



HAL
open science

Microsystèmes communicants pour un habitat intelligent

Eric Campo

► **To cite this version:**

Eric Campo. Microsystèmes communicants pour un habitat intelligent. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2003. tel-00584301

HAL Id: tel-00584301

<https://theses.hal.science/tel-00584301>

Submitted on 8 Apr 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Habilitation à Diriger des Recherches

Préparé au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS - Toulouse
Et dans l'équipe ICARE EA 3050 de l'IUT Blagnac - Université de Toulouse II

par

Eric CAMPO

Docteur de l'INSA Toulouse

Maître de Conférences à l'IUT Blagnac - Université Toulouse II

MICROSYSTEMES COMMUNICANTS POUR UN HABITAT INTELLIGENT

Soutenu le 4 juillet 2003, devant la Commission d'Examen :

Rapporteurs :	Mme S. DUCHEMIN	Professeur à l'université de Montpellier II
	M. A. MARTINEZ	Professeur à l'INSA de Toulouse
	M. J.P. THOMESSE	Professeur à l'ENSEM de Nancy

Examineurs :	M. N. BAILLY	Ingénieur-Chercheur Senior - EDF R&D
	M. Y. DANTO	Professeur à l'université de Bordeaux I
	M. D. ESTEVE	Directeur de Recherches au LAAS/CNRS
	M. J.J. MERCIER	Professeur à l'université de Toulouse II

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire constitue la synthèse de mes activités d'enseignement, d'encadrement et de recherche depuis 1994 :

- au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) du CNRS dans le groupe Microsystèmes et Intégration des Systèmes (MIS), et
- dans l'équipe de recherche Ingénierie des Communications pour l'informAtique, les Réseaux et l'Electronique sans fil (EA 3050 ICARE) de l'IUT de Blagnac - université de Toulouse II.

Ce travail résulte d'une collaboration étroite entre le groupe MIS et l'équipe ICARE. A ce titre, je tiens à remercier pour avoir soutenu voire encouragé cette initiative, les directeurs successifs du LAAS Messieurs A. Costes et J.C. Laprie, Madame A.M. Gué, responsable du groupe de recherche MIS et particulièrement mon directeur de thèse Monsieur A. Martinez.

Je remercie Monsieur D. Estève pour m'avoir confié la coordination de projets, pour m'avoir prodigué ses conseils éclairés tout au long de ces années ainsi que pour la disponibilité dont il a toujours fait preuve à mon égard.

Je tiens à adresser un témoignage chaleureux à Monsieur J.J. Mercier pour m'avoir fait confiance dans la mise en place d'une recherche en électronique lors de la création de l'équipe ICARE et m'avoir permis de mener librement mes recherches dans cette équipe. Ses encouragements constants et ses conseils m'ont été très bénéfiques.

Je remercie les doctorants qui ont participé activement à ces travaux de recherche et qui pour certains y contribuent encore : S. Bourdel, P. Melet, C. Escriba, S. El Homsy, R. Maurice, A. Bouzoualegh, J.C. Hamon et tous les étudiants DEA, DESS, ingénieurs et techniciens.

Le travail présenté dans ce mémoire est un travail collectif. Aussi, je remercie tous mes collègues associés à ces travaux : M. Chan du LAAS, L. Andrieux, F. Peyrard et particulièrement T. Val d'ICARE à qui j'adresse une amicale reconnaissance pour l'aide qu'il a toujours su m'apporter dans le domaine des réseaux ainsi que pour sa volonté permanente d'associer nos disciplines complémentaires.

J'associe à ces remerciements mes collègues enseignants des départements de l'IUT de Blagnac dans lesquels j'interviens, pour leur compréhension et pour avoir contribué à tisser des liens étroits entre l'enseignement et la recherche, ainsi qu'au personnel administratif et technique.

J'exprime mes remerciements à Monsieur J.M. Cellier, Vice-Président du Conseil Scientifique de l'université du Mirail, ainsi que tout le personnel du Service Général d'Appui à la Recherche pour leur aide.

Enfin, je remercie très sincèrement tous les membres du jury pour avoir répondu positivement à ma requête pour juger mon travail. J'ai conscience de l'investissement que cela suppose en plus de leur charge de travail. Je suis très honoré de les avoir eu comme rapporteurs et examinateurs.

AVANT-PROPOS

Ce mémoire résume les activités de Recherche menées depuis mon intégration dans le corps des enseignants-chercheurs en 1994.

Après une thèse préparée au LAAS¹, laboratoire du CNRS à Toulouse, sous la direction de Monsieur le professeur A. Martinez, mes activités de recherche se sont poursuivies au sein de l'équipe ICARE² de l'IUT de Blagnac dirigée par Monsieur le professeur J.J. Mercier et dans le groupe Microsystèmes et Intégration des Systèmes du LAAS-CNRS dirigé par Madame A.M. Gué, Directeur de Recherches.

Notre thématique de recherche porte sur les **Systèmes Intégrés Communicants dans l'Habitat Intelligent**.

L'habitat intelligent définit un secteur d'application important de l'Electronique et des Télécommunications que l'on identifie aussi par le terme de Domotique. Il couvre de très nombreuses fonctions liées à l'énergie, au confort, à la sécurité et aux échanges multimédia.

Ce domaine d'application permet de valider expérimentalement les techniques et les méthodes originales développées autour de la miniaturisation des systèmes et des microsystèmes. Ainsi, ce manuscrit tentera de présenter la démarche menée pour aboutir à la proposition de solutions systèmes et microsystèmes communicants spécifiques.

Cette démarche sera illustrée par plusieurs expérimentations ou plates-formes expérimentales réalisées, par le développement et l'intégration de nouveaux capteurs insérés au sein de systèmes de communications - filaire et sans fil - en vue de traitements multisensoriels (acquisition, analyse, diagnostic).

Ce mémoire décrit mes contributions scientifiques et ma prospective de recherche suivant deux parties :

- La partie 1 présente la synthèse de mes activités de recherche fondamentale et technologique en 4 chapitres :
 - ✓ Le chapitre 1 présente la problématique de recherche et les objectifs visés.
 - ✓ Le chapitre 2 présente ma contribution dans le domaine de la technologie.
 - ✓ Le chapitre 3 présente les travaux effectués dans le domaine des communications sans fil.
 - ✓ Le chapitre 4 présente deux exemples de réalisations expérimentales.

¹ LAAS : Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes

² ICARE : Ingénierie des Communications pour l'informAtique, les Réseaux et l'Electronique sans fil

- La partie 2 du mémoire :
 - ✓ Annexe 1 : liste la bibliographie relative aux travaux présentés,
 - ✓ Annexe 2 : recense les différents projets régionaux, nationaux, européens, les collaborations industrielles et précise les responsabilités exercées,
 - ✓ Annexe 3 : résume les divers encadrements doctoraux et connexes,
 - ✓ Annexe 4 : détaille les différentes publications personnelles,
 - ✓ Annexe 5 : propose une copie de cinq publications principales.

SOMMAIRE

PARTIE 1 : SYNTHÈSE DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE 9

INTRODUCTION GÉNÉRALE 10

CHAPITRE 1 : PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE..... 12

I.	INTRODUCTION	13
II.	CONTEXTE GÉNÉRAL DES MICROSYSTEMES.....	14
III.	ARCHITECTURES SANS FIL.....	15
IV.	LES APPLICATIONS SYSTEMES	16
V.	LES ALGORITHMES DE DIAGNOSTIC.....	17
VI.	NOTRE PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE	18
VI.1	<i>Objets communicants</i>	19
VI.2	<i>Intégration des systèmes</i>	19
VI.3	<i>Modélisation et conception</i>	20
VI.4	<i>Technologie</i>	21
VII.	CONCLUSION.....	22

CHAPITRE 2 : CONTRIBUTION AUX TECHNOLOGIES MICROSYSTEMES.....23

I.	INTRODUCTION	24
II.	COMPOSANTS A FILMS MINCES.....	25
II.1	<i>Objectifs et Contexte</i>	25
II.2	<i>Réalisation de transistors à films minces</i>	26
	<i>Phase I : Analyse du recuit des films de silicium déposés en phase vapeur à basse pression (LPCVD) par procédé thermique rapide (RTA) à haute et basse température</i>	26
	<i>Phase II : Etude de la cinétique d'oxydation des films de silicium et des propriétés électriques des polyoxydes par procédé thermique rapide (RTO)</i>	26
	<i>Phase III : Réalisation de transistors TFT par la technique RTP</i>	27
III.	INTEGRATION DE DETECTEURS DE PRESENCE	28
III.1	<i>Les Besoins</i>	28
III.2	<i>Réalisation de senseurs radiatifs de présence</i>	29
IV.	CONCLUSION.....	34

CHAPITRE 3 : SYSTEMES DE COMMUNICATION SANS FIL 35

I.	INTRODUCTION	36
II.	CONTEXTE DE TRAVAIL.....	37

III.	LES RESEAUX DE COMMUNICATION.....	38
IV.	CONCEPTION ET INTEGRATION D'UN SYSTEME RADIOFREQUENCE.....	39
IV.1	<i>Description du principe</i>	39
IV.2	<i>Modèle fonctionnel proposé</i>	40
IV.3	<i>Intégration VHDL</i>	43
IV.4	<i>Maquettage hybride</i>	45
IV.5	<i>Conclusion</i>	45
V.	INTEGRATION DE SYSTEMES BLUETOOTH.....	46
V.1	<i>La technologie Bluetooth</i>	46
V.2	<i>Principe de la communication radiofréquence Bluetooth</i>	47
V.3	<i>Architecture protocolaire</i>	48
V.4	<i>Proposition d'une architecture en réseau hybride</i>	49
V.5	<i>Caractérisation des échanges</i>	50
V.6	<i>Conception et réalisation d'une plate-forme de développement</i>	52
V.6.1	<i>Intégration du circuit Bluetooth "ROK"</i>	52
V.6.2	<i>Intégration du circuit RF "PBA"</i>	54
VI.	CONCLUSION.....	55

CHAPITRE 4 : REALISATION DE DEMONSTRATEURS 56

I.	INTRODUCTION	57
II.	CONTEXTE ECONOMIQUE	58
III.	SYSTEME DE SURVEILLANCE AUTOMATISEE DE PERSONNES AGEES.....	59
III.1	<i>Contexte social</i>	59
III.2	<i>Les soins à domicile</i>	59
III.3	<i>Dispositifs technologiques</i>	60
III.4	<i>Systèmes technologiques d'aide aux personnes âgées</i>	61
III.4.1	<i>Généralités sur les techniques de surveillance</i>	61
III.4.2	<i>Etat de l'art des systèmes de suivi</i>	62
III.4.3	<i>Contribution à la définition de règles normatives</i>	63
III.5	<i>Le système PROSAFE</i>	64
III.5.1	<i>Principe</i>	64
III.5.2	<i>Architecture matérielle</i>	65
III.5.3	<i>Architecture logicielle</i>	66
III.5.4	<i>Expérimentations</i>	69
III.5.5	<i>Perspectives d'amélioration</i>	72
IV.	SYSTEME DE GESTION AUTOMATIQUE DU CONFORT THERMIQUE : LE PROJET ERGDOM	73
IV.1	<i>Contexte économique</i>	73
IV.2	<i>Le système ERGDOM</i>	73
IV.2.1	<i>Principe</i>	73
IV.2.2	<i>Validation expérimentale</i>	75
V.	CONCLUSION.....	77

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 78

I.	CONCLUSION GENERALE	79
II.	PERSPECTIVES D'APPLICATION A D'AUTRES DOMAINES.....	83
II.1	<i>Microsystème multicapteurs pour des mesures de Génie Civil</i>	83
II.2	<i>Réseau local de communication pour le milieu aquatique</i>	84

PARTIE 2 : BIBLIOGRAPHIE, CONTRATS ET ENCADREMENTS ... 86

ANNEXE 1 : REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 87

ANNEXE 2 : CONTRATS DE RECHERCHE 93

I.	PROJETS CONTRACTUELS ACADEMIQUES ET INDUSTRIELS.....	94
I.1	<i>Régionaux</i>	94
I.2	<i>Nationaux</i>	95
I.3	<i>Industriels</i>	96
I.4	<i>Réseaux Nationaux et Européens</i>	98
I.4.1	Réseau National	98
I.4.2	Réseau Européen.....	98
II-	LIENS AVEC LA COMMUNAUTE SCIENTIFIQUE.....	99

ANNEXE 3 : ENCADREMENTS SCIENTIFIQUES 101

CO-ENCADREMENTS DE THESES	102
CO-ENCADREMENTS DE DEA	103
CO-ENCADREMENTS DESS.....	104
CO-ENCADREMENTS INGENIEURS	104
CO-ENCADREMENTS ELEVES INGENIEURS	104
CO-ENCADREMENTS MAITRISES	105

ANNEXE 4 : LISTE DES PUBLICATIONS PERSONNELLES..... 107

THESE	108
CONTRIBUTION A OUVRAGE	108
REVUES INTERNATIONALES AVEC COMITE DE LECTURE	108
REVUES NATIONALES AVEC COMITE DE LECTURE.....	109
BREVETS	110
MANIFESTATIONS INTERNATIONALES	110
MANIFESTATIONS NATIONALES	114
CONTRIBUTION A LA REDACTION DE PROJETS DE NORMES.....	115
RAPPORTS DE RECHERCHE ET DE CONTRATS LAAS-ICARE.....	115
PRESENTATIONS INVITEES	118

LISTE DES FIGURES 119

GLOSSAIRE 120

ANNEXE 5 : CINQ PUBLICATIONS PRINCIPALES 121

PARTIE 1

SYNTHESE DES ACTIVITES

DE RECHERCHE

L'habitat intelligent est un secteur d'application important pour l'ingénierie des communications à courte distance et pour le développement des microsystèmes.

Nos travaux se positionnent au carrefour de ces deux disciplines pour des raisons historiques que nous allons détailler mais aussi pour des raisons d'environnement scientifique. En effet, nos travaux s'insèrent d'une part, dans le cadre de l'activité du groupe MIS (Microsystèmes et Intégration des Systèmes) du LAAS et dans le cadre de l'activité de l'équipe ICARE qui s'intéresse plus précisément au domaine des télécommunications à courte distance.

L'intérêt pour la Domotique remonte aux années 90 où tous les experts considéraient qu'elle allait constituer un énorme secteur de développement avec l'introduction de l'électronique à domicile : loisir, confort, sécurité... On y voyait introduit un réseau informatique qui serait le support à une gestion distribuée et contrôlée de nombreuses fonctions... Le contexte économique et l'état d'avancement des technologies moins important que prévu n'ont pas favorisé le développement de ce secteur. Aujourd'hui, les progrès technologiques en télécommunications et en microsystèmes sont à maturité avec des offres plus attractives. De même, les besoins sont plus explicites. De ce fait, le secteur d'activité de la "nouvelle" domotique a évolué en proposant des fonctions intelligentes dans l'habitat avec des objectifs plus pragmatiques visant à se mettre au service de besoins sociétaux : les thèmes privilégiés d'application s'articulent autour des préoccupations essentielles de la sécurité des biens et des personnes, de la santé par le développement des soins à domicile ainsi que des fonctions liées au confort (gestion, télécommunications, multimédia...).

Les recherches scientifiques que nous résumons dans ce mémoire recensent les principaux travaux que nous avons réalisés dans ce domaine depuis une dizaine d'années. Ils ont porté sur des aspects théoriques et pratiques. L'idée directrice de notre travail est celle de contribuer au développement des **microsystèmes autonomes, communicants, interconnectés pour des fonctions de supervision**. Exprimée sous cette forme, elle témoigne d'une vision générale des systèmes de supervision dont les secteurs d'application dépassent largement celui de la Domotique. En effet, les transports, l'énergie, l'industrie et d'autres... ont des besoins analogues pour des questions de commande, de surveillance ou de maintenance. Ces systèmes se présentent d'une manière générale comme l'association :

- de capteurs répartis,
- d'un système de communication,
- d'un processeur central où s'élaborent les décisions ou les commandes.

Les choix matériels et fonctionnels peuvent être très différents avec l'application visée : l'option domotique nous a permis d'approfondir l'ensemble de ces questions sur des applications particulières. Nous nous intéressons donc à l'étude et à la conception de systèmes intelligents intégrant des capacités de détection, d'analyse et de diagnostic dans l'habitat.

Dans ce cadre, l'architecture générale multifonctionnelle des microsystèmes et autres objets communicants doit être précisée pour les applications qui doivent pouvoir répondre à un réel besoin sociétal. La démarche scientifique s'appuiera sur différents exemples d'application qui ont permis d'une part d'élaborer et de valider expérimentalement les concepts technologiques proposés, et d'autre part, d'élaborer des solutions techniques pour des architectures de communication adaptées.

Les exemples qui nous ont guidé sont :

- **la gestion domotique du confort** : chauffage et climatisation, à partir du réseau de capteurs multifonctionnels (température, présence),

- **la surveillance des personnes âgées** à domicile basée sur le suivi de la déambulation grâce à des capteurs de présence répartis.

Ces exemples ont donné lieu à une collaboration forte avec la société EDF qui a déposé plusieurs brevets EDF/CNRS sur les résultats de nos travaux (Projet ERGDOM³ et Projet PROSAFE⁴).

Les systèmes développés ont été étudiés, conçus et testés en laboratoire puis sur des sites réels : hôpital, clinique et résidences particulières pour personnes âgées. Ces différentes validations n'ont pu être effectuées que grâce au soutien de contrats régionaux, nationaux et industriels (cf. Annexe 2). Ces deux exemples d'application dans le domaine de l'habitat montrent que plusieurs années d'investissement à la fois matériel et financier et d'engagement personnel sont nécessaires pour arriver à proposer des solutions valides pour un éventuel transfert industriel. Ces travaux ont nécessité la création d'une équipe pluridisciplinaire. Les résultats présentés sont ainsi le fruit d'interactions fortes avec de nombreux collègues de disciplines connexes et de différents organismes.

La réalisation de ces démonstrateurs systèmes dits "intelligents" ont mis en évidence des limites technologiques pour chaque constituant de ces systèmes. Ils nous ont ainsi permis de dégager des idées nouvelles sur la conception de microsystèmes spécifiques pouvant répondre aux besoins technologiques recensés à différents niveaux de la chaîne de mesure : les capteurs et le lien de communication pour la partie matérielle, les algorithmes de traitement des données pour la partie logicielle. Sur la base des applications retenues, ces idées nouvelles et ces concepts innovants ont contribué au développement des microsystèmes intégrés sans fil :

- dans le domaine des **télécommunications sans fil** dont les besoins dans le secteur de l'habitat sont très évidents. En effet, l'implantation souple de fonctionnalités domotiques nouvelles ou actuelles passe par l'élimination à moyen terme de tout câblage.

- en matière de diagnostic appliquant un concept général **d'apprentissage préalable à la décision**. L'originalité de notre travail a été d'appliquer ce concept à "l'Homme dans la boucle". **Pour ce faire, nous avons modélisé sa fonction au travers de ses habitudes** (modes d'action, modes de vie...). C'est de notre point de vue, une contribution générale importante que nous validons dans nos deux applications principales.

Notre problématique de recherche cible donc les microsystèmes autonomes, communicants, interconnectés pour des fonctions de supervision en Domotique. Pour présenter nos contributions, nous resterons dans cette logique scientifique plutôt que chronologique.

Le premier chapitre présente notre problématique de manière détaillée.

Dans un deuxième chapitre, nous présenterons nos résultats sous l'exemple de la technologie en revenant sur les études les plus anciennes consacrées au développement des composants en couches minces et en développant des objectifs plus récents d'intégration de capteurs de présence de nouvelle génération.

Dans un troisième chapitre, nous nous attacherons aux aspects de communication dans les systèmes domotiques. Cela nous permettra d'introduire l'approche que nous avons de la conception des microsystèmes.

Le quatrième chapitre présentera les deux exemples d'application : ERGDOM et PROSAFE. Ce sera l'occasion de traiter des questions algorithmiques de fusion multisensorielle et de diagnostic.

³ ERGDOM : ERGonomic and intelligent interface in DOMotic functions

⁴ PROSAFE : PRO Safety And Follow-up of the Elderly

CHAPITRE 1

PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE

I. INTRODUCTION

Ce chapitre fait une présentation détaillée de la problématique générale de recherche en restant fidèle à la structure de présentation de notre manuscrit : nous présenterons d'abord le contexte général des microsystemes avant de traiter des aspects de la communication, des questions algorithmiques de décision et de technologie.

Le développement des microsystemes a rapidement progressé ses dernières années par une demande croissante de miniaturisation des systemes intégrant un nombre plus élevé de fonctions. Des réseaux et des plates-formes technologiques de conception et de réalisation se sont alors constitués pour répondre à l'étendue croissante des applications potentielles.

Beaucoup de ces applications nécessitent l'utilisation de microsystemes répartis. Ceux-ci doivent s'insérer dans une architecture en réseau qu'il conviendra de spécifier. Ces microsystemes doivent également disposer de capacités décisionnelles et réactives et pouvoir s'associer à des systemes d'aide à la décision. La prise de décision ou de commande doit être adaptée à la situation. Plusieurs techniques existantes relèvent du concept de fusion multisensorielle et des techniques de diagnostics. Nous les présenterons pour les avoir utilisées dans nos applications.

Les composantes qui interviennent dans la conception et la mise en œuvre d'ensembles électroniques associant des microsystemes "intelligents" communicants soulèvent différentes questions qu'il conviendra d'aborder relevant :

- de la dimension technologique (intégration),
- de la dimension de la communication (modélisation et simulation),
- de la dimension de la supervision (méthodes algorithmiques).

II. CONTEXTE GENERAL DES MICROSYSTEMES

L'évolution incessante des technologies de la microélectronique a permis ces dernières années de réduire considérablement la taille des composants et des coûts qui leur sont associés et d'augmenter de manière ininterrompue la densité des circuits intégrés (loi de Moore). Dans les années 90, le concept de Microsystèmes a progressivement émergé. Il s'agit d'intégrer sur une même plaque de silicium, le capteur et son électronique de traitement du signal, mais aussi dans certains cas, des éléments mécaniques, engrenages, moteurs et autres actionneurs. Ces dispositifs sont obtenus en complétant les technologies classiques des circuits intégrés par des opérations de micro-usinage du silicium. Cette "approche" microsystèmes (encore appelée MEMS) permet de réduire de façon importante le prix de revient des fonctions élémentaires pour peu que les étapes d'assemblage aient des coûts de production raisonnables. Par extension, tout dispositif :

- contenu dans un volume inférieur à quelques centaines de mm^3 ,
- doté d'une certaine intelligence dans la capture de l'information, dans son traitement, dans son diagnostic ou dans la façon de la communiquer,

est considéré comme un microsystème.

De nouveaux produits sont alors envisageables et de nouveaux marchés deviennent accessibles.

