible de l'ordre de plusieurs mètres. Il est également très sensible à la lumière fluorescente et à la lumière du soleil.

Cricket, un système conçu à l'origine par le MIT, utilise une combinaison des ondes RF (Radio fréquence) et des ondes ultrasons, figure 2.3. Des balises "Cricket beacons" déployés sur le site envoient des ondes RF et ultrasonores au récepteur "Cricket listener" attaché à l'objet mobile. La position de ce dernier est ensuite estimée à partir de la mesure de la différence entre le temps de propagation des ondes RF et des ondes ultrasonores. Ce paramètre est appelé, différence de temps d'arrivée ou TDoA (Time Difference of Arrival) [109]. La précision de localisation est de l'ordre de 10 cm.

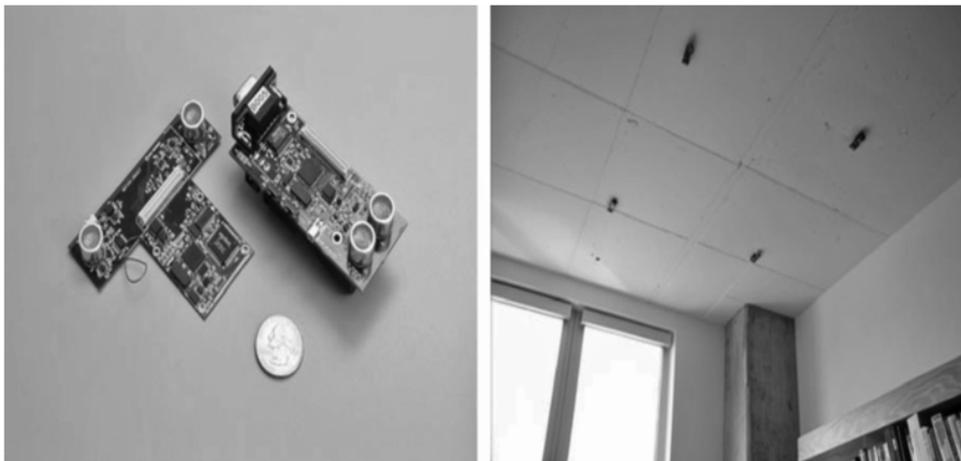


FIGURE 2.3 – Système de localisation Cricket.

---

3. <http://www.ekahau.com/products/real-time-location-system/overview.html>

Le système Ubisense, utilise, quant à lui, la technologie UWB,<sup>4</sup> figure 2.4. La localisation d'une balise active (appelée Ubitag) portée par l'objet mobile s'effectue selon le principe de la triangulation à partir d'une collection de capteurs en réseau (appelés Ubisensors) déployés dans une cellule rectangulaire. Chaque Ubitag intègre d'une part, une radio UWB (6-8 GHz) pour l'envoi de signaux UWB impulsionsnels de très courte durée qui sont captés par les Ubisensors et d'autre part, une radio conventionnelle RF (2,4 GHz) pour la coordination de l'envoi de signaux UWB. Le système Ubisense utilise les paramètres TDoA (la différence de temps d'arrivée) et AOA (l'angle d'arrivée correspondant à la direction du signal -Angle of Arrival) pour calculer par triangulation la position de la balise Ubitag. Ainsi, au moins deux capteurs Ubisensors sont nécessaires pour calculer la position 3D d'une balise Ubitag. La localisation dans un appartement ou bâtiment nécessite que le site soit divisé en cellules de forme rectangulaire (chambre, séjour, bureau, etc.) nécessitant chacun 3 capteurs. Le système assure une précision relativement élevée (de l'ordre de 15 centimètres) mais reste cependant très onéreux et nécessite une infrastructure avec un câblage spécifique pour la mise en réseau des capteurs.

