

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de Génie
Département de Génie électrique et informatique

Architecture distribuée pour la détection d'activité dans un Espace Intelligent

Mémoire de Maîtrise
Spécialité : Génie Électrique

Jean-Philippe OUDET

Jury : Philippe MABILLEAU, ing., Ph.D. (directeur)
Bessam ABDULRAZAK, Ph.D.
Roch LEFEBVRE, ing., Ph.D.

Sherbrooke (Québec) Canada

Janvier 2011

U-2129



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-83740-5

Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-83740-5

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

RESUME

La présente étude porte sur la capacité d'améliorer la détection des Activités de la Vie Quotidienne, AVQ (ou ADL : « Activity of Daily Life ») par l'utilisation de capteur de mouvements portés par l'occupant d'un habitat intelligent. Les données provenant de ces capteurs devraient fusionner avec les informations issues de l'appartement pour donner une information plus pertinente par le principe de synergie [21].

La solution choisie pour le dispositif porté par la personne est l'innovation principale du projet : un réseau de capteurs disposés à plusieurs endroits sur le corps, communiquant sans fil entre eux et avec le contrôle de l'appartement. Les données extraites sont le mouvement relatif du corps, et plus spécifiquement des mains et du tronc, par rapport à la verticale. De par les propriétés de ces éléments – nécessairement petits, discrets – des MEMS seront utilisés pour satisfaire ces critères. Le projet repose sur la conception des dispositifs embarqués sur l'occupant dans l'optique d'en étendre les fonctionnalités à d'autres analyses tels que le son, la position dans l'environnement, le statut médical, etc. Pour prouver la faisabilité, des capteurs externes seront ajoutés pour compléter les informations de base et donc étendre la qualité des inférences sur les activités en cours.

Le mouvement est une donnée facilement détectable de par sa relative simplicité de mise en œuvre et il fournit une bonne base de travail pour étudier de façon systématique les différents points clés de l'étude : la communication, la synergie des informations, l'analyse des activités, etc.

MOTS CLES

Réseau de capteurs, Intelligence Ambiante, systèmes distribués et ubiquitaires, mesure de mouvements inertiels, fusion de données, architectures des systèmes numériques, localisation intérieure, RFID

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1. INTRODUCTION	1
1.1 Motivations	3
1.2 Contexte de l'étude	4
1.2.1 Contexte technologique.....	4
1.2.2 Contexte applicatif.....	4
1.3 Problématique	5
1.3.1 Intégration dans un environnement hétérogène.....	5
1.3.2 Utilité du projet.....	5
1.4 Hypothèses	6
1.5 Objectifs	6
1.6 Contributions de la recherche	8
1.6.1 Actimétrie portable : détecteur d'interaction réseautée.....	9
1.6.2 Infrastructure supportant l'inférence d'activités.....	9
1.7 Agencement du document	10
CHAPITRE 2. ÉTAT DES CONNAISSANCES	11
2.1 Systèmes et architectures	11
2.1.1 Laboratoire DOMUS.....	11
2.1.2 Détection de mouvements.....	12
2.1.3 Réseau de capteurs/actuateurs sans fil intelligents.....	16
Introduction.....	16
Réseau porté sur la personne.....	17
Conclusions.....	18
2.1.4 Combiner l'informatique ubiquitaire et la reconnaissance d'activité.....	18
2.2 Technologies	20
2.2.1 5 éléments fondamentaux des capteurs intelligents.....	20
Élément de traitement de l'information.....	20
Capteurs.....	20
Réseau.....	24
Alimentation.....	30
2.2.2 Localisation.....	30
2.2.3 Intégration.....	32
2.3 Conclusions	32

CHAPITRE 3.	
UN DETECTEUR D'ACTIVITE PORTABLE UTILISANT DES CAPTEURS ENVIRONNEMENTAUX.....	35
Introduction.....	36
3.1 State of the Art.....	40
3.1.1 ADL recognition	40
3.1.2 Body Sensors	41
3.1.3 Body Wireless Network	41
3.1.4 Smart wear	42
3.2 Conceptual Description.....	42
3.3 System Design.....	46
3.3.1 Embedded Processing.....	46
3.3.2 Sensors.....	47
3.3.3 RFID reader	48
3.3.4 Wireless Network	49
3.3.5 Power Source	50
3.3.6 Base Station	50
3.4 Outlook	51
3.5 Conclusion	51
3.6 Example of synergistic differentiations	53
CHAPITRE 4. ANALYSES ET RECOMMANDATIONS DE CONCEPTION	55
4.1 Perspectives.....	55
4.2 Conception de la plateforme	56
4.2.1 Unités de traitement de l'information.....	56
4.2.2 Mémoire	57
4.2.3 Capteurs.....	58
4.2.4 Connectivité.....	60
4.2.5 Source d'énergie	61
4.3 Extensions	62
4.4 Localisation intérieure	62
4.5 Insertion des capteurs intelligents dans l'environnement	64
4.6 Conclusion	66
CHAPITRE 5. CONCLUSIONS.....	67
BIBLIOGRAPHIE.....	69
ANNEXES.....	81
Annexe 1 Schémas de l'implémentation.....	82

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 : Overview of sensors' interactions in the Smart Home	38
Figure 3.2 : High-Level View of the Concept.....	40
Figure 3.3 : Block Diagram of a Sensor.....	46
Figure A1.1 : Connectivité à la MRAM.....	82
Figure A1.2 : Interconnexions.....	83
Figure A1.3 : Chaîne d'acquisition analogique (<i>IMU</i>).....	84
Figure A1.4 : Filtre <i>Sallen-Key</i> , 4 ^e ordre, 500 Hz	85
Figure A1.5 : Vue d'ensemble du système radio	85
Figure A1.6 : Système d'adaptation d'impédance d'antenne compact 2.4GHz.....	86
Figure A1.7 : SoC, Système Radio et contrôleur de protocole, <i>TI CC2431</i>	86
Figure A1.8 : Adaptation d'impédance compacte	87
Figure A1.9 : Microcontrôleur principal <i>C8051F120</i>	87
Figure A1.10 : Périphériques.....	88
Figure A1.11 : Gestion de l'alimentation	89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Capteurs habituellement trouvés dans les WBAN et leur débit de données.....	21
Tableau 2.2 : Comparaison, Zigbee vs. les technologies de communications pour réseaux de capteurs sans-fils	28
Tableau 3.1 : Synergistic Differentiations	53

CHAPITRE 1. INTRODUCTION

Dans la majorité des pays occidentaux, les études récentes indiquent que les personnes de plus de 65 ans représente une part toujours grandissante de la population [3, 69]. On estime la démographie de cette part de la population en croissance pour les 50 prochaines années. La proportion des personnes de 60 ans et plus devrait doubler de 10 % à 22 % sur l'ensemble de la planète [54]. Le nombre de personnes requérant des soins augmentera de façon proportionnelle [81]. Cette même population nécessite une attention importante de la part de leur famille ou d'une structure spécialisée, en ce qui concerne leurs soins ou leur autonomie. Si on ajoute à ce marché les personnes à capacités cognitives réduites, comme ceux souffrant de la maladie d'Alzheimer ou les traumatisés crâniens, qui requièrent aussi une structure particulière leur assurant une qualité de vie¹ humaine, le besoin pour une maison un peu plus intelligente devient évident. Les maisons de retraite et les hôpitaux, actuellement surchargés, ne peuvent plus se charger d'une clientèle excédentaire, surtout si cette dernière pourrait être indépendante avec seulement quelques précautions supplémentaires. Un subtil changement dans le comportement ou les habitudes de vie est connu pour être un bon indicateur de l'état de santé d'une personne. Un environnement capable de détecter des anomalies de comportement résultant de l'évolution de l'état de santé cognitive de ses occupants pourrait suffire pour accompagner ces personnes tout au long de leur vie autonome, tout en diminuant la charge de leur famille.

Depuis Mark Weiser en 1991 [97], il est reconnu qu'un changement fondamental dans l'informatique nous attend ces prochaines années. La tendance vers la distributivité et l'intégration des systèmes informatiques, jusqu'à leur disparition dans notre environnement, a commencé et se poursuit rapidement comme le prouvent les diverses analyses économiques (ex : le concept d'*Internet of Things*², votée 31^e invention de l'année 2008), appuyant également l'importance de l'évolution de la technique.

¹ *NHP : Nottingham Health Profile* ou *QWB : Quality of Well-Being* (indicateurs génériques de qualité de vie)

² Principe d'interconnecter, à travers le monde, des objets uniquement identifiables, basé sur un standard de communication. Les appareils sans-fil identifiables sont capables d'interagir et de communiquer facilement avec l'environnement et avec les autres appareils.

Plus concrètement, des exemples de mise en place de systèmes distribués sont apparus ces dernières années, sources et/ou conséquences des recherches sur les réseaux de capteurs intelligents. Auparavant utilisées plutôt dans le domaine de l'automatisation industrielle, depuis un certain temps ils apparaissent dans d'autres milieux pour former le concept d'Espaces Intelligents (*Smart Spaces* en anglais) ou de participer à l'Intelligence Ambiante³ (*AmI*). L'ubiquité des capteurs combinée à la capacité de détecter, d'agir et d'adapter l'Espace de façon coordonnée grâce à un réseau de communication permet de superviser et de contrôler en temps réel ces Espaces Intelligents (EI). La progression de la technologie permet de disposer de capteurs fiables et économiques qui alimentent en données de plus en plus précises les systèmes d'acquisition. Ces systèmes peuvent dorénavant être utilisés pour reconnaître les activités d'une personne. En attachant différents types de capteurs sur des objets, à des emplacements fixes dans l'environnement ou portés à même le corps humain, les activités d'une personne présente dans un Espace Intelligent peuvent être détectées.

Le but de ce travail est de démontrer les avantages de l'architecture proposée pour la détection des activités et des guides à la mise en place de tels systèmes dans ces EI. Pour cela, une conception d'architecture distribuée servira d'exemple à l'applicabilité à la détection d'AVQ et à son intégration dans un EI.

Les contributions principales sont donc : 1) l'analyse des besoins et des technologies courantes pouvant être mises en place pour répondre à des situations de renforcement de la détection des AVQ, requérant une analyse centré sur la personne, 2) la mise en évidence de principes comme par exemple le besoin de localisation de chaque élément du réseau.

Les sections suivantes décrivent les motivations, les objectifs de ce travail, le contexte de l'étude (basé sur des hypothèses) qui a permis plusieurs contributions et finalement, l'agencement du reste du document sera présenté.

³ Le principe de l'Intelligence Ambiante (*Ambient Intelligence* - *AmI*) est relativement nouveau. Des recherches combinées dans des domaines comme l'Intelligence Artificielle, l'informatique diffuse, les systèmes embarqués ont pour but de fournir un environnement capable de détecter et d'interagir intelligemment avec les gens.

1.1 Motivations

Ce travail fut motivé par le besoin de créer une solution pratique pouvant être mises-en-place pour interfacier un système mobile avec un environnement intelligent. L'intérêt serait de venir compléter les recherches orientées sur la création d'une architecture complète permettant la détection d'activités humaine comme proposé dans [100]. En général, une grande majorité des recherches se concentre soit sur une détection très grossière des activités, soit sur une détection très fine d'activités très précises (cf. sous-section « Combiner l'informatique ubiquitaire et la reconnaissance d'activité », au CHAPITRE 2). L'intérêt de traiter des activités très précises reste à être démontré, ce travail propose donc de se concentrer sur une approche macroscopique intégrant ce qui a été fait auparavant. Il est ainsi proposé de s'appuyer sur une infrastructure capable d'être suffisamment extensible pour être raffinée lorsque la technologie ou les connaissances permettront d'être plus efficace.

Cette approche consiste à concevoir une infrastructure simple capable de publier et de synthétiser les informations issues de multiples capteurs de types différents. À l'aide d'un mécanisme logiciel sophistiqué développé par les membres du Laboratoire DOMUS [39, 79], il devient possible d'inférer les activités et étudier les changements des comportements pour fournir des services. Au final, l'infrastructure aura comme mission de supporter la détection d'activité et également le déploiement de services et d'informations.

En particulier, les tâches les plus importantes qui intéressent cette recherche sont la supervision à domicile, l'évaluation et la prévention des risques (chutes, fuite de gaz, surdose de médicaments) ou l'évaluation de l'évolution des situations personnelles. Bien évidemment, ces types de services doivent être conçus par des praticiens spécialisés dans l'évaluation des risques et leurs remèdes.

Pour démontrer l'intérêt d'une telle infrastructure, ce travail se concentrera donc sur l'acquisition de mouvements d'une personne et présentera des possibles extensions pour appuyer l'intérêt de la solution proposée.

1.2 Contexte de l'étude

1.2.1 Contexte technologique

Avec la domotique, le microprocesseur investit les objets de la vie quotidienne. L'informatique diffuse met un point final à l'identification de l'informatique à un appareil physique. L'ordinateur ne sera plus personnel, mais un ensemble d'applications seront réparties sur plusieurs appareils hétéroclites et diverses interfaces permettront d'y accéder. D'un côté, il y aura le monde réel, celui de l'individu, et de l'autre le monde virtuel, celui des systèmes d'information. Les deux mondes se superposeront et les appareils fixes et mobiles serviront de points de contact, d'interfaces entre ces deux mondes.

Dans un environnement informatique diffus ou mobile, la personne, intégrée dans un monde par essence complexe, est assistée par une infrastructure informatique afin de réaliser ses activités quotidiennes en toute sécurité. D'une part, l'informatique diffuse installe des capteurs et des appareils intelligents dans l'environnement. D'autre part, l'informatique mobile et vestimentaire fait porter par la personne un code mobile inséré dans un minuscule processeur. Tous deux, intégrés dans l'environnement, n'indisposeront pas l'utilisateur. L'informatique diffuse rend plus agréable l'usage du monde tel qu'il nous est donné, sans interférence, plutôt que de l'adapter à un plan préconçu.

L'informatique mobile et l'informatique diffuse sont donc complémentaires. Même plus, dans beaucoup d'applications, ils ne peuvent exister l'un sans l'autre. Ce qui est la base de cette recherche. L'intérêt recherché est la symbiose possible de ces deux mondes pour affiner l'interaction entre l'utilisateur et l'environnement intelligent.

1.2.2 Contexte applicatif

Il serait donc utile de mettre à profit ce contexte particulier moderne pour permettre de réaliser cette étude selon les motivations énoncées auparavant. La spécificité du laboratoire DOMUS, introduit succinctement auparavant, sera décrite plus en détails dans le chapitre suivant. Ce laboratoire est un contexte particulièrement intéressant pour permettre une étude d'intégration de systèmes distribués de détection et de rétroaction sur l'environnement ambiant. Il s'ensuit donc une description d'un processus d'intégration de technologies de

détection dans un environnement intelligent.

1.3 Problématique

La conception des systèmes de mesures de mouvements par capteurs inertiels étant largement étudiés [2, 6, 8, 10, 22, 32, 35, 37, 40, 41, 50, 55, 61, 62, 77, 83, 89, 92, 92, 94, 101] et les détails des recherches sur leur implémentation faisant l'objet de nombreuses publications dans de nombreux domaines (sports, ergonomie, militaire, automobile, gérontechnologies, jeux vidéo, cinéma, média interactifs ou encore pour superviser un statut médical), cette perspective ne fera pas l'objet de la plus grande part de l'étude. Ce document fera donc l'état de l'intégration de ces systèmes dans une infrastructure d'envergure [100].

1.3.1 Intégration dans un environnement hétérogène

Comme les réseaux de capteurs intègrent de plus en plus d'éléments variés dans leur architecture, l'hétérogénéité devient de plus en plus importante [25], d'où la nécessité de concevoir une infrastructure supportant cette problématique. La plateforme peut communiquer avec des récepteurs variés, les capteurs devant être interfacés sont de natures très différentes dans leurs interfaces, contraintes de communications, d'alimentation ou de fonctionnement interne. La conception de ce prototype a donc pour but de se concentrer sur les techniques permettant de maximiser l'interfaçage avec cette hétérogénéité matérielle et logicielle.

1.3.2 Utilité du projet

On s'intéresse de plus en plus à implanter des systèmes d'identification partout (quel que soit leur intérêt...), la fonction de « tag » de ce capteur [89] pourrait donc être utilisée ailleurs qu'à la maison, par exemple pour des environnements sensibles aux déficiences (également une tendance positive qui permet aux personnes, par exemple à déficience motrice, de pouvoir accéder à des endroits habituellement impossibles d'atteinte). On pourrait donc imaginer des domaines d'application tels que le transport public, les magasins à grande surface ou tout

autre lieu fréquenté lors des AVQ, AVR ou AVP⁴, capables d'accueillir une personne déficiente en toute sécurité grâce à l'utilisation des fonctionnalités d'adaptation fournies par un tel système. Ces systèmes sont étudiés surtout pour leurs spécificités ergonomiques.

Également, ultimement, il serait possible de personnaliser et d'adapter les services à toutes les clientèles interagissant avec les Environnements Intelligents.

1.4 Hypothèses

Cette recherche repose sur les hypothèses suivantes :

- Il existe des capteurs individuels portés par la personne et d'autres dispersés dans l'environnement qui émettent des « évènements ». Ces évènements sont des données plus ou moins prétraitées par les processeurs des capteurs ou recueillies par des contrôleurs spécialisés.
- Il ne sera pas fait d'utilisation de caméra vidéo
Pour des raisons de protection de la vie privée, l'utilisation de capteurs vidéo sera proscrite.
- Il existe une infrastructure informatique prenant en compte différents types de capteurs et pouvant analyser ces données informatiquement
Le système de ce travail aura seulement à informer cette infrastructure des évènements qui lui sont nécessaires.
- L'analyse sera centrée sur la personne
Pour restreindre le cadre de cette recherche, il ne sera pas fait mention de problématiques liées à un partage des informations contextuelles, par exemple pour automatiser un appartement, assurer la sécurité des lieux. Le contexte personnel semble plus contraignant donc devrait faire émerger plus de contraintes, donc plus de résultats.

1.5 Objectifs

Le principal objectif de ce travail est de proposer une infrastructure matérielle et logicielle

⁴ Activités de la Vie Quotidienne, Récréatives, Professionnelles

permettant une nouvelle approche cognitive basée sur un interfaçage entre les interactions de la personne avec son habitat et l'intelligence ambiante de l'environnement.

Il sera donc nécessaire de concevoir un système adapté à cette tâche et, pour démontrer la validité de l'approche et estimer les recherches devant être poursuivies par la suite, il sera nécessaire de :

- proposer une infrastructure matérielle,
- développer un capteur anthropométrique et personnalisé pour diffuser les données personnelles de l'habitant,
- intégrer ces capteurs dans un système relié à l'habitat permettant de corroborer les données personnelles et les fusionner à celles recueillies par l'habitat pour obtenir un résultat plus précis ou plus fiable (principe de synergie).

Le but est d'affiner les mesures actuellement obtenues (par l'environnement) pour améliorer la détection des activités.

Pour répondre à cet objectif principal, il sera nécessaire de prendre en compte les différents points suivants :

- Ces capteurs intelligents seront réseautés pour extraire les données non redondantes et/ou nécessaires à une interaction avec les capteurs de l'environnement. Le prototype porté sur la personne à développer est basé sur un microcontrôleur gérant une communication sans fil de mesures utiles pour l'inférence d'activité de la vie quotidienne basée sur les mouvements et les interactions de l'utilisateur avec son environnement.
- Le capteur sera conçu dans l'optique de l'utiliser comme support évolutif à un système complet de détection d'activités. En ce sens, il intégrera les fonctionnalités minimales prévues dans le cadre de ce travail, mais il sera conçu pour pouvoir être modifié facilement pour intégrer de nouvelles fonctionnalités logicielles, matérielles ou de s'associer avec d'autres modules externes. Le but recherché est d'utiliser des informations basées sur la personne, son environnement, ses habitudes, et tous autres renseignements utiles pour l'inférence de cette activité. Pour cela, dans un premier

temps, il sera construit un prototype permettant de transmettre des mesures. Ensuite, ce prototype sera complété pour permettre l'acquisition des mesures d'accélération linéaire et angulaire.

- Il est nécessaire d'insister sur le fait que le prototype doit être le plus mobile possible puisqu'il sera porté par une personne. Ce qui comprend : minimisation de la taille et du poids, maximisation de l'autonomie, conception tridimensionnelle uniforme, etc.
- Pour la suite des travaux, l'étude de la mesure de mouvement devra au possible permettre la détection de gestes, de postures, de déplacements... avec la plus grande finesse possible et avec la plus grande richesse d'inférence qu'il est possible d'obtenir en tenant compte des limitations physiques imposées par la capacité réduite des systèmes d'acquisitions disponibles.

Ces différents points ne sont que des objectifs généraux qui seront précisés par la suite. Cependant, le focus de ce document est de reporter la création matérielle du capteur en tenant compte de ces différentes contraintes et objectifs secondaires.

L'ensemble des informations obtenues entre les données des capteurs portés et ceux de l'environnement devraient dans une mesure qu'il faut déterminer pour cette architecture, améliorer la finesse de la détection, aider à la discrimination entre différentes activités de la vie quotidienne (AVQ), ou permettre de détecter de nouveaux paramètres. Par exemple, un inclinomètre permettrait de détecter que la personne boit un verre, information actuellement impossible à obtenir sauf en utilisant une caméra.

Ce présent document a pour but de présenter une architecture distribuée, implémentée par un réseau de capteurs intelligent, qui supporte la détection d'activités réalisées par un habitant d'une Maison Intelligente. L'architecture est originellement basée sur des capteurs d'actimétrie [59, 89] portés sur la personne, interagissant avec l'environnement, lui-même équipé de multiples capteurs réseautés.

1.6 Contributions de la recherche

Les contributions principales de ce travail sont les suivantes :

1.6.1 Actimétrie portable : détecteur d'interaction réseautée

Comme première étape de la construction de capteur d'actimétrie, le projet « *iGlove* » d'Intel Research [34] est repris pour intégrer un lecteur RFID miniature à proximité des mains d'un utilisateur. Cette contribution se démarque des autres propositions scientifiques [60] et commerciales par le besoin de concevoir une architecture ouverte pour permettre la convergence de plusieurs technologies sur un même support.