On a ainsi vu émerger en premier lieu des dispositifs microsystèmes qui ne doivent leur essor qu'au travers d'applications à grands volumes. On peut citer l'exemple des micro-accéléromètres inventés dans les années 80 et qui pilotent depuis 1998 le déclenchement des coussins gonflables de nos véhicules (airbags).

Parmi les domaines d'utilisation des MEMS, on trouve le secteur des périphériques informatiques (têtes d'imprimantes) mais aussi les secteurs de la défense, de l'espace, de l'automobile, de l'environnement et des télécommunications. Les MEMS permettent d'améliorer et de remplacer des dispositifs déjà existants en les miniaturisant à l'image des gyromètres lasers intégrés dans les commandes de vol des avions, des fusées ou des satellites mais aussi des détecteurs de roulis dans les véhicules automobiles. Ils peuvent aussi créer de nouveaux marchés comme les biopuces.

Le marché des microsystèmes qui représentait environ 16 milliards d'euros en 2000, devrait continuer de croître au rythme de + 30 % par an.

Les télécommunications apparaissent aujourd'hui comme un des principaux champs d'application. L'apport des MEMS permet d'augmenter la rapidité de calcul des fonctions réalisées traditionnellement par des composants passifs. Le temps d'accès aux informations en est lui aussi amélioré. Le marché en pleine expansion devrait passer de 144 millions d'euros en 2000 à quelques 4 milliards d'euros en 2004.

Enfin, le domaine médical devrait aussi bénéficier des avancées en terme de miniaturisation de dispositifs multifonctionnels, par exemple :

- la détection des très faibles accélérations cardiaques pour les patients équipés de pacemakers,
- la délivrance automatique de médicaments (micro-pompes d'injection implantables),
- ou encore les systèmes de diagnostic et de monitoring autonomes (microcapteurs de pression artérielle).

Tous les domaines d'activité sont donc concernés par les micro/nanotechnologies pour autant que les dispositifs répondent à une demande socio-économique latente ou exprimée. Ce nouveau concept d'intégration nécessite souvent la collaboration de différentes disciplines scientifiques (RF, électrique, mécanique, optique, chimique...).

IV. LES APPLICATIONS SYSTEMES

L'évolution des technologies de l'information et de la communication a été extrêmement rapide en s'appuyant sur des domaines d'application favorables dans l'automobile et les transports, la gestion professionnelle, les télécommunications, l'informatique domestique personnelle... Ces succès invitent les professionnels et les responsables de la recherche publique au niveau national et européen à initier de nouvelles recherches poussant à la diffusion de l'électronique dans l'habitat.

Il est clair que le logement tel qu'il est proposé aujourd'hui ne correspond pas aux possibilités technologiques. Il doit devenir un espace de vie intelligent adapté aux personnes qui y vivent avec des besoins qui se décrivent en termes de confort, de fonctionnalité, de flexibilité, de sécurité et d'économies d'énergie. Par exemple, la mise en réseau des objets communicants permettrait aujourd'hui de rendre la maison communicante avec l'intérieur (réseaux locaux *indoor*) mais aussi avec l'extérieur (Internet). De nouveaux services et télé-services feront leur apparition dès lors que les systèmes domestiques seront normalisés. L'utilisateur ou le prestataire de services pourra par exemple intervenir à distance sur l'installation soit à des fins de contrôle ou de gestion, soit à des fins de maintenance. Nombreuses sont ainsi les entreprises qui comme EDF se montrent particulièrement intéressées par les perspectives qu'ouvre cette technologie et soutiennent des projets de recherche et développement.

Ces perspectives ont ouvert deux secteurs dynamiques :

- **la gestion de l'énergie** (avec par exemple des thermostats capables de se déclencher seulement quand les occupants sont présents),
- et **des systèmes de sécurité** (90% des gens investissent pour la première fois dans l'automatisation afin de rendre leur maison plus sûre) et de **surveillance** (suivi du comportement ou de l'état de santé des personnes dépendantes).

Le potentiel des services à développer est donc considérable, du côté des utilisateurs (économies d'énergie, sécurité, confort, aide aux handicapés...) comme du côté des prestataires. Mais encore faut-il que les offres soient en adéquation avec la demande pour convaincre, tant au niveau du prix que des performances.

L'origine des travaux du LAAS dans ces secteurs se situent dans les années 90 :

- Une réflexion menée par le CNRS en 1997 sur le thème de "l'habitat intelligent" concluait à l'existence des besoins croissants dans les "soins à domicile", besoins qui correspondaient à des intérêts grandissants pour la maîtrise des dépenses de santé. En effet, le nombre de personnes âgées est en augmentation dans tous les pays industrialisés. Cette augmentation très liée à l'accroissement de la durée de vie pose des problèmes aigus de prise en charge des personnes âgées dépendantes. Cette prise en charge doit si possible être assurée à domicile. Ce sont ces considérations qui ont inspiré le projet PROSAFE.

- Durant ces dernières décennies beaucoup d'efforts ont été déployés pour favoriser la diminution des coûts de la consommation de l'énergie (réglementation, normes, matériaux, systèmes de programmation). Les systèmes de gestion énergétique sont devenus un investissement important dans l'habitat pour la maîtrise de la consommation électrique et pour l'obtention du confort thermique. Ces systèmes doivent être de faibles coûts, faciles d'installation et surtout d'utilisation. Le système ERGDOM exploite les techniques nouvelles qui permettent d'explorer les possibilités de l'automatique adaptative avec l'intégration de systèmes à règles ou à probabilités statistiques munis de capteurs de détection répartis.

Ces deux exemples qui nous concernent plus particulièrement ne sont qu'une part des fonctions que l'on peut intégrer sur un réseau domotique. D'autres fonctions sécuritaires et de

surveillance (intrusion, enfants, handicapés...) peuvent être aussi associées sur le même support et contribuer aussi au développement d'un véritable "habitat intelligent".

V. LES ALGORITHMES DE DIAGNOSTIC

Notre ambition est de montrer que l'usage de capteurs distribués permet d'obtenir de meilleures performances grâce aux techniques de fusion multisensorielle. Du point de vue applicatif, nous visons principalement la sécurité et le confort des personnes via la proposition d'outils nouveaux permettant la surveillance automatique de personnes âgées et la gestion du confort thermique dans l'habitat.

En fait, notre motivation part d'une analyse plus générale qui veut que le progrès technologique entraîne une complexité croissante des organisations et des produits industriels. Cette complexité implique une gestion plus élaborée des risques encourus à l'échelle individuelle ou à l'échelle de la société. Cette gestion du risque doit faire appel à des techniques de supervision caractérisées par l'usage de capteurs multiples, associés à des algorithmes de fusion multisensorielle et de décision.

Le concept de fusion multisensorielle vise à tirer parti de données issues de plusieurs capteurs pour accroître les performances de la mesure en précision, fiabilité, dynamique ou encore pour accéder à des variables agrégées non directement accessibles par chacune des mesures prises séparément. La difficulté particulière de nos domaines d'application est que nous nous intéressons à des systèmes où "l'Homme entre dans la boucle". Le fait que ces systèmes reposent sur le comportement dynamique d'un individu implique que le type et la quantité d'informations à manipuler est différent par rapport aux problèmes classiques : on doit faire face ici à des informations plus imprécises, approximatives, personnelles, quelquefois qualitatives... Pour traiter ces particularités nous avons choisi de mettre en œuvre des techniques d'apprentissage par voies statistiques et neuronales [MI7-8], [RN5].

Les motivations initiales de ces deux applications reposent sur une analyse des besoins. Les utilisateurs souhaitent des automatismes "transparents" au sens où ils ne nécessitent pas d'interventions systématiques d'opérateurs liées à des exigences de programmation à respecter. L'objectif complémentaire est d'être assuré que l'utilisateur est bien aidé conformément à ses souhaits, conformément – dans notre démarche – à ses habitudes et modes de vie.

Notre idée a été d'appliquer systématiquement une approche par apprentissage comportant deux étapes (figure 2) :

- *une étape d'apprentissage* (1) où l'on élabore une modélisation des habitudes et modes de vie permettant d'avoir une version prédictive anticipant les besoins de l'utilisateur.
- *une étape d'exploitation* (2), où l'on s'appuie sur cette modélisation pour réaliser l'automatisme étant entendu que le modèle doit être constamment réactualisé pour tenir compte d'éventuels changements de comportements.

Cette idée peut présenter des risques dans l'application car elle se fonde sur une hypothèse qui est l'existence d'habitudes... Or, nous savons bien que même si ces habitudes existent, il y a des aléas et des imprécisions qui peuvent réduire l'efficacité de l'approche. Notre expérience va montrer que ces situations peuvent être gérées le plus souvent sans gêne pour l'utilisateur et que, dans tous les cas, le caractère "humain" de l'approche lui donne une compréhension très naturelle des erreurs.

L'idée nouvelle que nous avançons pourra être appliquée dans toutes les applications où "l'Homme dans la boucle" peut être "modélisé" par une estimation probabiliste de ses habitudes et comportements. Dans l'habitat, les habitudes que nous avons modélisées sont des habitudes de présence, de confort, de cheminement... que l'on retrouve systématiquement dans les deux exemples d'application étudiées.

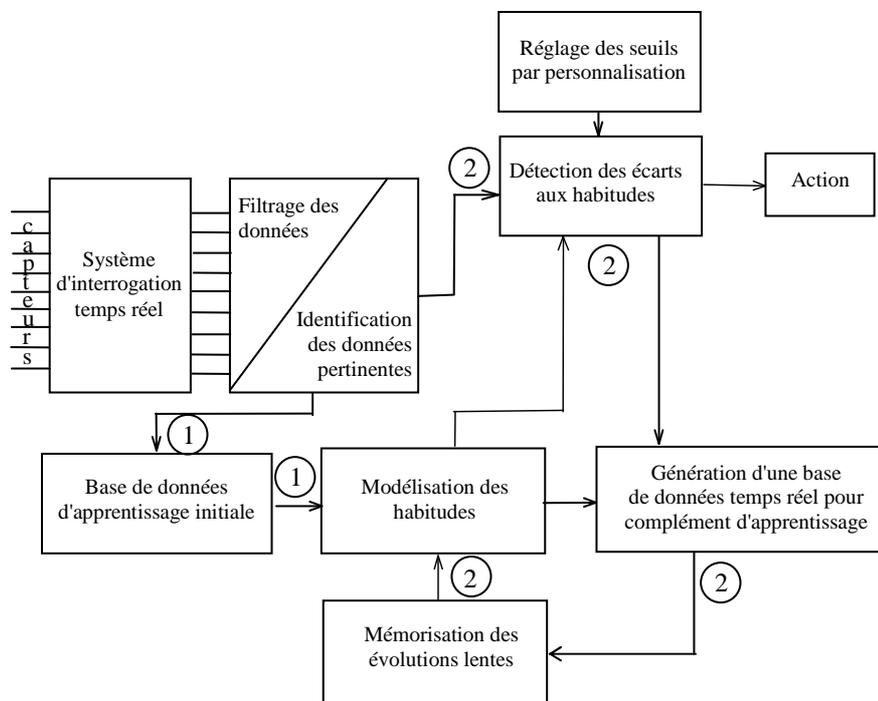


Figure 2. Diagramme de la chaîne d'automatisation par apprentissage.

VI. NOTRE PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

Notre recherche traite depuis une dizaine d'années de la conception et de la mise en oeuvre de systèmes de surveillance dans l'habitat. Comme nous l'avons déjà évoqué, cette problématique est générale. Elle concerne tous les systèmes complexes : transport, énergie, industrie... qui nécessitent d'être très performants en matière de fiabilité et de sécurité. La tendance aujourd'hui pour tous ces systèmes complexes est de rajouter une couche électronique supplémentaire de surveillance dont le rôle sera de diagnostiquer un dysfonctionnement, d'identifier les organes défaillants et si possible d'anticiper ces dysfonctionnements en mesurant des petits signaux précurseurs. Cet objectif ultime d'anticipation oblige à concevoir des systèmes de surveillance très sophistiqués. Notre proposition est ici extrêmement claire : ces systèmes seront basés sur des réseaux multicapteurs capables de caractériser le système à surveiller dans tout son espace de fonctionnement.

Parmi les systèmes à surveiller, tous ne sont pas des automatismes. Certains laissent un opérateur humain commander : dans les transports ce sera le conducteur, dans l'habitat c'est l'utilisateur. Dans cette catégorie de systèmes, l'Homme peut être sollicité pour la décision finale où - c'est le cas dans l'habitat - l'Homme souhaite être bénéficiaire d'un service personnalisé sans avoir à faire le travail de décision ou plutôt de programmation. C'est là le cœur de notre problématique systèmes que nous pensons pouvoir gérer par la modélisation automatisée des modes de vie et des habitudes.

Notre problématique reste toutefois ouverte aux deux autres dimensions de ces systèmes :

- la dimension technologique de conception des microsystèmes qui sont en l'occurrence des capteurs répartis dans l'habitat,
- la dimension de la communication entre les microsystèmes, notamment de la communication sans fil.

La formulation que nous avons trouvée pour présenter notre problématique est donc celle de **la conception de microsystèmes autonomes interconnectés pour réaliser des fonctions de diagnostic**.

VI.1 OBJETS COMMUNICANTS

La notion de microsystème requiert un minimum d'autonomie et une intégration dans un système plus général. La portabilité d'une fonction ou d'un système est devenue une nécessité technique pour beaucoup d'applications de dispositifs mobiles : on parle alors de produits nomades. Cette caractéristique de portabilité permet de plus à ces systèmes électroniques miniaturisés de mieux pénétrer le marché des applications grand public. Une forte créativité va pouvoir s'exprimer pour répondre à une demande toujours élevée. Cette demande passe souvent par la réalisation de systèmes complexes où l'intelligence est distribuée entre des objets communicants, organisés en réseaux : la communication peut être réalisée par des liaisons sans fil (souvent RF) ou associée à des réseaux de type Internet ou des réseaux locaux (bus de terrain). Les liaisons sans fil concernent des applications portables ou autonomes auxquelles les problèmes d'encombrement, de consommation, d'autonomie sont fréquemment associés. La téléphonie a été moteur dans le développement rapide des premiers systèmes communicants. Le champ de possibilités apporté par cette technologie est énorme pour peu que l'on pense aux véritables besoins.

L'idée est donc de doter des objets non communicants à la base (capteurs, actionneurs, équipements domotiques, tous systèmes embarqués) de fonctions intelligentes avec une capacité minimale propre de traitement et de communication et de compléter les infrastructures actuelles dites "réseaux" gérées uniquement par un ordinateur PC central. Ceci doit nous conduire à un ensemble d'objets répartis aux fonctions initiales élargies, pouvant communiquer entre eux dans une architecture physique en réseau selon un protocole adapté. Ces modules communicants acquièrent de manière autonome l'information nécessaire (issue de capteurs ou d'actionneurs) et mettent de ce fait l'utilisateur "hors de la boucle" technique, le gardant "dans la boucle" uniquement pour des services de types géo-dépendants exploitant l'information de localisation physique de l'utilisateur. Les applications au service des usagers deviennent alors illimitées, que ce soit pour des applications classiques ou plus spécialisées de confort, de surveillance, de suivi, de sécurité, de loisirs, de culture... Certaines ne peuvent prétendre à une utilité réelle, alors que d'autres peuvent répondre à un vrai besoin sociétal (sécurité de personnes seules, télésanté, économie d'énergie...).

Bon nombre de technologies permettant la réalisation de ces objets communicants sont disponibles ou presque. Au-delà des progrès nécessaires dans le domaine de la miniaturisation et des techniques de communication sans fil, certains aspects de recherche (capteurs/actionneurs, interfaces, consommation, localisation, diagnostic, automatisation, personnalisation...) doivent être abordés pour le développement de ces objets communicants.

VI.2 INTEGRATION DES SYSTEMES

Les activités d'intégration que nous menons couvrent un vaste champ d'investigation allant des technologies de base jusqu'à la modélisation comportementale du système et le traitement du signal. Elles reposent sur des méthodologies de conception et de modélisation dont les avancées

sont illustrées par la réalisation exemplaire de démonstrateurs ou de plates-formes tout en respectant un double souci de positionnement à long terme mais aussi d'efficacité par rapport au domaine applicatif concerné. Nous devons cependant dissocier dans nos travaux les deux approches développées :

- l'intégration de macrosystèmes qui constitue **l'élaboration d'un système global centralisé** constituée des différentes fonctions associées de manière répartie (capteurs, actionneurs, traitement du signal, diagnostic...),
- et **l'intégration de microsystèmes** obtenus par assemblage de composants, de circuits ou de microdispositifs divers.

Dans ce contexte, nous avons particulièrement étudié et proposé des solutions de systèmes intégrés communicants qui permettent d'assurer sans intervention humaine, des fonctions de service, de gestion, de médiation dans un environnement domestique et professionnel. Notre idée principale est d'une part de mettre au point des fonctions intégrées de communication génériques et des capteurs d'imagerie infrarouge pour des dispositifs embarqués, et d'autre part de proposer des architectures de systèmes communicants en réseaux. Ces dispositifs peuvent s'appuyer sur des "circuits intégrés sur étagères" (COS) qui permettent de diminuer le nombre de composants passifs discrets. Il nous paraît évident que pour répondre à la demande, ces systèmes doivent être impérativement conçus et réalisés en prenant en considération la globalité des besoins et des attentes liés à leur application : spécifications techniques, ergonomie, fiabilité...

VI.3 MODELISATION ET CONCEPTION

L'utilisation de technologies innovantes dans les ensembles hétérogènes que sont les microsystèmes rend très difficile la connaissance précise des différents mécanismes physiques et technologiques qui s'y établissent. Par exemple dans des ensembles complexes où il existe des couplages électriques, mécaniques et thermiques, le recours à des logiciels de simulation globale s'avère incontournable. Il est donc important d'avoir une approche de conception globale fonctionnelle du dispositif et de développer des outils spécifiques de mesures ou de simulation.

L'approche d'une conception descendante par prototypage virtuel depuis les spécifications fonctionnelles jusqu'aux spécifications technologiques est la voie que nous avons suivie dans l'étude des dispositifs RF (Chapitre 3). La modélisation s'avère indispensable pour maîtriser le comportement fonctionnel dans son ensemble avant l'étape de réalisation de démonstrateurs plus globaux respectant fidèlement les spécifications d'origine.

En sus de l'approche comportementale, l'implantation d'algorithmes sur des supports matériels confère au système que l'on intègre une capacité à traiter au plus près l'information. La figure 3 illustre un exemple d'association d'outils logiciels intégrés à un environnement de conception de type CADENCE permettant une simulation des fonctions développées du niveau le plus haut (logiciel comportemental SABER et son langage associé MAST) à un niveau le plus bas (niveau transistor ou VHDL par exemple). Cette co-simulation (MAST-VHDL) permet d'assurer un *feedback* efficace pour le redimensionnement des paramètres dans l'environnement global du système étudié.

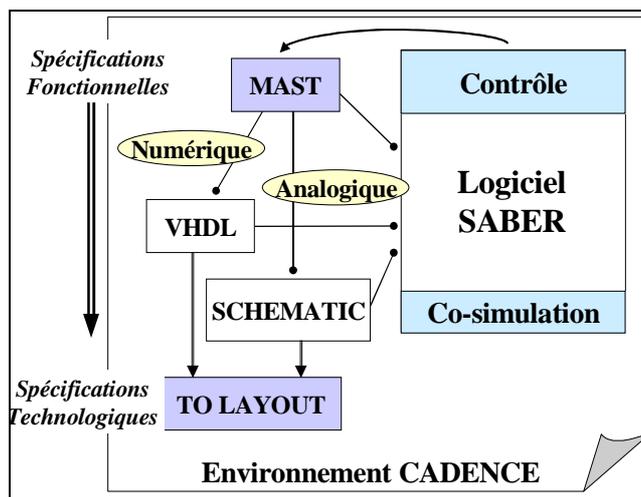


Figure 3. Outils logiciels associés pour la conception d'un système.

VI.4 TECHNOLOGIE

L'apport des techniques de la micro et de la nanotechnologie est déterminant dans la réalisation de systèmes intégrés ou de microsystèmes sur silicium. Ces techniques reposent principalement sur le micro-usinage de surface et de volume, le dépôt de couches minces : métaux ou matériaux nouveaux pour l'intégration de nouvelles fonctions d'actionnement et de détection. L'avantage majeur de ces techniques est de pouvoir fabriquer collectivement un grand nombre de dispositifs avec des propriétés comparables.

Parmi les efforts de recherche sur des dispositifs de détection et d'actionnement effectués dans le groupe MIS du LAAS-CNRS, on peut distinguer principalement :

- des composants pour la fluidique (micro-pompe, injecteurs matriciels),
- des capteurs chimiques et biocapteurs (gaz, cellule enzymatique, ions, molécules...),
- des capteurs radiatifs (imagerie infrarouge),
- des actionneurs électrostatiques (micromiroirs),
- des actionneurs pyrotechniques (micropropulseurs),
- des microdispositifs (microscopie).

Parmi ces champs de recherche, nous traitons actuellement celui des capteurs radiatifs (Chapitre 2) avec des perspectives d'application nombreuses : détection de présence, imagerie thermique, senseurs terrestres... Ces capteurs doivent pouvoir être facilement intégrés au sein de microsystèmes plus complets et donc être compatibles avec la technologie CMOS. Ce mode d'intégration fonctionnelle suit en effet une filière technologique silicium flexible qui possèdent des étapes optimisées et compatibles entre elles.

VII. CONCLUSION

Il est clair que la plupart des applications actuelles ou envisagées pour les microsystèmes se présente sous la forme d'une mise en réseau d'objets communicants répartis dans l'environnement où ils sont implantés. Ces objets sont généralement utilisés pour l'obtention de points de mesure ou de l'acquisition de données. Les architectures retenues sont centralisées ou réparties selon les exigences de mobilité ou d'interconnexion avec d'autres réseaux. Elles doivent autant que possible permettre une certaine interopérabilité. La réalisation de tels microsystèmes en réseau constitue un ensemble fonctionnel complexe dont tous les constituants doivent être appréhendés. L'approche que nous avons retenue repose sur une vision globale et méthodologique du système et de ses constituants afin de maîtriser au mieux les différents mécanismes mis en jeu. Nos investigations ont ainsi portées sur les deux aspects principaux suivants :

- le système global avec des fonctions réparties (capteurs, communication, analyse du signal), notamment dans le cadre d'applications réelles,
- l'intégration technologique de microsystèmes multifonctionnels,

Notre contribution scientifique a porté sur certains aspects clés de l'intégration et de la mise en œuvre de microsystèmes répartis :

- les capteurs intégrés (capteurs infrarouges de présence),
- les communications sans fil (architecture en réseau radiofréquence),
- l'analyse multisensorielle des données (diagnostic, aide à la décision) reposant sur des méthodes d'apprentissage.