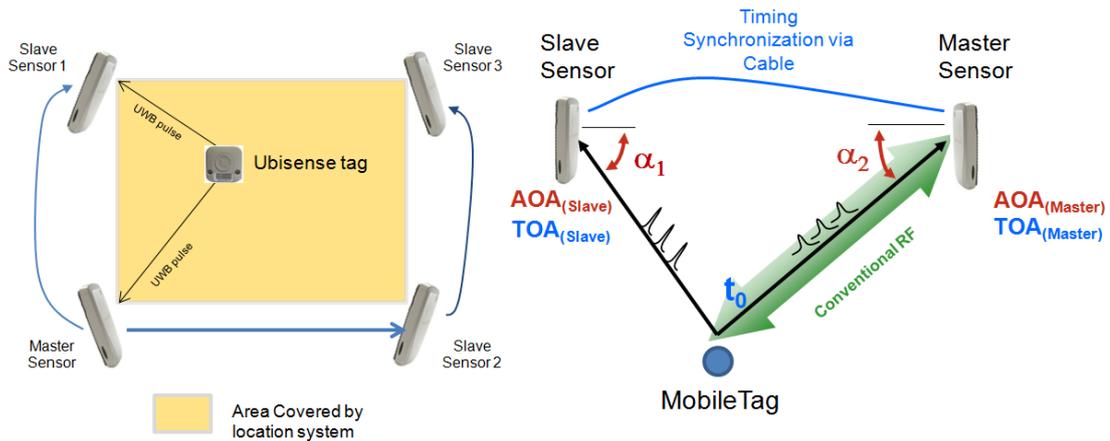


FIGURE 2.4 – Système de localisation Ubisens.

### 2.3.6 Robots de services

L'utilisation de robots de services pour l'assistance aux personnes dans l'exécution de leurs tâches ou activités quotidiennes est toujours en phase d'expérimentation et de recherche de modèles économiques viables. Dans ce qui suit, nous nous limiterons aux deux catégories suivantes : Les robots d'assistance à la mobilité ou au déplacement et les robots d'assistance domestique.

4. <http://www.ubisense.net/en/>

### 2.3.6.1 Robots d'assistance à la mobilité

Ces robots sont en général conçus pour compenser les déficiences motrices de leurs utilisateurs et aider ces derniers dans leurs activités physiques quotidiennes comme se lever/s'asseoir, marcher, monter les escaliers, etc. Dans cette catégorie de robots, on trouve les robots fauteuils, les robots cannes, les robots déambulateurs et les robots exosquelettes. La figure 2.5 illustre quelques prototypes de robots : (a) le concept de fauteuil roulant robotisé CARRIER développé par l'Université des arts appliqués de l'Industrial Design Studio 2 Esslinger en Autriche. Ce robot fait également office de verticalisateur ; (b) le fauteuil roulant robotisé Sharioto de l'Université de Louvain [34] ; (c) La cane intelligente iCane développée à l'université de Nagoya [37] ; (d) le déambulateur RobuWalker développé par la société Robosoft et l'ISIR pour l'aide à la verticalisation et au déplacement<sup>5</sup> ; (e) l'exosquelette Hal de la société Cyberdyne<sup>6</sup> ; (f) l'exosquelette EiCOSI, pour l'assistance aux mouvements de l'articulation du genou, développé au laboratoire LISSI [89]. Les exosquelettes ou orthèses sont des dispositifs mécatroniques que l'on qualifie de robots portables. Ils sont utilisés dans le but d'augmenter, d'assister ou de restaurer les mouvements des personnes dépendantes.



FIGURE 2.5 – Robots d'assistance à la mobilité : (a) CARRIER (b) Sharioto (c) iCane (d) RobuWalker (e) Hal (f)EiCOSI.

---

5. <http://www.robosoft.com>

6. <http://www.cyberdyne.jp/english/customer/index.html>

### 2.3.6.2 Les robots d'assistance domestique

Ce domaine s'est développé ces dernières années pour le grand public, avec principalement l'apparition sur le marché de robots de service mono-tâche, à autonomie limitée et à prix réduit, comme par exemple, le robot de nettoyage Roomba de iRobot. Ces robots grand public nécessitent encore des évolutions pour s'adapter aux capacités fonctionnelles des personnes âgées ou dépendantes.

Dans la catégorie des robots d'assistance domestique qu'on appelle aussi robots personnels, on peut également citer les robots d'assistance relationnelle qui regroupent les robots compagnons et les robots pour l'éveil sensoriel.

Les robots compagnons ont une fonction d'assistance cognitive auprès de personnes isolées et fragilisées et peuvent communiquer avec la personne en tant qu'objets mobiles et communicants. Les robots compagnons sont en général constitués d'une base mobile avec une tête. Ils sont munis de capteurs, de reconnaissance et de synthèse vocale, d'interfaces de connexion à Internet et de fonctions de navigation autonome. Les fonctions principales pouvant être prises en charge par un robot compagnon concernent essentiellement l'assistance cognitive, allant des aide-mémoire aux stimulations (exercices physiques et intellectuels), ainsi que les fonctions basiques de communication comme le courrier électronique ou l'interaction social (accès aux réseaux sociaux, famille, amis, etc.). La figure 2.6 illustre quelques exemples de robots personnels : Kompai de Robosoft, Ava d'iRobot, PR2 de Willow Garage.