De plus, cette contribution constitue la base de la construction du prototype. Il est nécessaire d'étudier les technologies utiles et de produire une solution optimisée pour s'interfacer avec ce lecteur, de traiter l'information localement, puis de transmettre les données à l'environnement. La conception matérielle et logicielle de ce capteur est présentée à la section 3.3.3, ainsi qu'une proposition d'interface avec les installations de l'environnement.

Les nécessités d'un système embarqué, telles que l'encombrement, la consommation, sont également prises en compte.

1.6.2 Infrastructure supportant l'inférence d'activités

Le thème général de l'étude est le bénéfice apporté par un système intelligent porté par une personne en collaboration avec un environnement intelligent de plus grande envergure. L'utilisation de toutes les informations contextuelles provenant de l'environnement est une piste qu'il est intéressant d'étudier.

De plus, cela suppose une certaine cohérence dans les échanges entre l'environnement et le réseau porté et également une rigueur de développement de l'infrastructure supportant cette fonctionnalité. L'étape finale sera donc la conception de l'infrastructure complète permettant un interfaçage élégant du réseau personnel avec celui de l'environnement.

Les applications existant déjà, l'accent de ce travail est porté sur la conception de l'infrastructure permettant l'homogénéité et l'interprétation des données proche du matériel par les applications de plus haut niveau. Nous proposons donc un ensemble de technologies et de modèles devant permettre la coexistence et l'adaptation de mesures prises avec différents types de capteurs à travers une plateforme logicielle-matérielle optimisée.

1.7 Agencement du document

Dans le CHAPITRE 1 est présenté le contexte générique qui justifie ce projet de recherche. D'après les recherches du domaine, il est fait un état des lieux des contraintes applicables à une telle application. Il est également fait l'analyse des connaissances actuelles pour appuyer les choix et l'architecture choisie pour supporter cette problématique.

Le CHAPITRE 2 présentera un rapide état des connaissances utiles pour identifier et clarifier les propriétés qui seront analysées dans le CHAPITRE 4 qui discute de certains paramètres au centre du présent travail.

Les contributions sont synthétisées dans un article scientifique (CHAPITRE 3) présenté dans un Journal International dont les sujets principaux sont les technologies robotiques et mécatroniques d'assistance (IJARM). Cette synthèse s'est concentrée sur la particularité du capteur de mesure inertiel en lien avec un capteur d'interaction RFID et de la localisation à l'intérieur d'un bâtiment.

La solution proposée est ensuite analysée et commentée dans le CHAPITRE 4 qui ouvre vers des recommandations sur les différentes problématiques relevées lors de la conception.

CHAPITRE 2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

2.1 *Systemes et architectures*

Le concept de Maison Intelligente (« Smart Homes ») est un des fantasmes les plus couramment rencontrés dans la littérature ou les films de Science-Fiction. Bien que ce soit pour le moment des exemples le plus souvent impossibles à réaliser à l'aide des technologies actuelles, il est possible de voir apparaître certains de leurs concepts qui transformeraient notre habitat en un espace qui interagit avec ses occupants pour leur bien. À l'heure actuelle, quelques appareils électroménagers fournissent des services, mais leur utilité reste, pour le moment, questionnable (allumer un four avec son cellulaire).

Dans le laboratoire DOMUS (Université de Sherbrooke), les recherches ont pour motivation première l'amélioration du bien-être des occupants pour si possible leur permettre de vivre mieux, plus longtemps chez eux, tout en réduisant les coûts associés à leur maintien payé par la société.

2.1.1 Laboratoire DOMUS

DOMUS est un laboratoire qui est pourvu d'un appartement-test (« Smart Home », ou Maison Intelligente) pour l'évaluation des technologies d'aide à la vie pour les personnes à déficience cognitive (perte de mémoire, par accident de la route par exemple, maladie d'Alzheimer...). Pour cela, il est nécessaire de superviser les activités des habitants pour pouvoir interagir avec eux, ou même agir en cas de nécessité.

De plus, l'interaction avec les éléments de l'environnement doit être prise en compte, ce qui signifie que toute action doit être mesurée à l'aide de capteurs dispersés (cachés) dans les éléments constituant l'environnement. Le laboratoire DOMUS est donc équipé d'une multitude de capteurs de types différents qui sont utilisés pour mesurer toutes sortes d'information physique possible : température, ouvertures de portes, présence, débit, son, gaz. L'infrastructure fournit des interfaces de communication : haut-parleurs, écrans vidéo, témoins lumineux, un système de « téléphonie ambiante ». On trouve également des interfaces à des actionneurs : électrovannes, commutateurs électriques, relais, sectionneurs.

L'ensemble de ces interfaces est relié à un système centralisé, complexe, composé de serveurs informatiques, de contrôleurs industriels, de processeurs audio-vidéo spécialisés, d'une matrice de commutation contrôlable, de systèmes domotiques et d'une importante connectique. Rien que la partie connectique requiert une importante connaissance et une logistique rigoureuse, que ce soit entre les différents modules précédents ou entre les modules et les différents éléments implantés dans l'environnement.

Un moteur d'inférence et de décision est le cœur de l'intelligence artificielle ayant pour but d'aider les personnes à vivre de façon indépendante à la maison. Cette application réduit ainsi l'impact de leur handicap en étant capable, d'après les activités en cours, de leur fournir une aide contextuelle. C'est une infrastructure logicielle de contrôle de très haut niveau, complexe et localisée dans une « salle de serveurs » qui est utilisée pour interconnecter tous les appareils et les capteurs, donc c'est une immense infrastructure centralisée, avec énormément de câblage et une configuration complexe. Des kilomètres de câbles passent dans des murs spécialement conçus pour leur laisser l'accès libre, dans les faux plafonds, dans des gaines préalablement installées, ou traversent l'ameublement vers des modules de connexions.

Le but de ce laboratoire étant d'aider la personne, il n'est pas concevable d'implanter des éléments de mesure trop intrusifs à sa vie personnelle, telle l'utilisation d'une caméra. Mais pour permettre d'acquérir des informations les plus précises possibles, il est nécessaire de se placer au plus près du corps humain qui est le centre de l'attention. Ceci oblige à déployer cette armada de conversion physique-informatique.

2.1.2 Détection de mouvements

La possibilité de détecter un mouvement et même de le qualifier en termes de direction, sens, vitesse, rotation ou accélération a été prouvée par une étude doctorale qui a d'ailleurs donné naissance à une firme spécialisée en « Motion Capture » (*Mocap*) pour le cinéma ou les jeux vidéo : *Xsense*. La thèse [61] affirme qu'avec seulement des accéléromètres de type MEMS⁵

⁵ MicroElectroMechanical Systems: système électromécanique microscopique à la limite de taille du concept des nanotechnologies.

3D, un mouvement (et non pas seulement un déplacement) peut être discriminé, tant et si bien que le mouvement reste « calme » [61]. Le travail présente surtout les modèles, les algorithmes, la calibration et discute des contraintes anatomiques nécessaires à l'implémentation d'un système de mesures de mouvement porté par une personne. Cette étude est la base du présent travail, la recherche effectuée s'appuie par contre sur la détectabilité d'un mouvement de la main.

La main est intéressante puisque c'est l'effecteur humain le plus mis à contribution lors d'activités. Le déplacement du corps est utile aussi, surtout pour aider à séparer les informations de déplacement de la main par rapport à celui du corps humain (le tronc), mais aussi pour détecter des postures (allongé, debout, assis) ou des allures de déplacement (statique, marche course).

Les mesures que l'on souhaite obtenir ne permettent pas de s'appuyer sur une solution triviale. Il est nécessaire de bien choisir la gamme de détection pour avoir un bon compromis sensibilité/gamme de mesure. La sensibilité reflètera la précision de la mesure, une gamme étendue permettra une plus grande diversité de détection. La combinaison de deux sensibilités différentes reste cependant une possibilité (un inclinomètre pour les mesures sensibles sous les 2 ou 3 g⁶, un autre pour les mouvements de plus importantes accélérations, limitées à 10 g selon les mesures expérimentales de Luinge [61]. Actuellement, il est possible de trouver des composants offrant cette fonctionnalité, sinon il est toujours possible d'arranger une architecture de mise à l'échelle du signal entre l'amplification et la plage de mesure du convertisseur pour simuler cette fonctionnalité.

D'après l'étude du comportement de personnes lors de la vie dans un appartement, plusieurs remarques peuvent être faites relatives au choix des capteurs (utilisés pour la détection des mouvements utiles à l'amélioration de la détection des AVQ). Ce choix dépend essentiellement des mouvements de la main ; le corps (tronc de la personne) étant essentiellement soumis à des mouvements de faible amplitude, fréquence et accélération.

⁶ Constante gravitationnelle

Pour les capteurs des mains, il reste à déterminer les accélérations maximales qu'une personne peut produire et surtout la plage utile de cette valeur (les chocs ou les vibrations ont une utilité limitée dans un contexte de détection d'activités).

Un ordre d'idée pour les mouvements courants est de ± 2 g. Cette valeur provient des capteurs utilisés dans les *tiltpads* (par exemple les contrôleurs de jeux, les *gamepads*, les PDA⁷, ou des systèmes de capture de mouvement dans le monde militaire – soit tout capteur d'inclinaison utilisé comme interface homme/machine pour mesurer le mouvement à l'intention d'un programme). Un accéléromètre de ± 5 g, ainsi qu'un gyroscope de sensibilité nominale de 1200 degrés par secondes sont suggérés par [7], pour un mouvement rapide. Également, une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz, pour 12 bits de plage d'acquisition sont suggérées.

Mais cette mesure ne reflète pas une activité normale. Ces utilisations sont restreintes du point de vue de la gamme de mesure, pour rendre le contrôle plus simple (une sensibilité plus petite permet au contrôleur d'être manipulé de manière à ce que le résultat soit moins chaotique sans diminuer les possibilités du capteur). Pour un capteur qui doit détecter les activités normales, il est nécessaire de mesurer ou de trouver les maxima exercés sur le poignet pour ce qui est de l'accélération, des angles de rotation, des amplitudes de mouvement, de la fréquence, etc.

Les paramètres utilisés pour le choix du capteur sont les suivants :

- la fréquence (bande passante) de répétition des mouvements
- l'accélération utile et maximale
- l'amplitude des mouvements (déplacements effectués, relatifs à la quantité d'énergie déployée)
- les chocs possibles que doit absorber le système une fois mis en place

Le même processus réflexif est nécessaire pour le choix du capteur d'inclinaison (les 3 autres degrés de liberté dans l'espace), appelé couramment gyroscope. La mesure exprimée est des degrés par seconde, la sensibilité est donc exprimée en millivolts par seconde. Les paramètres de choix seront donc la fréquence, la vitesse de rotation, l'amplitude des mouvements, les

⁷ PDA : « Personal Digital Assistant », est un appareil mobile, aussi connu sous le nom de « palmtop ».

contraintes de chocs, tout comme les accéléromètres.

La combinaison de ces deux capteurs donne un système très connu, surtout dans le monde de l'aérospatial comme étant un IMU (*Inertial Measurement Unit* ou centrale de mesure inertielle). Cette unité fonctionnelle existe dans tous les avions, robots mobiles, sous-marins... et permet d'identifier la position instantanée du système dans l'espace. Souvent les accéléromètres sont couplés avec un compas magnétique qui permet de transformer cette position relative en position absolue par rapport à la Terre en utilisant le principe de gravité pour les premiers et de Nord magnétique pour les derniers. Les valeurs d'accélération et de rotation complètent la mesure initiale pour informer des variations de position. Si la position en un point géographique est possible d'être identifiée, la succession de variation de position permet un positionnement dans le temps qui peut compléter, ou même affiner la précision de la technique de positionnement utilisée. Ce principe est appelé en anglais le *dead-reckoning*. Cette technique est utilisée dans la présente étude.

La répartition spatiale des capteurs inertiels complets (accéléromètre et gyroscope et compas), ou non, permettent une mesure suffisamment robuste pour être utilisée de plus en plus pour le contrôle avionique en complément du positionnement satellite (GPS) [40, 41].

Pour ce qui est de l'étude sur l'utilisation de capteurs distribués de mouvement, de nombreuses recherches concluent sur leur intérêt, surtout par leur coût abordable, leur relative facilité de mise en place, et également la possibilité de contrôler l'intrusivité de la technologie dans la vie privée des porteurs de par leur taille réduite [14, 32, 65, 68, 91]. Les résultats montrent qu'il est tout aussi possible de mesurer un niveau d'activité que d'inférer d'une activité à l'aide de capteurs de type accéléromètres [28, 52, 67], selon l'application choisie. Aussi, la fusion de donnée à base de capteurs inertiels permet de détecter les ADL, à la maison [77] ou des applications similaires [62].

2.1.3 Réseau de capteurs/actuateurs sans fil intelligents

Introduction

Beaucoup de recherches sont menées sur le thème des réseaux de capteurs intelligents⁸. Selon la loi de Bell⁹, plusieurs prévoient que ce sera la technologie émergente de la prochaine décennie, et que les futures applications requérant le déploiement de capteurs seront un marché important.

La technologie des réseaux de capteurs sans fil prouve son utilité pratique en dehors de l'application visée ou de l'industrie des soins (para)médicaux. Les chercheurs de la communauté scientifique sont actuellement en train d'évaluer de nombreuses utilisations : militaire, domotique, gestion de l'infrastructure énergétique publique (le « *Smart Grid* » américain [19, 98]), monitoring environnemental [33], agriculture, étude de la faune sauvage [56, 64, 66, 90], météorologique [63], sécurité publique [44, 49], et même dans l'ingénierie des structures [46].

De plus en plus, on parle de l'*Internet of Things*¹⁰ [23] ou du concept de Web Sémantique¹¹[13, 53], où les objets deviendront connectés et intelligents, prenant part à l'Intelligence Ambiante en tant que capteur intelligent.

Que ce soit dans la communauté scientifique ou déjà dans le monde industriel, les capteurs sous la forme traditionnelle (dans le sens où une multitude de systèmes de conversion de phénomènes physiques sont directement reliés à un système de conversion et de transmission

⁸ Nom générique donné par la communauté. De très diverses variations peuvent être trouvées, ainsi que des acronymes correspondants : WSAN (Wireless Sensors & Actuators Network), WSN (Wireless Sensors Network), WSSN, BSN, ...

⁹ Définition : Environ chaque décennie apparaît une nouvelle classe d'ordinateur, plus économique, basée sur une nouvelle plateforme programmable, un réseau et des interfaces. Il en résulte des nouvelles règles d'usage et l'établissement d'une nouvelle industrie.

¹⁰ Aussi nommé « *Internet of Objects* », réfère à l'interconnexion des objets quotidiens. Généralement vu comme un réseau de capteurs sans-fils auto-configurés dont le seul but serait d'interconnecter toutes les choses. Le concept est attribué à l'Auto-ID Center, fondé en 1999 et basé alors au MIT.

¹¹ Terme popularisé par le W3C, définit toutes les « choses » (pas seulement électroniques, intelligents ou équipées de tag RFID) adressables par un protocole de nommage, tel que les URI. Les objets eux-mêmes ne se parlent pas, mais peuvent être référés par d'autres agents, tels que des serveurs centralisés puissants agissant à la place de leurs propriétaires humains.

de l'information) tendent à disparaître au profit d'un système plus intégré et « intelligent » qui décentralise les calculs et les intègre directement au capteur. Le capteur devient « intelligent » et de plus en plus intègre de fortes capacités de traitement du signal et de transmission efficace pour réduire les contraintes habituellement trouvées avec les systèmes de la génération précédente. Cette tendance est connue pour être la nouvelle classe d'« ordinateurs » de ce début de siècle. Elle est aussi à la base de la mise en œuvre du concept d'informatique diffuse.

Le terme habituel de capteur intelligent (en anglais : *Smart Sensor*) souvent trouvé dans la littérature n'est pas exactement suffisant, puisque le concept peut tout aussi bien être adapté au contrôle de l'environnement. Le titre de cette section réfère donc à la classe complète de ce concept, que ce soit pour un capteur ou un actionneur (effecteur plus système de commande et régulation). On trouve donc dans un tel système un médium de communication, un élément de contrôle et de traitement de l'information, un ou plusieurs capteurs et/ou un ou plusieurs actionneurs.

Un réseau de capteurs représente une innovation importante pour une multitude d'applications. L'essence même des objectifs qu'elle essaie de combler : l'efficacité (énergétique, transmission, puissance de calcul, complexité), la redondance, la sécurité, la facilité de mise en place et de maintenance, permet de régler de nombreuses problématiques rencontrées dans des domaines aussi variables que la domotique, le contrôle industriel, la supervision des structures et de l'Environnement, le contrôle embarqué, le traitement de signal, etc.

Réseau porté sur la personne

Les réseaux de capteurs intégrant la sphère personnelle sont appelés WBAN (Wireless Body Area Network). Les principales contraintes et caractéristiques sont présentées dans [45] et [31]. Concrètement, les détails d'une architecture portée ne seront pas si différents d'une architecture fixe même déployée à large échelle. L'autonomie (énergétique, réseautique, l'autodéploiement, l'autoconfiguration, l'automaintenance) doit être tout aussi importante que ce soit sur le corps humain que dans un espace naturel, les capteurs dans le premier cas

devront souvent s'attacher et se détacher du réseau; dans l'autre cas, une action de l'utilisateur n'est pas réaliste, question pratique. Bien évidemment les contraintes énergétiques, et réseautiques seront donc tout aussi variées et restreintes. Le dynamisme semble néanmoins plus prépondérant pour cette classe de systèmes.

Conclusions

D'après l'état des connaissances relevé, une intéressante opportunité serait d'explorer les considérations pragmatiques pour améliorer la qualité des plateformes utilisées pour concevoir un capteur virtuel déployé de façon ubiquitaire dans un EI. La plupart des recherches effectuées dans ce domaine portent sur à la qualité de l'architecture matérielle optimale pour chaque application typique (surveillance écologique, environnemental, structurel ...). Des efforts sont entrepris surtout dans le domaine militaire de par le besoin de rapidement mettre en place un réseau fonctionnel (*Unattended Ground Sensors (UGS)* [74]), mais également dans d'autres domaines civils [4]). Ce travail essaye donc d'apporter quelques réponses supplémentaires, pour le domaine visé, en introduisant les réflexions réalisées en essayant de répondre à cette problématique.

2.1.4 Combiner l'informatique ubiquitaire et la reconnaissance d'activité

Les activités de la vie quotidienne, ou AVQ, ou encore activités élémentaires représentent les actes qu'une personne exécute pour satisfaire ses besoins fondamentaux. Les AVQ sont des concepts utilisés couramment en ergothérapie pour évaluer l'indépendance (capacité fonctionnelle) et l'autonomie (capacité à faire des choix) d'une personne. En informatique, ces AVQ servent à faire le lien entre les requis de la personne et les tâches à accomplir. Les technologies des soins pour les personnes âgées sont un champ de recherche populaire. Cette technologie représente une sous discipline de la « gérontechnologie » [15].

Pour le moment, la détection des activités quotidiennes (*ADL : activities of daily life*) de la personne se fait exclusivement par inférences basées sur des événements matériels tels que

l'ouverture de portes, placard, robinets... Des capteurs sont disséminés partout dans l'appartement et renseignent un serveur central qui décide de l'action en cours. Ces actions sont utilisées pour connaître la possible activité en cours par l'occupant.

Les capteurs utilisés sont standards dans ce type d'application : des capteurs à contact aux portes et tiroirs, des capteurs de présence de type détecteur pour alarme d'appartement (PIR : *Pyroelectric InfraRed sensor*), des débitmètres, thermomètres... Ces capteurs commerciaux sont disponibles facilement mais ne sont pas performants et nécessitent souvent un câblage très difficile à installer dans un appartement existant. Ces capteurs nécessitent un point de connexion standard, binaire ou analogique. Pour diminuer ces contraintes, de plus en plus de capteurs intègrent déjà une interface plus pratique pour le câblage, par des liaisons sans-fil, Ethernet, USB, bus de terrain (CAN, *ModBus*)... mais restent un problème technique pour la détection des événements utilisés pour la reconnaissance des ADL, surtout dans un environnement existant, où il est difficile de mettre en place de centaines de mètres de câble électrique et une infrastructure informatique centralisée.

Le concept d'Intelligence Ambiante basé sur les interactions et les activités de la personne a été démontré auparavant dans [20] et [85].

La solution proposée s'appuie pour une part de décomposition des mouvements de la personne faite SUR la personne, par la personne et d'autre part de son interaction avec l'environnement (pour connaître la position de la personne), par une localisation géographique, une identification des éléments manipulés, ou tout autre paramètre à déterminer.

2.2 Technologies

2.2.1 5 éléments fondamentaux¹² des capteurs intelligents

Élément de traitement de l'information

Cette capacité de calcul répartie permet de diminuer la quantité de données à transmettre en traitant localement les données brutes pour en retirer des données plus abstraites, triées, et plus condensées. L'effet recherché est donc une plus grande efficacité de la part d'une grande quantité de capteurs de faible capacité de traitement mais hautement optimisés plutôt que de prendre des systèmes de plus grande capacité qui sont conçus de façon plus générique (et généralement sous-utilisés).

Pour respecter les critères issus de l'étude des réseaux de capteurs, le processeur est certainement le composant le plus exigeant lors de la conception. La radio en comparaison est conçue pour être la plus optimisée possible pour la communication, que ce soit sur le point de vue de la consommation en Joules par bits ou en proposant un débit supérieur pour minimiser le temps d'émission (l'énergie) ou en consommation instantanée. Le processeur quant à lui pourrait être utilisé plus souvent ou plus longtemps, en fonction de la conversion à effectuer. dans ce cas, sa consommation instantanée, sa consommation par bit, sa capacité à émerger d'un état de veille rapidement, la consommation lors de cet état, la densité du code, la consommation de sa mémoire interne, la capacité de calcul (MIPS) et l'efficacité d'exécution (CPI : coups d'horloge par instruction) ainsi que le nombre et la sophistication des périphériques internes sont tous des critères favorisant une réduction globale de la consommation, critère le plus important pour l'application visée [70], [84] et [86].