Les cas d'application qui nous ont permis d'illustrer les problématiques précédentes sont ceux de l'habitat intelligent avec deux projets principalement :

- la surveillance et le suivi comportemental des personnes âgées,
- et la gestion du confort thermique.

La figure 4 schématise les domaines d'activité liés aux microsystèmes et précise (en grisé) les points que nous avons plus particulièrement abordés dans nos travaux.

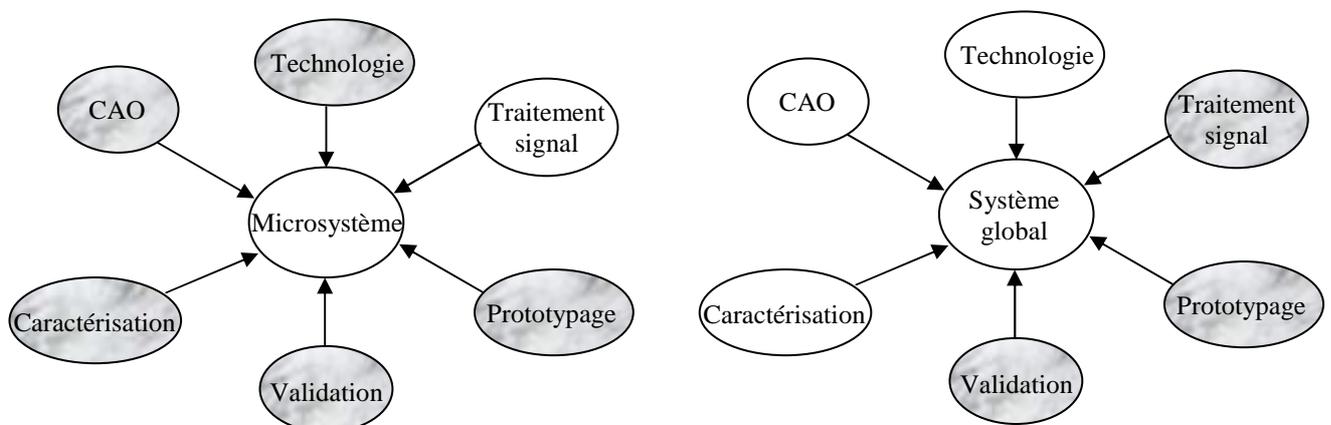


Figure 4. Domaines de contributions de nos travaux.

CHAPITRE 2

CONTRIBUTION AUX TECHNOLOGIES MICROSYSTEMES

I. INTRODUCTION

Ce chapitre traite de nos contributions en technologie des microsystemes. Nous les présenterons en deux volets :

- Nous avons tout d'abord commencé nos activités de recherche sur les **technologies à films minces** qui offre une solution alternative pour l'intégration des composants actifs à faible coût. Dans le champ d'application des écrans plats, l'intégration de l'électronique de commande est un enjeu industriel important : le but est de miniaturiser les périphériques tout en abaissant les coûts de fabrication et en augmentant la fiabilité. D'autre part, la complexité croissante des composants et la réduction de l'épaisseur des couches qui les composent imposent une parfaite maîtrise des propriétés des matériaux et font jouer un rôle accru aux interfaces qui doivent être "abruptes". Ceci implique la mise en place d'un processus technologique précis en atmosphère entièrement contrôlée, mettant en jeu des bilans thermiques réduits et assurant au mieux l'indépendance des diverses étapes. Deux procédés thermiques sont possibles :

- soit un procédé à basse température (LTP),
- soit un procédé thermique rapide (RTP).

C'est dans ce cadre qu'ont eu lieu mes premiers travaux de recherches effectués au LAAS dans l'équipe "Technologie à films minces" dans le cursus DEA et poursuivi par une thèse.

Le but *in fine* de notre étude était la réalisation de transistors MOS à film mince dédiés à la réalisation de circuits d'adressage de matrices à cristaux liquides à bas coûts.

- Nous avons ensuite repris nos activités technologiques après avoir constaté qu'il y avait un besoin précis en microsystemes de détection de présence. En effet, la nécessité, dans les approches menées, de modéliser le comportement humain par apprentissage implique que de nouveaux capteurs soient étudiés et développés. Ils doivent être correctement spécifiés et adaptés. L'étude du fonctionnement des démonstrateurs-systèmes, nous a permis de mettre en évidence la criticité de certains paramètres ou caractéristiques de ces dispositifs. Les besoins concernent essentiellement la fiabilité de détection des capteurs de présence et la flexibilité de leur utilisation dans des applications étendues.

Nous avons ainsi engagé des **travaux de modélisation et de réalisations technologiques de capteurs radiatifs infrarouges** basés sur le principe de l'effet thermoélectrique. Ce deuxième volet technologique entre directement dans l'activité consacrée aux microsystemes communicants, développée après notre thèse.

II. COMPOSANTS A FILMS MINCES

II.1 OBJECTIFS ET CONTEXTE

Tout d'abord, les travaux (dans le cadre du DEA) portaient sur l'oxydation du polysilicium par procédé thermique rapide avec l'objectif de comparer le comportement structural des films de silicium déposés par LPCVD⁵ à partir de la filière Silane, sous oxydation à haute température [R1]. Les cinétiques d'oxydation de ces films ont été comparées à celle du silicium monocristallin.

Notre étude sur les films de silicium recuits et oxydés par procédé thermique rapide a été menée dans le sens des préoccupations actuelles des technologies silicium au niveau de la réduction de l'épaisseur des couches associée à l'accroissement de l'intégration, au niveau de la réduction des bilans thermiques et des temps de cycle de fabrication.

Nous avons montré la possibilité pour les procédés thermiques rapides (RTP), de réaliser des polyoxydes minces (oxydes sur polysilicium) de bonne qualité, et d'activer très rapidement les grains de polysilicium.

Ces résultats prometteurs en terme d'applications ont donné lieu à une thèse que j'ai effectué au sein de l'équipe "Technologie à films minces" [Thèse].

Le travail a eu pour objectif d'analyser les potentialités de la technologie multiprocess, par Procédé Thermique Rapide en réacteur monoplaque à murs froids, à l'aide d'analyses expérimentales appliquées :

- à la cristallisation des films de silicium par recuit thermique rapide RTA (*Rapid Thermal Annealing*)
- à l'oxydation thermique rapide RTO de ces films (*Rapid Thermal Oxidation*), pour la réalisation de transistors à films minces de polysilicium (TFT).

Pour cela, nous avons recherché les conditions technologiques donnant les meilleures performances électriques pour les structures TFT : optimisation en terme de mobilité de canal et de qualité d'isolant de grille (optimisation des films de silicium et de la structure des interfaces).

Dans ce contexte, les recuits RTA à 750°C et l'oxydation thermique RTO à 1050-1100°C (sous O₂ sec) ont permis respectivement, la cristallisation des films de silicium et l'obtention d'oxyde de la centaine d'Angströms d'épaisseur avec des durées très courtes (comprises entre 2 et 3 minutes).

Une comparaison entre les valeurs obtenues pour des TFT réalisés, par procédé technologique basse température (recuit et oxydation LTA,O à 600°C), par les étapes RTA,O précédentes ou par la combinaison des deux, a été effectuée.

Enfin, une étude en température nous a permis de formuler ou de vérifier quelques hypothèses sur la conduction dans nos films.

Ces études se sont appuyées sur une collaboration étroite avec le CEMES⁶ et ont fait partie de travaux dans le cadre d'une convention entre le LAAS et le CNET de LANNION [R2-6].

Ce travail s'est également inscrit dans le cadre de collaborations européennes avec :

- le Fhg-IFT Munich (action intégrée PROCOPE "Multiprocédés thermiques séquentiels et/ou rapides pour la réalisation de microstructures à films minces des technologies silicium"),
- le Département de Physique de l'université Aristote de Thessalonique "Amélioration des transistors à films minces de Si polycristallin en vue de leur application à l'Electronique Large Surface et aux Microsystèmes Intégrés",

⁵ LPCVD : Low Pressure Chemical Vapor Deposition

⁶ CEMES : Centre d'Elaboration de Matériaux et d'Etudes Structurales

- le LCMM de l'université de Barcelone "Optimisation et caractérisation physico-chimiques et électriques de couches isolantes ou semi-isolantes pour la microélectronique et les microsystèmes silicium".

Ces activités de recherches technologiques ont été poursuivies lors de mon année d'ATER. Cette année a été mise à profit pour rédiger un article de synthèse des principaux résultats obtenus. L'article a été publié dans la revue IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing [RI2].

II.2 REALISATION DE TRANSISTORS A FILMS MINCES

Pour répondre à une démarche d'optimisation du processus technologique pour la réalisation de composants TFT, nos travaux se sont déroulés en trois phases principales :

Phase I : Analyse du recuit des films de silicium déposés en phase vapeur à basse pression (LPCVD) par procédé thermique rapide (RTA) à haute et basse températures

Nous avons pu suivre en fonction du temps de recuit, pour les températures 750°C et 1050°C, l'évolution de la structure cristalline du film de silicium déposé par LPCVD en relevant les indices n (indice de réfraction) et k (coefficient d'absorption) par une méthode optique appelée l'ellipsométrie.

Ces résultats ont été confirmés par des observations par Microscope Electronique à Balayage (MEB) et par Microscope Electronique en Transmission (MET) [RI1].

Nous en avons déduit que :

- suivant les dépôts, il existe des comportements de structure différents qui sont fonction de plusieurs paramètres de dépôt : température et pression, débit gazeux, filière gazeuse,

- aux très basses températures de dépôts ($< 500^\circ\text{C}$), le taux de nucléation du film est plus faible et donc la taille des grains est plus grande.

De très gros grains (environ 5000 Å) sont notamment obtenus pour le dépôt réalisé à 465°C-200 mTorr dans la filière Disilane,

- à 1050°C, les deux phénomènes qui régissent l'évolution du matériau à savoir le phénomène de germination puis le phénomène de croissance semblent se confondre. Ceci est dû à la très forte énergie reçue par le matériau dès la rampe de montée à 1050°C ($t_m = 16\text{s}$),

- à 750°C, les deux phénomènes interviennent successivement, l'observation de la structure devient alors plus facile. Nous avons également constaté que la taille des grains est plus grande après des recuits à basse température.

L'étude à 750°C permet, en outre, de comparer avec ce qui se fait à 600°C dans un four conventionnel [1].

Les recuits réalisés par RTP font donc évoluer les matériaux beaucoup plus rapidement que ceux réalisés avec les procédés basses températures (par fours classiques) en gardant les mêmes propriétés. Seule la taille de grain des films recuits RTA est légèrement plus petite [MI5].

Phase II : Etude de la cinétique d'oxydation des films de silicium et des propriétés électriques des polyoxydes par procédé thermique rapide (RTO)

Des résultats très prometteurs ont été obtenus concernant la qualité des oxydes minces (100Å) RTO sur silicium monocristallin (très bon courant de Fowler-Nordheim, excellent champ de

claquage) [MI1]. Ces résultats sont comparables (et même meilleurs d'un point de vue reproductibilité) à ceux des meilleurs oxydes "tunnels" réalisés à haute et basse températures.

L'étude que nous avons effectuée sur la cinétique d'oxydation à 1050°C des différents films de silicium utilisés précédemment pour les recuits, a permis de dégager les conclusions suivantes :

- les films déposés aux très basses températures $\leq 555^\circ\text{C}$ (dépôts amorphes) s'oxydent plus rapidement que les dépôts réalisés aux plus hautes températures (dépôts polycristallins à 620°C),
- les films de la filière Disilane s'oxydent plus rapidement que ceux de la filière silane,
- enfin, le taux d'oxydation des dépôts amorphes reste comparable à celui du silicium monocristallin d'orientation $\langle 100 \rangle$ ou tout au moins compris entre ce dernier et celui du silicium d'orientation $\langle 111 \rangle$.

Tous ces dépôts semblent montrer une croissance linéaire (temps allant de 30s à 180s).

Dans le but d'évaluer les propriétés électriques de ces polyoxydes, nous avons réalisé plusieurs séries de capacités MOS en fonction de différentes conditions de dépôts.

Globalement, il ressort de cette étude que :

- les champs de claquage obtenus par les procédés RTA,O confèrent aux polyoxydes des propriétés électriques aussi bonnes que celles obtenues par des procédés basses températures sous conditions classiques,
- les hauteurs de barrière de potentiel aux interfaces se trouvent améliorées par les procédés RTA,O,
- le recuit pré-oxydation à 750°C ou à 1050°C affecte peu le taux d'oxydation des films amorphes ou polycristallins. Cependant une certaine variation de ce taux apparaît suivant que les films ont été pré-recuits ou non. Ceci atteste d'un certain effet de la "qualité" structurale du film sur son taux d'oxydation, et de l'évolution de cette "qualité" avec les conditions de dépôt du film Si-LPCVD étudié.

Ces résultats indiqueraient que les procédés RTA,O permettent de réaliser des interfaces film-polyoxyde et polyoxyde-métal globalement meilleures (ou au moins comparables) que celles données par le procédé basse température à 600°C . Par contre, des défauts "localisés" (charges ou pic de rugosité) tendraient à être introduits pénalisant les champs de claquage.

L'intérêt de l'étape de pré-recuit dans ces procédés, pour augmenter les performances du polyoxyde, dépend des conditions de dépôt du film Si-LPCVD lui-même.

Phase III : Réalisation de transistors à films minces de polysilicium (TFT) par la technique RTP

Le travail de mise au point du procédé technologique ainsi achevé, les transistors à films minces de polysilicium (TFT) ($W = 500 \text{ \AA}$) utilisant un faible bilan thermique ont ainsi pu être réalisés. Ils bénéficient de l'optimisation préalable des différentes couches de dépôt les constituant ainsi que des mesures effectuées sur les différents véhicules tests associés.

Les dépôts de silicium ont été réalisés dans la gamme de température $450\text{-}480^\circ\text{C}$ (Pression=200 mTorr) dans la filière Disilane [2]. Des transistors de type N et de type P dont la grille a des dimensions de longueur $L = 80 \text{ \mu m}$ à 260 \mu m ont été réalisés et testés [MI2] (figure 5).

Les résultats obtenus donnent des mobilités μ qui atteignent $84 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ pour les canaux N et $46 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ et des rapports de courants à l'état passant et à l'état bloqué $I_{\text{ON}}/I_{\text{OFF}}$ de l'ordre de 5.10^5 à 10^6 compatibles avec les résultats de la littérature.

Nous avons également constaté que la mobilité était liée à la qualité interne des cristallites dans le film Si-poly. Une conséquence en est le lien direct entre la valeur de la mobilité et la valeur du coefficient "k" mesuré à 405 nanomètres. Les études de tailles de grain (expérimentale : par MET, et théorique : par le modèle de "Seto"), de k (par ellipsométrie), et des hauteurs de barrières de potentiel (déduites des courbes de mobilité en fonction de la température), nous ont permis de montrer que les zones de barrière de potentiel (zones de défauts associés aux joints de grains ou dans les grains eux-mêmes) sont le facteur prépondérant qui agit sur les performances électriques des transistors réalisés par les procédés RT et LT [MI3], [MI4]. La mesure de k peut ainsi servir à l'optimisation du procédé technologique qui conduirait à des plus hautes mobilités.

Nous avons enfin montré dans ce travail que la combinaison des étapes de recuits RTA et LTA s'avère très intéressante d'un point de vue structural et électrique. En effet, l'étape de recuit thermique rapide permet la "guérison" (partielle) des défauts contenus dans les cristallites. Ainsi, les films ayant subi une étape RTA à 750°C après l'étape LTA à 600°C , montrent une qualité cristalline des grains meilleure et des performances électriques accrues.

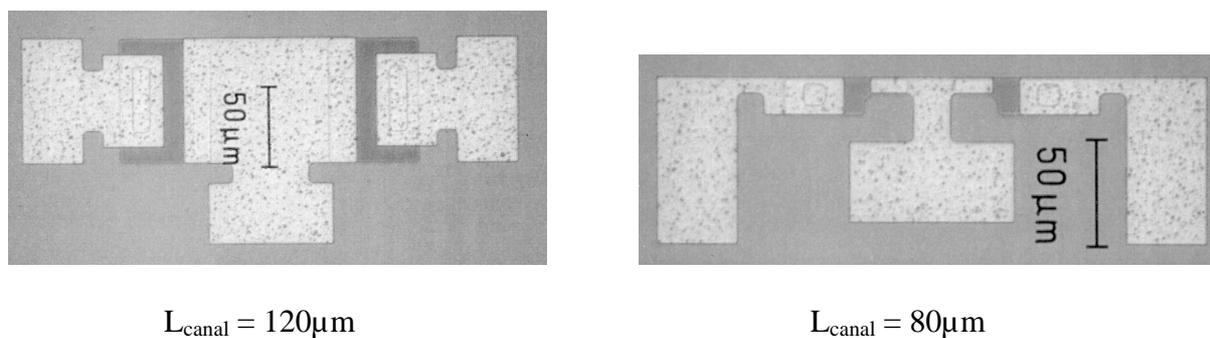


Figure 5. Transistors à films minces de polysilicium ($W = 500 \text{ \AA}$).

III. INTEGRATION DE DETECTEURS DE PRESENCE

III.1 LES BESOINS

Le concept utilisé dans les exemples d'application domotiques repose sur l'apprentissage des habitudes de vie. Tous les traitements multisensoriels effectués sont donc basés sur la fiabilité de détection de la présence de l'individu. Or, les capteurs basiques utilisés dans ces systèmes, de types pyroélectriques, présentent des insuffisances :

- en termes de couverture de l'espace et de sensibilité, regroupés sous la notion d'**insuffisance fonctionnelle**. Autant les deux premières insuffisances sont perfectibles à l'installation, autant l'insuffisance fonctionnelle mérite la recherche de capteurs nouveaux. Ainsi, les capteurs piézoélectriques ne sont sensibles qu'au mouvement par la dérivée par rapport au temps de l'énergie thermique reçue. Dans ces conditions, un mouvement effectué très lentement ne sera pas détecté.

- en terme "d'intelligence" à la fois dans le **traitement de l'information** qui peut par exemple prendre un occupant habituel d'une habitation pour un intrus et vice-versa, mais aussi dans la

transmission de cette information. Ainsi, l'usage d'un capteur unique fonctionnant en mode local n'a que la faculté de détecter une présence sans pouvoir l'attribuer à un habitué ou à un intrus. Seule la centralisation et le traitement d'une installation multicapteurs fonctionnant en réseau peuvent apporter la base de données indispensable à l'interprétation d'un signal capteur. Ce réseau de capteurs doit cependant constituer une infrastructure matérielle flexible et répondre à des exigences de fiabilité et de sécurisation des données transmises.

L'expérience acquise au cours des différentes expérimentations nous a permis de définir les spécifications requises pour les différents éléments matériels d'une chaîne système, notamment au niveau des détecteurs de présence.

III.2 REALISATION DE SENSEURS RADIATIFS DE PRESENCE

Compte tenu des considérations précédentes, nous pensons que l'étude d'un capteur de présence "vraie" statique est une solution très intéressante [D4]. Nous proposons ainsi d'introduire comme capteur de présence domotique, des capteurs bolométriques ou à thermopiles qui sont fondamentalement sensibles à l'énergie de rayonnement reçue. Les bolomètres silicium et les thermopiles s'avèrent supérieurs en détectivité et sont aujourd'hui d'un intérêt croissant [R23]. De plus, les différentes technologies d'assemblage ou de report de puces développées au LAAS nous permettent d'entrevoir leur mise en application dans la conception et la réalisation d'un système intégré complet, comprenant une matrice micro-bolométrique ou micro-thermopile et la chaîne de traitement du signal, avec les algorithmes implantés.

La thèse de C. ESCRIBA [T4] permet d'initier ce travail de recherche avec l'objectif de montrer la faisabilité de réaliser un détecteur de présence faible coût adapté à des applications spécifiques de domotique (détection booléenne, reconnaissance de formes, imagerie thermique).

Ce travail s'articule parallèlement autour de trois axes :

- la réalisation technologique du capteur infrarouge [MN7],
- la modélisation (analytique et par éléments finis) globale du détecteur et de son environnement (figure 6) en tenant compte des paramètres technologiques, des dimensions géométriques et des conditions externes de fonctionnement,
- la conception d'une architecture électronique de traitement analogique-numérique générique.

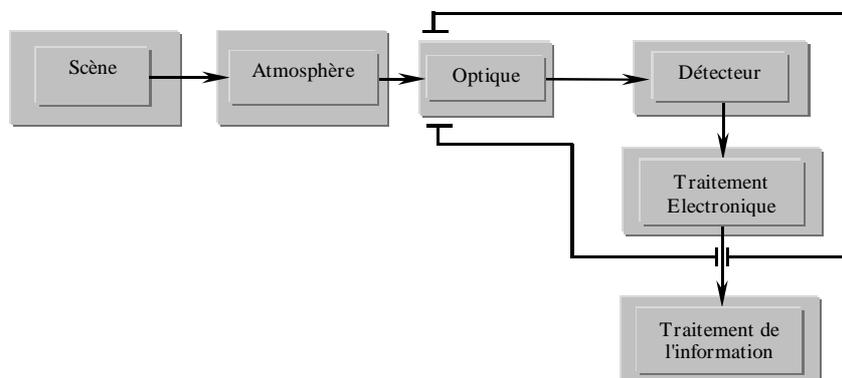


Figure 6. Synoptique d'un système de détection infrarouge.

Le fonctionnement des thermopiles repose sur l'effet thermoélectrique. Il s'appuie sur la résultante d'une élévation thermique du détecteur sous l'action de photons incidents (rayonnements

infrarouges). Les photons absorbés par le matériau thermoélectrique modifient les propriétés physiques de celui-ci. La figure 7 montre le principe général qui s'appuie sur deux matériaux de natures différentes, le PolySi (Polysilicium) et le Al (Aluminium) par exemple, dont les extrémités M et N sont soudés et forment un circuit fermé. La soudure froide est soumise à la température ambiante alors que la soudure chaude est soumise aux variations du flux incident [MN7].

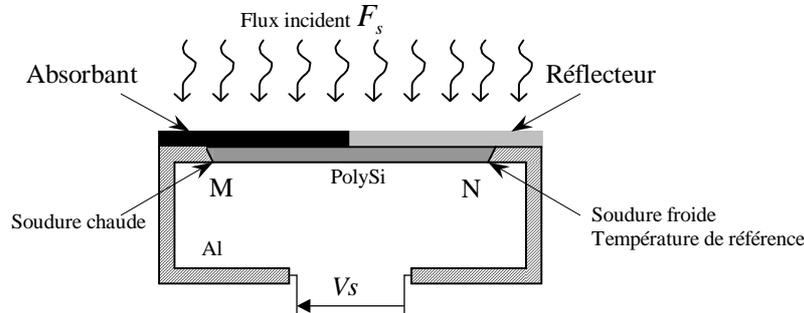


Figure 7. Principe de fonctionnement d'une thermopile.