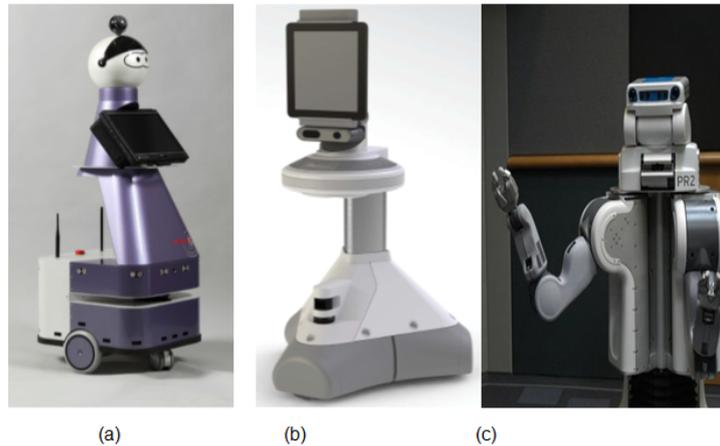


FIGURE 2.6 – Robots personnels : (a) Kompai (b) Ava (c) PR2.

Les robots d'éveil sensoriel sont généralement conçus pour favoriser l'interaction et la communication par le contact direct avec la personne. Ils sont destinés aux personnes souffrant de troubles cognitifs tels que l'autisme, les maladies

## Chapitre 2. De l'intelligence ambiante à la robotique ubiquitaire : Principes, technologies et défis

---

d'Alzheimer, etc. Ils se présentent sous la forme d'animaux de compagnie robotisés à l'image du robot chien Aibo de Sony. Ces robots sont équipés de capteurs leur permettant de réagir au toucher et à la voix et peuvent émettre des sons. Ils sont dotés d'une intelligence leur permettant essentiellement une communication et une interaction affective, personnalisée avec l'individu.

Le robot PR2 de Willow Garage est sans doute le robot personnel le plus abouti. Il dispose d'une base mobile à roues et de deux bras qui possèdent chacun 7 degrés de liberté. Ce robot reste néanmoins un outil d'expérimentation pour la recherche. La robotique de service multitâche pour des applications domestiques est toujours au stade de l'expérimentation et de la recherche, comme en témoignent les nombreux travaux, notamment sur les robots humanoïdes. A ce jour, il n'existe pas encore de produits commercialisés dans le domaine grand public.

### 2.3.7 Vers la robotique ubiquitaire

Avec l'apparition des paradigmes de l'informatique ubiquitaire, de l'intelligence ambiante, et la disponibilité des technologies de communications sans fil (réseaux de capteurs, réseaux mobiles, smart phones, etc.), des technologies logicielles (Web services, middleware), d'identification (*RFID*, biométrie), etc., on assiste à l'émergence d'une nouvelle génération de robots de service appelés robots ubiquitaires. La robotique ubiquitaire ou la robotique en réseau constitue un domaine de recherche très prometteur de la robotique [62] [124]. Les enjeux autour de cette nouvelle forme de la robotique sont considérables avec un potentiel fort et des perspectives de croissance prometteuses, notamment sur le marché de la robotique de service. Des acteurs de l'industrie informatique de tout premier plan comme Google, Microsoft, Intel, etc. s'intéressent de plus en plus à ce marché.