Capteurs

Il existe une multitude de capteurs, pour mesurer virtuellement tous les phénomènes physiques possibles. Dans une application de détection d'activités, il n'est pas si trivial de déterminer quelles sont les mesures les plus intéressantes à prendre en compte. Il est donc

¹² D'après la classification de [95, 96, 99] .

évident qu'il faudra irrémédiablement étudier la validité des choix, que ce soit du type, de la précision ou tout autre paramètre des capteurs intégrés.

Pour superviser les mouvements, les signes vitaux, son comportement, et l'environnement proche d'un humain, une multitude de capteurs commerciaux peuvent être déployés tels que les accéléromètres, les gyroscopes, les magnétorésistances (compas électronique), les électrodes pour les électrocardiogrammes (ECG, EKG), les électromyogrammes (EMG), les électroencéphalogrammes (EEG), l'oxymètre de pouls (SpO_2), le dioxyde de carbone (CO_2), pour la respiration, la pression sanguine, la glucométrie, l'humidité, la température, etc.

Tableau 2.1 : Capteurs habituellement trouvés dans les WBAN et leur débit de données

Type de capteur	Fonctionnement	Débit de Données
Accéléromètre	Mesure l'accélération linéaire sur 3 axes, également mesure l'accélération gravitationnelle (g) au repos	Moyen
Gyroscope	Mesure l'accélération angulaire sur 3 axes	Moyen
Compas électronique	Mesure la variation du champ magnétique pour donner l'axe magnétique terrestre	Moyen
ECG/EMG/EEG	Mesure la différence de potentiel entre 2 électrodes placées stratégiquement sur le corps	Moyen
Pression	Mesure d'une force statique ou dynamique par une résistance ou un film piézoélectrique	Bas / Moyen
Flexion	Mesure le changement de résistance lié à la déformation du matériau	Bas
GSR	Mesure la réponse galvanique de la peau associée à l'activité des glandes sudoripares	Bas
Oxymètre de pouls	Mesure le taux de changement dans l'absorption de la lumière infrarouge à travers la peau	Bas
Respiration	Mesure la concentration d'oxygène dans un liquide à travers 2 électrodes recouvrant une membrane (ZrO_2) Mesure la déformation de la cage thoracique par l'extension d'un tissu	Bas
CO_2	Mesure l'absorption à l'infrarouge du gaz présenté dans un tube interféromètre	Bas

Type de capteur	Fonctionnement	Débit de Données
Pression sanguine	Mesure la pression systolique (max) et diastolique (min)	Bas
Glucométrie	Analyse la composition sanguine par spectroscopie proche-infrarouge, ultrasons, mesure optique à l'œil, analyse de l'haleine ou (invasif :) goutte de sang	Bas
Humidité	Mesure les changements de conductivité	Très bas
Température	Utilise la sensibilité du silicium à la température pour mesurer la température ambiante Mesure l'intensité lumineuse infrarouge pour déterminer la température distante	Très bas
Pression atmosphérique	Mesure la pression relative à la pression du vide parfait	Très bas
Sons, Audio	Mesure de la variation de pression acoustique	Moyen - Haut
Force	Mesure la résistance variable proportionnellement à la déformation du substrat sur laquelle elle est liée	Bas
Pression	Mesure la force appliquée sur un capteur soumis à une contrainte de compression	Bas
Goniomètre	Mesure le déplacement angulaire sur plusieurs axes, typiquement utilisé sur les articulations	Moyen

Les accéléromètres MEMS sont couramment utilisés pour des mesures de mouvements. Récemment les gyroscopes MEMS ont été ajoutés aux systèmes de *Mocap* pour affiner les mesures et réduire la divergence. Un ensemble de capteurs devrait être monté partout sur le corps humain pour distinctement analyser ses mouvements, mais cela fait émerger des questions sur le positionnement et les techniques de réduction du bruit pour réduire le nombre de capteurs à utiliser, réduisant la bande passante nécessaire. Réduire un ensemble de capteurs réduit également le SNR par l'abandon d'un certain taux de redondance, ce qui justifie des capteurs moins nombreux mais devant être plus précis.

Les données physiques à recueillir peuvent s'étendre sur une plage relativement très large, mais pour ce qui a trait aux mesures autour du corps humain, il est prouvé que les fréquences et les amplitudes des signaux mécano-physiologiques sont limitées (4 Hz, ± 10 g selon Luinge

[61]). Ainsi, des fréquences d'échantillonnages et des transmissions bas débit sont appropriées. Cependant, combien et quel type de capteurs sont relatifs à l'application recherchée et de l'infrastructure système.

Tous ces capteurs profitent de plus en plus de la miniaturisation et surtout avec l'apparition de la classe des MEMS¹³, des NEMS¹⁴ ou des « lab-on-chip¹⁵ » (applications microfluidiques) de nouvelles applications sont envisageable d'être embarquées sur la personne. Les accéléromètres et les gyroscopes sont de bons exemples.

Dans la conception générale, les systèmes de capteur intelligent, en plus d'intégrer la capacité de contrôler le système et de transmettre les données, doivent interfacer ensemble la chaîne d'acquisition analogique à numérique, soit le capteur avec un filtre, un convertisseur analogique-numérique (ADC) et le traitement numérique supplémentaire. Une quelconque forme d'énergie est convertie en signal électrique, qui est filtré pour la bande passante d'intérêt, puis numérisé pour un traitement numérique plus approfondi.

Pour ce qui est de la signification des mesures, elle est fortement liée à l'imperfection de la chaîne de mesure et c'est ce qui est largement discuté lors de la création d'une ontologie de capteurs. Un standard (IEEE 1451 [73]) est spécialement proposé pour répondre aux besoins d'autodivulgaration de capteurs intelligents dans un système, telle une fiche technique limitée. Mais en prenant en compte seulement les paramètres les plus courants (facilement extractible des fiches techniques des fabricant), il s'avère qu'une méthode de classification n'est pas triviale, étant donné la variabilité des mesures et des incertitudes reliées :

- la mesure dans le référentiel de choix (24 °C)
- le référentiel (métrique, impérial, Celsius, standard X...)
- la plage mesurable (-30 °C à + 100 °C)
- la résolution (0.2 °C)
- la précision/dispersion (*accuracy/precision*) (0.1 °C)

¹³ Micro Electro Mechanical Systems : microsystème électromécanique

¹⁴ Nano Electro Mechanical Systems : Systèmes Électromécaniques Nanométriques ; on parle aussi de « nanosystèmes »

¹⁵ Dispositif intégré rassemblant, sur un substrat miniaturisé, une ou plusieurs fonctions de laboratoire

- décalage (*offset, bias*) (+2 °C)
- sensibilité, non-linéarité (2 %)
- fréquence d'échantillonnage (2 Hz)
- dégradation des propriétés avec le temps, « *drift* »
- bruit
- hystérèse
- erreurs de numérisations
- sensibilité externe (température, vibration...)

Cette courte liste de paramètres inhérents à tous système de mesure devrait être introduite dans toute ontologie décrivant un capteur. Il est donc clair qu'un capteur de température sera différent d'un capteur de pression, par exemple, par l'importance relative de certains de ces paramètres. Il est certainement possible d'ajouter de nombreuses autres informations dépendantes du domaine physique, mais ces dernières semblent être communes pour représenter la plupart des mesures. Également, le système d'acquisition aura son importance. Il est donc difficile de pouvoir supporter avec une unique architecture la plupart des capteurs existants de par leur comparative grande hétérogénéité.

Réseau

De très nombreuses technologies radio existent, qu'elle soit propriétaires, ou suivant des standards comme Zigbee, Bluetooth, Wi-Fi, 6LowPAN, etc. Il est nécessaire, pour le choix de la technologie de préférence d'établir des critères réalistes en fonction du contexte d'utilisation. On rappelle que les nœuds doivent être compacts, mobiles, efficaces, que la quantité de données est limitée (donc la bande passante est relativement étroite), que l'on doit garantir un certain niveau de sécurité. Il est donc préférable d'analyser la solution qui prouvera être le compromis le plus intéressant selon ces critères.

De plus, étant intéressé à collaborer avec un maximum d'autres systèmes, l'emphase est mise sur la recherche d'un standard ayant la plus grande pénétration sur le marché, qu'il soit ainsi possible de s'interfacer avec un maximum de systèmes actuellement disponibles ou dans le futur. On rappelle également que de combiner le monde IP avec les réseaux de capteurs n'était pas envisageable à la date de conception du prototype, argument qu'il serait justifiable

de reprendre par la suite (cf. 6LowPAN).

Les standards de communication les plus connus actuellement pour les applications contraintes en énergie consommée sont Bluetooth (BT) et son profil *Low Energy* (BT-LE), *UWB*, *Zigbee*, *RFID*. Ces standards requièrent des circuits implémentant la mécanique de transmission de façon matérielle. Ces circuits sont appelés radios, *transceivers*...

De nombreux dérivés de ces protocoles existent comme lien de communication aux réseaux de capteurs, mais elles sont souvent propriétaires, ou reposent sur du matériel non standard. Dans le domaine de la recherche, il semble de plus en plus s'établir un consensus pour l'utilisation de *Zigbee* avec une couche *MAC 802.15.4*, ou plus récemment *6LowPAN* [71], une implémentation minimale standardisée de *IPv6* sur cette même couche *MAC* et *Bluetooth LE*, une implémentation optimisée de la radio *Bluetooth 4.0*. Sinon, des protocoles comme *Wireless HART*, *SP100* de l'*ISA* ou de nombreuses alternatives propriétaires ont sélectionné *802.15.4* comme couche *MAC*.

Bluetooth, dans sa version largement déployée dans les téléphones cellulaires, souffre d'une connectivité limitée (7 connections), une communication indirecte dans chaque *piconet* et surtout d'un temps d'établissement beaucoup trop long (des secondes) pour permettre la mise en veille de l'appareil pour une réduction de la consommation. Il fut conçu comme remplacement à des câbles séries puis comme un lien série universel. Sa particularité est de séparer l'audio des données dans sa conception, ce qui a permis de voir apparaître autant de solutions d'écouteurs téléphoniques (*headset*) basés sur BT. La nouvelle version (3.0 avec *High Speed*) ajoute la couche d'adaptation *PAL* du protocole 802.11 à la couche BT et améliore la bande passante de 3 Mb/s à 24 Mb/s. La version optimisée BT-LE pour la consommation énergétique est conçue pour une compatibilité complète avec BT. Nous recommanderions donc que BT soit restreint à une communication à court terme de haut débit, particulièrement pour agglomérer les communications du WBAN¹⁶ dans un canal unique le reliant à une infrastructure [51].

¹⁶ *Wireless Body Area Network*

De plus, n'importe quel système de transmission n'est pas forcément adapté à toutes les utilisations. D'après l'expérience faite avec Bluetooth sur les communications moins conventionnelles, dépassant le but premier de simple alternative aux câbles, il est apparu qu'il est nécessaire d'évaluer le « domaine de prédilection » des technologies de transmission. Ou plutôt, la technologie qui semble le mieux convenir à l'utilisation faite, pas seulement de suivre la tendance actuelle. Par exemple, de par la relative adoption de Bluetooth dans les solutions commerciales, des tentatives de mise en œuvre pour des réseaux de capteurs ont suivi. Majoritairement soldée par un manque d'adoption concrète, la conclusion fut l'instauration du profil spécial « *Bluetooth Low Energy* » (BT-LE).

Le ratio « faible consommation/débit » est un facteur primordial dans tous systèmes de transmission. Ici, de par la source d'énergie la plupart du temps limitée, il est d'autant plus important lors de l'élaboration d'un système embarqué tel ces capteurs. Le débit peut être réduit par compression des données, de façon bas niveau ou en triant et traitant les informations, à un plus haut niveau d'abstraction. Un compromis existe donc entre la nécessité de réduire par l'intermédiaire du processeur la quantité de données à émettre et le besoin de transmettre plus de données en moins de temps, nécessitant tous deux plus de puissance.

D'après les recherches, selon les critères établis (bande passante, consommation, portée, prix, sécurité, disponibilité) et pour les standards existants à la date du choix, la technologie de transmission préférée était la norme Zigbee. Bien qu'à l'heure du choix ce standard n'ayant pas été éprouvé, cette technologie s'est avéré être un choix intéressant et à l'heure actuelle, elle apparait dans de plus en plus d'application, de la domotique à la gestion intelligente des réseaux de distribution publique d'électricité (le *Smart Grid* américain) en passant par l'interface préférentielle pour les capteurs sans-fil médicaux (*Continua Health Alliance*). Par contre, pour ce qui est des technologies apparaissant depuis 2009, un choix aussi intéressant à évaluer pour la suite est 6LowPAN [71], une spécialisation de la couche TCP/IP [24] pour le contexte des réseaux de capteurs intelligents. Cette solution permet le concept de l'*Internet of Things* sans devoir faire appel à une passerelle de conversion d'un standard particulier vers le

monde IP qui supporte l'Internet. Ce standard n'a pas été choisi parce qu'il n'était pas encore disponible. Il reste de toute façon à voir comment l'interopérabilité entre Zigbee et 6LowPAN pourrait être améliorée, ce qui permettrait également de ne pas avoir à choisir entre les deux protocoles mais de les avoir de façon simultanée dans un même environnement. Mais selon notre point de vue, Zigbee a de meilleures chances d'être adopté dans le domaine de l'automatisation ou de la domotique, alors que Bluetooth Low Energy devrait avoir plus de potentiel pour être adopté comme technologie connectant les appareils basse consommation entourant le corps humain (montre, superviseur médical, capteurs sportifs), surtout de par son association native avec les appareils BT habituellement utilisés (cellulaires, PDA).

Tableau 2.2 : Comparaison, Zigbee vs. les technologies de communications pour réseaux de capteurs sans-fils

Technologie	Norme	Bande de fréquence	Débit de données (b/s)	Méthode d'accès multiple	Aire de couverture (m)	Topologies réseau	Besoin Mémoire	Autonomie avec pile	Nombre de nœuds	Cryptographie	Établi (s)
Bluetooth Low Energy	802.15.1	2.4 GHz	200 k - 1 M	Fh ¹⁷ + TDMA ¹⁸	1	star		années		ok	1
UWB	ECMA-368	3.1-10.6 GHz	480 M	CSMA ¹⁹ /TDMA	<10	star				ok	1
Bluetooth 3.0 + High Speed	IEEE 802.15.1	2.4 GHz (ISM)	3-24 M	Fh + CSMA/TDMA	10 - 100	star	250 kb +	jours	7	ok	6
Zigbee	IEEE 802.15.4	ISM	250 k	CSMA	30 - 100	star/tree/mesh	4-32 k	années	65000 +	ok	1
6LowPAN (RFC4944)	IEEE 802.15.4	ISM	250 k		100	mesh		années		ok	1
Insteon		131.65 kHz (powerline) / 902-924 MHz	13165 inst.	?	45 m	bus/mesh	256 B RAM. 7 kB ROM typ.	N/A	256		
Z-wave		900 MHz (ISM)	9.6 - 40 k	?	30 m	mesh			232		
ANT		2.4 GHz (ISM)	1 M	TDMA	local area	star/mesh					
Rubee	IEEE 1902.1	131 kHz	9.6 k	?		peer-to-peer					
RFID	ISO 18000-6	860 - 960 MHz	10-100 k	slotted-Aloha/Binary tree	1 - 100	peer-to-peer					0.1

¹⁷ Fh : frequency hopping

¹⁸ TDMA : Time-Division Multiple Access

¹⁹ CSMA : Carrier Sense Multiple Access

Technologie	Norme	Bande de Fréquence	Débit de données (b/s)	Méthode d'accès multiple	Aire de couverture (m)	Topologies réseau	Besoin Mémoire	Autonomie avec pile	Nombre de nœuds	Cryptographie	Établissement (s)
Near Field Communication (NFC)	ISO 13157 etc.	13.56 MHz	848 k	N/A	3 cm	peer-to-peer	b - kb	N/A	1	ok	0.1
Wi-Fi	802.11 a/b/g/n/n-draft	2.4-5 GHz	11, 54, 108, 320 M	CSMA/TDMA	300	star	1 Mb +	heures	32	ok	1 min

Alimentation

Le choix du type de batterie est basé principalement sur le besoin de maximiser l'énergie par rapport au poids. La technologie Lithium-Ion est une des meilleures selon ce critère (dans les chimies en vente libre), n'a pas d'effet mémoire, mais la recharge doit être contrôlée de façon particulière (d'où le choix d'un chargeur spécifique). Par contre, ce type de batterie est très courant et l'empreinte physique idéale est trouvée pour les appareils photo du commerce ou pour certains téléphones cellulaires compacts. Le prix et la disponibilité sont donc optimum dû à la masse de vente.

À noter que l'application proposée est habituellement alimentée par une batterie 3V Lithium (de par leur fuite largement inférieure aux autres batteries et leur bas coût) [5]²⁰. L'architecture doit être évaluée sous cette tension.

Aussi, une mémoire volatile de type RAM sera probablement utilisée ainsi qu'un circuit de contrôle de la charge et de détection de chute de tension (BOR), dont les consommations continues doivent être prises en compte comme pertes supplémentaires.

2.2.2 Localisation

Légèrement différente des autres capteurs, la donnée de localisation est une variable environnementale mais liant fortement la personne à son milieu. Elle est mise à part à cause de la problématique particulière de cette contrainte. Technologiquement, il n'existe pas de solution pratique permettant de localiser une personne plus précisément que dans l'espace d'une pièce [76].

Par contre, en utilisant judicieusement certains paramètres technologiques et architecturaux, il est possible d'affiner la localisation, surtout en mettant en pratique la cohésion des données et leur contexte respectif, soit en utilisant les interactions avec l'environnement qui peuvent partager leur localisation, prédéterminée, d'une granularité spatiale supérieure.

Par contre, pour des raisons pratiques, il n'est pas envisageable de prédéterminer la

²⁰ En général, la batterie typique est de 3.6V, 2 Ah.

localisation de chaque nœud manuellement. Ainsi il est préférable de faire appel à un système de détermination automatique de la localisation géométrique basé sur un processus automatisé ou une autolocalisation coopérative [1].

Dans le cadre des recherches effectuées pour établir un contexte dans un environnement intelligent, la manipulation des objets, fournitures et le passage devant des capteurs disséminés dans un appartement peuvent établir une localisation qui peut être suffisante pour contribuer à la détermination de l'activité initiée. Dans [82], une localisation par fusion de données statistique permet de déterminer la position d'une seule personne dans un habitat intelligent. Pour permettre la détection de multiples utilisateurs, le recours à un système d'agents est nécessaire comme est démontré dans [18]. Mais cette infrastructure, significativement plus complexe requiert une capacité de calcul important, ce qui ne serait pas adapté pour des capteurs de taille minimaliste.

La localisation autonome des systèmes est une application difficile, telle qu'expliqué dans le système Placelab [42]. Ce *framework* logiciel permet à des appareils mobiles munies d'un élément de mesure de position géographique et/ou de communication de participer à la détermination de la position de tout élément faisant partie du système global en autant que ces derniers soient capable d'estimer 2 distances entre lui et d'autres, mais sans avoir recourt à un système de positionnement (comme GPS). Encore une fois, la mobilité des systèmes et leur hétérogénéité impose une solution logicielle complexe et des ressources calculatoire importantes.

Cette mesure est donc idéale pour tester la symbiose entre les capteurs mobiles et ceux de l'environnement, à condition qu'ils puissent communiquer entre eux de façon optimale. Le compromis de la précision face à la complexité de mise-en-œuvre est une recherche à approfondir. Des pistes de réflexion sont données dans [76].

2.2.3 Intégration

Pour ce qui est donc de l'intégration, les capteurs doivent être distribués de façon profonde dans l'environnement mais continuer à pouvoir s'adapter aux conditions automatiquement. Le déploiement des nœuds est le problème de base dans les réseaux de capteurs sans fil. Selon l'application, la stratégie de déploiement est décidée. La plupart des travaux assument que l'environnement est suffisamment connu et sous contrôle, mais habituellement, ce n'est pas le cas : environnement inconnu, hostile, distant, toxique, ou tout simplement trop complexe ou onéreux pour une intégration manuelle. Avec la disposition aléatoire, l'assurance des performances n'est plus assurée : la densité de couverture pourrait être localement insuffisante, le routage difficile, la durée de vie des batteries variable selon la position du nœud et son traitement, la fiabilité des mesures peut ne pas être assurée et la maintenance difficile à effectuer.

La disposition de l'infrastructure est donc un sujet ouvert de recherche et différentes problématiques sont à étudier. En particulier, la localisation est une donnée qui est intéressante de coupler avec l'application mais pose de nombreux problèmes comme introduits dans [26]. La principale utilité est de pouvoir lier la donnée avec son contexte, mais peut aussi devenir nécessaire pour intervenir sur une infrastructure déjà mise en place (maintenance, remplacement, etc.) ou comme présentée précédemment, pour optimiser le déploiement d'une infrastructure lacunaire, pour optimiser la couverture en limitant le temps [102].

Le problème majeur devient le compromis entre le besoin d'une résolution spatiale dense mais en ne déployant que le nombre minimum de points de références dans les environnements existants pour des raisons pratiques ou économiques.

2.3 Conclusions

Dans ce chapitre ont été présentés les différentes approches existantes et les technologies permettant à un usager d'interagir avec l'environnement et vice-versa. Bien que l'ensemble des technologies permettent de réaliser l'ensemble des fonctionnalités utiles aux applications, des choix éclairés doivent être guidés par des considérations architecturales qui ne sont pas

clairement identifiés. En se concentrant sur la problématique, nous proposons donc d'identifier des éléments de réponse par l'utilisation d'un cas d'étude autour d'un capteur de mouvement.

Pour répondre à l'objectif visé, donc de permettre de diffuser à l'environnement des informations reliées aux mouvements d'une personne pour inférer son activité, il est proposé de compléter les solutions présentées ci-dessus par une infrastructure capable d'interfacer élégamment la personne avec son Environnement Intelligent. Le chapitre suivant fera donc la proposition de la conception d'un capteur de mouvements et d'interactions distribué, porté par la personne et relié à l'environnement. Son implémentation sera critiquée dans les chapitres subséquents.