Sous l'effet de l'échauffement différentiel ΔT des deux thermojonctions (M et N), on observe l'apparition d'une différence de potentiel, appelée tension Seebeck.

$$V_s = N \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

Où, α est le coefficient *Seebeck* de l'association des deux matériaux, ΔT l'écart de température entre les deux soudures et N , le nombre de thermocouples.

La sensibilité est de la forme :

$$\mathfrak{R}_s = \frac{N \cdot \alpha \cdot a}{G_{th} \sqrt{1 + 4 \cdot \pi^2 \cdot f \cdot \tau_{th}}} \quad (1.2)$$

La sensibilité du capteur sera d'autant plus grande que le coefficient α est grand et que les échanges thermiques avec la thermojonction soumis au flux radiatif (effet de la conductance thermique G_{th}) sont réduits, ce qui explique que ces détecteurs sont souvent mis sous vide et que les fils de connexion soient aussi fin que possible et compatibles avec une tenue mécanique suffisante.

La figure 8 présente la structure des thermopiles réalisées qui repose sur une membrane micro-usinée dont le rôle consiste à garantir un gradient thermique entre les extrémités des zones chaudes soumises aux rayonnements infrarouges émis par un corps humain et les zones froides maintenues à la température ambiante (T° du substrat).

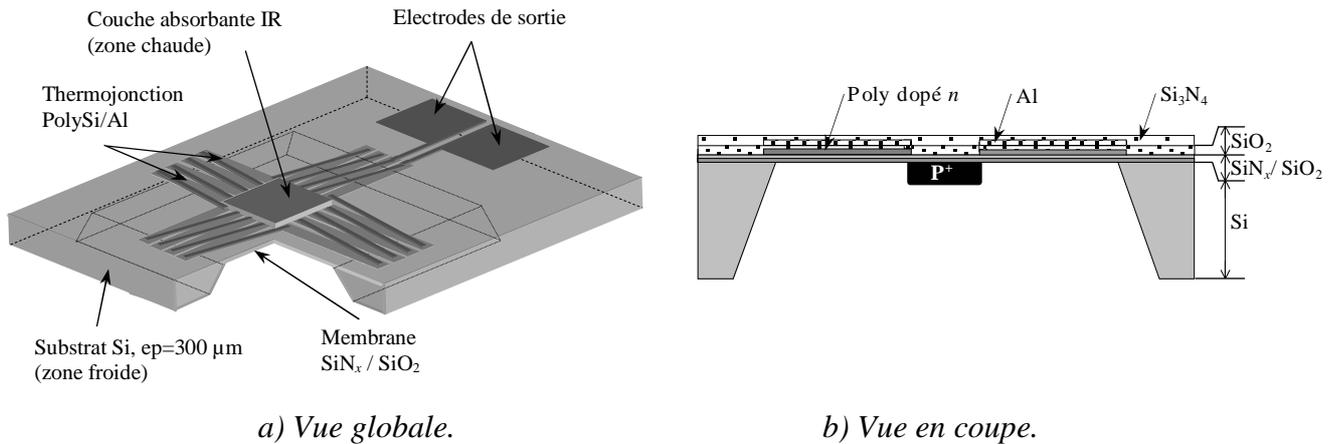


Figure 8. Structure de la thermopile.

Cette partie du travail s'est déroulée en collaboration avec notre collègue J.Y. FOURNIOLS du groupe MIS du LAAS et à partir des contacts qu'il a initié avec une équipe de recherche du laboratoire CNM de Barcelone dans le cadre d'un projet IMPACT⁷ [4-5].

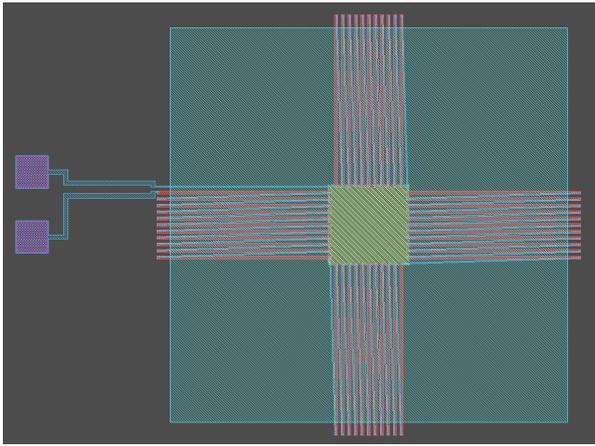
Actuellement, un jeu de 8 niveaux de masques a été conçu. Il comporte 186 éléments (figure 9) dont des véhicules tests et diverses topologies de capteurs (éléments unitaires, matrices 3x3 pixels, 8x8 pixels). Ces capteurs possèdent différentes géométries essentiellement au niveau des longueurs des thermocouples, des surfaces des membranes et des structures d'isolation des jonctions. L'élaboration d'un banc de test optique permettra d'effectuer des caractérisations électriques et fonctionnelles qui devront conduire à la détermination des grandeurs caractéristiques des capteurs telles que :

- la sensibilité électrique,
- la détectivité spécifique,
- l'éclairement équivalent au bruit,
- la sensibilité thermique
- l'écart de température équivalente au bruit.

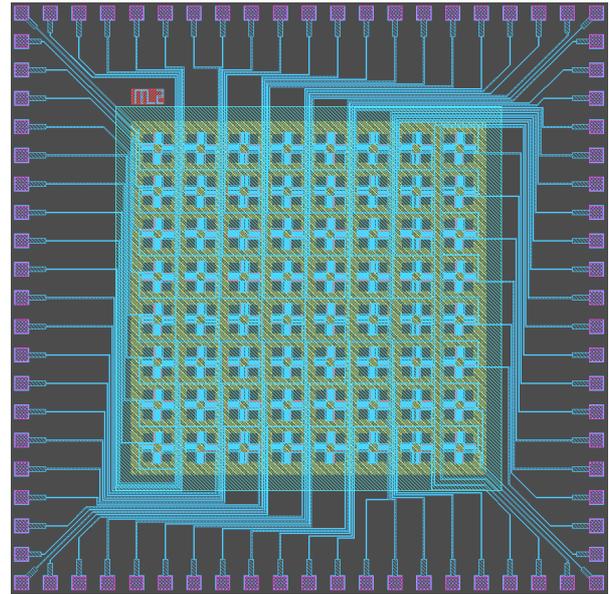
L'influence des paramètres géométriques et technologiques des différents dispositifs envisagés sera évaluée et comparée aux résultats de simulation d'un modèle de thermopile développé sous le logiciel MathCad. Ce modèle élaboré par résolution d'équations aux dérivées partielles devra permettre de dimensionner les caractéristiques géométriques (longueur, largeur, contacts ohmiques des thermojonctions...) des différentes structures établies.

L'idée est de proposer un modèle global de conception à partir duquel on pourra prédire et optimiser les performances d'un capteur thermopile en fonction des paramètres géométriques, des phénomènes thermoélectriques des matériaux mis en jeu et des spécifications fonctionnelles [3].

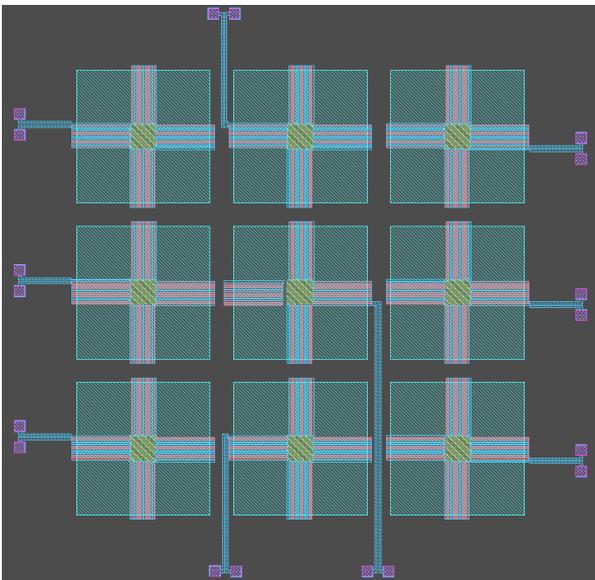
⁷ IMPACT : Structure d'accueil européenne pour l'accès aux technologies microsystemes



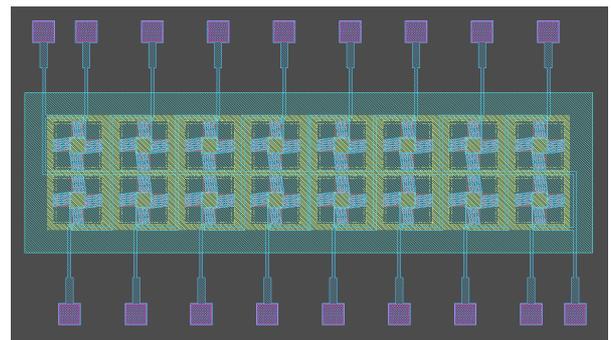
Structure unitaire



Structure matricielle (8x8)



Structure matricielle (3x3)



Structure matricielle (2x8)

Figure 9. *Différentes structures thermopiles réalisées.*

La figure 10 présente un capteur thermopile (1 pixel) sur son embase.

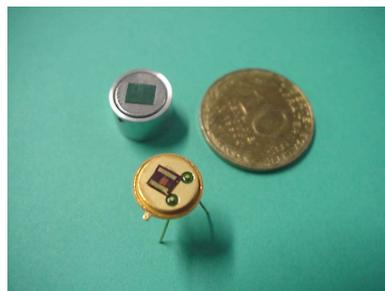


Figure 10. *Thermopile mono-élément.*

Une chaîne de traitement a été définie (contrat avec EDF R&D- Annexe 2) et une première maquette a été développée utilisant un capteur thermopile "sur étagère" [R26,30]. L'originalité du procédé a fait l'objet d'un dépôt de brevet LAAS-EDF [B4]. Le principe consiste à réaliser une double détection à la fois statique et dynamique. De plus, un système de calibration ajuste automatiquement la réponse du capteur en fonction des changements des conditions environnementales (T° , luminosité, ...) [R32]. Le fonctionnement a été validé.

Les résultats obtenus lors de l'évaluation des deux fonctions principales :

- évaluation de la détection statique en fonction de la distance (figure 11),
- évaluation du temps de réponse lors d'un passage transversal d'une personne vis-à-vis du champ de vision du capteur (détection dynamique) (figure 12),
- évaluation de l'auto-calibration.

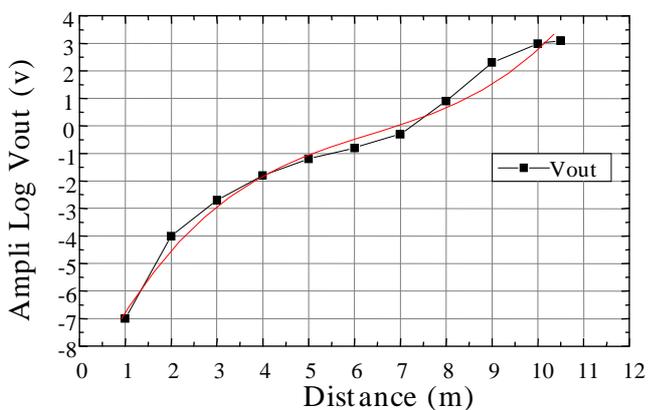


Figure 11. Evaluation de la tension de sortie en fonction de la distance (détection statique).

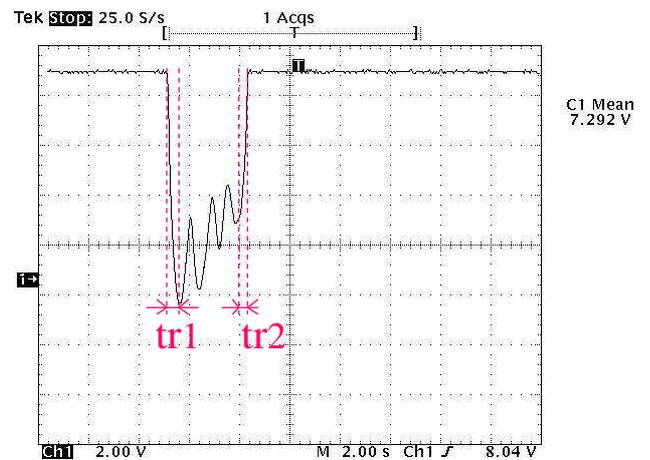


Figure 12. Temps de réponse du module (détection dynamique).

L'évolution de la courbe, de type logarithmique permet d'évaluer la distance en fonction de la réponse V_{out} . Le circuit se comporte comme un compresseur de signal, à savoir une évolution en amplitude beaucoup plus significative pour des distances lointaines et au contraire un rôle d'atténuation du signal aux proches distances du capteur.

IV. CONCLUSION

Les travaux de réalisations technologiques de composants que nous venons de présenter ont contribué à la dynamique d'intégration des microsystèmes sous des aspects différents :

- La réalisation de transistors à film mince de polysilicium dédiés à des applications bas coûts nous a permis d'acquérir une démarche rigoureuse de conception et d'intégration. La nécessité de mettre en place un processus technologique à faible bilan thermique nous a amené à étudier et à mettre en œuvre la technique originale RTP (Procédé Thermique Rapide). Les propriétés électriques et structurales des films de polysilicium sous des filières gazeuses de Silane et Disilane ont alors été étudiées avec des étapes d'oxydation rapide (RTO) et de recuit rapide (RTA). Cette technique a permis d'obtenir des polyoxydes minces de bonne qualité et d'activer rapidement les grains de polysilicium. Ces résultats ont été confrontés de façon systématique aux techniques conventionnelles (procédés thermiques basses températures). Notre conclusion est que les qualités structurales des films peuvent être améliorées par les techniques RTP grâce à la "guérison" des défauts cristallins entraînant ainsi de meilleures performances électriques. **L'optimisation de ces films a permis l'élaboration, à faible bilan thermique, de transistors MOS avec de bonnes caractéristiques électriques (mobilité, courants, champs de claquage).** Nous avons enfin montré qu'il était possible d'optimiser les valeurs de mobilité dans les transistors grâce à une mesure préalable du coefficient d'absorption des couches minces déposées.

- Cette première expérience a été mise à profit plus tard dans la réalisation d'un détecteur de présence où la contrainte d'un procédé bas coût est également prédominante. L'étude complète du détecteur comprend la conception et la réalisation de l'élément sensible ainsi que les étages de conditionnement du signal. L'élément sensible est basé sur un capteur thermopile dont le procédé technologique repose sur la réalisation d'une membrane micro-usinée qui absorbe les rayonnements infrarouges émis. Plusieurs structures de géométries et de dimensions différentes ont été conçues et ont donné lieu à l'élaboration d'un ensemble de masques. La réalisation technologique associe le LAAS et des partenaires espagnols dans le cadre du projet européen IMPACT. Les caractérisations devront permettre de mettre en évidence l'influence de la forme géométrique des structures étudiées (élément unitaire et en matrice) afin d'augmenter les performances électriques des capteurs. L'étude du circuit de conditionnement a d'ores et déjà été validée grâce à l'utilisation d'un capteur thermopile du commerce. **Nous avons montré la faisabilité de réaliser en analogique un ensemble nouveau de détection bi-fonctionnelle de présence (statique et dynamique) avec un calibrage automatique du capteur en fonction des modifications de l'environnement.** Enfin, une étude de modélisation complète de la chaîne de détection (environnement d'utilisation, géométrie des capteurs, paramètres technologiques) est en cours de développement de manière à simuler au plus près les réponses électriques des capteurs et à optimiser leurs performances.

CHAPITRE 3

SYSTEMES DE COMMUNICATION SANS FIL

I. INTRODUCTION

Ce chapitre présente notre contribution aux systèmes de communication notamment à l'intégration de microsystèmes communicants sans fil.

Un des traits essentiels des microsystèmes étudiés est la complexité et la forte hétérogénéité des composants qui les constituent et des techniques nombreuses à mettre en oeuvre (numérique, analogique et radiofréquence). La conception et l'intégration des systèmes et microsystèmes doit donc impérativement passer par une approche générique globale de prototypage puis de validation virtuelle. Ce choix s'illustre par des travaux de modélisation des dispositifs et de simulation fonctionnelle. L'approche retenue pour conduire ces travaux est celle d'une conception descendante depuis les spécifications jusqu'à la réalisation de circuits spécifiques. L'objectif est montrer que l'on peut s'affranchir de l'étape "maquette" en prenant en compte en amont de la conception toutes les informations utiles sur les fonctionnalités mais aussi sur les facteurs d'utilisation et les facteurs d'influence (spécifications environnementales et fonctionnelles).

C'est sous cet angle que s'inscrivent nos travaux menés dans cette thématique.

Notre champ d'application privilégié sera celui de l'habitat. Les exigences requises par ce domaine seront spécifiées de manière à définir précisément le cahier des charges du microsystème permettant la mesure et la communication sans fil. Une contrainte majeure relative à l'adaptativité du débit de transmission en fonction de la taille des données à transmettre sera traitée. On peut citer également la sécurisation des données liée aux fortes probabilités de collisions dans un espace de fonctionnement réduit.

Un modèle fonctionnel des différents étages constituant la chaîne électronique de transmission et de réception sera élaboré par des outils logiciels comportementaux. Nous optimiserons les différents éléments de la chaîne par des simulations en environnement idéal et bruité et ce pour différentes topologies.

L'intégration de tout ou partie des fonctions de la chaîne prendra en compte les critères de coût, de consommation et de rapidité de traitement des données. Enfin, nous présenterons les plates-formes de caractérisation pour évaluer les performances attendues des dispositifs.

Suivant ces considérations, ce chapitre abordera deux aspects de nos contributions :

- l'intégration complète d'un système de communication sans fil ouvert,
- l'intégration d'une solution sans fil basée sur la technologie Bluetooth.

II. CONTEXTE DE TRAVAIL

C'est avec la volonté commune de fédérer des disciplines complémentaires (électronique et réseaux) que j'ai participé avec mon collègue T. VAL à la création de l'équipe de recherche ICARE. La mise en place de cette activité de recherche s'est effectuée sous l'impulsion du professeur J.J. MERCIER. Officiellement mise en place en 1996 sur les bases de l'équipe ERIC (Equipe de Recherche en Informatique et Communication) initialement constituée dans les locaux de l'université de Toulouse II, l'équipe ICARE (Ingénierie des Communications pour l'informAtique, les Réseaux et l'Electronique sans fil) est composée de 7 enseignants-chercheurs, et de 6 doctorants. Elle accueille régulièrement plusieurs étudiants en stage de DEA, de DESS, d'ingénieurs. Elle est rattachée à 2 écoles doctorales :

- l'école GEET (Génie Electronique, Electrotechnique et Télécommunications),
- et l'école Systèmes Informatiques de Toulouse.

Grâce entre autres aux travaux de recherche menés en collaboration avec le groupe MIS du LAAS et à l'effort de publications et de coopérations industrielles, l'équipe ICARE a été reconnue Equipe de Recherche Technologique en 1997 et suite à des recadrages ministériels **Equipe d'Accueil EA 3050 en 1998 et renouvelée en 2003 [R7]**.

Bien que de disciplines distinctes, les enseignants-chercheurs de l'équipe ICARE ont pu être unis au sein d'un même thème de recherche fédérateur. Un projet global a été défini, où chacun participe, en fonction de sa spécialité.

Ce thème central concerne l'ingénierie des systèmes de communication. Il apparaît trois disciplines principales mises à profit pour converger vers le développement d'un Système Intégré Multifonctions Communicant. Ces disciplines sont traitées selon trois axes complémentaires [R31] :

- un axe électronique : conception, modélisation et intégration de capteurs, d'émetteurs-récepteurs hautes fréquences et de systèmes multicapteurs.
- un axe réseau : ingénierie des réseaux sans fil et de leurs protocoles : spécification, modélisation, simulation, validation, localisation des mobiles en environnement cloisonné.
- un axe informatique : système d'exploitation temps réel, base de données, modélisation, simulation.

Le domaine d'application de ces travaux concerne les environnements clos ou proches. Il s'agit principalement de proposer des solutions de communication filaire et sans fil à courtes portées pour des systèmes communicants entre eux ou vers une centrale de base.

Mes travaux au sein de l'équipe ICARE ont exploré deux voies :

- l'une liée à la conception et la modélisation globale d'un système radiofréquence (émetteur-récepteur) dédiée à des applications de domotique,
- l'autre contribuant à l'ingénierie des réseaux WPAN⁸ et basée sur l'intégration et la réalisation de plates-formes matérielle-logicielle.

⁸ WPAN : Wireless Personal Area Network

III. LES RESEAUX DE COMMUNICATION

Comme nous l'avons déjà évoqué dans le chapitre 1, le réseau de communication entre les capteurs, les organes de traitement et les actionneurs potentiels jouent un rôle primordial dans tout système distribué. On peut dire que le réseau de communication représente l'épine dorsale du système. Ces caractéristiques techniques vont influencer directement sur le temps de réaction du système, sur la quantité et le débit d'informations à traiter mais également sur la souplesse d'installation, de maintenance et d'utilisation du système global.

Il existe différentes topologies et formes géométriques d'architectures de réseaux. Nous citons les principales pour les avoir étudiées :

- la topologie classique de type BUS, par exemple basée sur une liaison série RS485 comme dans une de nos applications. Elle est habituellement utilisée dans les réseaux informatiques industriels LAN⁹ et WAN¹⁰ [6],

- les réseaux plus orientés domotiques tels que Batibus, EIBus¹¹ ou EHS¹². Ces bus domotiques ont l'inconvénient de faire appel à des équipements associés (capteurs, actionneurs) qui doivent être compatibles à ces standards. Il s'agit de liaisons filaires (excepté pour le bus EHS qui accepte des fonctions multi-médiums) avec des débits limités (respectivement 4800, 9600 et 64 kbit/s au maximum) ce qui peut être une contrainte dans des applications domotiques multicapteurs temps réel [RI3],

- les courants porteurs (CPL) utilisant le réseau électrique 220 V. Ils offrent l'avantage de n'entraîner aucun câblage supplémentaire mais les débits sont assez limités,

- les médiums sans fil : infrarouge, ultrason, micro-ondes... Ils sont utilisés pour des communications de courtes portées [7]. Certains montrent cependant des limites évidentes dans leur fonctionnement (très courte portée, visée directe, sensibilité aux perturbations...).

Il est clair que la tendance actuelle se tourne vers des équipements aux infrastructures mobiles, flexibles, faciles d'installation et présentant une grande souplesse de reconfiguration. De toutes les techniques présentes dans le domaine, la radiofréquence semble fournir le meilleur compromis. Certaines gammes de fréquence sont libres d'utilisation (bandes 433 MHz, 866 MHz, 2,4 GHz, 5,2 GHz, 60 GHz). Elles offrent des débits amplement suffisants pour une application de surveillance multicapteurs ou plus largement de robotique (~ 1 Mbit/s en radio dans la bande des 2,4 GHz par exemple). La méthode d'accès au canal (CSMA¹³/CD, CSMA/CA, TDMA¹⁴, FDMA¹⁵, jeton...) joue alors un rôle important par rapport au temps de réaction du système.