L'idée sous-jacente consiste à intégrer ces robots dans des espaces intelligents à petite ou large échelle (maisons intelligentes, bâtiments, espaces urbains), afin d'offrir, en tout lieu, à tout instant et de manière transparente des services à valeur ajoutée : Assistance cognitive, sécurité, confort, divertissement, etc. Nous définissons un service comme une assistance (ou commodité matérielle, physique ou immatérielle) fournie à un (ou des) êtres vivant(s) et notamment à des personnes. La notion de service est apparue récemment dans les sciences informatiques. Dans ce cadre, un service offre une fonction utilisable par un tiers. Ce tiers peut être un ou plusieurs êtres vivants ou un autre service. La notion de service telle qu'elle est conçue dans les systèmes d'information distribués peut ainsi être perçue de la même manière qu'en robotique ubiquitaire. Le modèle d'interaction entre le robot et son environnement est ainsi totalement repensé puisqu'il ne s'appuie plus sur un schéma pré établi ; l'environnement d'évolution étant considéré comme ouvert, partiellement connu et dynamique. Un robot ubiquitaire doit être interopérable avec des objets ou des entités (capteurs, actionneurs, robots, artefacts, etc.) qu'il découvre dans son environnement plutôt que d'être pré

programmé statiquement pour cet environnement. Il doit être capable non seulement d'utiliser ses propres objets (capteurs et actionneurs) mais aussi d'interagir avec d'autres objets de l'environnement et d'adapter dynamiquement ses services face à des changements de contextes. On parle dans ce cas de sensibilité au contexte.

Le chevauchement qui existe actuellement entre la robotique ubiquitaire et l'intelligence ambiante fait que leur utilisation conjointe constitue un choix synergétique pour créer des espaces physiques et numériques riches et offrant une multitude de services intelligents réactifs et/ou proactifs, visant à améliorer nos cadres de vie en tout lieu (maison, travail, etc.) et à tout instant. L'intelligence ambiante, d'une manière générale, et la robotique ubiquitaire, en particulier, constituent un domaine de recherche en plein essor qui vise à créer des écosystèmes exploitant des objets communicants (capteurs, actionneurs, terminaux numériques, artefacts intelligents, robots d'assistance, etc.) d'un environnement connecté, pour créer des services et des espaces (web et physiques) intelligents selon la vision du Web des Objets (Web of Things).

L'apparition récente du concept du cloud computing (informatique en nuage) va dans le même sens et va permettre l'émergence d'une nouvelle génération de robots ubiquitaires capables d'enrichir leurs capacités cognitives et partager leurs connaissances en se connectant à des infrastructures cloud [60] [48] [65]. Ces robots ouvrent ainsi la voie à un nombre illimité d'applications telles que les compagnons physiques et virtuels pour aider les personnes dans leur vie quotidienne. Ces robots seront capables de travailler aux côtés des personnes et de coopérer avec ces dernières en partageant le même environnement ; ils agiront en tant que gardes physiques et/ou virtuels autonomes pour protéger les personnes, surveiller leur sécurité et leur venir en aide dans les espaces intérieurs et extérieurs.

Selon cette nouvelle vision de la robotique, un robot ubiquitaire sera susceptible aussi de servir d'incarnation pour l'interaction avec les humains. Ainsi, les travaux de recherche autour du concept de l'affective computing (l'informatique affective) explorent déjà l'usage des modèles articulés des visages. Couplés à une interaction vocale, de tels dispositifs pourront créer une illusion forte d'intelligence, quasi humaine. Une application naturelle de ces technologies consisterait à associer à un système à intelligence ambiante l'apparence d'un visage humain ou à l'incarner à travers un ou plusieurs objets de la vie quotidienne.

## 2.4 Défis de l'intelligence ambiante et de la robotique ubiquitaire

Tout système utilisant les paradigmes de la robotique ubiquitaire et de l'intelligence ambiante doit posséder les caractéristiques essentielles suivantes : L'interopérabilité pour assurer l'omniprésence et la continuité du service pendant

## **Chapitre 2. De l'intelligence ambiante à la robotique ubiquitaire : Principes, technologies et défis**

---

la mobilité, l'auto-localisation, l'auto-exploration de l'environnement physique, la sensibilité au contexte et à l'intention des usagers, l'interaction multimodale et naturelle avec les autres systèmes, la capacité de raisonnement pour la reconnaissance de contextes et la prise de décision, l'adaptation et l'extensibilité afin d'assurer la pérennité, l'évolutivité du système par rapport à l'évolution de l'environnement ambiant et des usagers, et enfin la sécurité et la protection de la vie privée des usagers. La mise en œuvre de ces fonctionnalités nécessite de s'attaquer à plusieurs défis que nous analysons dans ce qui suit :