CHAPITRE 3. UN DÉTECTEUR D'ACTIVITÉ PORTABLE UTILISANT DES CAPTEURS ENVIRONNEMENTAUX

Avant-propos

Auteurs et affiliation:

JP. Oudet : étudiant à la maîtrise, P. Mabillean : Professeur

Université de Sherbrooke, Faculté de Génie, Département de Génie électrique et informatique

Date d'acceptation : Octobre 2006

État de l'acceptation : Version finale publiée

Revue : International Journal of Assistive Robotics and Mechatronics (IJARM)

Référence : Oudet, J.P. et Mabillean, P. (2007). Wearable Activity Detector Using Environmental Sensors: Design Report. *International Journal of Assistive Robotics and Mechatronics*, volume 8, n° 2, p. 19-28.

Titre français : Détecteur d'activité portable utilisant des capteurs environnementaux – rapport de conception

Contribution au document :

Cet article synthétise les éléments importants qui ont donné naissance à l'architecture actuelle du système complet. Avec celui-ci, il est possible de prendre conscience des problématiques essentielles, des contraintes et des solutions proposées.

Résumé français :

Le concept de Maison Intelligente s'appuie sur une multitude de capteurs qui interagissent avec les habitants tout en restant le moins intrusifs possible. Ce qui signifie que l'utilisation d'un capteur vidéo est discutable et donc la plupart du temps évitée. De cet état de fait, des capteurs différents et une nouvelle forme d'environnement intelligent sont nécessairement à repenser. Cet environnement intelligent doit fournir à l'Intelligence Globale (le *Smart Engine*) des données utiles pour atteindre le but principal : soutenir les personnes déficientes intellectuelles à rester à leur domicile. Ce papier a pour but de fournir un aperçu d'une nouvelle technologie pour détecter les activités des habitants de la Maison Intelligente grâce à l'utilisation d'un réseau de capteurs intelligents portables et sa symbiose avec la détectabilité environnante, et son utilisation pour interagir avec plus de précision avec l'habitant.

Wearable Activity Detector Using Environmental Sensors: Design Report

J.P. OUDET and P. MABILLEAU

Faculty of Engineering, University of Sherbrooke, 2500 boulevard de l'Université,
Sherbrooke (Qc), Canada

(E-mail: [jean-philippe.oudet / philippe.mabilleau]@usherbrooke.ca)

Abstract

The house of tomorrow has to use a plethora of sensors, which are used to interact with people while remaining as non-intrusive as possible. That is why the use of a video camera could be debatable and is most of the time avoided. From this state of fact, and because sensors are undoubtedly necessary, a new form of smart environment is needed. This smart environment has to provide to the global intelligence (i.e. "the Smart Engine") some necessary data to achieve the main goal of the DOMUS Laboratory at the University of Sherbrooke: helping cognitively impaired people who are still living at home. This paper is aimed to provide an overview of one new technology used by the laboratory to detect activities of inhabitants of Smart Homes with an array of intelligent wearable sensors (Worn Smart Network) and symbiosis with the overall detectability, and its use to interact with more precision with the user of a Smart Home.

Keywords

Smart sensor network, wireless network, detections of ADL, mobility, localization, situation awareness, disabilities reducing technology.

Introduction

Nowadays, due to the ever-increasing longevity in the western population, the number of elderly persons is growing dramatically [3] and [81]. Moreover, the rise of health costs and the incidence of long-term chronic diseases are driving a trend towards increasing the level and duration of care-at-home. This ever-growing elderly population seems to be more and more attracted by the idea of staying at home as long as possible, avoiding the difficulties to find a place in specialized structures with nursing capabilities such as hospital or old people's

home and maintaining at the same time their own independent living. This natural wish of disabled and elderly to stay at their residence, to live independently of a care dispensing structure, could be a practical or cost-saving solution but on the other hand could be problematic regarding their security or wellness. These technical issues need to be solved. Firstly environmental data are collected and processed to be used in an automatic interaction with the person. Alternatively, the person themselves or the environment could alert caregivers in cases of danger.

The credo of the DOMUS laboratory complies with the increasing popular tendency among the research community which aims to explore how everyday life can be supported and enhanced through interacting devices. What we want is that the computer as we know it has no more interest but all the intelligence distributed into "artefact" (in the meaning of human-made objects which gives information) will form a new kind of environment more people-centric which will be useful to help them in any kind of situation. More than the ideological approach of the DOMUS laboratory, which aims to provide proactive help to people with reduced cognitive capacities, the main goal of any domotic or ubiquity researcher is to develop new concepts or applications. These should be supported by innovative technologies and a completely renewed view of our actual conception of our environments. This should also take in to consideration the notion of not destructing it for another futurist, Sci-Fi-like and overwhelming technological home or work place but by minor transformations only. This notion of a normal routine and a reticence to see wires or sensors spreading into a well-known living environment is very easy to understand. Far from being *Deus ex Machina*, the pervasive intelligence present in the environment will provide supervision for the user, alike an unexpected, artificial device or event introduced suddenly in a task to resolve a situation. To achieve this easily, both sensing and HCI have to be extremely precise.

The main topic discussed by domotic researchers is the use of cameras to analyze everyday activity. Although it is a very useful and analyzed tool, offering a lot of very good results, in a precise and convenient manner, the fact that a lot of people are currently reacting to the security cameras in the streets provides proof that they are concerned with privacy issues.

Actually, it is common to encounter a lot of resistance from the population regarding fixing a camera in their living environment. We do not want to enter the debate but this point is an example of limitations we, as engineers, are obliged to take into account, when working with people, if we aim to diffuse data (e.g. to caregiver, family ...). In this work, this problem was circumvented by using a new approach based on a new collection of techniques and tools to avoid the utilization of webcams or regular cameras, using the most current possible sensors to achieve the best results. This paper deals with the benefits of the utilization of sensors which are worn by people but used in synergy with the environment. These sensors will permit the gathering of personal data and take from the mobility and the ubiquitous strategy, a certain advantage on systems using only fixed sensors or even on the most high-tech wirelessly connected body motion sensor.

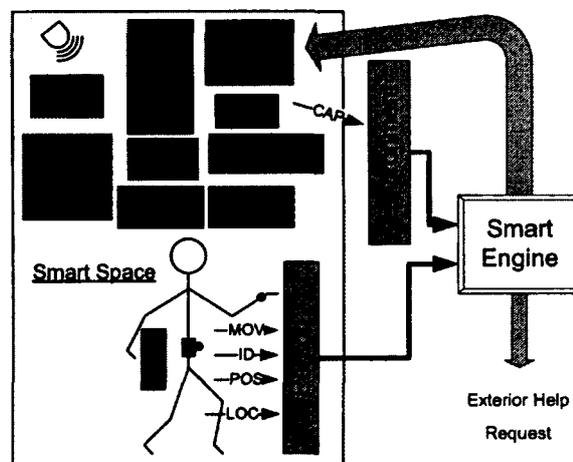


Figure 3.1: Overview of sensors' interactions in the Smart Home

A large field of research among the community involves the exploration of the potential created by the deployment of smart sensors, throughout an apartment, for the analysis of daily life of smart home inhabitants. Another subject is the embodiment of various types of sensors on the body to detect characteristics such as movement (activity), biometric data (monitoring), localization, etc. useful for a more precise analysis of the condition of the person. The novelty of this study is to present a new concept using the consolidation of these two approaches in determining how the synergy between wearable and home sensors can contribute to building greater overall precision and reliability for a system of ADL (Activity

of Daily Living) detection, and assisting to improve the quality of the help provided by a better knowledge of what is being undertaken by the occupant(s). A wireless network of smart sensors, wearable by inhabitants of a smart environment (home, transport, public places ...), is presented in this paper.

The system is composed of three components: two bracelets and a small box attached to the person's trunk. The body movements are analyzed to predict the current activity, in order to provide intelligent support.

The focus of this project is to provide new sorts of sensors, to be worn as near as possible to the user and providing and receiving data as specific as possible, enabling it to improve the quality of interactions with the environment. Approaching the objectives of governmental initiatives [29], the project, rather than developing such an artefact, is experimenting new ways of collecting data in an intelligent setting using this state-of-the-art sensor based system whilst trying to hide the technology from the user. Moreover, we are working with a team of industrial designers at Montreal to study how systems could be integrated into real-life equipment with the wrist-watch and the belt box forming the subject of similar studies.

The Wireless Sensor Network is used as a complex system:

- to facilitate symbiosis with the context
- to improve the quality of the ADL recognition
- to provide a source of precise data very close to the body

To resume the explicit explanation of the context of this research written by *Philipose et al.* [78], trying to stay proactive but minimizing intrusivity we pursue the same vision of disappearing human-computer interaction (HCI). The activity monitoring is done by watching changes in the environment, monitoring differences in the normal progression of a task, detecting behavioural inconsistencies and trying to help directing interactions with the user or, in case of real difficulties or danger, sometimes alerting someone in charge.

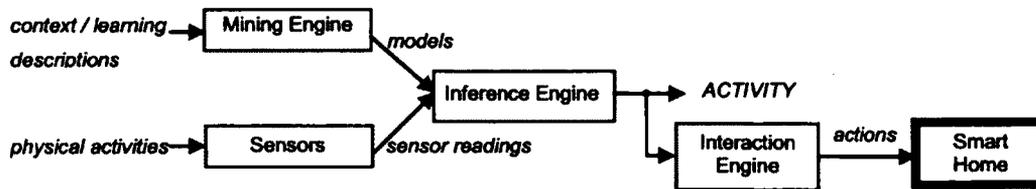


Figure 3.2 : High-Level View of the Concept

The core utility of an array of sensors is to provide accurate, simple, synergistically improved, customizable and robust data fusion used to observe behaviours of users, infer activities useful to the rest of the overall intelligence of the context-aware setting. One of the challenges designing fine-grained systems is to create it as versatile as possible, avoiding the multiplication of dedicated sensors worn or installed in the environment. They should stay as invisible as possible for the person. The combination of three important vectors is used in any system used to support and enhance people's lives: customized detectors (even if COTS sensors are used, it sometimes requires some modifications), inference engines and augmented settings. All three parts have to be designed with the same idea of versatility and non-obtrusiveness.

Taking this into consideration, we present our proposed solution envisaged to be the base of new types of research where the people, their actions and even their position in their environment are the real inputs. The following Section provides an overview of related work in this area.

3.1 State of the Art

3.1.1 ADL recognition

A known difficult problem from health care is to recognize multiple ADLs in a real home environment. Many researchers are working on inferring ADLs [38], [58], [57] or [17]. The most interesting investigations are those which imply a set of different low-level sensors (mainly motion and contact) to infer multiple ADLs. As a result, only general activity levels or a rough estimation of kitchen and bathroom activity can be determined. Some others are focused on single ADL but do not usually report the quantitative results of user testing.

The multiple-ADL approach most similar to ours is the one from *Intille et al.* [48]. Our work

differs from theirs because we immediately analyze collected data, with our in-situ sensor network. We are also in the early stages of creating prototypes and thinking about how to deploy fusion and improve the analysis. Our work can be seen as the development of all the present solutions in the ADL recognition field of research.

The actual research at the DOMUS Laboratory relating to ADL deals with the construction of a model of the habitant [11, 12] or intelligent interfaces. All the subjects studied could be applied to our approach and a link will be easily made between all the projects due to the real apartment environment located within our laboratory.

3.1.2 Body Sensors

Since the collective activity around the topic of sensing and monitoring devices for healthcare are centred on particular point-of-view (either motion or vital signs) this study may be considered notable because of its ambition to create a common platform for the whole field.

The closest research in the area of worn sensors for movement analysis is led by the LMAM at EPFL. A useful conclusion on motion detection for the ADL inference was extracted from this paper [72], and as such has supported the construction of our approach.

3.1.3 Body Wireless Network

The Imperial College of London has recently started a biomedical smart sensor project [87]. The consortium involved is searching for state-of-the-art solutions to miniaturize and improve the durability of body-mounted sensors. This proposal assembles a multidisciplinary team with the overall objective to lay the foundations for a new generation of intelligent, self-managing, context-aware biosensor networks for critical control of human health. Similarly, the Healthy Aims project [30] is developing medical body wireless networks using micro-technologies. The present proposal diverges from these projects in an architectural point-of-view, since simplicity is preferred to miniaturization. We focus on the concepts of exploration with COTS components satisfying the need of the project. In this manner the work accomplished will be complementary to these large projects, and more pragmatic.

3.1.4 Smart wear

To date, research efforts have not managed to find a potential market due to the high cost of the emerging products and the lack of important needs from this very market. However, the technologies are close to being exploitable. Local positioning systems (LPS) integrated into clothing or system incorporating RFID-tags or Wi-Fi cards [36] are examples of developments made by commercial firms or research centers.

The best effort in this domain has been led by the US Army, through the "Future Force Warrior" program [93]. The aim of this program is to provide a complete set of equipment to enhance the soldier's mobility, situational awareness (Command & Control and Communications), lethality, sustainability and survivability. One of the first elements will be the Commander's Digital Assistant (CDA), a kind of militarized PDA. The current version uses satellite phone capability and is able to download maps with overlaid graphics. When deployed with dismounted teams, CDA provide access to sensors, intelligence and tactical data previously not available at such tactical levels. Given even the army is interested in a global interconnected intelligence, this principle argues the importance shown in developing smart devices more or less integrated into the common-life objects, from PDA to *wearables* and is a perfect illustration of the interest of the approach.

3.2 Conceptual Description

The persons by which the current study aims to support, and is presently the same at our laboratory, are primarily elderly people or those suffering from schizophrenia or Alzheimer. In addition the concepts could be extended for use by any disabled person. Anyone who wishes to extend their stay at home will not be either watched constantly nor be harnessed with cables. This non-intrusivity is a mandatory point of view which does not permit the use of cameras to detect motion like activities, for example, in cinema or video game studio motion capture systems.

The properties of the developed architecture were mainly constructed with mobility and non-intrusive views. The sensor is desired to be able to collect motion information during normal activities without being detected by the carrier. The non-intrusive, multi-site (trunk

and wrists), multi-elements, wearable - or bracelet-like - detectors seem to be a good approach for a long-term utilisation. So a provisional shape of bracelet-like elements, as well as a small box attached to the trunk could permit the person to forget their presence like cell phones and watches. Actually, some other studies are conducted to improve the miniaturisation (i.e. the Smart Dust project [80]), which could hide the actual solution deeper into clothes or embedded applications like cell phones, PDA or the future smart phones. This is driven by the tendency for the convergence of services (e.g. cell phones are already all equipped with cameras; we could easily think that motion sensors or other MEMS-like sensors could be added). The non-interference is one of the ideas that is most often taken into account during the design of the solution - even for a prototype - due to the importance of the errors of analysis inducted by abnormal behaviour of the carrier.

To improve the quality of life and support persons everywhere possible, in addition to improving their own security, the caretaker or even the smart environment needs to find out the behaviour, what the person is doing, or predict what could be the desired action undertaken. To achieve this, the system presented was designed to detect movement, improve analysis, and return the most accurate possible activity of daily life.

The movements acquired by ambulatory systems are used to monitor the inhabitants and to detect their activity. Using this analysis, a smart environment or device could react and provide support to them.

Three different levels of detection with wearable sensors are possible: locomotion (walking, sitting, running, stepping, lying), orientation (stand, crouch, prone) and motion of effectors: hands. Since there is no occlusion of markers like in optical motion capture systems, the actor can make complex movements. The objective of the complete system is to provide data used to identify the action realised. The environmental sensors are a key element in the system. The electronic environment informs the embodied devices and provides context-sensitive information, as well as general data such as absolute positioning in a space defined location (room in a flat, bus, shop in a commercial center room in hospital). The possible accuracy needs to be determined to know which level of precision of movement is potentially reachable, and which actions could be discriminated from others.

The architecture creates a local (and personal) detection via a networked wearable sensor to extract the level of activity and the type of activity with different levels of precision. This activity could be simple: walking, resting, sleeping; more precise (intermediate level): cooking, washing oneself, having a meal; or definitively accurate: drinking, teeth brushing, scratching. These different descriptive levels of activity are easily differentiable for context-aware intelligence, from a global activity like having a meal to a more specific one like drinking or cutting a steak. With low level intelligence, it is difficult to differentiate the action of pouring coffee into a cup or drinking it. The precision needed to discriminate the two actions needs to be very accurate. Improving the actual systems, with only simple levels achievable, this study wishes to reach an intermediate level, i.e. to obtain a precision which could permit to discriminate “pouring coffee” or “taking medicine”. With the combination of context, localization and motion data, these kinds of confusions could be reduced.

The existence of this synergy ([21], see also notes at the end) between environmental- and body-related sensors could be explained with the benefice on the action determination of the localisation, knowledge of inhabitants' habits, contextual inherent information, etc. We can deduce by analysing a specific kind of movement (“is moving the hand circularly on a horizontal plan”, “sitting”) and in determining where the person is (“on his armchair”), what action is being accomplished (“moving something”). If the location “armchair” is known, the action becomes “reading ... newspaper” with more certitude, due to habits or contextual learning.

Moreover, the mobility researched with this architecture is easily achievable with actual technology. Every characteristic could be obtained with low-power transducers; the processing and circuitry are not problematic issues nowadays in an embedded system. The wireless improves the independence of each part of the network, between them and the enviroing space.

With a low power RF link such as Zigbee, some antennas in the neighbourhood are needed. The drawback of this solution is the need of equipping every distinct space available to the public. But the advantage is the “world dependant” information (depending on the base station's location linked with the worn sensor), at the cost of small systems in the order of a

few tens of dollars each base station, which could be also compatible with other systems. This solution could complete the GPS for localization (for the indoor positioning in particular), for the reception of context-sensitive data for the user's benefit.

One of the major advantages is the exploitation outside the home. Thinking of a network integrating e.g. a smart phone, the disabled person could have on it an intelligent alert device which could detect a wandering compartment, panic situation, or any activity detectable relative to the person's security, and could transmit a signal to a caregiver. Consequently, even if the person is in a bus or at the commercial center, ADL detection could work and hence improve security at the cost of some environmental information transmitted by antennas implanted everywhere the public has access to. This drawback seems to us not a very important subject for now, because of the relatively low cost of emitters (the same kinds of discussions relate to RFID tagging). Assistance, localisation and identification are the keywords about this solution.

Previously, with environmental systems based on IR sensors (anti-intrusion-like systems), if an animal or even two persons moved simultaneously, the action could not be attributed to the correct actor. But now, another advantage of the personal worn sensors is the *personification* of the information provided by the system, as well as the identification of the person. Encryption provided by the worn processing unit and a relatively small range protect the contents of the signal.

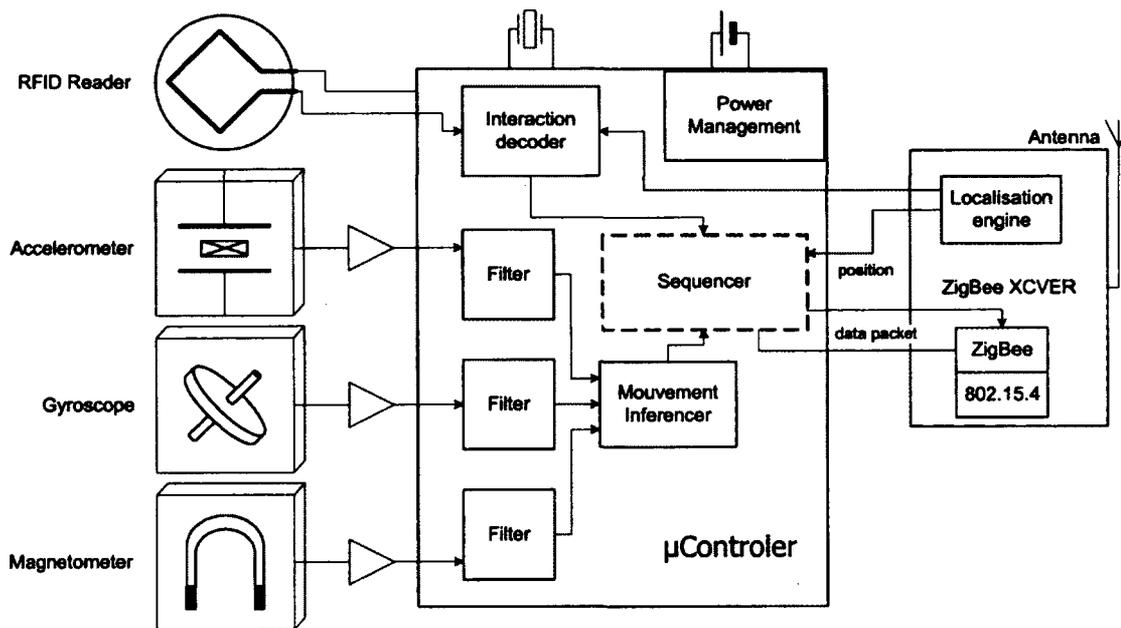


Figure 3.3 : Block Diagram of a Sensor

3.3 System Design

Some features have been added to the preliminary design [75], providing more interesting, easy to deploy and context-aware information.

With this architecture (Figure 3.3), we have a very convenient platform, usable with a broad range of sensors. We are currently trying to link different type of sensors and other features, batteries, RF modems etc. trying to have the best quantity of information with the least number of components possible.

3.3.1 Embedded Processing

The following details some variation from the previous work, whereby the hierarchy envisaged should have used a simple 802.15.4 transceiver alike almost every vendor's recommendation with an 8051-based chip. Our choice is to use the *Chipcon* CC2431, a *System-on-Chip* (SoC) radio module built on an enhanced 8051 microcontroller, memory, a localization engine and some other very useful features, as a co-processor for transmission and localization and even as an interface for some compliant modules or computation, if needed.

The pros are in particular an improved capacity of processing, dedicated circuitry for the power-hungry transmission, expandability and controllable power management of the transceiver. The cons are more space on the PCB, extra consumption and complexity. Nevertheless we are designing a prototype of a customizable, research oriented solution of wearable sensors, at the very early stage of development. We need to explore the real requirements of this solution, especially thinking of Zigbee which was a relatively new technology, not enough deeply deployed to be able to give a full-optimized solution. The best advantage found in this structure is the location engine combined with the most powerful 8 bit enhanced microcontroller (from Silicon Laboratories). This duo will be perfect to avoid the use of a 16 or 32 bit controller, distributing the task between two more manageable small computing entities while allowing the utilization of the only-known SoC part which could automatically give the spatial position of this system.