Les recherches scientifiques très actives dans ce domaine concernent essentiellement les composants hautes fréquences, les architectures de réseaux et les outils de simulation.

Nos travaux se positionnent, eux, sur une approche globale de conception de systèmes intégrés communicants avec des objectifs d'applications à courtes portées.

⁹ LAN : Local Area Network

¹⁰ WAN : Wide Area Network

¹¹ EIB : European Installation Bus

¹² EHS : European Home System

¹³ CSMA : Carrier Sense Multiple Access

¹⁴ TDMA : Time Division Multiple Access

¹⁵ FDMA: Frequency Division Multiple Access

IV. CONCEPTION ET INTEGRATION D'UN SYSTEME RADIOFREQUENCE

L'objectif de la thèse de S. BOURDEL [T1] était de proposer un modèle fonctionnel de système électronique de communication radiofréquence. Pour que ce système soit adapté à des applications en environnement clos, il doit être bidirectionnel et adaptatif en terme de débit de transmission [MI14]

Ces travaux de conception et de modélisation se sont appuyés sur le logiciel de simulation comportementale SABER et sur son langage associé MAST. Cet outil nous a permis de concevoir chaque élément comme une entité pouvant être décrite par des équations linéaires et/ou non linéaires. De plus, intégré à un environnement de type CADENCE, cette description haut-niveau permet d'assurer un meilleur *feedback* entre les principales étapes de conception grâce notamment à la co-simulation, définissant la plate-forme de conception évoquée dans la figure 3 [R14].

Une étude bibliographique poussée a permis de définir clairement le cahier des charges et le choix de la méthode de transmission à adopter, en l'occurrence pour un environnement domotique : la technique de l'étalement de spectre par séquence directe DS-SS¹⁶.

IV.1 DESCRIPTION DU PRINCIPE

Intégrée dans la plupart des normes existantes (UMTS¹⁷, 802.11, ...) [8], la technique de l'étalement de spectre est utilisée dans la majorité des modems radio pour les réseaux intra-nets [9] et le sera dans la téléphonie portable de troisième génération [10].

Le principe de l'étalement de spectre repose sur le codage de l'information à transmettre avec une séquence pseudo-aléatoire (PN-Code), de longueur N, connue seulement des utilisateurs (figure 13). La conséquence directe de ce codage, quelle que soit la technique utilisée, est l'étalement de la densité spectrale de puissance sur une plus grande largeur de bande [11]. Ainsi, le signal transmis se comporte comme du bruit vis-à-vis des autres utilisateurs qui travaillent en bande étroite ou de ceux qui ne possèdent pas le code. Cette propriété confère à l'étalement de spectre différents avantages qui semblent répondre aux nouvelles exigences au niveau :

- des performances (débits, immunité aux interférences),
- de la flexibilité (sécurisation, nombre d'utilisateurs potentiels),
- et du coût (simplicité de réalisation, intégration numérique VLSI),

que requièrent des communications en milieu *indoor*.

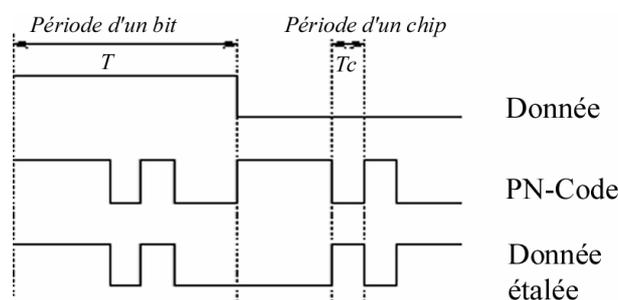


Figure 13. Etalement de la donnée par un PN-Code en DS-SS.

¹⁶ DS-SS : Direct Sequence Spread Spectrum

¹⁷ UMTS : Universal Mobile Telecommunications System

IV.2 MODELE FONCTIONNEL PROPOSE

Une synthèse bibliographique et théorique a permis de fixer précisément le cahier des charges d'un système de communication radiofréquence domotique tout en respectant les standards de communication actuels tels que la norme IEEE 802.11 [MN2], [R12].

Ainsi, les caractéristiques suivantes (les avantages sont précisés entre parenthèses) ont été définies :

Fréquence porteuse :	2,44 GHz	(norme ETS 300-380)
Bande passante :	80 MHz	(norme ETS 300-380)
Modulation :	DBPSK/DQPSK	(performance et réalisation)
Méthode d'accès :	CDMA ¹⁸	(flexibilité)
Technique d'étalement :	DS-SS	(performance et réalisation)
S/N en entrée du démodulateur :	11 dB	(taux d'erreur et modulation)
S/N en sortie de l'étage RF :	3 dB	(11dB-G _{pmin} *)
Particularité :	Générateur de PN-Code programmable	
	Filtrage de Nyquist Non-optimal ($f_{\text{coupure}}=1/T_{\text{chip}}$)	

$$* G_{p_{\min}} = 10 \log_{10}(T_{\text{min}}/T_c) = 10 \log_{10}(BP/D_{\text{max}}) = 10 \log_{10}(80 \cdot 10^6 / 10 \cdot 10^6) = 8 \text{ dB}$$

Trois blocs fonctionnels ont été étudiés et modélisés (figure 14) :

- la partie RF qui comprend tout l'étage de tête et dont la fonction est de passer de la fréquence porteuse (2,4 GHz) à une fréquence plus faible utilisable (numérisable ou traitable par des composants classiques, de l'ordre de quelque MHz),
- la partie de traitement classique qui comprend le modulateur/démodulateur (en BQPSK et DQPSK), la détection et la remise en forme, et les organes qui les constituent : encodeur différentiel, filtre de Nyquist, démodulateur I/Q, estimateur...
- la partie étalement qui comprend le corrélateur et le décorrélateur d'étalement ainsi que l'organe de synchronisation et de poursuite (DLL¹⁹).

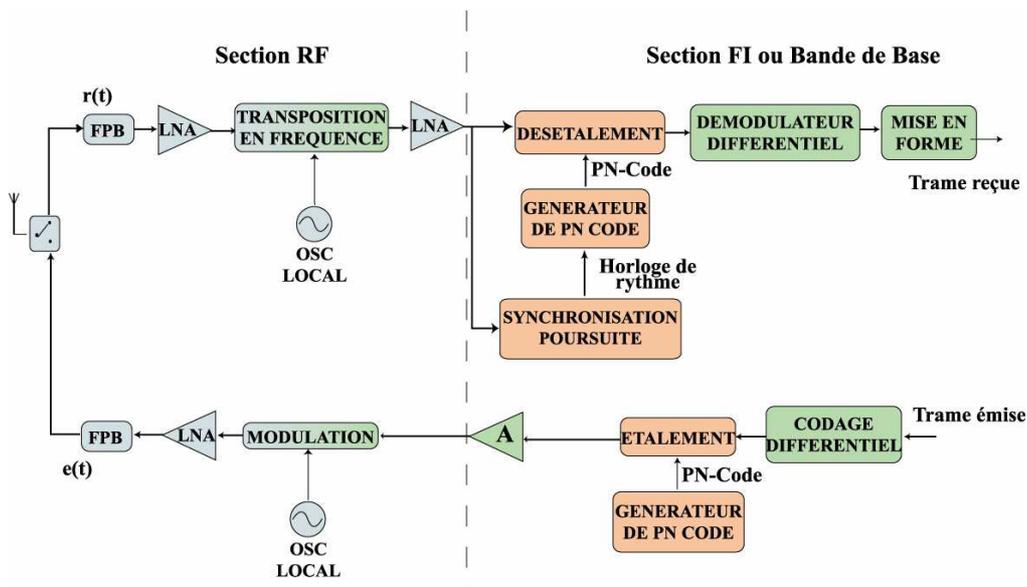


Figure 14. Synoptique du système d'émission/réception modélisé, utilisant la technique de l'étalement de spectre.

¹⁸ CDMA : Code Division Multiple Access

¹⁹ DLL : Delay Lock Loop

Cette approche comporte un intérêt scientifique majeur puisque d'une part, très peu de modèles télécoms existent pour les logiciels comportementaux de type SPICE et que, d'autre part, la majorité des outils développés pour l'étude de systèmes télécoms (COMSIS, SIMULINK...) ne permettent pas de descendre les niveaux de conception.

Les fonctions de traitement regroupant les modules de modulation/démodulation DBPSK et DQPSK, et les modules dédiés à l'étalement de spectre (corrélateurs, organes de synchronisation spécifiques : DLL et synchroniseur type Série et RASE) ont tous été modélisés.

Dans un premier temps, nous avons pu dimensionner chaque fonction de manière indépendante puis étudier leurs performances en environnement bruité (AWGN²⁰) ou en environnement multi-utilisateurs.

Dans un second temps, nous avons analysé l'interaction de certaines fonctions entre elles. En outre, quand cela était possible, les organes ont été conçus afin de pouvoir fonctionner à la fois en fréquence intermédiaire et en bande de base. De cette façon, nous avons pu comparer le système en termes de fonctionnement et de performance pour l'une et l'autre des topologies et ce, dans sa globalité.

Une partie importante du travail, outre l'implantation des fonctions numériques et analogiques propres aux techniques de modulation retenues, s'est située au niveau de la boucle à verrouillage de délai du récepteur (DLL). Elle est relativement complexe d'un point de vue fonctionnel puisque c'est un système asservi dont le signal de commande est issu d'un corrélateur [MN3], [MI15]. Sa fonction principale est la synchronisation de la séquence pseudo-aléatoire reçue (utilisée pour le DS-SS) avec celle générée localement. Afin de réaliser la comparaison fréquence intermédiaire/bande de base, nous avons développé un modèle théorique de la variance de l'erreur de poursuite (en milieu AWGN) pour la bande de base [R20,21]. Le modèle SABER nous a permis d'aller plus loin au niveau de l'analyse du fonctionnement puisque nous avons pu évaluer l'influence des filtres du corrélateur sur la variance de l'erreur de poursuite (ce que le modèle théorique ne permet pas).

Une analyse de performances en milieu AWGN a de plus mis en évidence la difficulté d'établir un modèle performant pour la démodulation différentielle en fréquence intermédiaire. En outre, lors de la démodulation en bande de base, nous avons montré la nécessité du filtrage "adapté" grâce à l'utilisation d'un intégrateur-bloqueur. Nous avons ainsi pu évaluer la perte de performances lorsque ce dernier n'est pas utilisé.

Ces analyses montrent que l'architecture en bande de base semble plus performante d'un point de vue fonctionnel [MI17].

Des mesures de simulation sur les modulations ont mis en avant les problèmes qu'engendre la mesure du taux d'erreur sur le bit (TEB) dans les simulateurs temporels de type SABER. Nous avons ainsi développé des outils d'aide à l'analyse tel que le module spécifique de mesure du TEB. De plus, grâce à une méthode originale, nous avons évalué de manière quantitative l'influence des différentes topologies sur les performances du système sans passer par la mesure du TEB, trop contraignante en temps de simulation. La méthode proposée consiste à mesurer (à niveau de corrélation constant) le bruit en sortie du corrélateur introduit par les multi-trajets. Ce bruit est obtenu en comparant la corrélation de la topologie multi-utilisateurs à une référence qui est la corrélation dans une topologie simple utilisateur.

Pour nous aider dans ces analyses, un outil logiciel utilisant les données des simulations temporelles de SABER a été développé sous le logiciel MATLAB. Il permet de tracer des "diagrammes de l'œil" et d'optimiser ainsi l'ordre des filtres qui réalisent l'intégration dans la fonction de corrélation (fréquence de coupure et bruit de corrélation).

²⁰ AWGN : Bruit Blanc Additif Gaussien

Enfin, une simulation globale du dispositif basée sur des mesures réelles (atténuation et retards des multi-trajets) [12] a mis en évidence les performances du système en environnement *indoor* (multi-utilisateurs, multi-trajets). Toutes les fonctions du dispositif (filtre, modulateur, démodulateur, corrélateur, boucle à verrouillage...) ont été validées et les différents paramètres optimisés.

La figure 15 présente la topologie du système implémentée sous SABER où l'on considère deux utilisateurs distincts (trames et longueurs de PN-Code différents). Seuls les trois premiers trajets, généralement les plus puissants et donc les plus perturbateurs pour le système, ont été considérés.

Les résultats de simulation (figure 16) montre la faisabilité de la chaîne proposée.

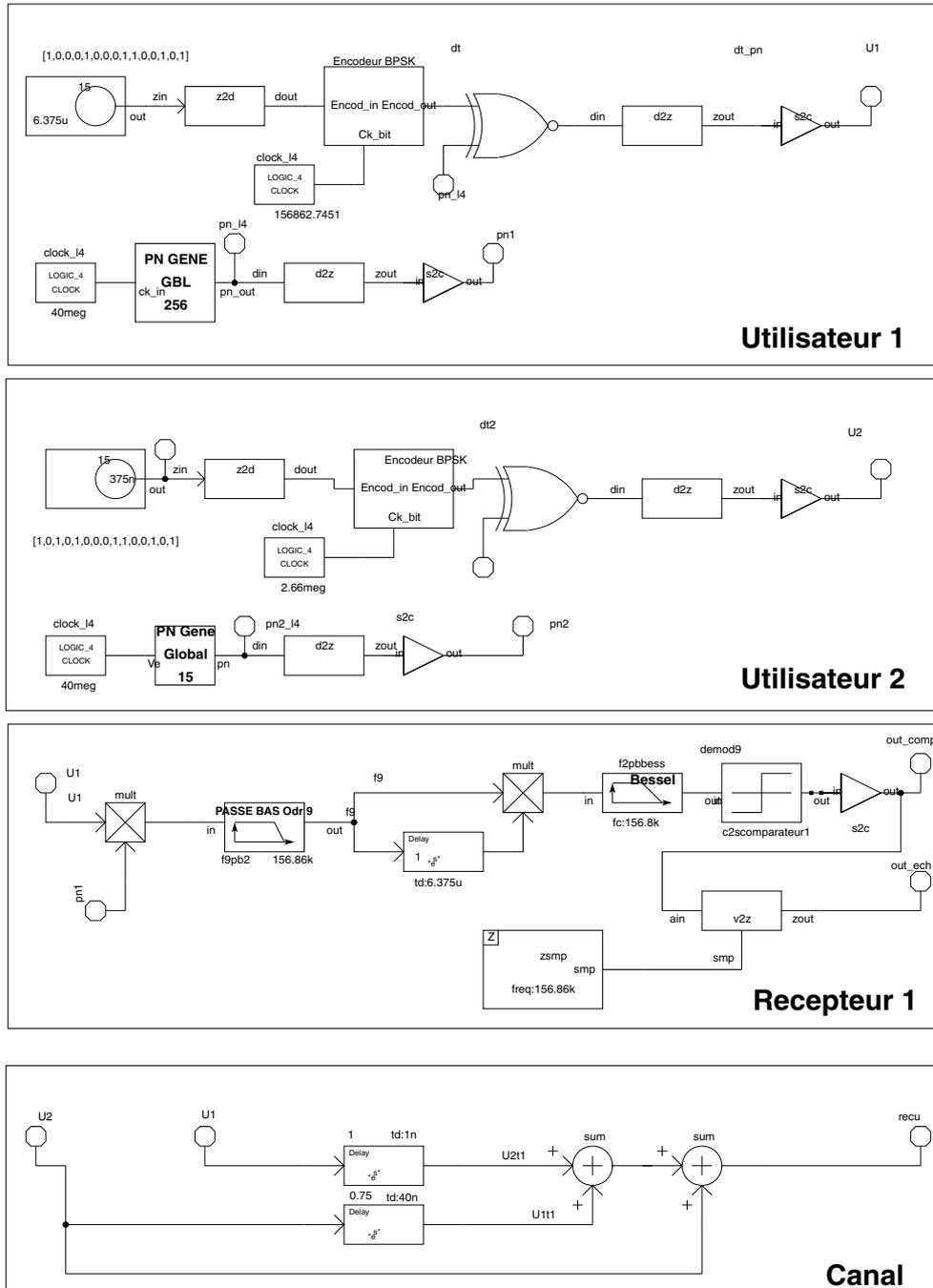


Figure 15. Topologie multi-utilisateurs modélisée sous SABER.

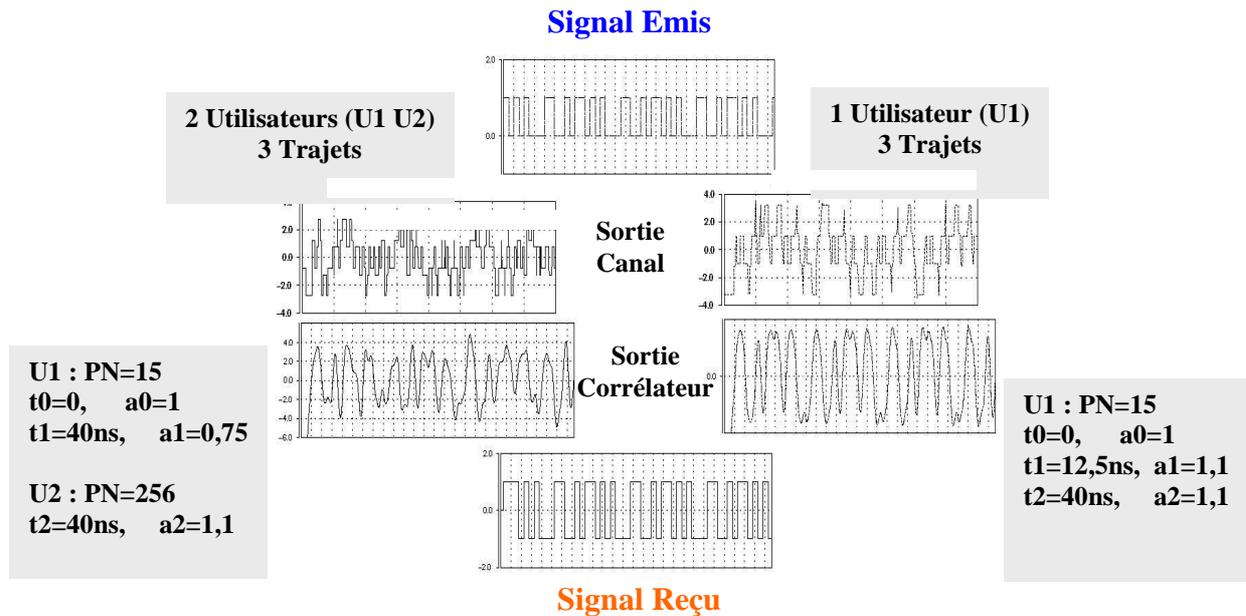


Figure 16. Simulation globale en environnement indoor.

IV.3 INTEGRATION VHDL

Notre contribution à la mise en place d'une librairie de composants et de modules "télécoms" sous SABER a facilité l'étude et l'intégration des étages numériques du dispositif d'émission et de réception pour une implantation sur un ASIC²¹.

A partir des spécifications établies dans le travail précédent, un circuit ASIC regroupant les fonctions réalisant le traitement en bande de base (modulation, démodulation, corrélation, décorrélacion et génération des PN-codes à longueur variable) a été réalisé. Ce travail a fait l'objet de la thèse de P. MELET [T2] suivant une démarche de conception "top-down" [MI19,22].

Nous avons associé pour cela différents outils de simulation VHDL/MAST/SCHEMATIC (cf. figure 3) [RI5], [MN4], [R13] :

- Trois paramètres numériques fondamentaux du récepteur radiofréquence : le coefficient d'arrondi du filtre de Nyquist, la fréquence d'échantillonnage, et le nombre de bits du convertisseur analogique-numérique, ont été définis et optimisés sous les logiciels SABER et MATLAB. Cette étude préalable a permis d'obtenir un compromis entre la consommation électrique, le taux d'erreur binaire et la rapidité de traitement des données.

- Les fonctions numériques ont ensuite été transposées sous l'environnement CADENCE grâce à leur codage en langage VHDL²² portable. La synthèse a été effectuée sous SYNOPSIS et prend en compte la technologie choisie. Une étude originale de sensibilité aux technologies a montré que la technologie CMOS 0,6 μm de AMS (Austria Mikro Systems) offre un meilleur compromis en termes de coût-consommation-surface active [RI10].

²¹ ASIC : Application Specific Integrated Circuit

²² VHDL : Very High Description Language

La figure 17 présente le LAYOUT complet du circuit ASIC multidébits (19 kbits à 5,7 Mbits) intégré.

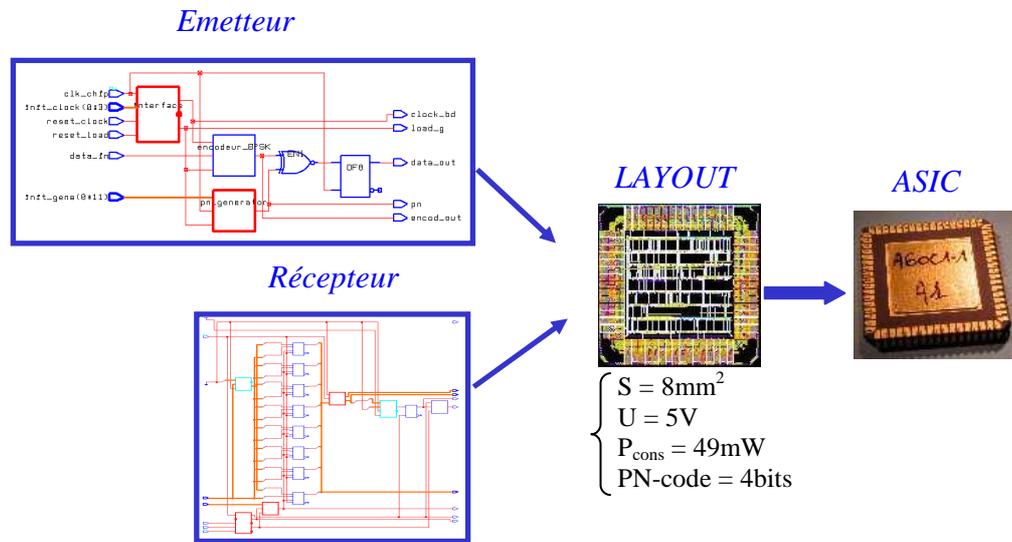


Figure 17. Circuit ASIC réalisé.

Pour évaluer et valider les performances finales du circuit, une carte spécifique supportant et conditionnant le circuit ASIC a été développée. Cette carte a été associée à un module de test basé sur un circuit programmable de type FPGA²³. Le tout était connecté à un ordinateur selon le schéma de la figure 18 [RI9].