### **Auto-localisation**

L'intelligence ambiante et la robotique ubiquitaire reposent sur l'identification et la localisation des personnes et des objets à l'intérieur d'espaces divers (maisons, bâtiments, à l'extérieur dans des espaces publics ou privés). Il est en effet primordial que les objets communicants (artefacts intelligents, robots, etc.) présents dans ces espaces soient capables d'identifier leurs positions, sans dépendre systématiquement d'un service central de calcul de position. Cette information de localisation est utile, par exemple, pour reconnaître un contexte, analyser le comportement d'une personne ou pour choisir le service le plus approprié (proximité du service vis-à-vis de la position courante de l'utilisateur, préférences de l'utilisateur, etc.). Les systèmes de localisation disponibles actuellement dépendent le plus souvent d'un service central qui permet de calculer les coordonnées de localisation. Ils dépendent aussi fortement des contraintes matérielles des technologies utilisées. Il est alors nécessaire de combiner plusieurs technologies de localisation pour parvenir à une meilleure estimation de la position d'un objet. L'auto-localisation reste un challenge technologique car il n'existe pas à l'heure actuelle de solution fiable et bon marché.

### **Auto-exploration et cartographie sémantique**

Il s'agit de la capacité du robot à explorer son environnement, identifier tout objet présent, comprendre sa description, ses fonctionnalités et exploiter ces connaissances pour effectuer une tâche donnée. Pour ce faire, le robot doit être capable de construire dynamiquement des cartes sémantiques en corrélant la description des objets avec celle de la cartographie physique. Il est aujourd'hui admis par la communauté robotique l'importance pour un robot autonome de disposer de connaissances sémantiques, et d'effectuer des raisonnements à un niveau sémantique (symbolique) pour mieux comprendre son environnement, reconnaître un contexte, analyser une scène, comprendre le comportement humain, planifier une action donnée, etc. D'une manière générale, les ontologies spatiales et les cartes sémantiques peuvent être utilisées pour accroître les capacités et les performances de planification, de navigation et de manipulation, dans des scénarii complexes du monde réel. Pour un robot mobile, une carte sémantique est une carte qui comporte, en plus des informations spatiales (2D ou 3D) utilisées pour la navigation, des annotations sémantiques relatives aux caractéristiques des

entités de l'environnement du robot, c'est-à-dire, les objets, les fonctionnalités, les événements, les relations, etc. [97].

### Sensibilité et adaptation au contexte

Le paradigme de la sensibilité au contexte en informatique ubiquitaire a été introduit pour la première fois par Schillit qui considère que le contexte est basé sur trois aspects : La localisation de l'humain (Where are you?), les identités des personnes avec qui il se trouve (Who are you with?) et les objets qui l'entourent (what resources are nearby?) [130]. Autour de ce paradigme, on trouve d'autres appellations, comme : La conscience du contexte (context awareness) ou l'adaptation au contexte. La définition de *Schillit* a été par la suite enrichie et adaptée par les chercheurs en fonction de leurs applications. Parmi les nombreuses définitions proposées dans la littérature, celle de *A.K. Dey* est la plus citée [35]. Elle stipule que le contexte couvre toute information pouvant être utilisée pour caractériser la situation d'une entité. Une entité peut être une personne, un lieu ou un objet qui est considéré comme pertinent pour l'interaction entre un utilisateur et une application, incluant l'utilisateur et les applications. Le contexte peut aussi concerner plusieurs modalités : (i) les profils des personnes et des objets présents dans un lieu ainsi que les événements associés comme par exemple : La personne déplace un objet, la personne entre dans une pièce; (ii) les moyens de communications et leurs qualités (fiabilité, bande passante, sécurité, etc.), les équipements et artefacts dont disposent les usagers (bracelet, montre, etc.); (iii) les moyens d'interaction avec l'utilisateur (écrans, sons, vidéos, texte, etc.), les services simples ou complexes qui peuvent être fournis par des équipements ou des robots de services (télé-vigilance, assistance cognitive, identification de comportements sur le long terme, etc.).