The localization is very convenient information. The resolution of this Location Engine is estimated at 0.5 meters, in less than 40 μ s, within a range of 64 x 64 meters for a final accuracy of 3 meters or less. We are trying to reduce this constructor data by averaging the results but it is already useable in a dwelling or an office.

3.3.2 Sensors

Many highly miniaturised transducers, like micro-machined electromechanical systems (MEMS), are integrated into embedded applications to collect data. For our application, motion is the only interesting parameter, but a lot of other data is currently extracted by other projects, like blood pressure, ECG, orientation, position to name but a few. Small devices like microphones, MEMS, passive integrated circuits, and other custom solutions are power-efficient, relatively economic, small and robust. They are perfect for in-depth integration, at a point close to the subjects' skin, to extract global useful data of wellness, situation, position, activities, etc. Moreover, the miniaturisation tends to reduce the intrusivity of the sensors.

One point of interest will be the "site" where the system has to be attached. This is a common issue in the sensors world; interferences and performance are conditioned by this important issue [9, 36]. We try to find the lightest solution possible and the least intrusive in order to

lower the discomfort and errors of measurement, so the smallest form factor sensors are the best, and MEMS are more and more interesting in regards to this point.

At rest (low acceleration) and calibrated, a three-dimensional (3D) accelerometer could return the gravity vector. This design refers to the conclusions of *Luinge* and *Veltink* [61, 94], which clearly affirm that a 3D accelerometer IMU (Inertial Measurement Unit) composed of only accelerometers could perform inclination measurement, gyroscope being the more expensive complement. An interesting device is the 3D monolithic single chip accelerometer from ST, or its equivalent from Analog Devices. We have the opportunity to decrease the overall dimension significantly, since the electronic parts are reduced as well as the surrounding electronics.

The bandwidth is relatively narrow and the amplitude small; the tests realized show that any type of low-g sensors achieves the measurement of any interesting motion (the highest measure was movements at 20 Hz, more commonly at very less than 10 Hz, and for very low amplitude of accelerations). Moreover, on every commercial or presented research accelerometer, the specified amplitude was approximately 2 to 3 g, the ADXL202 chip is the most commonly used sensor.

For this new solution, the sensors chosen are: an *Analog Devices* ADXL330 as the triaxial accelerometer, an *Invensense* IDG-1000 Dual-Axis Gyroscope, a *Hitachi-Metals* magneto-resistive sensor. The best combination is still interesting to know, especially for our context, and we will have to compare these results with the conclusions of *Luinge* and *Veltink*. An interesting point of study is the behaviour of the magnetic compass in highly perturbed settings, like the kitchen, and how we manage to keep coherent results. One thing is to be remembered: we do not have to continuously monitor the orientation, but use it as a reference; the magnetic North is used as a reference, exactly like the gravity.

The sensors present in the laboratory are IR security-like sensors, pressure sensors, microphone, contact, flow-meters, tactile carpet and buttons. All of them are connected to a central device serializing the state of the apartment which is used by the "Smart Engine".

3.3.3 RFID reader

The RFID reader, as deployed by the Intel researchers in [34, 78] has demonstrated its

usefulness. The reader used here is the same as their *iGlove* [16, 47], provided by *Skyetek*, “the industry’s most space, cost and power efficient RFID modules providing support for a wide range of industry standard and proprietary protocols, enabling the readers to work with the widest range of RFID tags”. It is a very practical module for this architecture, almost a plug-and-play add-on since the interface may be a UART or SPI or I²C. This simple module enables the environment to know what has been grabbed by the user. The information gained will be relevant to the improvement of the activity inference since the human behaviour depends also upon the objects they handle. An object identified is an easy way to give contextual information interesting for the inboard detection. Even if object handling is not a certainty, the proximity of an object during an activity can offer a better recognition for this activity.

3.3.4 Wireless Network

Another new feature we wish to include into the system is a low power RF link. Due to the high consumption of WIFI and Bluetooth, these technologies do not fit well in our application. The emergence of “Zigbee”, predicted to replace Bluetooth for ultra-low power systems, has become widely used in the community, in particular in our laboratory. For application like ours, Zigbee is the best ratio bandwidth/consumption and brings new interesting features. Originally, WIFI was created for WLAN, whereas Bluetooth for peripherals and Zigbee for domotic and control applications. Zigbee is not targeted for high data rates, but for low power, low cost and ease of use (remote controls, home automation, etc.). This technology is predicted to be widely used in future smart homes, and on the other side, fits perfectly with the needs of the wireless sensor network. Finally, the choice of a homogeneous low-rate wireless network stems from the opinion that much of the success of the wireless sensor network market will depend on standards, so that nodes from multiple vendors can be interoperable. The detection needs contextual information from anything surrounding the person to favour the analysis, so integration with the global network could be interesting.

3.3.5 Power Source

One perpetual point of interest is the power source and the consumption of the device. Since it is created to stay during a long time on the person, either a rechargeable or an auto-powering source has to be integrated. Batteries are the first source we can think of, but it could be interesting to take a look at fuel cells or mechanical powering (with movement or vibrations). Some considerations on the design are predicted to be therefore challenging. For now, cell phone high-tech batteries are used and the local processing tries to minimize the global consumption as best as possible.

3.3.6 Base Station

The array of sensors need to communicate with a very complicated environment (pervasive, ubiquitous, and is composed of a broad type of elements in our laboratory) and it also needs to be as flexible as possible to be able to reuse it. The antenna, linking the environment and the system needs to transmit (and select) the right data from the worn sensors and from the complex inference engine, and will receive identical data streams from the sensors. To route these two channels, we conceived a solution based on a commercial router, with a custom firmware (a *Linksys* home router with DD-WRT) which is able to run an OSGi framework. This is useful to remotely manage services that handle high level decision making algorithms and bridge in house functionalities with external service providers (like the DOMUS' PCA (Pervasive Cognitive Assistant) Engine [11]). Depending of the sensors present in the setting, worn or fixed, several routing and managing bundles can be loaded into the router acting as a home gateway. The low level sensor world was by this way connected to the "Smart Engine" written in Java, through the Zigbee network and a home-made antenna.

It was also necessary to add security procedures with the base station being the core of the problem. All data transmitted through it and the Zigbee link will normally not be reachable from outside of the apartment. The link could be secured by a protocol, and since now the "serialised" data has no meaning out-of-context.

3.4 Outlook

Our goal is to provide the person with a relatively complete interface within the environment. We assume we could link useful data extracted from the person itself to the pervasive computing facility present everywhere around to improve the overall context awareness of anyone requiring it (the carrier or a person in charge).

Starting with this, we would like to enlarge the network with the use of Smart Phones which could be the main device in the “body net” with more processing capacity, a set of very useful features “all-in-one” (widely available communication, PDA-like extensions, GPS, Wi-Fi, compass), a versatile support for the development and a multiple interface through audio or the screen. The main problem at present is the operating system integration; all layers of the application (ADL detection, analysis, communication) depend on the proprietary solution. Most of the time, the OS abstraction layer is the Java Virtual Machine (JVM) but is implanted as a reduced version, with Windows or Palm OS.

Another point of possible issue is that Zigbee is not well implanted yet, contrary to Bluetooth. Drivers and full-featured, ready-to-wire chipsets are almost inexistent. For a research perspective, efforts have to be made in order to have systems compliant with the majority of OS and other software sub-layers as well as hardware integration.

3.5 Conclusion

A key element of the quality of life of a person is their mobility. The first step of this proposed approach is to document capabilities about the detection of the subject’s motions. We guess the base development described here-above will help us to create a lot of interesting clinical or research applications to improve this detection.

Our approach is definitely pragmatic; our point-of-view is that we need to evaluate each results of each step before extending the prototype. Since accelerometers are well-known and reliable transceivers, it will be the base of the experiment to reach an optimum exploitation and reliability level. Contrary to GPS, the localisation of the device will be another point of interest, even if the granularity is not yet sufficient for certain fields of research, this information will be a more precise complement to the geo-localisation in small environments.

This solution needs to be explored and developed; therefore the work will be to enhance the prototype so as to obtain more concrete experimental results. The following planned activities will support the data which is extracted and hence be used as the base of further research studies. The first step will be to extract the level of activity; next will be the 3D motion, the movement recognition, and finally the ADL inference. The ultimate step predicted is the integration into a ubiquitous framework.

3.6 Example of synergistic differentiations

Tableau 3.1 : Synergistic Differentiations

		Possible inference
Localisation	Kitchen	preparation of something to eat
Movement	rotation of the wrist	pouring, not drinking
RFID tag	ID left = tea bag box, ID right = kettle	relevant to tea
Activity	Preparing tea	

		Possible inference
Localisation	Kitchen	preparation of something to eat
Movement	rotation of the wrist	pouring, not drinking
RFID tag	ID left = drug box, ID right = glass	relevant to drugs
Activity	Taking drugs	

		Possible inference
Localisation	Kitchen	preparation of something to eat
Movement	twisting of the wrist	drinking, not pouring
RFID tag	ID left = empty, ID right = glass	relevant to liquids
Activity	Drinking	

CHAPITRE 4. ANALYSES ET RECOMMANDATIONS DE CONCEPTION

4.1 *Perspectives*

Les années 2000 ont marqué le début des réseaux de capteurs intelligents, c'est donc une matière relativement nouvelle. Les technologies existantes alors ont été très vite dépassées suite à l'engouement de la communauté scientifique et tiré par l'intérêt clairement prononcé de l'industrie. De nouvelles solutions apparaissent très vite, de nouveaux standards font leur apparition, des protocoles sortent de l'industrie régulièrement pour répondre à un besoin très spécifique, les techniques évoluent et se raffinent rapidement, les prix se réduisent (par l'effet de masse et parce que le marché est mieux contrôlé, donc doit être plus compétitif), la loi de Moore²¹ permet des circuits plus sophistiqués (dans ce contexte : plus d'Instructions Par Secondes (MIPS) par Joules), etc. Les technologies utilisées sont pour la plupart bien maîtrisées mais il reste difficile de planifier ce type de systèmes. Ces technologies suivent de nombreuses évolutions qui sont trop rapides pour même la durée de vie de la conception d'un prototype! Il est donc nécessaire de penser bien plus au niveau architectural qu'à simplement un assemblage de composants. Certes les composants sont généralement simples et leur interfaçage ne représente pas, pour la plupart, un défi particulièrement notable. Il n'y a souvent que peu de recherches théoriques liées au concept de capteurs intelligents, du moins surtout du point de vue matériel. Le logiciel et les protocoles sont eux un sujet de recherche académique abondamment présenté.

Par contre, il est clairement apparu que, comme l'ingénierie logicielle s'est développée à la suite de l'explosion de la complexité des applications, il existe une lacune semblable dans le monde des réseaux de capteurs intelligents : il existe un espace de conception qu'il est nécessaire de rationaliser. Le fait que les WSN soient par essence diffus et surtout dispersés dans l'environnement complexifie de façon importante l'application.

²¹ ... qui fait référence à l'augmentation régulière dans le temps du nombre de transistors dans les circuits imprimés.

4.2 Conception de la plateforme

Cette section résume et explique les choix technologiques. Des précisions supplémentaires à la description donnée dans le CHAPITRE 3 sont données ici pour introduire les schémas de la mise-en-œuvre réalisés présents en Annexes. Se référer à l'architecture schématisée à la Figure 3.3. Le capteur se présente comme une carte unique supportant un microcontrôleur principal, un SoC pour la radio, les capteurs et les connecteurs pour les circuits externes ainsi que divers sous-systèmes pour la gestion de l'alimentation et de la connectique.

4.2.1 Unités de traitement de l'information

Le microcontrôleur (MCU) principal est un *Silicon Labs* C8051F120, architecture 8 bits de type 8051, 100 MIPS. Il supportera l'application principale. Ce MCU est le plus complet et rapide des microcontrôleurs 8 bits connus sur le marché. Il est très pratique par sa simplicité, son caractère versatile et ses fonctions avancées pour le traitement analogique. La mémoire interne est une des plus grosses disponible, le nombre de broches est largement suffisant pour la plupart des applications et les périphériques disponibles sont nombreux et efficaces. La consommation est raisonnable et la complexité de mise en œuvre est réduite. Le prix des outils de développement commerciaux est relativement bas. Dans l'ensemble, c'est le meilleur compromis pour tous ces facteurs entre les processeurs ARM v7, MSP430 et DS80C4xx pour ce qui sont des architectures couramment utilisées, donc avec un environnement complet disponible à l'Université.

Le composant gérant la communication est le SoC *TI/Chipcon* CC2431, architecture 8 bits de type 8051, 32 MIPS²², coprocesseur de localisation intégré, modem compatible 802.15.4 intégré. Il est utilisé pour implanter le protocole de communication. Le choix d'une architecture à deux processeurs peut paraître sous-optimal, mais il est soutenu par plusieurs raisons [103]. Premièrement, l'utilisation du modem CC2431 fournit une fonctionnalité intéressante et exclusive à ce circuit qui est le coprocesseur de localisation. L'alternative aurait été un modem simple de type CC2420. Ensuite, de par la complexité du protocole

²² Millions d'instructions par seconde

Zigbee, l'implémenter dans un circuit non indigène s'est révélé difficile. La possibilité de profiter des mises à jour, en s'abstrayant de l'architecture s'est révélé un choix indispensable, surtout parce que, à la date du choix, il n'existait pas d'implémentation fiable et ouverte du protocole Zigbee ou même d'un protocole concurrent respectant les critères de sélection.

Également, la question énergétique étant primordiale, l'effet de l'ajout d'un MCU supplémentaire ne signifie pas forcément une augmentation de la consommation, mais plutôt une possible rationalisation des processus liés à la communication qui peuvent être complètement oubliés momentanément. Le CC2431 est capable de se mettre dans un mode de très basse consommation en attendant qu'une trame doive être reçue ou émise. Il se réveille en un temps relativement court.

La possibilité de segmenter deux tâches dans différents domaines d'exécution est une solution optimale pour segmenter les risques de corruption volontaire (*piratage*) ou involontaire (fautes). Il est donc possible d'améliorer la protection des données en réduisant les possibilités de transactions avec la mémoire principale.

Finalement, la capacité de concentrer le développement du logiciel applicatif dans un processeur aux capacités plus importantes (versus uniquement utiliser le CC2431) libère des contraintes particulièrement fortes, inhérentes au développement d'un logiciel embarqué. L'effet a été de pouvoir augmenter la capacité de calcul et de traitement de l'information dans le MCU principal.

4.2.2 Mémoire

Pour stocker l'information, une mémoire de type MRAM est intégrée (MR2A16A). Le circuit d'interfaçage est un habituel partage du bus d'adresses/données pour réduire l'empreinte sur le circuit imprimé. Les bus sont de 8 bits de large. À noter également que le circuit utilisé est un circuit 16 bits de large, avec séparation octet haut/octet bas qui doit être gérée manuellement par le MCU²³. Tous les signaux sont regroupés sur un connecteur haute densité qui permet de changer la mémoire pour un périphérique en disposant de l'interface standard des mémoires de type RAM (Figure A1.1 et Figure A1.2).

²³ À l'heure de la conception, il n'existait pas de composant MRAM 8 bits.

La problématique de la mémoire « de masse » est particulièrement intéressante. Le principe d'une mémoire MRAM est de combiner la rapidité de la technologie S/DRAM avec celle de la rétention de la Flash. L'interface est standard pour un transfert parallèle de type RAM, et il n'est pas nécessaire d'alimenter le circuit de façon particulière. Les MRAM ont des performances similaires à la SRAM, une densité similaire à la DRAM et une consommation sensiblement plus basse que la DRAM ainsi qu'une rapidité bien supérieure aux mémoires FLASH. Pour ce qui est de la rapidité et de la conservation d'énergie, cette technologie est un meilleur compromis qu'une SRAM conventionnelle ou une Flash puisqu'elle combine les avantages des deux. Elle a cependant le désavantage de ne fournir qu'un espace de stockage relativement restreint comparé à une FLASH.

4.2.3 Capteurs

Pour ce qui est du choix des capteurs, de façon générale, la technologie MEMS a été préférée, bien entendu pour la compacité et la consommation réduite. Par contre, les générations se succédant, il est certain qu'il faudrait revoir le choix des capteurs par rapport à l'évolution de la technologie. L'interface analogique est certes plus complexe à utiliser, mais, à l'heure de la conception, elle permettait d'avoir un contrôle plus fin sur les signaux que les interfaces numériques disponibles, surtout pour ce qui est des accéléromètres et des microphones MEMS. Il est bien évident qu'un capteur triaxial pour les 3 différentes mesures inertielles serait un plus, mais à l'heure de la conception, un gyroscope 2 axes était un composant innovateur et haut de gamme, idem pour le compas.

La chaîne d'acquisition du signal est conçue pour optimiser la qualité des mesures. Le choix du microcontrôleur est spécifiquement adapté à cette tâche : les convertisseurs intégrés sont parmi les plus rapides et de meilleure résolution parmi ses concurrents de performance comparable. Cela permet entre autre de ne pas devoir ajouter des composants externes pour cette tâche.

Les capteurs de l'IMU sont le *Analog Devices* ADXL330, le gyroscope 2D *Invensense* IDG1000A, et le compas (capteur magnétorésistif) *Honeywell (Hitachi-Metals)* HMC5843.

La sortie de l'accéléromètre étant sensible et par choix analogique, pour profiter pleinement de la qualité de la mesure, un filtrage anti-repliement par un filtre *Sallen-Key* de 4^e ordre est

introduit avant un convertisseur 12 bits. La tension de référence étant sélectionnable par logiciel, on peut comparer le niveau à celui mesuré immédiatement aux bornes de l'accéléromètre (Figure A1.3) sans prendre en compte la perte d'un filtre passif ajouté pour isoler du bruit sur l'alimentation de ce dernier.

Les filtres sont conçus pour avoir un gain le plus « unitaire » pour la bande passante du capteur, ils ne font strictement que limiter les possibles perturbations en haut de la fréquence de repliement. Le choix de la topologie *Sallen-Key* est justifiable justement pour cette raison. Le but est de s'assurer de laisser passer sans perturbation dans la bande passante et de rejeter le plus efficacement possible dès la fin de la bande passante interne du capteur analogique. On cherche en particulier à supprimer le bruit issu de la modulation²⁴ interne du capteur. L'impédance d'entrée est infinie et de sortie est nulle, ce qui est intéressant pour simplifier un interfaçage entre différents capteurs et un convertisseur analogique/numérique.

Un des buts à atteindre avec la topologie *Sallen-Key* (Figure A1.4) était de laisser un maximum de la bande passante, mais de rester le plus neutre possible si l'on devait changer de capteur. Il est juste nécessaire de modifier les valeurs si l'on change le capteur pour s'ajuster à sa nouvelle bande passante. Cela est un excellent choix de circuit tampon qui n'utilise pas d'inductance, ce qui réduit le bruit numérique parasite. L'inconvénient majeur est l'espace requis pour implémenter ce filtrage; compromis entre la qualité et l'espace requis pour favoriser la modularité.

Pour le gyroscope, moins sensible, le principe est plus simple, la tension de référence est fournie et est directement utilisée pour le convertisseur.

Le compas étant numérique et configuré comme étant très lent de rafraichissement (pour un intérêt de conservation de l'énergie et la mesure statique étant suffisante), l'interfaçage est simple.

Le lecteur RFID²⁵ choisi a été préféré parce qu'il est multistandard, flexible et très compact. Le lecteur RFID est configuré pour transmettre sur le bus I²C parce qu'il est également utilisé

²⁴ Provenant de la conversion capacité-voltage du circuit de conversion du MEMS (source : fiche technique du composant).

²⁵ Skyetek, Inc, inc., <http://www.skyetek.com>

par le compas.

4.2.4 Connectivité

Une connexion USB *full-speed* est implémentée. Elle est assurée par un circuit de conversion UART vers USB CDC (adaptateur série) qui permet, à l'aide d'un port COM virtuel (VPC) de communiquer comme par un port série. Le circuit est le CP2101 de *Silabs*. Elle est utilisée comme passerelle avec l'environnement, pour la recharge et pour la programmation.

Un connecteur extérieur, SPI et I²C, est utilisé pour connecter le lecteur RFID M1-mini de *Skyetek* ainsi que pour d'éventuelles additions compatibles avec ces types de bus. Les capteurs externes tels les systèmes médicaux (pulsomètre, SpO₂, EEG, ECG...), les GPS, des radios spécialisées sont adaptables si elles peuvent communiquer par SPI ou I₂C ; une alimentation est fournie sur le port externe. La connexion SPI est partageable si elle adaptable à la configuration chaînée (« *daisy-chain* ») mise en place actuellement, sinon, il faudrait prévoir un adaptateur. Le choix de cette configuration est imposé par la restriction en lignes de sélection pouvant être fournies sur un connecteur externe.

La programmation des microcontrôleurs se fait soit par le standard *JTAG* (et un dérivé propriétaire pour le CC2431), soit par USB lorsque le microprogramme (*firmware*) est déjà présent, soit par *Zigbee* (par la fonctionnalité de téléchargement OTA : « *over-the-air* »).

Le système de transmission RF est conçu avec un adaptateur d'impédance (*balun*) et un circuit en silicium (l'antenne elle-même, format SMD) pour réduire l'empreinte physique au minimum, contrairement à la solution trouvée habituellement qui est d'adapter l'impédance avec une trace sur le circuit imprimé et de fournir un connecteur pour une antenne SMA ou une antenne gravée sur le PCB.

Les pistes doivent être soigneusement balancées car elles sont différentielles et aussi courtes que possible, ce qui implique que le CC2431 doit se trouver à proximité du système d'antenne donc sur les bords du PCB pour optimiser le pattern de transmission (l'impact du PCB, du boîtier et des composants environnants le système d'antenne est fortement susceptible, surtout en raison du faible SNR) Se référer aux schémas de la Figure A1.5 à la Figure A1.8.