Les performances du circuit en termes de consommation, de fréquence maximale de fonctionnement et de taux d'erreurs sur le bit ont pu être comparées de manière satisfaisante aux résultats des simulations préalables.

Le filtre de Nyquist, non intégré dans le circuit ASIC, a donné lieu à une étude spécifique sous CADENCE. Cette étude a mis en évidence deux limitations physiques de fonctionnement en numérique de ce filtre sous une technologie CMOS 0,6 μm :

- la grande surface de silicium nécessaire,
- et l'incapacité de travailler à une fréquence d'échantillonnage de 160 MHz.

Ce filtre a donc être intégré en analogique hors de la puce (*off-chip*) (cf. IV.4).

Un travail de thèse (encadré par L. ANDRIEUX) débute actuellement dans l'équipe et doit compléter les travaux précédents. Il porte sur la synthèse numérique de l'organe de synchronisation et de poursuite.

²³ FPGA : Field Programmable Gate Array

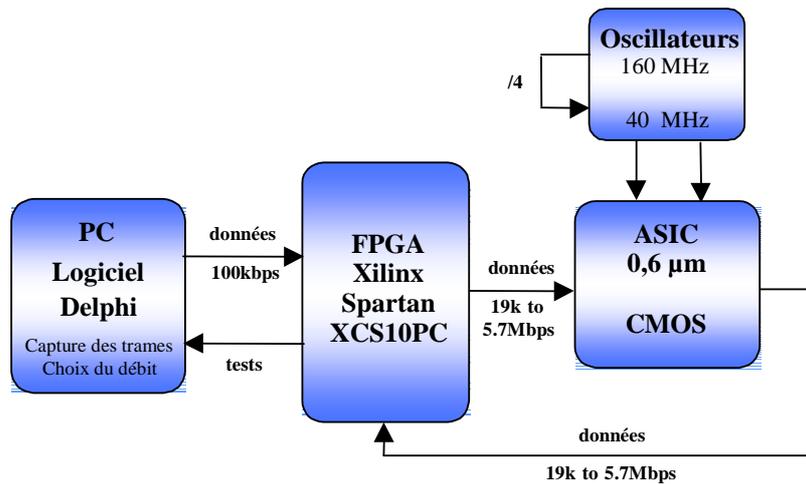


Figure 18. Platine de test fonctionnelle associant FPGA et ASIC.

IV.4 MAQUETTAGE HYBRIDE

L'étude de la partie RF étant relativement simple d'un point de vue fonctionnel (toute la difficulté de cette discipline réside dans la réalisation de ces fonctions à des fréquences très élevées), la modélisation sous SABER nous a permis :

- de valider le schéma de principe complet d'un étage RF hétérodyne (LNA, mélangeurs, filtres, oscillateurs),
- et de définir le cahier des charges complet (sensibilité, gain, facteur de bruit, bilan de liaison...) respectant les exigences de la norme 802.11.

Les résultats de ces travaux sont actuellement exploités en vue de la réalisation d'une maquette hybride à 2,4 GHz basée sur les circuits développés dans l'équipe :

- filtres LC à 250 MHz,
- filtres en lignes couplées à 2,4 GHz [D2],
- ASIC regroupant les principaux étages numériques (exceptée la fonction de synchronisation et de poursuite)

Une interface devra être réalisée pour mettre le signal en sortie de l'étage RF à un niveau de puissance utile pour la conversion analogique/numérique.

IV.5 CONCLUSION

Ces travaux complets de conception et d'intégration ont montré à partir de spécifications prédéfinies (fonction de l'application visée), la nécessité d'une part, d'appréhender les mécanismes mis en jeu dans les transmissions radiofréquences par une approche de prototypage virtuelle, et d'autre part, de valider une architecture complète adaptée et répondant aux exigences demandées.

Ce travail est une contribution à l'intégration des réseaux LAN et domotique. La plate-forme proposée et illustrée par la figure 3 doit permettre notamment l'étude des contraintes de la couche physique sur les protocoles à mettre en œuvre pour assurer un tel service, ce qui constitue un premier pas vers la mise en place d'une plate-forme de co-simulation : matérielle/protocole.

V. INTEGRATION DE SYSTEMES BLUETOOTH

Le développement industriel de nouveaux modules numériques radiofréquences, nous a orienté vers l'étude des possibilités offertes par la technologie Bluetooth pour la communication sans fil de capteurs/actionneurs.

La topologie en réseau très courte distance proposée par cette technologie innovante élargit les applications potentielles au-delà de la domotique vers des domaines tels que la robotique ou l'automobile. Nous poursuivons nos investigations dans cette voie afin de proposer des solutions originales contribuant au développement de systèmes embarqués communicants autonomes.

Un effort et un investissement personnels ont été nécessaires dans le domaine des réseaux pour appréhender l'ensemble des phénomènes mis en jeu dans cette technologie. Ainsi, ce travail est le fruit d'une très étroite collaboration entre des disciplines différentes mais néanmoins complémentaires que sont l'électronique et les réseaux. Cette interdisciplinarité trouve ici son illustration parfaite dans l'étude et la mise en oeuvre d'une plate-forme mixte de développement et de prototypage de réseaux Bluetooth [RI6]. Nous verrons dans la Partie 4 (Annexe 2) que la plupart des travaux liés à des contrats industriels dans le domaine des systèmes radiofréquences font intervenir très étroitement les deux disciplines.

V.1 LA TECHNOLOGIE BLUETOOTH

Ce nouveau standard de communication (initié en 1999 par un groupement mené par la société Ericsson) a été initialement prévu pour interconnecter tout équipement mobile ou fixe domestique : un ordinateur à ses périphériques, un téléphone mobile et son oreillette, la télévision et le four. Il devrait toucher à terme tous les secteurs où des câbles de connexion sont utilisés [13,14]. Les atouts annoncés concernent la robustesse, une faible complexité, une faible consommation (30 mA max et 0,3 mA en veille) et un faible coût (moins de 10 €). Bien que les offres de produits n'en soient qu'à leur début, on peut imaginer la multiplication des services dans l'habitat avec de nouvelles applications dès lors que l'interopérabilité entre fabricants sera réellement effective.

Quand nous avons commencé ces travaux d'intégration, il y a trois ans, peu de composants étaient disponibles. Le premier a été proposé par Ericsson, c'est celui que nous avons choisi d'utiliser dans toutes nos études depuis. Ce composant appelé ROK est constitué d'un mini-émetteur radio nommé PBA (il contient un ASIC BiCmos) et d'une puce de 9 mm² pour la gestion du protocole (il contient un cœur de processeur ARM) (figure 19). Ce circuit peut assurer la communication avec d'autres circuits du même type selon la notion de Maître, Esclaves.

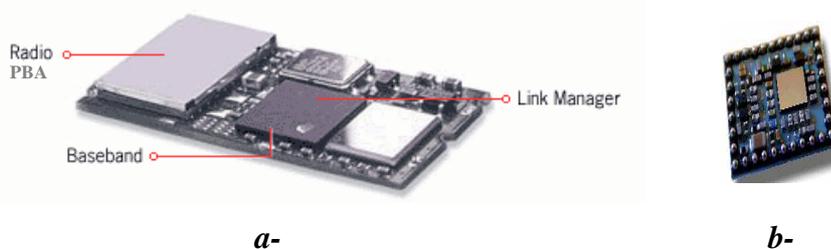


Figure 19. a- le circuit Bluetooth "ROK" sans le blindage.
b- le circuit radio (PBA 31 301).

Les principales caractéristiques sont les suivantes [15] :

- puissance d'émission : 0 dBm soit 1 mW (classe 3) pouvant couvrir une distance maximale de 10 m. Des extensions sont prévues pour permettre des portées plus grandes (10 m et 100 m),
- fréquence : bande libre de droit ISM²⁴ de 2,45 GHz (2,402 à 2,480 GHz) sous la forme de 79 canaux de 1 MHz. Les participants d'un réseau changent de canal 1600 fois par seconde (technique de l'étalement de spectre FH-SS²⁵) garantissant ainsi un échange sécurisé,
- débit : 1 Mbit/s pour le débit brut de base (la version 2 de Bluetooth doit atteindre 10 Mbit/s). Il est ajusté en fonction des besoins des différents appareils du réseau. Selon les débits nécessaires aux différentes utilisations, trois modes de communication sont offertes :
 - *mode Asynchrone Symétrique* (432 kbit/s) **ACL**²⁶ : pour des échanges de données entre ordinateurs,
 - *mode Asynchrone Asymétrique* (721 et 57,6 kbit/s) **ACL** : pour des échanges du type consultation Internet où la demande est faible pour un retour d'information important,
 - *mode Voie/Données* (3 canaux synchrones de 64 kbit/s) **SCO**²⁷ : pour la restitution de sons en temps réel (avec envoi simultané de données éventuellement).

V.2 PRINCIPE DE LA COMMUNICATION RADIOFREQUENCE BLUETOOTH

Bluetooth utilise une modulation GFSK²⁸. Une transmission bidirectionnelle TDD²⁹ est exploitée pour diviser les canaux communs dans les deux directions Maître → Esclave et Esclave → Maître. Trois modes de connexion sont possibles :

- *Mode point à point* : seulement 2 éléments Bluetooth sont connectés (1 Maître-1 Esclave).
- *Mode point - multipoints* : le canal est partagé par 1 dispositif Bluetooth qui a le rôle de Maître et de 2 à 7 dispositifs actifs Bluetooth qui ont le rôle d'Esclaves. Il s'agit d'un petit réseau *ad hoc* appelé picoréseau ou *piconet*. Tous les dispositifs du *piconet* sont synchronisés à la séquence de sauts et d'horloge du Maître. Bluetooth autorise aussi l'établissement automatique de la connexion et la synchronisation de données nœuds à portée.
- *Mode multipoints - multipoints* : ce mode permet l'extension de la portée du réseau grâce à la liaison de plusieurs *piconets* entre eux, équivalent alors à un réseau maillé ou *scatternet*. Dans ce cas, il est nécessaire que certains nœuds jouent le rôle de liens entre 2 *piconets* (rôle de Maître pour un *piconet* et d'Esclave pour un autre *piconet* ou rôle d'Esclaves pour 2 *piconets* différents alternativement).

Le Maître adresse ses Esclaves par scrutation (ou *polling*). Ainsi, les Esclaves doivent avoir été sollicités par le Maître pour accéder au canal. De ce fait, il ne peut y avoir de trafic de données direct entre 2 Esclaves dans un même *piconet*. Les Esclaves peuvent être mis dans un état bloqué (ou dit parqué) sur demande du Maître, autorisant ainsi l'entrée dans le réseau d'un nouvel Esclave. Cependant, pour des raisons pratiques, le nombre d'Esclaves parqués ne doit pas être supérieur à

²⁴ ISM : Industrielle Scientifique Médicale

²⁵ FH-SS : Frequency Hopping Spread Spectrum

²⁶ ACL : Asynchronous Connection Less

²⁷ SCO : Synchronous Connection Oriented

²⁸ GFSK : Gaussian Frequency Shift Keying

²⁹ TDD : Time-Division Duplex

255³⁰. Pour être de nouveau actif dans le canal, l'Esclave parqué doit avoir été réactivé par le Maître.

Le principe d'échange repose sur la transmission et la réception d'un paquet de données pouvant être réparti sur un nombre multiple impair de plages temporelles ou *slots* (1, 3 ou 5) de 625 μ s associée à une fréquence pour un simple *slot* de 1600 sauts/s (figure 20). Cette valeur semble assez élevée comparée aux LAN sans fil qui existent aujourd'hui et qui opèrent dans la même bande ISM (cf. IEEE 802.11 qui utilise 50 sauts/s). Des trames *multislots* permettront de plus hauts débits à cause de la diminution du temps "d'émission-réception" entre les paquets et la réduction du champ des informations dans les trames. Par exemple, des paquets peuvent avoir un débit maximal de 172 kbit/s pour 1 *slot* alors que 5 *slots* (1 trame *multislots*) supporteront un débit de 721 kbit/s dans la direction Maître \rightarrow Esclave et 57,6 kbit/s en sens inverse dans la direction Esclave \rightarrow Maître [16,17].

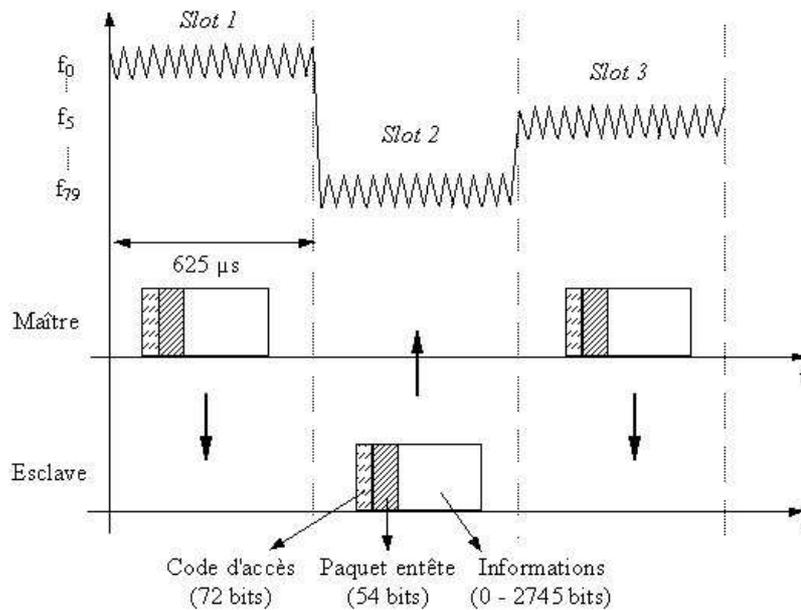


Figure 20. Principe des échanges de paquets Bluetooth en FH-SS/TDD (cas d'un slot).

V.3 ARCHITECTURE PROTOCOLAIRE

La figure 21 décrit la position des différentes couches protocolaires utilisées pour une transmission Bluetooth.

Notre travail porte essentiellement sur la couche physique même si il a été indispensable dans un premier temps de bien maîtriser les mécanismes protocolaires mis en jeu pour l'établissement de la communication Bluetooth.

La plus grande partie de l'intelligence de contrôle nécessaire pour établir et gérer un lien réside dans le module numérique *baseband* (module temps réel) des composants Bluetooth.

En principe, le module Bluetooth peut être vu comme étant constitué de deux entités séparées :

- la couche physique (avec la modulation RF, le codage, la temporisation...),
- et une machine à états appelée aussi gestionnaire de liens (LC), constituée de la *baseband* et de LMP (*Link Manager Protocol*). Les messages LMP sont échangés de façon point à point ou point-multipoints.

³⁰ En théorie, le nombre maximum d'Esclaves parqués simultanément dans un *piconet* est seulement limité par la disponibilité des adresses des dispositifs Bluetooth.

Le dispositif physique implémentant les parties plus basses de la spécification est habituellement un module résidant dans un hôte ne possédant pas les capacités offertes par Bluetooth (par exemple un téléphone, une carte embarquée ou un capteur). L'hôte interagit avec le module Bluetooth à travers une interface HCI (*Host Controller Interface*) avec des liaisons physiques de type RS232, USB³¹, I²C pour des liens Asynchrones (ACL) ou PCM³² pour des liens Synchrones (SCO). Cette interface HCI constitue une méthode de commande uniforme pour accéder aux capacités matérielles du module Bluetooth. Typiquement, pour des commandes de contrôle d'un lien, elle imposera l'échange de messages LMP avec des dispositifs Bluetooth distants. L'hôte peut lire et écrire des données à travers cette interface. Bien qu'il n'y ait qu'une seule couche physique par module, un support pour le multiplexage entre des protocoles de couches plus hautes partageant ces données est aussi nécessaire.

De plus, certains services demandent les moyens pour échanger des informations avec une qualité de service (QoS) attendue entre unités Bluetooth. Ceci est la tâche dédiée à la couche L2CAP (*Logical Link Control Adaptation Protocol*) grâce à des méthodes de correction d'erreur de type 1/3 ou 2/3 de FEC³³.

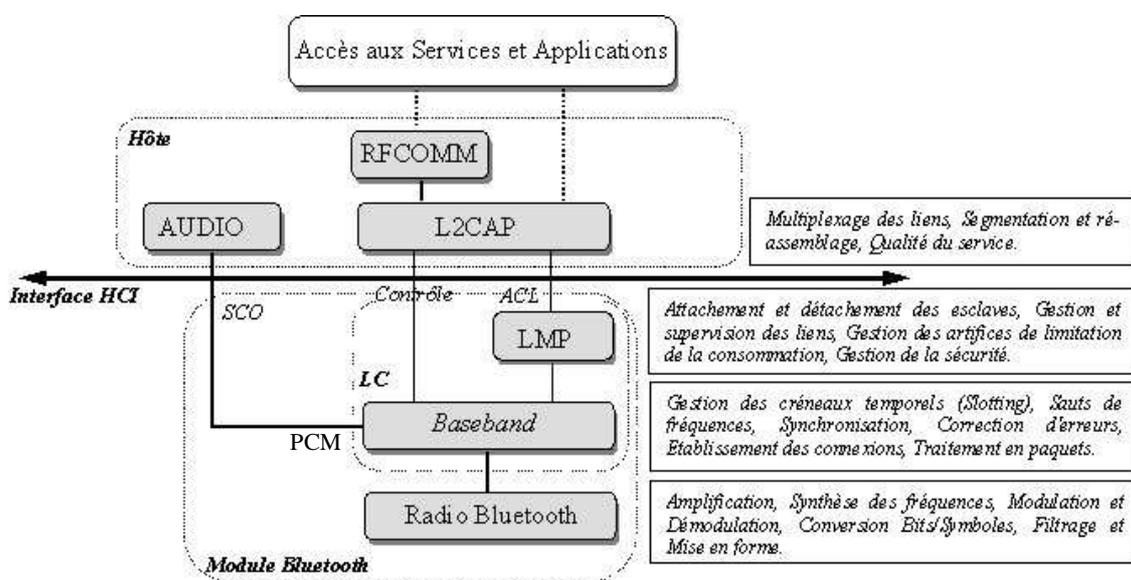


Figure 21. Principales couches protocolaires Bluetooth (matérielle et logicielle).

V.4 PROPOSITION D'UNE ARCHITECTURE EN RESEAU HYBRIDE

Partant de ces connaissances, nos travaux ont consisté à étudier et à proposer des solutions en vue de faire communiquer des capteurs et actionneurs répartis. Ces travaux font l'objet de la thèse de S. EL HOMSI [T3]. Nous collaborons très étroitement avec nos collègues spécialisés en réseaux pour les aspects protocolaires.

L'idée générale est de mettre en place une architecture de réseau domotique sans fil basé sur Bluetooth telle que l'illustre la figure 22.

Dans le *piconet* représenté, des contrôleurs *baseband* et radio Bluetooth (BT) sont reliés (ou intégrés) à un hôte, typiquement une station de base de type PC (ou un microcontrôleur), à des capteurs (Ci) ou à des dispositifs centraux via une liaison série RS232 ou USB [18]. Chacun de ces dispositifs peut contrôler à son tour différents Equipements Domotiques (ED) via des standards existants (liaisons filaires, bus domotiques).

³¹ USB : Universal Serial Bus

³² PCM : Pulse Code Modulation

³³ FEC : Forward Error Correction

Cette architecture générique permet d'élargir le réseau de communication dans l'habitat en profitant des avantages de chaque lien utilisé dans une configuration donnée. Il est évident que des interfaces logicielles génériques ou dédiées sont dès lors indispensables.

De plus, considérant les besoins d'un environnement domotique, un protocole adapté doit être élaboré. Basé sur le cœur de l'architecture protocolaire de Bluetooth, il doit comprendre 3 couches logicielles :

- L2CAP (pour fournir les services de données),
- SDP (pour obtenir les informations sur le dispositif et services associés),
- RFCOMM (pour faciliter la communication sans fil et fournir les possibilités de transport pour les services domotiques).

Déjà, des points d'accès Bluetooth longue portée sont disponibles sur le marché permettant en outre d'augmenter la couverture du réseau local (100 m max) à l'image des produits EtherBlue et BlueDSL (connexion par liaison Ethernet, ADSL³⁴ ou DECT³⁵) de la société INVENTEL³⁶.

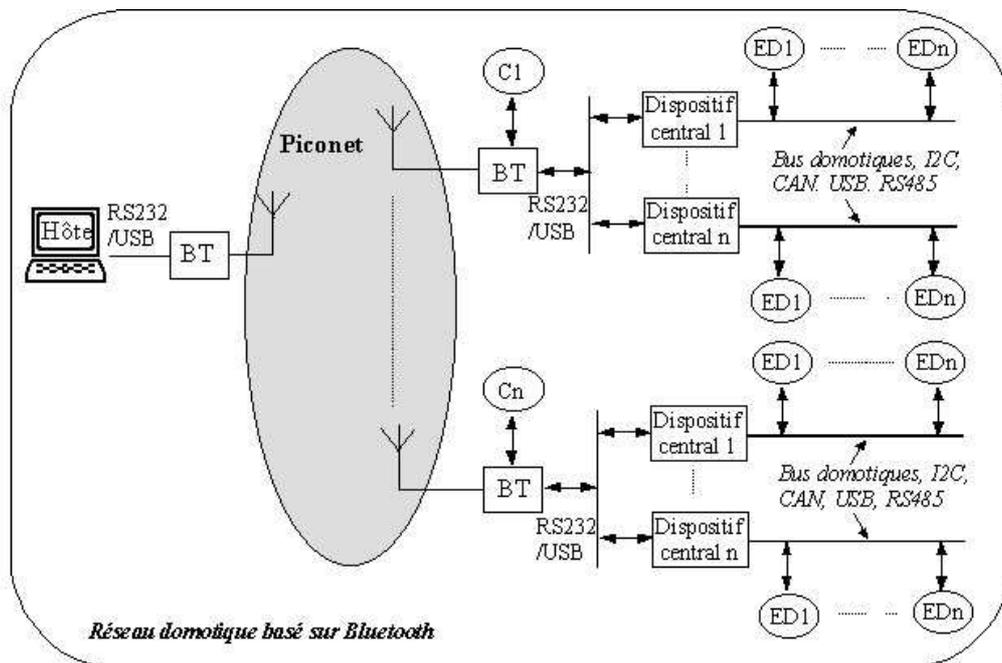


Figure 22. Architecture proposée (cas d'un piconet).

V.5 CARACTERISATION DES ECHANGES

Pour pouvoir utiliser les modules Bluetooth, il est impératif de correctement les gérer et les contrôler, via un microcontrôleur par exemple. Toutes les phases et étapes préliminaires à l'établissement de la liaison : préparation du module en tant qu'Esclave, réception et vérification de la commande, doivent donc pouvoir être réalisées de manière automatique. Or, la documentation [51,52] ne fournit pas directement les instructions ni les codes d'échange au niveau le plus bas.