D'une manière générale, on distingue deux types de connaissances contextuelles : (i) celles qui sont directement observables à partir d'organes de mesure (capteur de luminosité, système de localisation, sonde de mesure de la qualité d'un lien radio, etc.) et (ii) celles qui sont non-observables mais qui peuvent être déduites (par inférence, par classification, etc.). Le choix des capteurs et des sources d'informations contextuelles doit tenir compte des modes d'interaction avec les usagers et il est communément admis qu'il n'est pas nécessaire de tout savoir pour pouvoir aider et interagir de manière pertinente avec l'utilisateur [108]. Il s'agit de déterminer quels sont les capteurs appropriés dans une configuration donnée, de manière à ne pas suréquiper l'environnement. En plus de s'adapter au contexte lié aux activités quotidiennes des usagers, le système doit être capable d'estimer l'intention de l'utilisateur de manière transparente lorsque ce dernier est en train ou compte entamer une activité. Par conséquent, pour fournir des services intelligents sensibles au contexte, un système à intelligence ambiante ne doit pas seulement s'appuyer sur la localisation et l'identification des objets ou des personnes présents dans un lieu mais il doit aussi être conscient du contexte global, incluant l'environnement et les personnes.

Un système sensible au contexte est un système qui possède des capacités de réaction, d'adaptation et de reconfiguration face à des changements détectés dans l'environnement, dans l'intention de l'utilisateur et/ou de ses activités courantes. Pour *Dey*, l'un des objectifs principaux de l'acquisition du contexte est de déterminer par inférence ce que fait ou tente de faire l'utilisateur à un moment donné pour lui proposer des services et l'aider au mieux dans son activité. Les fonctions d'adaptation au contexte peuvent concerner : (i) la présentation de l'information : Des applications utilisent les informations contextuelles pour adapter la présentation de l'information ou modifier les possibilités d'interaction en proposant les actions les plus pertinentes à l'utilisateur comme par exemple : Présenter un choix d'imprimantes proches à un utilisateur ; montrer à l'utilisateur sa position géographique sur une carte ; (ii) l'exécution de services : Des applications exécutent automatiquement une ou plusieurs fonctions pour aider l'utilisateur. Par exemple, l'application peut délivrer un message ou une note lorsque l'utilisateur se trouve à un endroit particulier.

Récemment, et comme en témoigne les travaux menés dans la cadre du projet européen CA-Robocom (Robot Companions for Citizens)<sup>7</sup>, le paradigme de la sensibilité au contexte a été repris par les roboticiens avec comme défi majeur le développement de robots sensibles, c'est à dire des robots exprimant des émotions et qui sont en même temps dotés d'une conscience de soi, des humains et de l'environnement.

### **Raisonnement**

Un système à intelligence ambiante doit avoir des capacités cognitives avancées pour interpréter le contexte, reconnaître les activités et les intentions des usagers, et prendre des décisions adéquates en fournissant les services d'assistance les plus adaptés à la situation. Des techniques de raisonnement numérique et symbolique doivent être étudiées et adaptées pour doter le système de capacités cognitives avancées. Ainsi, l'inférence à base de règles de la logique du premier ordre peut être utile pour l'agrégation de connaissances contextuelles de bas niveau afin de transformer ces dernières en connaissances de haut niveau concernant le contexte. Un système d'apprentissage peut être utile pour reconnaître des activités à partir de données multi-sources en tenant compte de contraintes telles que l'incertitude des données. Un système d'inférence basé sur les logiques de description peut aussi être exploité pour détecter des relations sémantiques entre les connaissances contextuelles. La prise de décision est en général suivie par l'exécution d'actions (services pro-actifs) comme par exemple :(i) ajuster la température et l'aération en utilisant les actionneurs disponibles dans l'habitation (ii) notifier à l'utilisateur des commentaires, des suggestions ou des alertes instantanées ou en différé, à l'aide

---

7. <http://www.robotcompanions.eu/project>

d'interfaces multimodales personnalisées.

### **Intéropérabilité, adaptabilité et évolutivité**

Bien que les systèmes ubiquitaires soient étudiés depuis une vingtaine d'années, la mise en œuvre de techniques d'interopérabilité reste toujours d'actualité pour traiter principalement les problèmes liés à l'hétérogénéité des environnements à intelligence ambiante. L'hétérogénéité pose le problème de partage des données et indirectement des connaissances contextuelles. Elle concerne d'une part, l'incompatibilité des moyens de communication (couches protocolaires), et d'autre part, les différents modèles représentant les données. L'émergence des intergiciels a permis de simplifier la mise en œuvre des systèmes répartis tout en masquant l'hétérogénéité des différents équipements et réseaux utilisés. En effet, les services d'intelligence ambiante interagissent avec les capteurs et les actionneurs à travers des intergiciels qui offrent un support de communication interopérable permettant de simplifier l'intégration et la perception abstraite des entités de l'environnement. Plusieurs intergiciels et protocoles d'interaction ont été standardisés pour le domaine de l'informatique ubiquitaire et l'intelligence ambiante, telles que UPnP, DLNA, DPWS, COAP, etc. Ces derniers reposent sur l'usage des protocoles de l'internet comme infrastructure de communication. Les intergiciels pour l'informatique ubiquitaire se déclinent en deux grandes catégories principales :