Le gain est moindre avec une antenne compacte discrète (SMD, Figure A1.8) mais on

conserve un pattern de transmission omnidirectionnel (pour des raisons liées à la localisation : on ne veut pas être sensible à la position ou l'orientation de l'appareil, surtout attaché au poignet) avec un espace minimum. Par contre, la conception doit être plus soignée et spécifique, donc la solution finale sera plus complexe et moins flexible (l'antenne SMD devra être sur un bord du PCB, et séparée de tout autre composant). À noter que l'effet d'un boîtier sera un élément important à prendre en compte dans le bilan de l'atténuation du signal.

4.2.5 Source d'énergie

Le choix du type de batterie est basé principalement sur le besoin de maximiser l'énergie par rapport au poids. La technologie Lithium-Ion est une des meilleures selon ce critère (dans les chimies en vente libre), n'a pas d'effet mémoire, mais la recharge doit être contrôlée de façon particulière (d'où le choix d'un chargeur spécifique). Par contre, ce type de batterie est très courant et l'empreinte physique idéale est trouvée pour les appareils photo du commerce ou pour certains téléphones cellulaires compacts. Le prix et la disponibilité sont donc optimum dû au volume de vente.

La connexion USB permet également la recharge d'une batterie. Le régulateur choisi supervise les différentes sources d'énergie, charge une batterie Li-ion conventionnelle (type pour appareil photo) et régule le voltage pour l'ensemble des sous-systèmes de la plateforme. La batterie Li-ion fournit l'énergie au capteur mobile tant que le capteur n'est pas connecté sur un port USB.

Le chargement de la batterie est assuré par un moniteur de charge/régulateur (LTC3455) qui segmente les alimentations analogiques (3.3V) et numériques (3.3V). Il prend en charge l'alimentation USB, celle de la batterie, une alimentation externe (5V), tout en gérant l'utilisation et le passage de l'une à l'autre.

Les différentes tensions d'alimentation des capteurs analogiques sont toutes mesurées pour prendre en compte les éventuelles perturbations dans la logique de conversion.

La gestion de l'énergie étant importante, les régulateurs choisis permettent de couper sélectivement l'alimentation à différents sous-systèmes. De plus, la plupart des tensions et les courants de charge/décharge sont mesurables en temps réels par la plateforme elle-même,

permettant une gestion fine de la consommation en fonctionnement.

4.3 Extensions

L'ajout de capteurs supplémentaires, comme des extensions au système est pour cette recherche exclusivement limité à une interface standard SPI ou I₂C. De nombreux capteurs ou effecteurs industriels ou commerciaux ne sont pas compatibles avec cette solution. Mis-à-part cette limitation, il est également nécessaire de créer spécifiquement le logiciel nativement pour chaque extension, selon les différents protocoles, standards, architectures imposés par les constructeurs. Dans le cadre de cette recherche, il serait difficile de proposer un cadre logiciel permettant de supporter cet état de fait. De nombreuses recherches sont entreprises pour s'abstraire des contraintes de la modularité matérielle, en particulier en proposant de faire le parallèle logicielle. Ces *middlewares* permettent à des « composants » logiciels (« services », « agents » ... selon la terminologie préférée) de décrire les fonctionnalités des composants matériels et permettent la modification dynamique et la modularité. Cette solution permettrait de plus facilement intégrer de nouvelles solutions d'interfaces, que ce soit pour la mesure, l'action sur l'environnement, la communication, l'alimentation ou même le traitement.

En quelques mois de conception, les capacités, la flexibilité et l'intégration des capteurs, des radios, des protocoles ont fortement augmentés. Jugeant par cette tendance, il serait judicieux de permettre une plus grande flexibilité en développant selon une méthodologie modulaire, qui permettrait de pouvoir choisir ou de s'adapter à une nouvelle technologie. Il est possible que ce choix se fasse au détriment d'une perte d'efficacité mais les avantages sont importants, d'autant plus que l'impact serait amorti par l'augmentation des performances.

4.4 Localisation intérieure

Par exemple, l'application qui pourrait exprimer cette situation avec le plus de clarté serait la mise en place de la localisation dans un appartement. De nombreuses technologies, techniques de mesure, systèmes et infrastructure existent, mais la combinaison de toutes ne permet pas encore de vraies solutions pratiques de localisation intérieure. Le positionnement

GPS n'est pas disponible à l'intérieur des enceintes, et elle serait de toute façon inefficace à cause de la précision trop restreinte. Il existe des systèmes complexes de type *EkaHau*²⁶[27] et les RTLS basés sur le RFID qui permettent de localiser un tag dans une pièce d'un complexe hospitalier, mais pour le premier il est nécessaire de faire une calibration longue et relativement difficile des lectures de bornes Wi-Fi (un « *mapping* »), et le deuxième repose sur une infrastructure importante d'antennes RFID. D'autres systèmes, basés sur des technologies spécifiques (ultrasons, infrarouge, TV ...) ou un mélange d'entre elles permet une amélioration de la précision spatiale au détriment de la simplicité ou de la facilité d'utilisation. Le système le plus précis (MIT Cricket²⁷) utilise la combinaison d'une liaison de référence RF qui synchronise la mesure de temps d'un signal ultrasonore. La répartition spatiale des bornes est très dense, la réseautique également, la calibration est longue et difficile, d'où un coût très important de mise en service.

Une étude réalisée en parallèle à la conception de ce prototype [76] s'est concentrée sur le volet de la mise en place d'un système de localisation intérieure. Bien que le but soit de répertorier les différentes possibilités, il est apparu que l'utilisation d'un réseau de capteurs serait très appropriée pour cette application, parce qu'elle permettrait de mettre en pratique les avantages inhérents de ce type de structure pour simplifier l'architecture globale d'un système de localisation (aussi nommé RTLS (*real-time locating system*) ou d'un point de vue de la conception logiciel uniquement un « LBS » (*location-based service*)). La principale contrainte actuelle qui ralentit l'adoption et la mise en place de ces systèmes est la complexité et la maintenance, en plus d'une précision trop restreinte. Pour répondre à ces problématiques, l'étude a été menée la plus large possible, essayent de tirer des conclusions ou seulement des principes directeurs qui permettront de concevoir une architecture la plus précise possible, tout en restant pratique à mettre en place.

Le système développé par *Awarepoint* est un exemple typique des recommandations données dans [76]. Leur solution repose sur 802.15.4 et les transmissions par courant porteur pour mettre en œuvre une localisation (encore limitée à l'espace d'une pièce), qui a pour critères

²⁶ <http://www.ekahau.com/>

²⁷ <http://cricket.csail.mit.edu/>

principaux la facilité de mise en place, de maintenance et la fiabilité [43, 88].

4.5 Insertion des capteurs intelligents dans l'environnement

Les critères de conceptions ont été présentés ainsi que les choix technologiques qui seront mis à l'essai pour la suite du projet. Au vu du travail restant à accomplir pour que la technologie soit complètement apte à intégrer les domiciles, il est impossible de tirer des conclusions rationnelles et quantifiables quant à l'apport mais il apparaît évident que les solutions existantes ne suffisaient pas, en se basant sur la complexité de mise en place et/ou la durée de vie réduite. Les infrastructures centralisées sont puissantes (parfois beaucoup trop), mais complexes et demandent une quantité de travail importante pour l'installation et la maintenance. Les infrastructures distribuées sont complexes à programmer et leur efficacité globale (fonctionnalités, capacités, bilan énergétique) est une étude toujours en cours, ce qui ne permet pas non plus de valider leur viabilité. Le travail présent essaie donc de pallier à un maximum de problématiques. Il reste donc à valider étape par étape l'efficacité relative de l'approche présentée face aux approches existantes.

Lors de la mise en pratique de l'architecture, il a été soulevé un certain nombre de points qui ne limitaient pas sa convivialité, mais qui réduisaient la facilité de son insertion dans le système global. Dans le cadre des travaux effectués dans la structure du laboratoire, des appareils très communs sont utilisés pour faciliter le travail des développeurs logiciels : des serveurs du commerce, des PLC et des solutions commerciales de traitement spécialisé (audio, vidéo, réseau domotique) sont déployés dans un appartement-laboratoire. L'avantage que représente la rapidité de développement est devenu une barrière importante lorsqu'il a fallu s'interfacer avec ces appareils très fermés. Pour contourner le problème, il a été surtout préféré la solution de développer des portails spécifiques qui communiquaient avec des interfaces standards (Ethernet, USB...). Pour cela, des pilotes (*drivers*) ont dû être spécifiquement écrits pour communiquer avec les applications JAVA, langage préféré dans le cadre du laboratoire.

Un compromis doit être réalisé entre la densité spatiale des capteurs dans l'environnement et les difficultés (pratiques ou coûts économiques) de déploiement des solutions existantes.

Ce qui a été surtout soulevé est l'important travail de configuration, d'installation, d'optimisation et d'interfaçage qui est nécessaire de fournir pour être capable de faire fonctionner tous ces appareils commerciaux ensemble. Et l'extensibilité est extrêmement réduite de par le fait que les fonctionnalités sont fixées et qu'il est nécessaire de fournir un travail important pour tout ajout. De plus, ces appareils sont majoritairement très centralisés, ce qui réduit la flexibilité de l'architecture et augmente les points de défaillance – critère important pour une interaction avec des humains –, la latence et réduit la bande passante.

Finalement, en étudiant bien les fonctionnalités nécessaires, la possibilité de remplacer ces appareils commerciaux est apparue facilement réalisable avec des moyens simples (technologiques, architecturaux et logiciels) mais demandant un travail de conception de la base vers l'application globale (approche « *bottom-up* »). Un ensemble de capteurs est proposé pour mettre en œuvre les mesures nécessaires. Ces capteurs sont à la base d'une architecture complètement distribuée. Les contraintes de sécurité, de mise en place, de maintenance, etc. ont imposé une architecture modulaire, autoconfigurable, autoréparable, adaptable et surtout pouvant être déployé avec le minimum d'intervention humaine. L'importance de l'application de haut niveau (l'intelligence artificielle qui supervise le comportement du système) requiert une capacité de calcul très important et pas nécessairement critique à la bonne évolution de l'Espace Intelligent. Il a donc été décidé deux choix : du matériel standard sera utilisé comme support (des PC traditionnels, interconnectés pour augmenter la fiabilité) et le matériel conçu devra être réactif et fournir la sécurité nécessaire sans supervision.

Cette structure traditionnelle du monde du contrôle et des systèmes de commande et régulation permet de fournir en deux niveaux d'abstraction une rétroaction rapide et efficace pour les situations le demandant, tout en permettant une qualité de supervision. La qualité de la supervision, due à inférence optionnelle sera de plus grande précision grâce à la spécialisation et au plus haut niveau de connaissances disponible. L'ensemble sera également plus rapide, puisque seules les informations nécessaires seront transmises à la supervision, les

autres seront immédiatement traitées.

De plus, un matériel non spécialisé permet aux développeurs de concevoir un système complexe avec un environnement habituel : langage de programmation, système d'exploitation, pilotes, outils... ce qui réduit le temps de développement et augmente la qualité du logiciel haut-niveau.

4.6 Conclusion

La mise en œuvre de la plateforme telle que décrite dans le CHAPITRE 3 a soulevée de nombreux points reliés surtout à la nécessité de pousser l'architecture vers une solution plus adaptable pour s'interfacer à un ensemble de technologies toujours plus hétérogènes et complexes.

Pour supporter un mode de déploiement automatisé et faciliter cette opération, le recourt à des technologies supplémentaires devient nécessaire. Les nœuds basiques tels que vus précédemment devront supporter de plus en plus de services et devront être adaptables à cette nouvelle charge.

En conséquence, une architecture globale doit être étudiée et des solutions pour tous ces niveaux applicatifs restent à être proposés

CHAPITRE 5. CONCLUSIONS

Pour supporter une recherche sur les habitants intelligents pour l'aide à domicile, il est apparu que l'infrastructure de détection d'événements est un point important. Une conception rigoureuse et pragmatique de l'architecture est d'autant plus cruciale lorsque l'on cherche à équiper des environnements nouveaux.

Le travail effectué pour cette recherche fut dans un premier temps de compléter une infrastructure déjà existante avec d'autres capteurs pour extraire des données impossibles à extraire de l'environnement seulement. L'espace autour de la personne est difficile à percevoir du point de vue de l'environnement. Un système de capteurs portés par la personne a donc été développé. L'interaction entre ce système et l'environnement a été le cœur de la conception et a donné naissance à des recommandations quant à la stratégie de partage de l'information. Le but ultime est de favoriser la symbiose des données entre tous les capteurs; pour que la fusion de ces données soit significative, un travail de conception qui augmente les capacités de chaque capteur individuel est nécessaire.

Des lacunes importantes ont été décelées lors de la mise en pratique de la solution dans un environnement qui n'est pas encore équipé de capteurs. Il est tout aussi important de pouvoir prendre en compte autant les contraintes des capteurs que les contraintes du lieu où ils seront installés. La deuxième contribution a donc été de tirer des enseignements pour revoir, de la base, la méthode de conception des capteurs intelligents, avec une perspective pragmatique, proche de l'utilisateur et leur mise en application.

Un prototype permettant de mesurer l'activité humaine a été conçu. Il s'agit d'un capteur de mouvement, d'interaction avec les objets et fournissant des interfaces pour des capteurs physiologiques, paramédicaux, GPS ou autres, qui est également capable d'interagir avec les données de l'environnement (position, capteurs environnementaux, bases de données, inférence).

Ce capteur a fourni les éléments à la base d'une future réflexion nécessaire. Le concept d'une architecture modulaire et flexible, capable de fournir les fonctionnalités recherchées et qui

sont facilement déployées dans n'importe quel contexte d'Espace Intelligent est proposée comme piste de solution permettant de combler les déficits identifiés. Un avantage recherché est de pouvoir optimiser le maximum de technologies, de topologies et de services différents pour faciliter l'acceptation des réseaux de capteurs intelligents dans différents domaines d'applications.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Aamodt, K. (2006). CC2431 Location Engine, Application Note AN042 (Application Note). Texas Instruments, ti.com, p. 1-20, <http://focus.ti.com/lit/an/swra095/swra095.pdf>
- [2] Abbate, N., Basile, A., Brigante, C. et Faulisi, A. (2009). Development of a MEMS based wearable motion capture system. Dans : Human System Interactions, 2009. HSI '09. 2nd Conference, p. 255-259.
- [3] Administration on Aging, National Aging Information Center (May 31, 1996 Aging into the 21st Century.
Dans : http://www.aoa.gov/AoARoot/Aging_Statistics/future_growth/aging21/aging_21.aspx (page consultée en 2009).
- [4] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. et Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks, volume 38, numéro 4, p. 393-422.
- [5] Albus, Z., Valenzuela, A. et Buccini, M. (2009). Ultra-Low Power Comparison: MSP430 vs. Microchip XLP Tech Brief -- A Case for Ultra-Low Power Microcontroller Performance (White Paper). Texas Instruments, p. 1-10, <http://focus.ti.com/lit/wp/slay015/slay015.pdf>
- [6] Anliker, U., Ward, J. A., Lukowicz, P., Troster, G., Dolveck, F., Baer, M., Keita, F., Schenker, E. B., Catarsi, F., Coluccini, L., Belardinelli, A., Shklarski, D., Alon, M., Hirt, E., Schmid, R. et Vuskovic, M. (2004). AMON: a wearable multiparameter medical monitoring and alert system. Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on, volume 8, numéro 4, p. 415-427.
- [7] Aylward, R. et Paradiso, J. A. (2007). A compact, high-speed, wearable sensor network for biomotion capture and interactive media. Dans : Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks. ACM, p. 380-389.
- [8] Aylward, R. et Paradiso, J. A. (2007). A Compact, High-Speed, Wearable Sensor Network for Biomotion Capture and Interactive Media. Dans : Information Processing in Sensor Networks, 2007. IPSN 2007. 6th International Symposium , p. 380-389.
- [9] Balogun, J. A., Amusa , L. O. et Onyewadume, I. U. (1988). Factors affecting Caltrac and Calcount accelerometer output. Physical Therapy, volume 68, numéro 10, p. 1500-1504.

-
- [10] Barth, A. T., Hanson, M. A., Powell, H. C. et Lach, J. (2009). TEMPO 3.1: A Body Area Sensor Network Platform for Continuous Movement Assessment. Dans : *Wearable and Implantable Body Sensor Networks, 2009. BSN 2009. Sixth International Workshop*, p. 71-76.
- [11] Bauchet, J. et Mayers, A. (2005). Modelisation of ADLs in its environment for cognitive assistance. Dans : *From smart homes to smart care: ICOST 2005, 3rd International Conference on Smart Homes and Health Telematics*, volume 6. Ios Pr Inc, p. 221.
- [12] Bauchet, J., Vergnes, D., Giroux, S. et Pigot, H. (2006). A Pervasive Cognitive Assistant For Smart Homes. Dans : *International Conference on Aging, Disability and Independence*, p. 228.
- [13] Berners-Lee, T., Hendler, J. et Lassila, O. (2001). The Semantic Web, p. 28-37
- [14] Bernmark, E. et Wiktorin, C. (2002). A triaxial accelerometer for measuring arm movements. *Applied Ergonomics*, volume 33, numéro 6, p. 541-547.
- [15] Bouma, H. et Graafmans, J. (1993). Gerontechnology : A framework on technology and aging. *Gerontechnology*.
- [16] Buettner, M., Prasad, R., Sample, A., Yeager, D., Greenstein, B., Smith, J. R. et Wetherall, D. (2008). RFID sensor networks with the Intel WISP. Dans : *SenSys '08: Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*. ACM, New York, NY, USA, p. 393-394.
- [17] Campo, E. et Chan, M. (2002). Detecting abnormal behaviour by real-time monitoring of patients. Dans : *Proceedings of the AAI-02 Workshop "Automation as Caregiver*, p. 8-12.
- [18] Castebrunet, M., Boissier, O., Giroux, S. et Rialle, V. (2010). Organization Nesting in a Multi-agent Application for Ambient Intelligence. *Advances in Practical Applications of Agents and Multiagent Systems*, p. 259-268.
- [19] Chen, T. M. (2010). Smart grids, smart cities need better networks [Editor's Note]. *Network, IEEE*, volume 24, numéro 2, p. 2-3.
- [20] Cook, D. J., Augusto, J. C. et Jakkula, V. R. (2009). Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities. *Pervasive and Mobile Computing*, volume 5, numéro 4, p.

277-298.

- [21] Corning, P. A. 'The Synergism Hypothesis': On the Concept of Synergy and its Role in the Evolution of Complex Systems. *Journal of Social & Evolutionary Systems*, numéro 2,
- [22] de Micheli, G., de Rooij, N. et Kotrotsios, G. (2006). International workshop on wearable micro and nanosystems for personalised health
- [23] Dohr, A., Modre-Oprian, R., Drobits, M., Hayn, D. et Schreier, G. (2010). The Internet of Things for Ambient Assisted Living. Dans : *Information Technology: New Generations (ITNG), 2010 Seventh International Conference*, p. 804-809.
- [24] Dunkels, A. (2003). Full TCP/IP for 8-bit architectures. Dans : *MobiSys '03: Proceedings of the 1st international conference on Mobile systems, applications and services*. ACM, New York, NY, USA, p. 85-98.
- [25] Dunkels, A., Osterlind, F. et He, Z. (2007). An adaptive communication architecture for wireless sensor networks. Dans : *SenSys '07: Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems*. ACM, New York, NY, USA, p. 335-349.
- [26] Ekahau, I. (2009). Facts About Wi-Fi RTLS (Application Guide). Ekahau, Inc., p. 1-5, http://www.ekahau.com/images/stories/products/ekahau_myth_vs_facts.pdf
- [27] Ekahau, I. (2010). Ekahau RTLS Website. Dans : Ekahau, Inc. <http://ekahau.com/> (page consultée en 2010).
- [28] Eston, R. G., Rowlands, A. V. et Ingledeew, D. K. (1998). Validity of heart rate, pedometry, and accelerometry for predicting the energy cost of children's activities. *Journal of applied physiology*, volume 84, numéro 1, p. 362.
- [29] EU-funded project (2003). The Disappearing Computer. Dans : <http://www.disappearing-computer.net> (page consultée en 2009).
- [30] EU-funded project (30th Nov 2008 2008). Healthy Aims. Dans : Healthy Aims. <http://www.healthyaids.org> (page consultée en 2009).
- [31] Farella, E., Pieracci, A. et Acquaviva, A. (2005). Design and implementation of WiMoCA node for a body area wireless sensor network. Dans : *Systems Communications, 2005. Proceedings*, p. 342-347.
- [32] Farrington, J., Moore, A. J., Tilbury, N., Church, J. et Biemond, P. D. (2002). Wearable

- sensor badge and sensor jacket for context awareness. Dans : *Wearable Computers*, 1999. Digest of Papers. The Third International Symposium on. IEEE, p. 107-113.
- [33] Fernandez-Steeger, T. M., Arnhardt, C., Walter, K., Haß, S., Niemeyer, F., Nakaten, B., Homfeld, S. D., Asch, K., Azzam, R., Bill, R. et Ritter, H. (2009). SLEWS - A Prototype System for Flexible Real Time Monitoring of Landslides Using an Open Spatial Data Infrastructure and Wireless Sensor Networks (Science Report). GEOTECHNOLOGIEN Science Report 13. Early Warning Systems in Earth Management, p. 3-15
- [34] Fishkin, K. P., Philipose, M. et Rea, A. (2005). Hands-on RFID: wireless wearables for detecting use of objects. Dans : *Wearable Computers*, 2005. Proceedings. Ninth IEEE International Symposium, p. 38-41.
- [35] Fletcher, R. R., Dobson, K., Goodwin, M. S., Eydgahi, H., Wilder-Smith, O., Fernholz, D., Kuboyama, Y., Hedman, E. B., Ming-Zher Poh et Picard, R. W. (2010). iCalm: Wearable Sensor and Network Architecture for Wirelessly Communicating and Logging Autonomic Activity. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, volume 14, numéro 2, p. 215-223.
- [36] Fraunhofer ISST, Smart-Wear. Dans : www.smart-wear.de (page consultée le 07/15 2009).
- [37] Ghasemzadeh, H. et Jafari, R. (2010). Coordination Analysis of Human Movements with Body Sensor Networks: A Signal Processing Model to Evaluate Baseball Swings. *Sensors Journal, IEEE*, volume PP, numéro 99, p. 1-1.
- [38] Glascock, A. P. et Kutzik, D. M. (2000). Behavioral telemedicine: A new approach to the continuous nonintrusive monitoring of activities of daily living. *Telemedicine Journal*, volume 6, numéro 1, p. 33-44.
- [39] Gouin-Vallerand, C., Abdulrazak, B., Giroux, S. et Mokhtari, M. (2009). A self-configuration middleware for smart spaces. *International Journal of Smart Home*, volume 3, numéro 1, p. 7-16.
- [40] Hanson, R. (2005). Using Multiple MEMS IMUs to form a Distributed Inertial Measurement Unit. Air Force Institute of Technologies, Wright-Patterson AFB OH, School of Engineering and Management

-
- [41] Hanson, R. et Pachter, M. (2005). Optimal gyro-free IMU geometry. Dans : 2005 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, p. 1-8.
- [42] Hightower, J. et Borriello, G. (2001). Location Systems for Ubiquitous Computing. IEEE Computer, volume 34, numéro 8, p. 57-66.
- [43] Hoglund, D. H. (2009). Real-time Location Systems (RTLS) in Healthcare: Wi-Not Wi-Fi? (whitepaper). Integrasystems.org, p. 1-6
<http://www.awarepoint.com/documents/Wi-NotWi-Fi.pdf>
- [44] Hu Ji, Qin Hui-bin et Zheng Liang (2008). The research of low power wireless sensor network architecture based on fire monitoring. Dans : Communication Technology, 2008. ICCT 2008. 11th IEEE International Conference, p. 126-128.
- [45] Huasong Cao, Leung, V., Chow, C. et Chan, H. (2009). Enabling technologies for wireless body area networks: A survey and outlook. Communications Magazine, IEEE, volume 47, numéro 12, p. 84-93.
- [46] Ide, H., Abdi, F., Dang, C., Takahashi, T., Sauer, B. et Miraj, R. (2009). Wireless-zigbee strain gage sensor system for structural health monitoring. Dans : Photonics in the Transportation Industry: Auto to Aerospace II, April 13, 2009 - April 14, volume 7314. SPIE, Orlando (Fl), United States, the International Society for Optical Engineering (SPIE).
- [47] Intel Research Seattle, WISP: Wireless Identification and Sensing Platform, page consultée en 2009.
- [48] Intille, S. S., Tapia, E. M., Rondoni, J., Beaudin, J., Kukla, C., Agarwal, S., Bao, L. et Larson, K. (2003). Tools for studying behavior and technology in natural settings. Lecture notes in computer science, p. 157-174.
- [49] Istrate, D., Vacher, M., Serignat, J. F., Besacier, L. et Castelli, E. (2006). Système de télésurveillance sonore pour la détection de situations de détresse. ITBM-RBM, volume 27, numéro 2, p. 35-45.
- [50] Jafari, R., Bajcsy, R., Glaser, S., Gnade, B., Sgroi, M. et Sastry, S. (2007). Platform Design for Health-Care Monitoring Applications. Dans : High Confidence Medical Devices, Software, and Systems and Medical Device Plug-and-Play Interoperability, 2007. HCMDSS-MDPnP. Joint Workshop, p. 88-94.