Nous avons donc dû créer les outils nécessaires à l'interception, à la caractérisation et à l'analyse structurelle des trames d'échange transitant entre les couches protocolaires implémentées dans l'hôte et les couches basses câblées dans le module Bluetooth [MN6].

Plusieurs avancées ont déjà été effectuées à ce jour, nous en donnons ci-dessous les principaux résultats.

³⁴ ADSL : Asymmetric Digital Subscriber Line

³⁵ DECT : Digital Enhanced Cordless Telecommunications

³⁶ <http://www.inventel.com>

- Pour maîtriser les procédures de gestion que doivent posséder ces microcontrôleurs, le premier travail consiste à "espionner" l'échange point à point entre deux modules Bluetooth au niveau de l'interface HCI et à décrire la forme des trames qui y transitent. Pour cela, nous avons utilisé d'une part, deux cartes de développement matérielles "Starter Kit" d'Ericsson [15] comprenant essentiellement :

- un module Bluetooth "ROK" (*baseband* + radio) fonctionnant en point à point,
- plusieurs interfaces (RS232, USB...),
- un circuit CODEC³⁷ pour la gestion de l'audio connecté directement à la *baseband* par l'interface spécifique PCM (figure 21).

et d'autre part, des logiciels implémentant les couches protocolaires permettant d'établir les liens entre les deux cartes, reliées chacune via leur interface série à un ordinateur (figure 23).

Ainsi, la commande de la puce Bluetooth en langage assembleur et plusieurs séries de mesures ont permis de décrypter et de comprendre les procédures d'échanges de données asynchrones entre un Maître et un Esclave et d'optimiser l'échange hôte-module Bluetooth [D3].

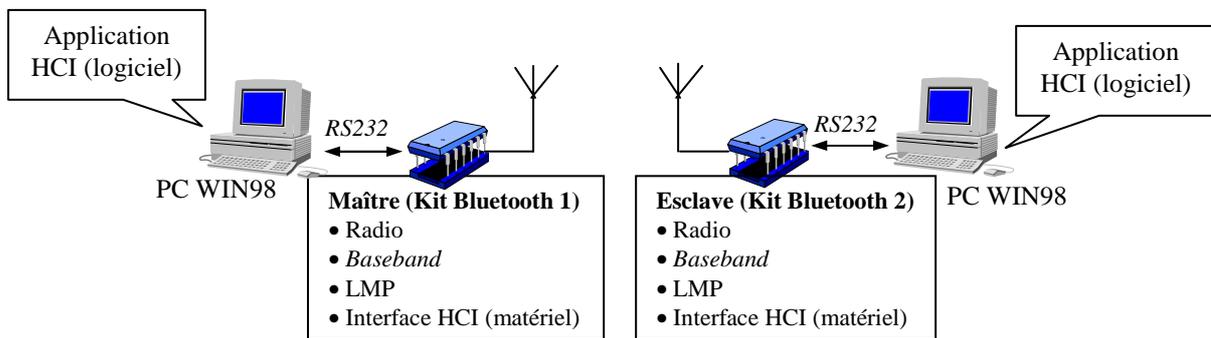


Figure 23. Banc de mesure et de tests.

- Le débit du port série du système "hôte" étant très critique pour beaucoup d'applications, nous avons ensuite étudié l'effet de cette limitation sur le débit de bout en bout de l'échange de l'information. La figure 24 illustre la variation du temps d'échange de 2 trames concernant la lecture de la dimension du buffer 'Read Buffer Size' du module (4 octets émis + 14 octets reçus) en fonction du débit. Ces mesures ont été effectuées à l'aide d'un programme spécifique³⁸ et ont permis de montrer qu'à débit radio Bluetooth constant, le temps d'échange des commandes Bluetooth est globalement inversement proportionnel au débit du port série par lequel transite ces commandes.

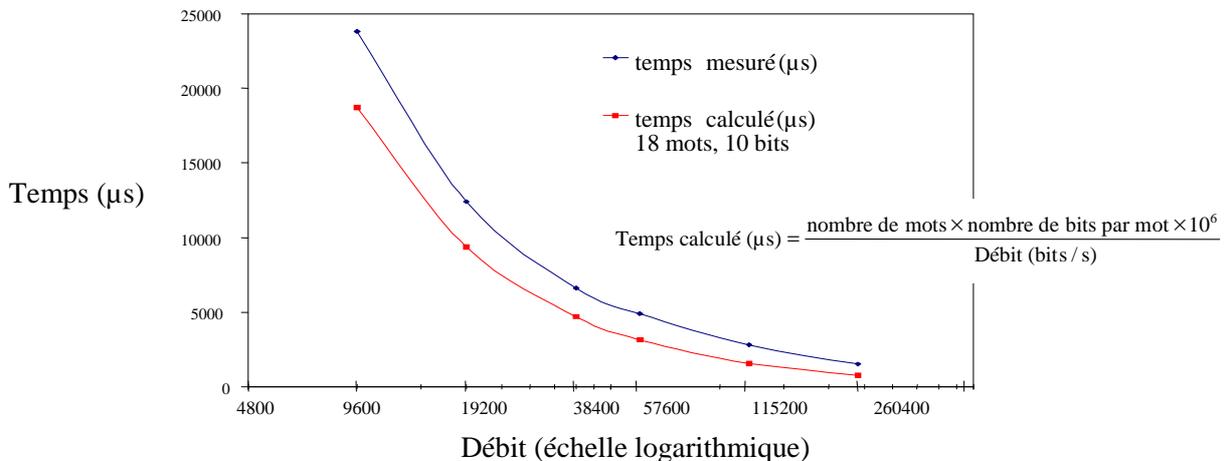


Figure 24. Variation du temps mesuré et calculé en fonction du débit.

³⁷ CODEC : CODEur - DECodeur

³⁸ Macro-langage de programme assembleur développé à ICARE

- Les liens asynchrones, étudiés et caractérisés, partagent avec le système hôte une même interface HCI. **Par contre, les liens synchrones transitent via une interface PCM initialement dédiée à la voix. Nous avons donc exploré la possibilité de transmettre via cette interface, des données numériques.** La modulation utilisée dans Bluetooth comporte 3 phases :

- l'échantillonnage,
- la quantification,
- et la compression, celle-ci pouvant s'effectuer de manière linéaire (transformation CVSD³⁹) ou logarithmique (loi μ ou loi A). Nous avons donc étudié ces deux méthodes en modélisant d'une part, la modulation CVSD sous MATLAB, et d'autre part, en analysant et corrélant un nombre important de signaux PCM émis et reçus en loi A et μ .

Ces tests nous ont permis de faire les remarques suivantes :

- l'utilisation du CVSD est déconseillée pour la transmission des données numériques à cause des procédures d'interpolation/décimation effectuées au niveau du module ROK,
- l'utilisation des lois de compression A et μ permet de garantir la transmission correcte des données numériques,
- l'apport judicieux de l'interface PCM Bluetooth pour la transmission des données permet ainsi de bénéficier de la qualité de service native.

Grâce à ces résultats, les liens synchrones ont commencé à être caractérisés et une solution originale pour la transmission de données numériques par liens synchrones a pu être proposée [R18]. La latence de transmission mesurée et évaluée (fixe de 1,75 ou 4,25 ms suivant le lien SCO utilisé) permet d'ores et déjà d'imaginer des applications encore plus prometteuses dans le domaine de l'échange robuste des données, ce qui nous laisse entrevoir des possibilités d'applications étendues à la robotique par exemple.

V.6 CONCEPTION ET REALISATION D'UNE PLATE-FORME DE DEVELOPPEMENT

V.6.1 Intégration du circuit Bluetooth "ROK"

La plate-forme de développement que nous avons mis en oeuvre répond à un besoin de validation et de métrologie des solutions proposées. D'autre part, elle s'inscrit dans le cadre d'une collaboration L2I⁴⁰ associant les équipes de recherche ICARE, LIRMM (Montpellier) et LIMOS (Clermont-Ferrand II) pour des applications de commande de robots mobiles [R24].

Cette plate-forme s'appuie sur des cartes d'applications modulaires que nous avons conçues et développées dans le but d'étudier les échanges Bluetooth dans un *piconet* (point - multipoints) (figure 25). Dans ce but, nous disposons d'un réseau constitué de huit cartes Bluetooth (1 Maître et 7 esclaves).

³⁹ CVSD : Continuous Variable Slope Delta Modulation

⁴⁰ <http://www.teleapplications.org>

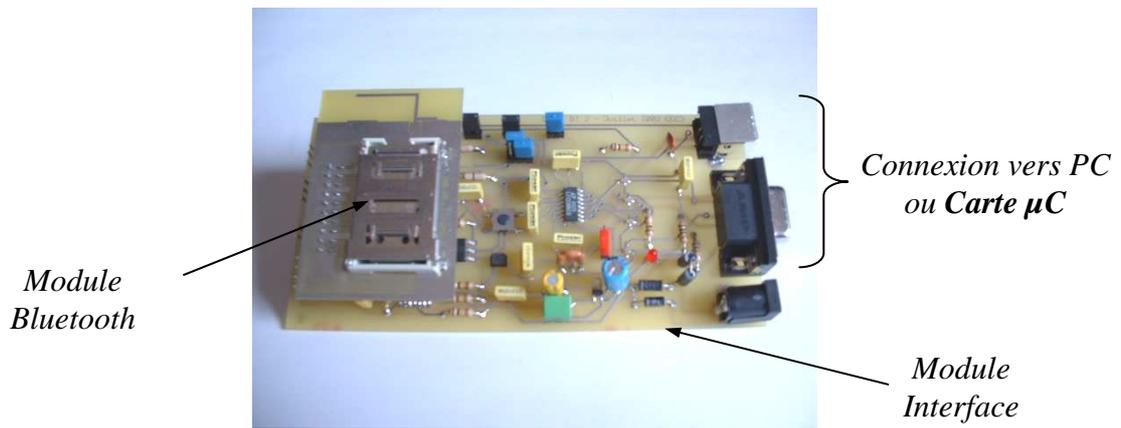


Figure 25. Conception d'une carte modulaire Bluetooth.

Chaque carte est composée de deux modules :

- un module complet Bluetooth d'Ericsson (ROK 101007 [19] permettant le point-multipoints) de type BGA⁴¹ "bas profil" sur son support spécial. Il intègre les couches physiques (RF, *baseband* et LMP) et une antenne sérigraphiée,
- et un module interface qui comporte différents ports (RS232, USB, I²C, PCM), les contrôles et conversions de tension en 3,3 V (issues d'une alimentation externe ou fournies via le port USB), et un *reset* manuel.

A partir de cette plate-forme de test, nous avons pu établir des liaisons en point à point et en *piconet* entre des dispositifs Bluetooth reliés chacun à un ordinateur PC.

Les premières mesures ont permis d'atteindre des débits de l'ordre de 238 kbit/s, des taux d'erreurs de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-3} avec des portées respectivement de 1 à 10 m (figure 26).

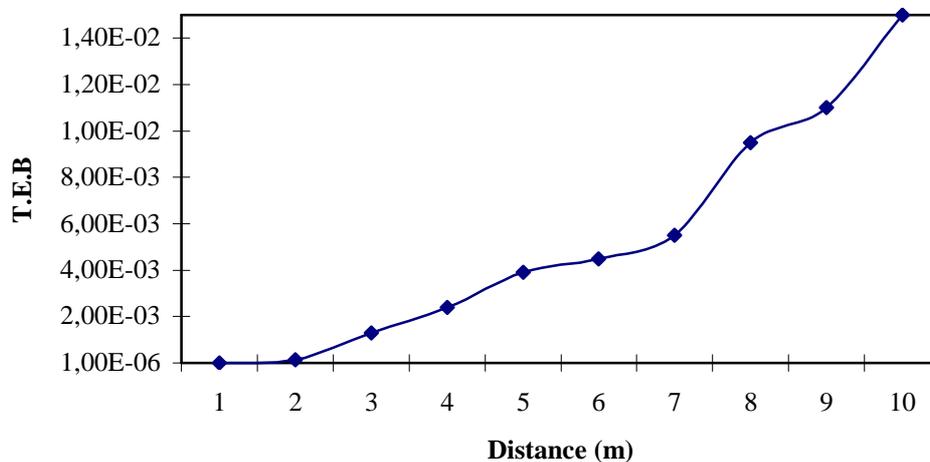


Figure 26. Taux d'Erreur sur les Bits en fonction de la portée entre deux modules Bluetooth.

Une carte en cours de développement doit permettre d'émuler en temps réel et de tester un programme comprenant les instructions de base minimum nécessaires à l'établissement et à la gestion des communications. Cette carte est architecturée autour d'un microcontrôleur PIC 16F877 fonctionnant à 20 MHz (sous 5 V), possédant un port UART⁴² et intégrant des mémoires embarquées de capacités suffisantes [20].

⁴¹ BGA : Ball Grid Array

⁴² UART : Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

A terme, le dispositif final devra intégrer les trois modules : Bluetooth+interface+ μ C au niveau matériel et une pile Bluetooth spécifique dédiée aux microcontrôleurs embarqués. En effet, des études au sein de l'équipe ICARE [21] ont montré que le temps de traversée de la couche L2CAP et de la couche HCI est très pénalisant au niveau du débit apparent et que la commande de la puce Bluetooth devait être émuler dans un langage de bas niveau.

Des travaux similaires commencent à se développer dans ce sens tels que ceux de O. Kasten à Zurich avec le projet européen *Smart-Its* [22] où un module Bluetooth est associé à un microcontrôleur ATMEL.

Une métrologie poussée doit être menée en particulier sur la caractérisation des différents liens asynchrones et surtout synchrones. Il serait également intéressant de réaliser une étude sur l'influence des perturbations sur la transmission des données causées par d'autres dispositifs travaillant dans et hors ces fréquences mais aussi par le milieu traversé (modules 802.11, fours micro-ondes...).

Parallèlement, des travaux de modélisation et de simulation de la couche physique radio doivent être couplés à cette plate-forme de développement pour définir des modèles fonctionnels à partir des mesures réelles préalablement obtenues. Une méthodologie globale Bluetooth étendue sur un réseau *piconet* ou *scatternet* pour une communication multipoint est aussi envisagé.

V.6.2 Intégration du circuit RF "PBA"

Outre les travaux d'intégration, de métrologie et de modélisation à mener sur les cartes développées basées sur le module Bluetooth complet (*baseband* + radio), nous prospectons la possibilité d'élargir la voie à une nouvelle architecture plus flexible et ouverte basée uniquement sur le composant Bluetooth RF (PBA) (cf. figure 19 b) pour la transmission du signal [D5].

Le composant PBA implémente la partie radiofréquence représentant la couche physique la plus basse de la pile protocolaire de Bluetooth. Bien que conçu pour répondre aux exigences de la norme Bluetooth, il offre une bonne accessibilité à ses registres internes configurables au niveau logique. La séparation des broches de données et de contrôle facilite la distribution des tâches, accélère la transmission et permet d'alléger considérablement les contraintes protocolaires. Ce composant est loin d'être le seul existant sur le marché en pleine expansion, mais il constitue un exemple d'outil de base exploitable avec des perspectives d'application intéressantes. Il est cependant nécessaire de correctement maîtriser les commandes nécessaires au pilotage de ce composant en tant qu'émetteur/récepteur radio Bluetooth. Ces commandes passent par la gestion et la configuration des registres internes du composant. Ce circuit RF ne contient pas de mémoires FIFO et se limite à transmettre seulement les données synchrones à 1 MHz. Il doit donc interfacer un circuit *baseband* où les données sont déjà stockées et paquetées. L'utilisation de ce circuit comme émetteur/récepteur radio Bluetooth implique l'usage d'une structure complexe contenant une grande fonctionnalité logicielle telle que celle contenue dans le circuit *baseband* du circuit complet Bluetooth.

Notre idée est de créer une nouvelle couche *baseband* allégée simple dont la charge est de gérer un ou plusieurs circuits RF fonctionnant en parallèle. Les avantages seront alors accrues :

- transmission multi-porteuse,
- débit élevé (> 1 Mbit/s),
- bande passante étendue,
- réduction de la latence de transmission,
- usage contrôlé et déterministe du saut de fréquence,
- augmentation de la sécurité par l'utilisation de méthode DS-SS.

Ces perspectives nous permettraient d'ores et déjà d'ouvrir le champ d'application à des domaines élargis de la robotique sans fil et des systèmes embarqués à commande temps-réel.

VI. CONCLUSION

Ce chapitre illustre les travaux que nous avons réalisés au sein de l'équipe ICARE. Il ont porté sur l'intégration de systèmes de communication radiofréquences fonctionnant en étalement de spectre. L'idée centrale a été de concevoir, de modéliser et de réaliser un système émetteur-récepteur sans fil présentant des caractéristiques propres à s'intégrer de manière adaptative en terme de performances (débit de transmission) et à moindre coût dans un habitat.

Dans ce but, nous avons abordé ces travaux selon deux approches :

- une approche ouverte de conception globale depuis des spécifications fonctionnelles jusqu'à la réalisation microélectronique d'un circuit ASIC,
- une approche hybride basée sur l'assemblage et l'intégration de composants spécifiques Bluetooth sur "étagères".

La première approche consistait tout d'abord à proposer **un modèle électronique fonctionnel complet d'un système de communication RF bidirectionnelle à 2,4 GHz adaptatif**. Tous les constituants d'une telle architecture ont été définis et leurs comportements modélisés sous l'environnement logiciel SABER. Les fonctions du système (modulation, filtrage, amplification...) ont été optimisées et leurs fonctionnements validés en environnement *indoor* (multi-utilisateurs, multi-trajets). Il ressort qu'une structure en bande de base semble mieux adaptée qu'une structure en fréquence intermédiaire. Un effort particulier a été effectué sur la fonction DLL qui a pour rôle l'asservissement de la séquence aléatoire (PN-code) reçue avec celle générée localement. Ces travaux ont non seulement permis de proposer un ensemble de modèles électroniques mais aussi d'évaluer et d'optimiser les différentes topologies utilisées généralement dans la littérature. Des outils logiciels de mesures du taux d'erreur ou de l'optimisation des filtres ont également été élaborés. Ces premiers résultats ont conduit à la synthèse VHDL de la plupart des étages numériques et leur intégration dans un ASIC. Ces travaux se sont appuyés sur un environnement multi-logiciels (SABER, CADENCE...) de manière à prendre en compte les paramètres de consommation, de coût et de rapidité. Les mesures effectuées à l'aide d'un banc de test spécialement conçu montrent des performances satisfaisantes et cohérentes par rapport à la simulation. Une étude portant sur les étages radiofréquences vient compléter l'ASIC en vue de la réalisation d'un prototype complet.

La deuxième approche repose sur **l'intégration de composants RF Bluetooth. Des modules communicants ont été développés** de manière à tester, évaluer et étudier les fonctions offertes par cette technologie. L'étude des liens asynchrones et synchrones nous a amené à faire des hypothèses intéressantes quant à l'utilisation de Bluetooth pour la transmission de données numériques à des débits élevés (> 1 Mbit). Des outils de tests ont été élaborés pour la mesure de la vitesse de transmission des données par l'interface série. Nous pensons enfin que des modules Bluetooth peuvent permettre la constitution d'un multi-réseaux domotique interconnectant différents médiums de communication. Cette architecture profiterait des avantages de chacun des médiums et élargirait la portée du réseau initial.

CHAPITRE 4

REALISATIONS DE DEMONSTRATEURS

I. INTRODUCTION

Le développement des systèmes domotiques se heurte depuis de nombreuses années aux exigences des utilisateurs en matière de simplification de l'interface homme-système. En particulier la multiplication des systèmes à programmer est un frein essentiel à la mise en oeuvre d'un concept moderne d'habitat intelligent. Notre objectif a été de proposer une approche où les questions de programmation sont évitées. Les études menées sur ce sujet prennent en compte l'exigence de réduction des coûts des microsystèmes mais aussi la mise en oeuvre de techniques d'apprentissage pour d'abord modéliser les modes de vie des utilisateurs, puis, en s'appuyant sur ces modèles comportementaux pour anticiper les commandes de gestion habituelle et donc réduire les tâches de programmation.

Ces idées sont tout d'abord appliquées à la gestion du confort en collaboration avec les sociétés EDF R&D, DELTA-DORE et LEGRAND : c'est le projet ERGDOM. Une deuxième application plus récente vise la surveillance à domicile de personnes âgées : c'est le projet PROSAFE.

Dans les deux cas, le principe est celui de l'apprentissage des habitudes : présence, confort ou déplacements. Cet apprentissage utilise des méthodes statistiques simples et s'appuie sur le traitement des données issues des capteurs, essentiellement de présence, répartis dans l'habitat. Les deux aspects complémentaires du travail concernent l'architecture matérielle à implémenter et les algorithmes d'analyse et de diagnostic à élaborer. Ces analyses reposent sur la comparaison automatique des modèles de comportements et/ou de confort établis et mémorisés avec les données temps réel.

Différents points ont ainsi été traités :

- la configuration matérielle du système,
- les méthodes d'analyse et de traitement,
- l'interface utilisateur.

II. CONTEXTE ECONOMIQUE

La domotique, précurseur de l'habitat intelligent, constitue depuis les années 80, un secteur d'application potentiel pour les technologies de l'information. Les efforts engagés par les entreprises n'ont toutefois connu qu'un succès très relatif dans la gestion technique du bâtiment, la surveillance et la sécurité.

Plusieurs raisons de ce semi-échec ont été invoquées :

- le coût encore trop élevé des installations,
 - l'intérêt pratique limité des services proposés (automatisation des fonctions de l'habitat) pour une complexité d'interface système-utilisateur trop grande,
 - les difficultés rencontrées pour réaliser une offre cohérente et partiellement standardisée.
- Ces difficultés sont illustrées par la multitude des protocoles de communication proposés et la diversité des supports de communication câblés ou sans fil.

Nous pensons, en ce qui nous concerne, qu'il existait aussi une limitation importante due à la non-disponibilité d'un support informatique suffisant sous la forme d'un PC multiservice performant et d'un réseau local de communication. Les objectifs de gestion technique ou de sécurité ne nécessitaient pas, dans chaque cas, des installations trop coûteuses. D'autres enjeux pouvaient être accessibles et mériter ces investissements : le maintien à domicile des personnes âgées et handicapées est un exemple d'évidence [PI1].

Depuis le démarrage de ces travaux dans les années 80, le paysage technique s'est fortement modifié [PI4] notamment par :

- le développement des composants miniaturisés utilisables pour l'habitat émergent [D1]. Ils sont en pleine expansion grâce aux technologies microsystemes,
- des groupements industriels se sont constitués et font des propositions concertées avec des offres communes. Les discussions sur les protocoles des réseaux locaux semblent devoir aboutir à quelques solutions qui, d'ailleurs, ne font plus obstacles au développement des services,
- le PC est devenu un produit grand public. Dès 1995, il se vendait en France plus de PC que d'automobiles. La baisse continue des coûts et l'accroissement des performances renforcent très vite cette tendance.
- les télécommunications enfin, avec Internet et les PC-terminaux jouent actuellement un rôle accélérateur et fédérateur.