-La première permet de masquer l'hétérogénéité des capteurs, des actionneurs, des équipements et des couches protocolaires de communication, en offrant des interfaces standardisées d'accès aux sources d'informations contextuelles. Ces intergiciels offrent des fonctions de mesure, de pré-traitement et de représentation structurée de données numériques telles que la température, la pression atmosphérique, etc. À ces structures de données sont ajoutées des méta données, telles que des estampilles de temps, de lieux où les mesures ont été effectuées, etc.

-La deuxième catégorie fournit des modèles et des mécanismes élaborés de représentation, de gestion et de partage des connaissances entre des applications et services ubiquitaires hétérogènes. Du point de vue des applications ubiquitaires sensibles au contexte, l'exploitation des ontologies dans les intergiciels permet de garantir une certaine interopérabilité sémantique des connaissances du contexte. Il s'agit d'une part, de faciliter le partage d'une représentation standard et intelligible de la sémantique des connaissances contextuelles et d'autre part, d'automatiser les processus de découverte, d'extraction et de raisonnement sur ces connaissances contextuelles.

Enfin, garantir la pérennité des services d'intelligence ambiante et l'évolution de tout l'environnement d'intelligence ambiante pour accompagner les besoins des usagers, peut être vu comme autre conséquence positive de l'utilisation des intergiciels. Ces derniers doivent disposer de fonctions d'adaptation prenant en

## **Chapitre 2. De l'intelligence ambiante à la robotique ubiquitaire : Principes, technologies et défis**

---

compte la dynamique de l'environnement en termes d'apparition ou disparition de services ou d'équipements, d'intégration de nouvelles applications ou équipements, la prise en compte de la mobilité des usagers et d'éventuels réaménagements de l'espace ubiquitaire. Enfin, pour faciliter la mise en œuvre de nouvelles applications, les intergiciels doivent fournir des outils qui permettent de simplifier la mise en œuvre des services, en utilisant par exemple des techniques d'assemblage de composants logiciels ou des techniques de composition de services.

### **Sécurité et respect de la vie privée**

La sécurité des systèmes informatiques et la protection de la confidentialité et de la vie privée des usagers sont deux caractéristiques importantes que doivent posséder les services d'intelligence ambiante. Les environnements d'intelligence ambiante peuvent comporter de multiples sources d'informations dont il faut contrôler et protéger l'accès tout en respectant les aspects éthiques et juridiques. Mettre en place des mécanismes fiables de contrôle d'accès aux services, et des systèmes de chiffrement et déchiffrement des données de la vie privée, sont des problématiques difficiles et complexes qu'il faut impérativement aborder pour permettre à des personnes dépendantes d'évoluer et d'interagir de manière sécurisée avec les services de l'intelligence ambiante sans atteinte à leur vie privée.

### **Système non-intrusif et adaptatif**

Les personnes dépendantes ont généralement besoin de services d'assistance et de soins et en même temps, elles souhaitent maintenir leur indépendance aussi longtemps que possible. Un système à intelligence ambiante doit par conséquent être capable de s'adapter aux habitudes et besoins des usagers pour améliorer ou maintenir leur qualité de vie. En règle générale, la qualité de vie est une notion assez complexe, ambiguë et difficilement mesurable. Dans un environnement d'intelligence ambiante, elle concerne en général la perception de la personne et son appréciation vis-à-vis de la façon dont les services d'intelligence ambiante influent (ou améliorent) sur son état de santé physique ou psychologique, réduisent sa dépendance vis-à-vis d'une assistance externe, maintiennent ou améliorent ses relations sociales, etc. [116]. Enfin, un aspect important qu'il convient de prendre en compte concerne le problème de l'acceptabilité de ces technologies d'assistance au quotidien.