- [51] Jantunen, I., Laine, H., Huuskonen, P., Trossen, D. et Ermolov, V. (2008). Smart sensor architecture for mobile-terminal-centric ambient intelligence. *Sensors and Actuators A: Physical*, volume 142, numéro 1, p. 352-360.
- [52] Janz, K. F. (1994). Validation of the CSA accelerometer for assessing children's physical activity. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, volume 26, numéro 3, p. 369.
- [53] Jeff Z. Pan (2007). A Flexible Ontology Reasoning Architecture for the Semantic Web. *Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on*, volume 19, numéro 2, p. 246-260.
- [54] Jones, I. (2006). Ageing : can we stop the clock ? Dans : The Wellcome Trust. http://www.wellcome.ac.uk/stellent/groups/corporatesite/@msh_publishing_group/documents/web_document/wtx033829.pdf (page consultée en 2010).
- [55] Jovanov, E., Milenkovic, A., Otto, C., De Groen, P., Johnson, B., Warren, S. et Taibi, G. (2005). A WBAN System for Ambulatory Monitoring of Physical Activity and Health Status: Applications and Challenges. Dans : Engineering in Medicine and Biology Society, 2005. IEEE-EMBS 2005. 27th Annual International Conference, p. 3810-3813.
- [56] Juang, P., Oki, H., Wang, Y., Martonosi, M., Peh, L. S. et Rubenstein, D. (2002). Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with ZebraNet. Dans : ASPLOS-X: Proceedings of the 10th international conference on Architectural support for programming languages and operating systems. ACM, New York, NY, USA, p. 96-107.
- [57] Korhonen, I., Paavilainen, P. et Särelä, A. Application of ubiquitous computing technologies for support of independent living of the elderly in real life settings. Dans : Ubicomp 2003 UbiHealth workshop
- [58] Korpipaa, P., Koskinen, M., Peltola, J., Makela, S. M. et Seppanen, T. (2003). Bayesian approach to sensor-based context awareness. *Personal and Ubiquitous Computing*, volume 7, numéro 2, p. 113-124.
- [59] LeBellego, G., Noury, N., Virone, G., Mousseau, M. et Demongeot, J. (2006). A model for the measurement of patient activity in a hospital suite. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, volume 10, numéro 1, p. 92-99.
- [60] Lei Zhang et Zhi Wang (2006). Integration of RFID into Wireless Sensor Networks:

-
- Architectures, Opportunities and Challenging Problems. Dans : Grid and Cooperative Computing Workshops, 2006. GCCW '06. Fifth International Conference, p. 463-469.
- [61] Luinge, H. (2002). Inertial sensing of human movement. University of Twente, University Press, Enschede,
- [62] Lukowicz, P., Junker, H., Staeger, M., von Bueren, T. et Tröster, G. (2002). Wearnnet: A distributed multi-sensor system for context aware wearables. UbiComp 2002: Ubiquitous Computing, p. 361-370.
- [63] Lundquist, J. D., Cayan, D. R. et Dettinger, M. D. (2003). Meteorology and hydrology in Yosemite national park: a sensor network application. Dans : IPSN'03: Proceedings of the 2nd international conference on Information processing in sensor networks. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, p. 518-528.
- [64] Mainwaring, A., Culler, D., Polastre, J., Szewczyk, R. et Anderson, J. (2002). Wireless sensor networks for habitat monitoring. Dans : WSNA '02: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications. ACM, New York, NY, USA, p. 88-97.
- [65] Mäntyjärvi, J., Kela, J., Korpipää, P. et Kallio, S. (2004). Enabling fast and effortless customisation in accelerometer based gesture interaction. Dans : Proceedings of the 3rd international conference on Mobile and ubiquitous multimedia. ACM, p. 25-31.
- [66] Martinez, K., Hart, J. K. et Ong, R. (2004). Environmental sensor networks. Computer, volume 37, numéro 8, p. 50-56.
- [67] Mathie, M. J., Celler, B. G., Lovell, N. H. et Coster, A. C. F. (2004). Classification of basic daily movements using a triaxial accelerometer. Medical and Biological Engineering and Computing, volume 42, numéro 5, p. 679-687.
- [68] Mathie, M. J., Coster, A. C. F., Lovell, N. H. et Celler, B. G. (2004). Accelerometry: providing an integrated, practical method for long-term, ambulatory monitoring of human movement. Physiological measurement, volume 25
- [69] Mcevoy, S., Mulvenna, M., Bond, R., Nugent, C. et Shapcott, M. (2006). Ageing People in Ireland : A Survey Perspective on Technology in the Home. Dans : Mann, W. C. et Helal, S., Promoting Independence for Older Persons with Disabilities. Assistive Technology

Research Series. IOS Press, p. 33-42.

[70] Mitchell, M. (2004). Choosing An Ultralow-Power MCU (Application Report). Texas Instruments, p.1-6, <http://focus.ti.com/lit/an/slaa207/slaa207.pdf>

[71] Mulligan, G. (2007). The 6LoWPAN architecture. Dans : EmNets '07: Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors. ACM, New York, NY, USA, p. 78-82.

[72] Najafi, B., Aminian, K., Paraschiv-Ionescu, A., Loew, F., Bula, C. et Robert, P. (2003). Ambulatory system for human motion analysis using a kinematic sensor: monitoring of daily physical activity in the elderly. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, volume 50, numéro 6, p. 711-723.

[73] National Institute of Standards and Technology (NIST) (January 27, 2010). IEEE 1451 Smart Transducer Interface Standard. Dans : The National Institute of Standards and Technology (NIST), IEEE 1451 Smart Transducer Interface Standard. <http://www.nist.gov/mel/mmd/ieee/ieee1451.cfm> (page consultée le 09/10/2010).

[74] Nemeroff, J., Garcia, L., Hampel, D. et DiPierro, S. (2001). Application of sensor network communications. Dans : Military Communications Conference, 2001. MILCOM 2001. Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force. IEEE, volume 1, p. 336-341 vol.1.

[75] Oudet, J. P. (2006). In-motion Detection of Daily Life Activity Using Wireless Networked Smart Sensors. Dans : Nugent, C. et Augusta, J. -, Smart homes and beyond: ICOST 2006: 4th International Conference on Smart Homes and Health Telematics. Ios Pr Inc., p. 223.

[76] Oudet, J. P. (2009). Déploiement de système de localisation intérieur (Rapport Interne), Laboratoire DOMUS / Faculté de Génie, Université de Sherbrooke

[77] Pansiot, J., Stoyanov, D., McIlwraith, D., Lo, B. et Yang, G. (2007). Ambient and wearable sensor fusion for activity recognition in healthcare monitoring systems. Dans : 4th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN 2007). Springer, p. 208-212.

[78] Philipose, M., Fishkin, K. P., Perkowitz, M., Patterson, D. et Hahnel, D. The Probabilistic Activity Toolkit: Towards Enabling Activity-Aware Computer Interfaces.

-
- [79] Pigot, H., Giroux, S., Mabillean, P. et Bouliane, F. (2007). L'habitat intelligent pour favoriser le maintien à domicile des personnes souffrant de troubles cognitifs. Dans : Les publications du CRIR – Défis technologiques, Montreal, p. 14-25.
- [80] Pister, K. (SMART DUST, Autonomous sensing and communication in a cubic millimeter.
- [81] Pollack, M. E. (2005). Intelligent Technology for an Aging Population : The Use of AI to Assist Elders with Cognitive Impairment. AI Magazine, volume 26, numéro 2, p. 9-24.
- [82] Rahal, Y., Mabillean, P. et Pigot, H. (2007). Bayesian Filtering and Anonymous Sensors for Localization in a Smart Home. Dans : Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'07).
- [83] Rosales, R. et Sclaroff, S. (2000). Learning and synthesizing human body motion and posture. Dans : Automatic Face and Gesture Recognition, 2000. Proceedings. Fourth IEEE International Conference, p. 506-511.
- [84] Salas, M. Low Power Design Basics -- How to Choose the Optimal Low Power MCU for your Embedded System (Design Guide). Silicon Laboratories Inc., p. 1-6 <http://www.silabs.com/Support Documents/TechnicalDocs/Low-Power-Design-Basics.pdf>
- [85] Sebe, N. (2010). Foreword. Dans : Hamid Aghajan, Ramón López-Cózar Delgado et Juan Carlos Augusto, Human-Centric Interfaces for Ambient Intelligence. Academic Press, Oxford, p. xvii-xviii.
- [86] Silicon Labs (2010). Low-Power Solutions Guide (Product Presentation). Silicon Labs, p. 1-2, <http://www.silabs.com/lowpower>
- [87] Sloman, M., Yang, G., Wells, O., Toumazou, C., Cass, T., O'Hare, D., Yeatman, E., Darzi, A. et Yacoub, M. (BiosensorNet: Autonomic Biosensor Networks for Pervasive Healthcare.
- [88] Smith, D. M., Adams, J. D., Nierenberg, N. C. et Baker, J. C. (2007). Wireless Position Location and Tracking System. US 7,312,752 B2, United States, p. 1
- [89] Stikic, M., Huynh, T., Van Laerhoven, K. et Schiele, B. (2008). ADL recognition based on the combination of RFID and accelerometer sensing. Dans : Pervasive Computing Technologies for Healthcare, 2008. PervasiveHealth 2008. Second International Conference, p. 258-263.

- [90] Szewczyk, R., Osterweil, E., Polastre, J., Hamilton, M., Mainwaring, A. et Estrin, D. (2004). Habitat monitoring with sensor networks. *Commun.ACM*, volume 47, numéro 6, p. 34-40.
- [91] Tabar, A. M., Keshavarz, A. et Aghajan, H. (2006). Smart home care network using sensor fusion and distributed vision-based reasoning. Dans : *Proceedings of the 4th ACM international workshop on Video surveillance and sensor networks*. ACM, p. 145-154.
- [92] Thiruvengada, H., Srinivasan, S. et Gacic, A. (2008). Design and implementation of an automated human activity monitoring application for wearable devices. Dans : *Systems, Man and Cybernetics, 2008. SMC 2008. IEEE International Conference*, p. 2252-2258.
- [93] US Army Natick Center (Natick Soldier RD&E Center (NSRDEC)). Dans : *Natick Soldier RD&E Center (NSRDEC)*. <http://nsrdec.natick.army.mil/index.htm> (page consultée en 2009).
- [94] Veltink, P., Lunige, H., Kooi, B. J. et others (2001). The artificial vestibular system-design of a tri-axial inertial sensor system and its application in the study of human movement. *Control of Posture and Gait, Proceedings of the International Society for Postural and Gait Research ISPG*, p. 23-27.
- [95] Verdone, R., Dardari, D., Mazzini, G. et Conti, A. (2008). *Wireless sensor and actuator networks: technologies, analysis and design*. Academic Press,
- [96] Weber, V. (2009). *Smart Sensor Networks: Technologies and Applications for Green Growth* (part of the WPIE's work on ICTs and the environment). OECD, OECD Conference on "ICTs, the environment and climate change", p. 1-48
www.oecd.org/sti/ict/green-ict; http://www.davara.com/documentos/relacionados/sociedad/Smart_Sensor_OCDE.pdf
- [97] Weiser, M. (1991). The computer for the 21st century. *Scientific American*, p. 94-104.
- [98] Wikipedia "Smart Grid". Dans : http://en.wikipedia.org/wiki/Smart_grid (page consultée en 2010).
- [99] Wilson, J. S. (2005). *Sensor technology handbook*. Newnes,
- [100] Woodbridge, J., Noshadi, H., Nahapetian, A. et Sarrafzadeh, M. (2010). HIP: Health Integration Platform. Dans : *Pervasive Computing and Communications Workshops*

(PERCOM Workshops), 2010 8th IEEE International Conference, p. 340-345. .

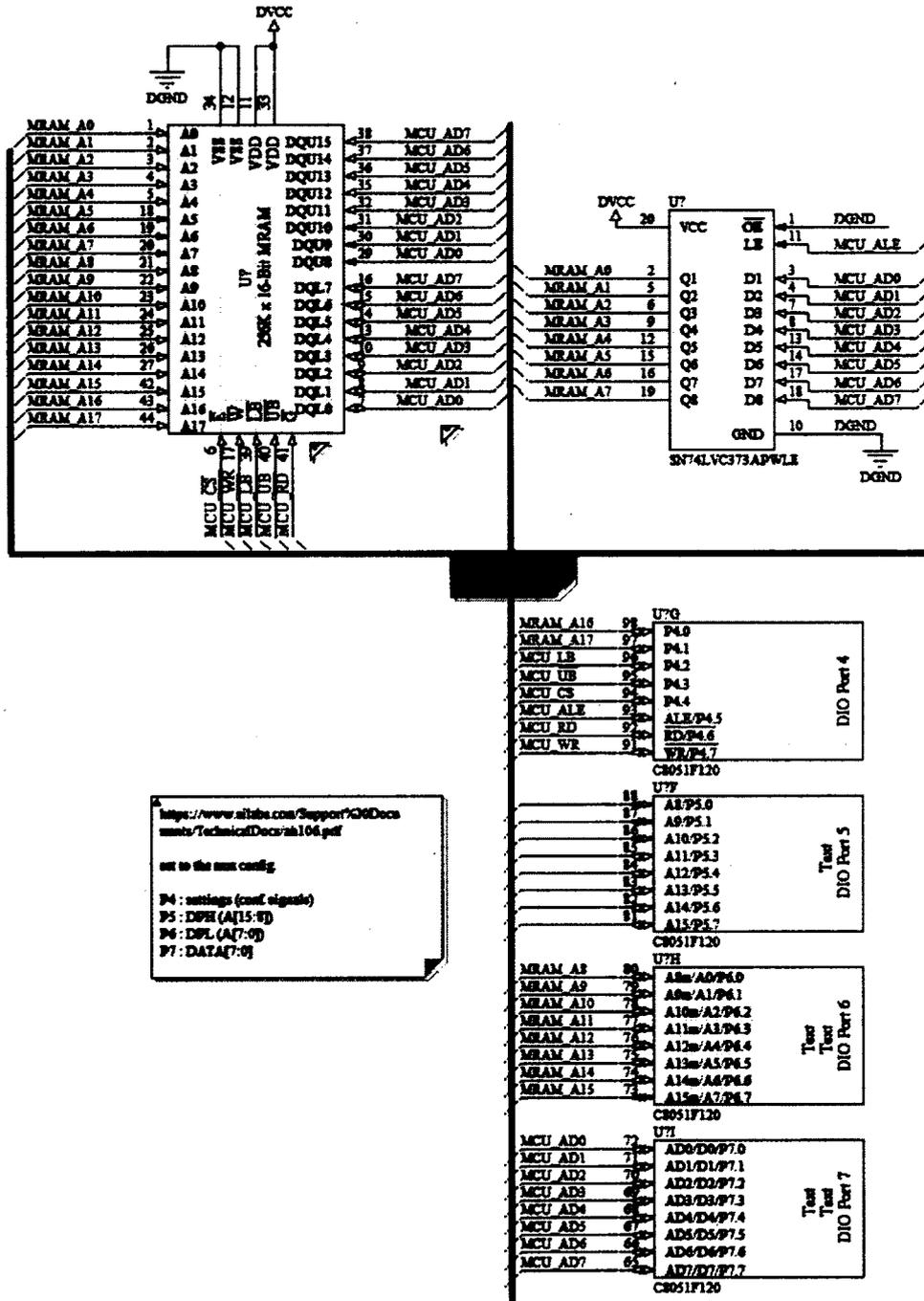
[101] Yunfeng Wang, Lei Li, Bo Wang et Lei Wang (2009). A Body Sensor Network Platform for In-home Health Monitoring Application. Dans : Ubiquitous Information Technologies & Applications, 2009. ICUT '09. Proceedings of the 4th International Conference, p. 1-5.

[102] Yunquan Dong et Qingyi Quan (2007). Topology-Based and Power-Adaptive Routing Algorithm for Wireless Sensor Network. Dans : Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007. International Conference, p. 2791-2794.