## **2.5 Discussion et objectifs de la thèse**

Dans cette thèse, nous nous focalisons sur la problématique de la représentation sémantique des connaissances et du raisonnement dans le cadre des systèmes à intelligence ambiante et des robots ubiquitaires. Il s'agit d'étudier des solutions adaptées permettant d'améliorer les fonctions cognitives de ces systèmes pour la gestion du contexte. Nous visons le développement de modèles sémantiques

qui soient suffisamment expressifs et génériques, pour permettre une description symbolique à la fois pertinente et riche de ces systèmes. Ces modèles doivent permettre d'une part, la reconnaissance de contextes et en particulier, les contextes non-observables et non-triviaux et d'autre part, de mettre en œuvre des fonctions d'adaptation. Un contexte non-observable peut être vu comme le résultat de l'agrégation d'un ensemble de connaissances contextuelles observables ou explicites. Nous considérons ici deux cas : L'exploitation d'observations courantes et l'exploitation de l'historique des observations. Les modèles proposés doivent permettre par exemple de décrire les activités de l'utilisateur allant des plus élémentaires (se lever/s'asseoir, marcher, allumer le four, etc.) aux plus complexes telles que préparer un repas. Ces dernières peuvent être vues comme des séquences d'évènements associés à des activités élémentaires. Les objectifs de cette thèse concernent la proposition de deux modèles sémantiques répondant aux contraintes imposées par les systèmes à intelligence ambiante et les robots ubiquitaires, et leurs validations à travers la mise en œuvre de scénarii réalistes en utilisant la plateforme ubiquitaire développée au laboratoire LISSI.

Le premier modèle sémantique proposé vise la représentation explicite des entités physiques ou logiques (humain, robot, capteurs, actionneurs, services web, etc.), et des connaissances contextuelles associées à ces entités ; l'objectif étant d'exploiter ces connaissances dans les services sensibles au contexte. Pour satisfaire aux contraintes d'expressivité et d'extensibilité, il s'agit d'aboutir à partir de ce modèle, à un modèle d'ontologie pour la description d'un environnement à intelligence ambiante. Par ailleurs, il est nécessaire d'associer à ce modèle un langage de règles pour modéliser le processus de raisonnement réactif sur les connaissances contextuelles avec deux objectifs : La reconnaissance implicite de contextes et la fourniture de services sensibles au contexte. Les contraintes imposées par les applications d'intelligence ambiante en termes de dynamique du contexte et de cohérence dans la prise de décision, exigent des modes de raisonnement garantissant les propriétés essentielles suivantes : Décidabilité, non-monotonie du raisonnement. Par cette approche, l'objectif est de pallier aux problèmes rencontrés dans les ontologies du web sémantique qui s'appuient sur le raisonnement monotone et qui sont par conséquent inadaptées pour prendre en compte dynamiquement des changements de contexte ou pour inférer des contextes non-observables.

Le deuxième modèle vise, quant à lui, à compléter le modèle précédent en termes d'expressivité pour la représentation de contextes non-triviaux liés au temps. Il s'agit ici de pallier aux inconvénients des approches ontologiques du Web sémantique en utilisant des relations n-aires pour la représentation des connaissances contextuelles. Sémantiquement, ce modèle doit permettre une représentation narrative des événements. Associé à des mécanismes d'inférence appropriés, ce modèle vise également à établir des relations sémantiques (causalité, but, etc.) implicites entre les événements qui se produisent dans l'environnement. Plus précisément, il s'agit de modéliser les interdépendances entre contextes, et

## **Chapitre 2. De l'intelligence ambiante à la robotique ubiquitaire : Principes, technologies et défis**

---

d'exprimer des connaissances de type : qui est l'initiateur de l'événement/action ? dans quel contexte un événement est observé ou une action est exécutée ? quelle est l'entité qui a subi l'action ? etc. L'objectif est d'enrichir l'interprétation du contexte en vue d'assurer une meilleure adaptation à ce dernier.

Le troisième objectif de cette thèse concerne la mise en œuvre et la validation des modèles sémantiques proposés. L'évaluation de ces modèles ne doit pas se limiter à la mise en œuvre d'un environnement de simulation élémentaire avec des outils de tests unitaires, mais elle doit être réalisée dans un espace d'intelligence ambiante réel. Ce dernier doit être composé d'un ensemble de capteurs, actionneurs, robot, etc. L'environnement d'expérimentation doit reposer sur un intergiciel permettant de faciliter l'intégration de technologies matérielles et logicielles hétérogènes, et la mise en œuvre de services d'intelligence ambiante sensibles au contexte.