[103] Hudgins, Dennis (2003). Using the TPS3619 with MSP430 Microcontrollers Can Reduce System Power Consumption With Charge Pumps (Application Report). Texas Instruments, p. 1-3, <http://focus.ti.com/lit/an/sbva014a/sbva014a.pdf>

ANNEXES

Annexe 1 SCHÉMAS DE L'IMPLEMENTATION



```

https://www.altera.com/Support/CGDocs/memts/TechnicalDocs/m106.pdf

set to the mem config
P4 : settings (conf. signals)
P5 : DPH (A[15:0])
P6 : DPL (A[7:0])
P7 : DATA[7:0]
    
```

Figure A1.1 : Connectivité à la MRAM
 (les blocs inférieurs sont représentés pour montrer les connexions de la carte principale à l'extension mémoire)

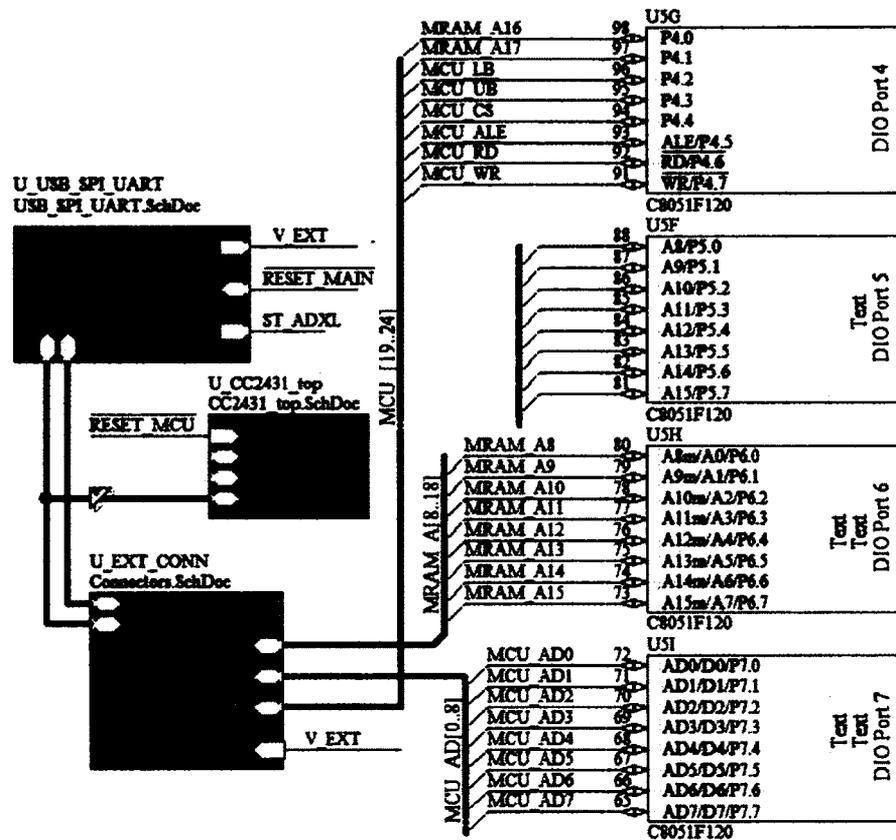


Figure A1.2 : Interconnexions

(à droite, les ports dédiés du microcontrôleur, à gauche, les blocs de connexions vers les ports séries, la communication sans-fil, le connecteur parallèle)

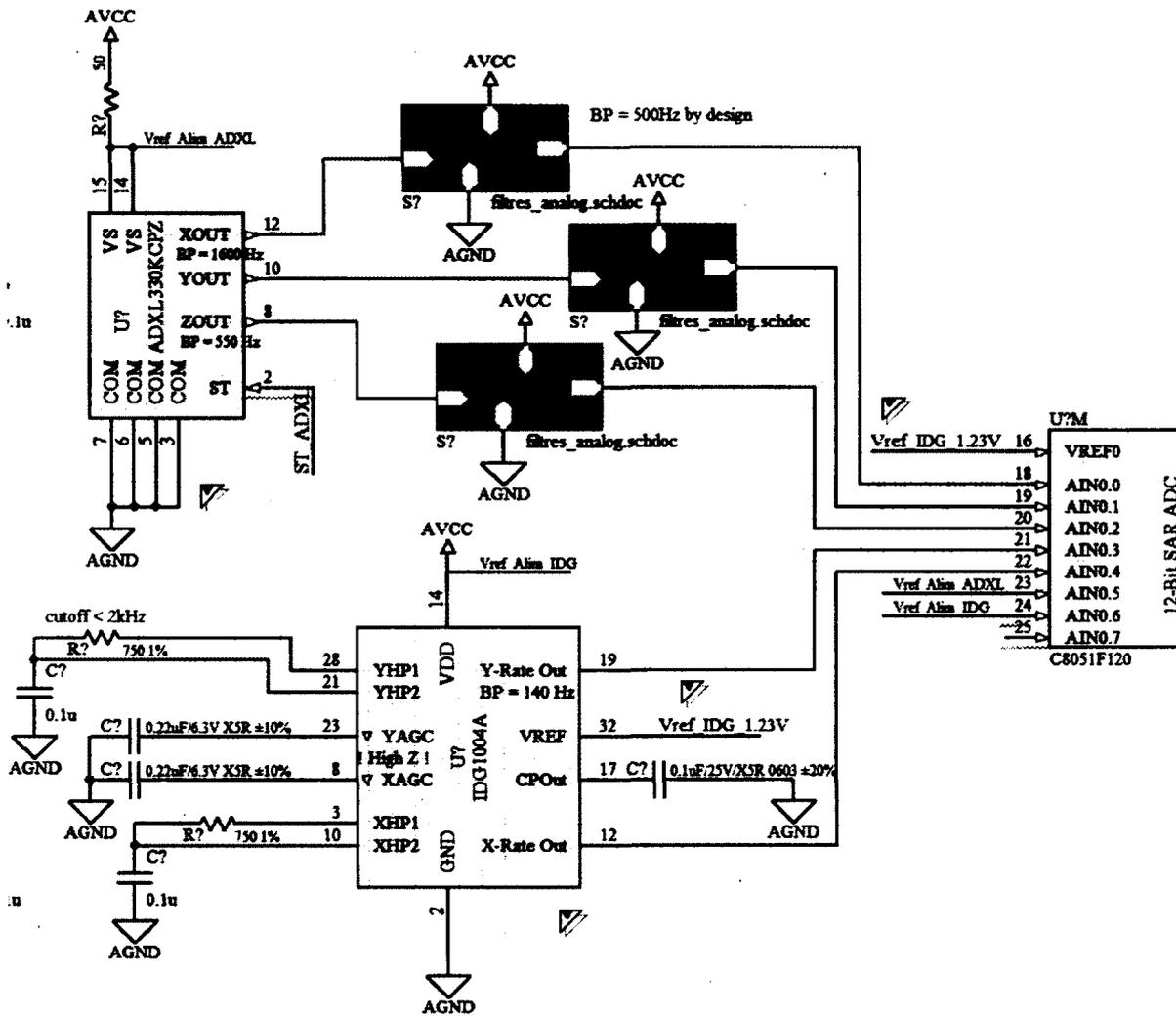


Figure A1.3 : Chaîne d'acquisition analogique (IMU)
 Accéléromètres 3D, Gyroscope 2D et convertisseur 12 bits SAR

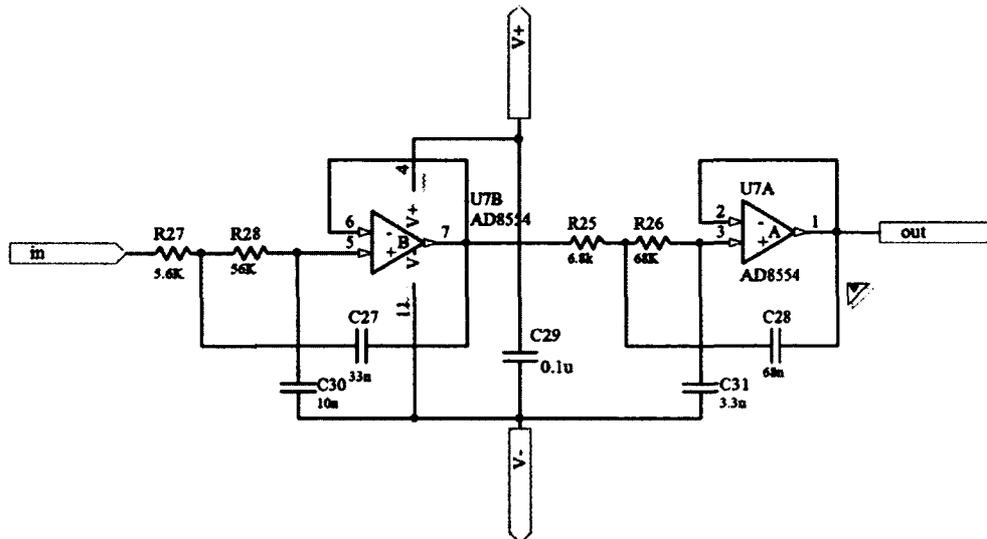


Figure A1.4 : Filtre *Sallen-Key*, 4^e ordre, 500 Hz

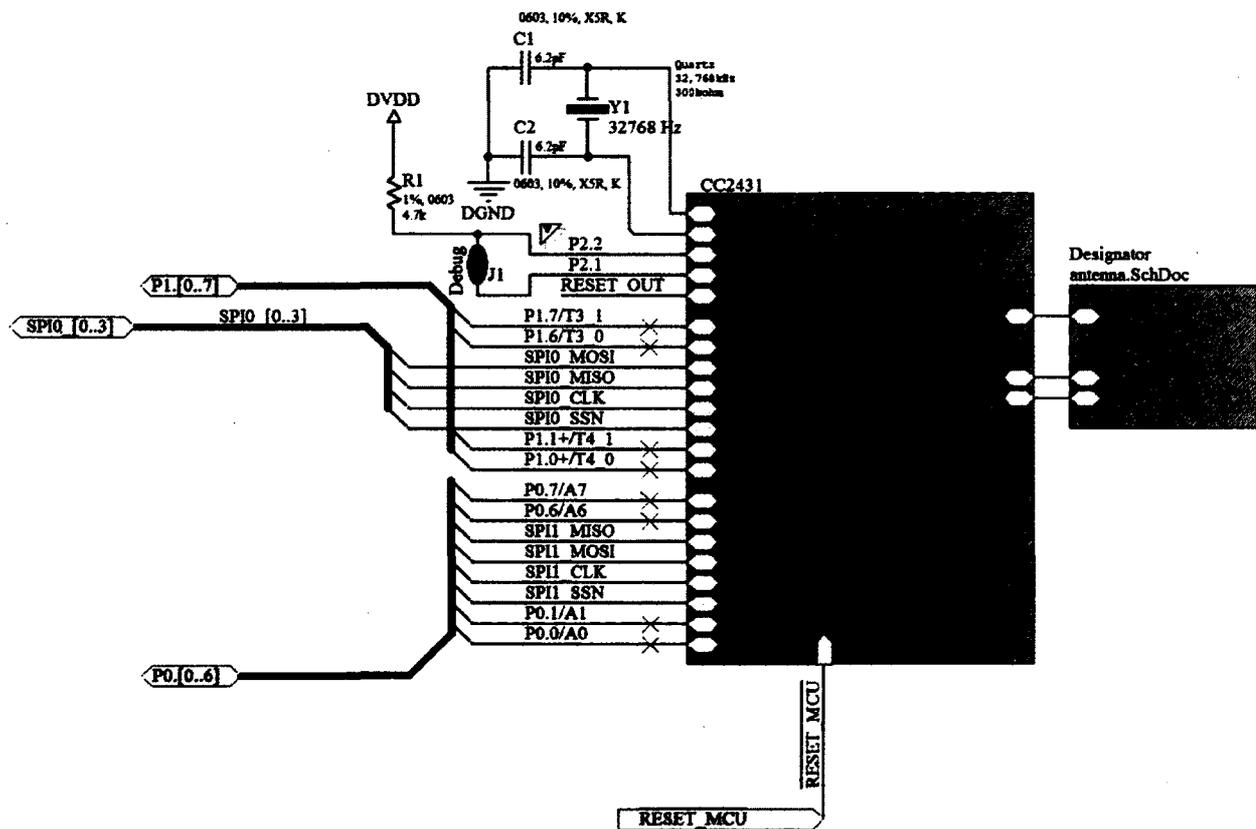


Figure A1.5: Vue d'ensemble du système radio

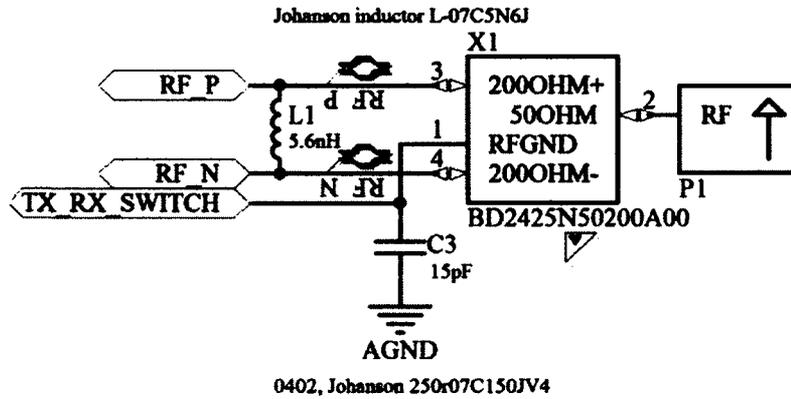


Figure A1.6: Système d'adaptation d'impédance d'antenne compact 2.4GHz

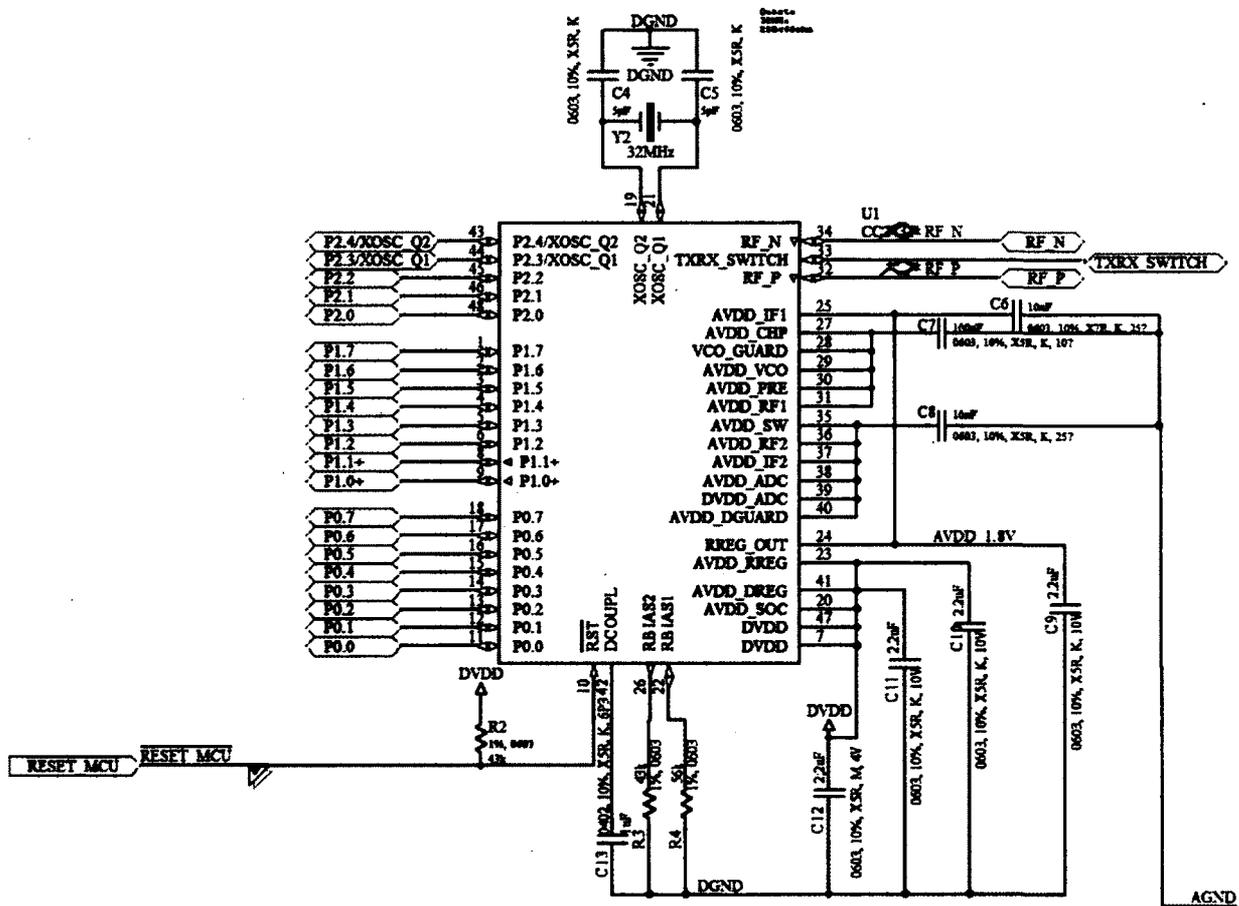


Figure A1.7: SoC, Système Radio et contrôleur de protocole, TI CC2431

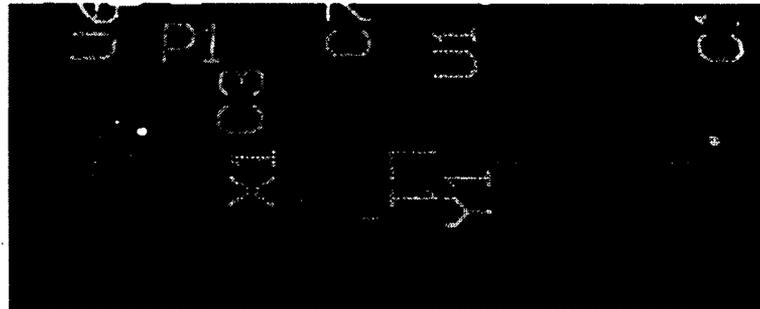


Figure A1.8 : Adaptation d'impédance compacte
(X1 est le ballun, le composant isolé est l'antenne SMD, U1 est le CC2431)

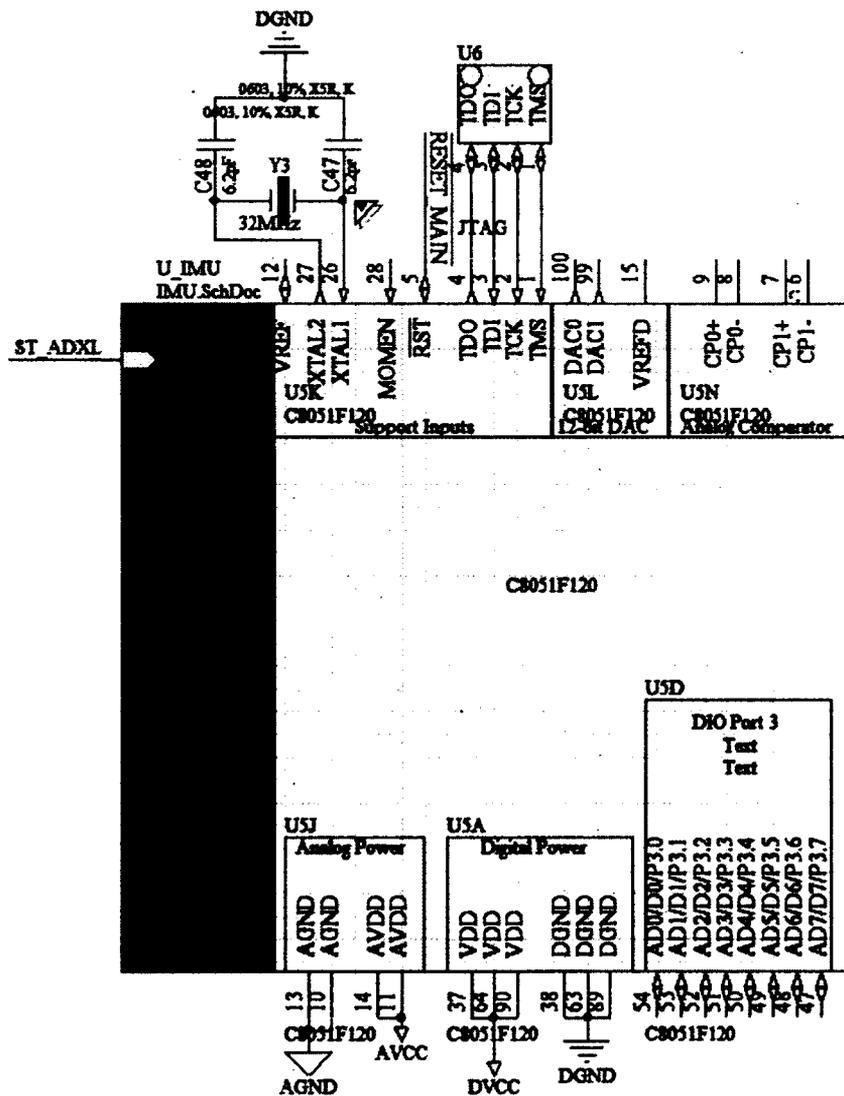


Figure A1.9 : Microcontrôleur principal C8051F120

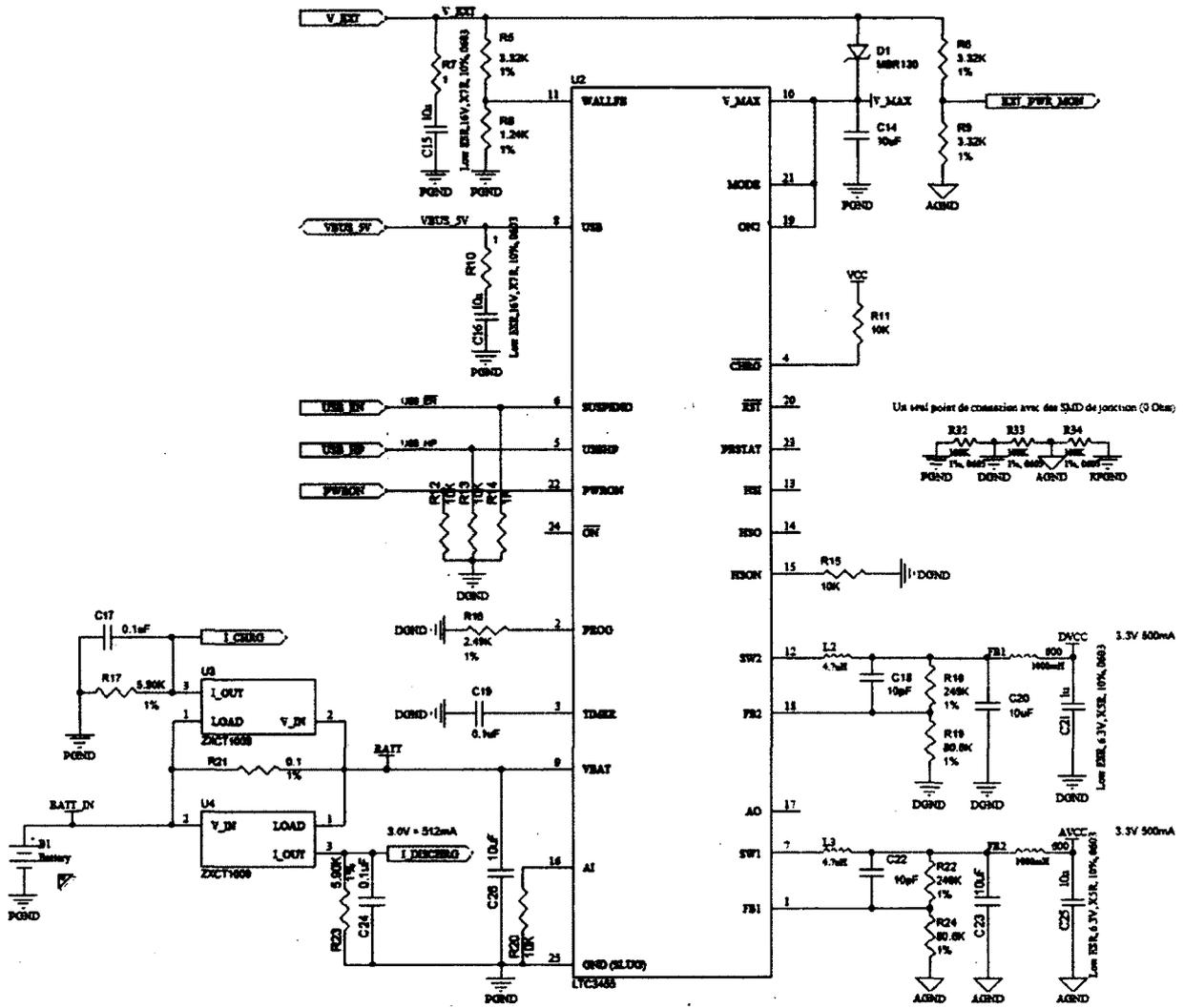


Figure A1.11 : Gestion de l'alimentation