Des ponts technologiques sont ainsi en train de s'établir entre le téléphone filaire et non filaire, le fax, la vidéo et les services domotiques.

La domotique va apporter en effet une quantité de nouveaux usages avec beaucoup plus de force grâce à la convergence des technologies. En 2000, le marché français de la domotique (regroupant les alarmes de sécurité intrusion, les équipements de régulation, le contrôle d'accès, la motorisation, les systèmes domotiques intégrés, la télésurveillance et les systèmes de gestion de l'éclairage pour les applications domestiques) et de l'immotique était estimé par l'Association Confort Régulation à 997 millions d'euros⁴³.

Le concept de "Maison Intelligente" ou "Smart Home" connaît désormais un véritable essor à tel point que le marché du "Home Networking" se chiffrerait à 3 milliards de Dollars en 2004 (Source Cahners In-Stat Group).

⁴³ Ce chiffre d'affaires est partagé entre la domotique qui représente un marché de 724 millions d'euros et l'immotique dont le chiffre d'affaires est de 273 millions d'euros (Source Eurostaff).

III. SYSTEME DE SURVEILLANCE AUTOMATISEE DE PERSONNES AGEES

III.1 CONTEXTE SOCIAL

Les études et statistiques médicales récentes montrent clairement que le nombre de personnes âgées souffrant de troubles du comportement moteur croît de manière inquiétante [23]. Ces troubles ont souvent des conséquences graves comme la chute, la déambulation ou la fugue.

Rappelons que depuis le début du siècle, tous les pays de l'Union Européenne, excepté l'Irlande sont confrontés à un processus de vieillissement démographique, expliqué par deux facteurs principaux : la baisse des taux de fécondité et la chute des taux de mortalité.

Selon une étude publiée en 1993 par la Commission Européenne, on recensait plus de 60 millions de personnes âgées de plus de 60 ans en Europe représentant un peu moins d'un cinquième de la population. D'ici 2020, elles représenteront plus du quart de la population européenne et les plus de 65 ans plus d'un cinquième. Il y a 50 ans, les personnes de plus de 65 ans ne représentaient qu'un quatorzième de la population européenne.

La France se situe dans la moyenne par rapport à ses partenaires européens. Sur une population de 57,7 millions au 1^{er} janvier 1993, un peu moins du cinquième avait 60 ans ou plus, environ 7% avait 75 ans et plus, soit 4 millions de personnes. Les personnes âgées de 85 ans et plus représentaient plus d'un million, soit 1,7%. Les projections démographiques prévoient une augmentation de la proportion des personnes âgées en 2010 (22,8% de 60 ans et plus) et qui se renforcera en 2020 (26,8%).

Parallèlement, on observe une croissance du nombre de personnes âgées atteintes de maladies chroniques ou de longue durée et de déficits fonctionnels ou cognitifs. Entre 1980 et 2025, la population des personnes de plus de 80 ans et plus sera multipliée par 2,25, passant de 11,2 millions en 1980 à 25,1 millions en 2025.

Aujourd'hui, plus de 20% de la population âgée souffrent de troubles fonctionnels et nécessitent une assistance minimale pour les activités quotidiennes. La majorité de ces personnes atteintes de pathologies démentes, plus de 70 %, vit dans la communauté et reçoit des soins à domicile plutôt que d'être admises dans un hôpital ou une maison de retraite médicalisée.

III.2 LES SOINS A DOMICILE

Des raisons économiques et sociétales évidentes (diminution des dépenses de santé, amélioration de la qualité de vie, confort de vie à domicile...) font que le maintien à domicile des personnes âgées est devenu une question de premier ordre. Cependant, les risques associés à l'isolement de ces personnes durant de longues périodes à leur domicile peuvent augmenter (chute, malaise, crise, fugue...). On voit bien là le besoin de systèmes nouveaux et de services adaptés.

Les experts dans ce domaine considèrent, en effet, que le réseau de santé devrait connaître une mutation profonde de sa structure, avec la mise en place de plates-formes techniques réalisant la surveillance et les soins à domicile. La prise en charge de masse doit être reconsidérée. Nous pensons que celle-ci doit être individualisée.

On connaît déjà des exemples de démonstration en télémédecine, en hôpital de jour, pour des convalescences surveillées ou des traitements particuliers (insuffisants rénaux et respiratoires par exemple). Les lois récentes sur la santé et les soins invitent à cette évolution.

Plusieurs enquêtes d'intérêts sur l'Habitat Intelligent ont été menées :

- dans le cadre du pôle "Machine Intelligente" du CNRS/SPI où il est apparu que les "Soins à Domicile" étaient un champ de recherche très stratégique et socio-économiquement très important,

- dans les 5^e et 6^e Programmes Cadres de Recherche et Développement européens, de nombreux thèmes concernent la qualité de vie chez l'homme (gestion de confort, télésurveillance, télé-médecine, maintien à domicile, assistance médicalisée, réseaux de soins...),

- dans les réseaux nationaux avec par exemple le Réseau National des Technologies pour la Santé (RNTS) où l'amélioration de la qualité de vie des malades et l'efficacité de l'intervention des professionnels de santé sont prioritaires.

Cependant, des discussions doivent encore être engagées pour fixer le cadre éthique et juridique de telles actions.

III.3 DISPOSITIFS TECHNOLOGIQUES

Un état de l'art dans le domaine de l'aide technologique aux personnes âgées dépendantes nous a permis de recenser sur le marché ou dans la littérature scientifique des produits et des services permettant de prendre en charge les personnes âgées souffrant de troubles ou de mesurer leur mobilité [RN5].

Il existe à l'heure actuelle différentes solutions techniques permettant d'aborder le problème de la sécurité des personnes âgées ou handicapées, solutions que nous présentons brièvement pour les avoir étudiées :

- *Montre "actigraphique"*

Cette montre portée par le patient permet de détecter et de stocker les mouvements du corps pendant des jours et des semaines, mais elle ne localise pas la personne. A l'heure actuelle, les montres "actigraphiques" ou "actigraphes" qui existent sur le marché ne permettent pas de discriminer des mouvements différents (tremblement, balancement...) [24,25].

- *Système d'identification*

Pour localiser un individu, il existe des bracelets permettant de le repérer dans un rayon de 10 à 15 kms. Cet outil est particulièrement utilisé pour des patients souffrant de la maladie d'Alzheimer ou de démence apparentée. Les systèmes que nous avons analysés comportent un émetteur et un récepteur à faible coût, ils fonctionnent avec une fréquence de 25 KHz et ils couvrent une zone géographique avec une erreur de 30 m. Ils permettent de localiser et de retrouver rapidement le patient en cas de fugue [26].

- *Système de télé-assistance*

Les systèmes qui existent pour secourir les personnes âgées en télé-assistance sont ceux qui nécessitent le port d'un collier ou d'un bracelet ou de tout autre bouton pour permettre à la personne âgée de demander une aide. Cette assistance ne fonctionne correctement que si la personne est munie de son appareillage. Ce système trouve ici ses limites dans de nombreux cas, par exemple : les personnes ayant toute leur faculté mentale mais dépourvues de leur matériel d'appel, les personnes ayant des troubles cognitifs ou ayant tout simplement perdu connaissance. Dans toutes ces situations, l'appel ne sera pas entendu et les secours ne pourront être organisés.

- *Systèmes de suivi physiologique*

De nouveaux systèmes embarqués sur les personnes apparaissent actuellement. Ces systèmes nomades permettent de mesurer les paramètres physiologiques des individus (pouls, fréquence respiratoire, température cutanée et mobilité du poignet). Ils se présentent sous la forme d'un bracelet-montre et sont pour la plupart entièrement autonomes. Ils intègrent un lien radio afin de véhiculer un message d'alarme le cas échéant.

Ces systèmes sont actuellement au stade de l'évaluation et de la validation en situations réelles. Ils nécessitent l'instrumentation de la personne mais peuvent s'avérer très complémentaires à terme avec un système d'analyse du comportement.

III.4 SYSTEMES TECHNOLOGIQUES D'AIDE AUX PERSONNES AGEES

III.4.1 Généralités sur les techniques de surveillance

Un des indicateurs de l'état de santé d'un individu est sa mobilité ou plus exactement son comportement. La déambulation dans le comportement est l'aspect de démence le plus difficile à gérer pour les aides-soignants et la famille [27] car il est source d'une perte d'indépendance [28]. De nombreuses études ont montré que les patients ayant de forts troubles du comportement étaient une charge trop lourde pour les aidants et entraînaient un placement dans une institution [29-31].

Les caractéristiques spécifiques des troubles des personnes sont ainsi recueillies et exploitées pour les diagnostics, les interventions cliniques, les essais de médicaments et autres études impliquant les membres de la famille ou le personnel médical [32,33].

Trois principales méthodes d'évaluation du comportement sont utilisées :

1- Les évaluations qui consistent en une série de tests, d'échelles de mesures, de grilles et de modèles d'évaluation [34]. Elles sont remplies par la personne elle-même ou par un aidant. La difficulté avec ces mesures est qu'elles sont basées sur des formes non structurées d'observation qui ne sont pas uniformes selon les grilles ou les sujets. De plus, elles sont pour la plupart analysées a posteriori loin du contexte habituel.

2- L'observation directe du comportement. Elle est plus intrusive et plus coûteuse que la méthode précédente. Elle est moins pratique pour la mesure de la fréquence des comportements rares tels que la fugue ou la chute. La notion de fréquence et de temps d'apparition des troubles qui sont des éléments importants dans l'évaluation de ces désordres, est ainsi souvent laissée de côté ou ignorée. En effet, un suivi temps réel continu est fortement contraignant pour le personnel participant à l'étude,

3- L'utilisation de caméras vidéos [35-37]. Il s'agit d'un outil de mesure intrusif, coûteux et qui nécessite une grande mémoire de stockage des données ainsi que des traitements lourds. D'autre part, l'utilisation de ces équipements vidéos soulèvent des questions de conformité éthique [38-40].

Compte tenu de ces considérations, il nous paraît clair qu'une surveillance automatisée basée sur une approche multicapteurs et de fusion de données comme énoncé dans le chapitre 1, est une solution qui s'impose.

Il est bien évident que toutes les applications ne peuvent être abordées de cette façon mais pour le secteur domotique dont l'objectif principal est le faible coût, la démarche est intéressante. Toutefois, la difficulté apparaît dans les fonctions de détection et de quantification à implanter dans le système (PC, μ P). Il faut en effet à partir des réponses de chaque capteur, reconnaître les formes typiques multidimensionnelles (de comportements, de localisation, de positionnement...) et les comparer aux formes détectées en situation réelle à chaque instant t. Les écarts constatés serviront à élaborer des diagnostics.

III.4.2 Etat de l'art des systèmes de suivi

Le système de suivi à distance de personnes âgées consiste à récupérer deux sortes de données :

- physiologiques, relatives à l'état de santé du patient,
- comportementales (thérapeutiques associées à un traitement ou non).

Nous donnons ici quelques exemples de projets menés en Europe sur ces deux aspects :

- L'expérience menée par l'université de Eindhoven (Pays-Bas) [41] est un des modèles les plus représentatifs de maison habitable intelligente pour les personnes âgées. L'objectif du projet est d'utiliser toutes les sortes d'applications télématiques possibles dans la maison avec un environnement local de type Intranet pour l'information et la communication d'une part, entre les personnes les plus âgées et les institutions médicalisées, et d'autre part, entre les soins et les services. Il s'agit d'un laboratoire vivant pratique permettant la réalisation de projets de gérontologie.

- L'expérience de pièce intelligente dans le domaine de la télémédecine développée dans le projet EPIC [42] consiste en un système de gestion de télésanté à domicile concernant deux sites : la maison du patient et un centre de service de télésanté à domicile.

Le système fournit deux types de services :

- en premier, un service de surveillance de signaux physiologiques du patient incluant la pression sanguine et des mesures de ECG⁴⁴,

- en second, un système de gestion de téléalarme fournissant à la fois des alarmes actives (bouton pressé par le patient sur un pendentif portable ou une centrale d'alarme), et des alarmes passives ou automatiques (auto-test du système, coupure de puissance, incendie, intrusion, chutes du patient).

- L'expérience menée par le laboratoire TIMC de Grenoble concerne la conception et l'évaluation d'un système d'information baptisé HIS [43] localisé dans une chambre d'hôpital. Ce système expérimental équipe un appartement de 50 m² incluant diverses pièces de vie. L'équipement médical comporte un ensemble de capteurs et ordinateur. Le dispositif complet fonctionne sur un réseau de communication et d'information avancé basé sur Internet, Java, et des modèles orientés objets. Il inclut un dispositif multisensoriel physique de la pièce du patient et un système multi-agents pour la détection de chute et le déclenchement d'alarme. La modélisation de de l'ensemble [44] a de plus été étudiée.

- Enfin, de nombreux autres travaux concernant la surveillance des personnes âgées vivant seules, on peut citer de manière non-exhaustive, ceux de A.Sixsmith [45], P. Tang et T. Venables [46], M. Ogawa et T. Togawa [47,48], B.G. Celler [49] et P.H.F. Peeters [50].

Les différences constatées dans les travaux menés apparaissent essentiellement dans les méthodes de traitement utilisées, les fonctionnalités proposées ainsi que dans l'architecture du système "hardware" (généralement contrôlé par un calculateur central de type PC). Bien que les architectures matérielles utilisées dans les exemples évoqués soient parfois lourdes (nombreux capteurs de natures différentes, réseau local multi-liens, diverses fonctionnalités, intrusivité des équipements...), ces systèmes dits "intelligents" convergent vers des objectifs communs de surveillance multisensorielle de l'état de santé des individus.

⁴⁴ ECG : ElectroCardioGramme

On voit bien l'importance d'adopter une approche générique dans la conception de tout système pour un couplage aisé de leurs fonctionnalités.

Cela a été l'objectif du projet TISSAD qui a réunit des équipes de recherche multidisciplinaires mais complémentaires issues de laboratoires français (LAAS et Unité 558 INSERM de Toulouse, LORIA de Nancy, Unité 121 INSERM de Lyon et TIMC de Grenoble). Ces collaborations se sont déroulées dans le cadre du programme RNTS⁴⁵ 2000 [R27].

Les travaux réalisés ont consisté à développer des approches et des prototypes d'outils génériques réutilisables dans d'autres domaines. Nous en résumons ci-après les principaux résultats.

III.4.3 Contribution à la définition de règles normatives

Plusieurs expériences ont été menées depuis parfois longtemps par les partenaires du projet TISSAD. C'est à partir de ces expériences et de la connaissance des besoins qu'ont été choisis les trois domaines suivants d'application de ces recherches, qui concernent la télésurveillance médicale :

- des personnes âgées à des fins de prévention des risques dûs à leur âge, (troubles du sommeil, immobilité prolongée anormale, discernement du risque de chutes...) [R25], [RI7],
- des insuffisants cardiaques, (suivi post-opératoire, suivi après pose de "pacemakers", défibrillation, angioplastie, personnes à risques) [51],
- des insuffisants rénaux soignés par dialyse péritonéale afin de détecter au plus tôt des risques d'œdème pulmonaire ou de péritonite (système Diatélic [52]).

Les recherches ont conduit à la définition précise de méthodes, de modèles et d'outils les plus génériques possibles, réutilisables dans ces trois pathologies. Les résultats concernent autant les aspects cliniques que les technologies de l'information et les méthodes d'évaluation.

Les travaux menés dans le projet TISSAD [O1] relèvent ainsi des sous-systèmes liés à l'acquisition de données, aux différents médiums de communication, à l'interface homme-machine adaptée, à l'aide à la décision, au stockage des données et enfin à un système d'alerte.

Il est nécessaire que l'architecture générale du dispositif garantisse une indépendance de ces entités distribuées et utilise autant que faire se peut les règles et standards établis (Internet, XML⁴⁶, UML⁴⁷).

Dans ce projet, nous avons participé aux recherches sur les méthodes et outils d'intégration, lesquelles ont conduit à la définition de règles "normatives" pour une meilleure interopérabilité fonctionnelle sur la construction de tels systèmes hétérogènes.

Parallèlement, des méthodes d'évaluations médicale et socio-économique ont été développées.

Les résultats obtenus ont fait l'objet de plusieurs publications présentées dans des conférences et des journées [MI20,21], [MN5] et dans un séminaire de fin de projet à Nancy [PI5] pour lequel un site Web présentant de manière virtuelle le projet PROSAFE décrit ci-après a été conçu (<http://www.laas.fr/PROSAFE>).

⁴⁵ RNTS : Réseau National des Technologies pour la Santé

⁴⁶ XML : Extensible Markup Language

⁴⁷ UML : Unified Markup Language

III.5 LE SYSTEME PROSAFE

III.5.1 Principe

Ce projet dont j'ai entièrement la charge élargit le domaine d'application du diagnostic multisensoriel imaginé pour l'hypovigilance du conducteur automobile. Des résultats récents ont montré que le comportement du patient pouvait être prédit par l'analyse d'évènements de son activité passée [53]. Ces évènements antérieurs peuvent passer totalement inaperçus mais être très significatifs pour détecter des anomalies de comportement.

Le projet PROSAFE est issu d'une réflexion poussée et concertée, impliquant électroniciens, praticiens hospitaliers, informaticiens et cliniciens. Il se concentre sur la surveillance automatisée et personnalisée des individus en perte d'autonomie [RN1]. Le système PROSAFE se veut être non intrusif et totalement automatisé (figure 27). Il se fonde uniquement sur le suivi permanent des paramètres de mobilité significatifs de l'état psychologique des personnes sous surveillance [RI7], [MI12-13].

L'originalité de notre approche est de se fonder sur l'usage des techniques d'apprentissage. On "apprend" les modes de vie (ADL⁴⁸) de la personne âgée dans son milieu de vie et on "suit" ses évolutions, et ce, en instrumentant uniquement l'habitat par des capteurs faibles coûts répartis et connectés à un réseau de communication adapté [MI9-11].

Les informations (de type binaire) issues de ce réseau de capteurs sont centralisées et mémorisées dans un ordinateur dans lequel elles constituent une base de données. A partir de celle-ci un algorithme d'apprentissage identifie les comportements habituels qui sont définis comme critères de normalité avec des fonctionnalités telles que :

- l'analyse des "habitudes" pour réaliser leur apprentissage : horaires, vitesses de déplacements, caractéristiques des chemins parcourus, modes de vie...,
- la création d'un système automatique de diagnostic et d'alerte lorsque, en temps réel, certains paramètres dépassent des seuils ou que le mode de vie sort trop des "habitudes" mémorisées dans la base d'apprentissage : immobilité totale, multiplication des levers/couchers, fréquence d'utilisation des toilettes...

L'objectif pour la recherche est d'appliquer le concept à la déambulation nocturne [RI4,RN4]. Ce choix simplifie la partie technique car la personne est le plus souvent seule.

Au plan gériatrique, c'est un problème nouveau et important du point de vue des traitements dont les conséquences sur le comportement locomoteur peuvent être contrôlées.

Dans ce contexte, deux types de résultats sont recherchés :

- la détection de situations d'urgence : alerter en temps réel le personnel soignant en cas d'incidents (chute ou fugue, par exemple),
- la détermination de tendances et la prédiction, basées sur l'analyse de données quotidiennes.

⁴⁸ ADL : Activity of Daily Life

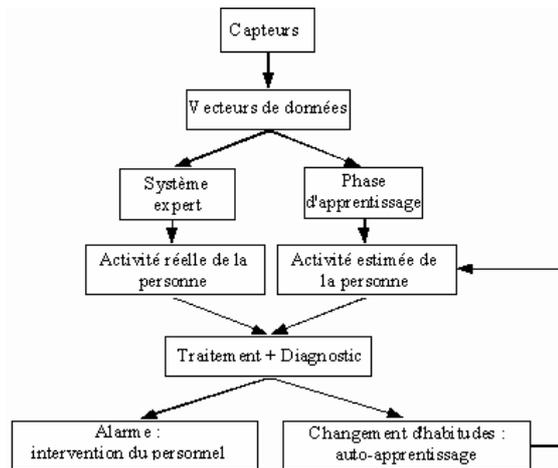


Figure 27. Schéma du principe général de fonctionnement du système de surveillance.

III.5.2 Architecture matérielle

Le système se présente comme un ensemble multicapteurs reflétant l'état du patient et de son environnement immédiat. La configuration de toutes les pièces expérimentales implémentées correspond à celle illustrée dans la figure 28.

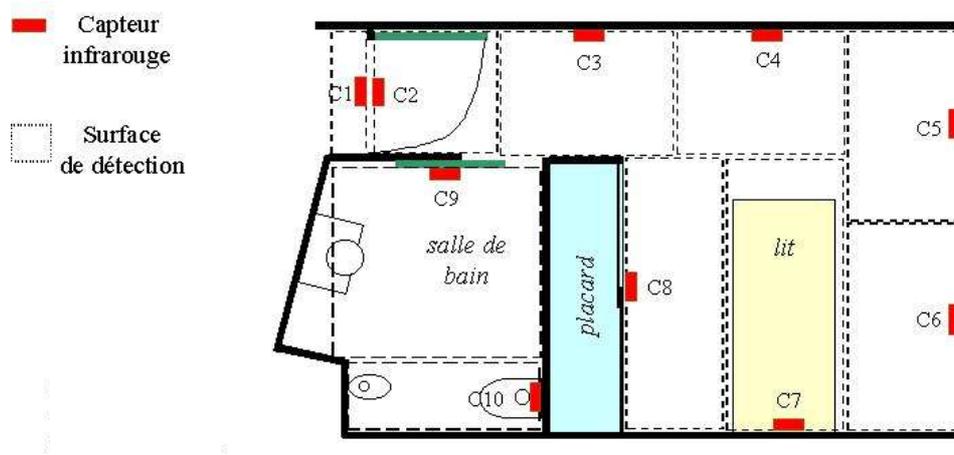


Figure 28. Schéma d'implantation des capteurs dans les chambres expérimentales.

Une dizaine de capteurs infrarouges piézoélectriques sont ainsi répartis dans le lieu de vie. Ils couvrent au sol une zone de détection d'environ 1 à 2 m².

Plusieurs médiums de communication ont été étudiés pour relier ces capteurs au ordinateur central. Des communications radio basées sur les fréquences ISM 433 MHz en modulation ASK⁴⁹ et FSK⁵⁰ ont été testées et validées en laboratoire [MNI]. Cependant, étant donné la nécessité d'un développement en nombre de tels modules, nous nous sommes orientés pour les expérimentations sur des solutions filaires du commerce basées sur la liaison série RS485.

Des cartes d'acquisition numériques permettent de véhiculer les données vers la station centrale de base (figure 29). Les modules RS485 utilisent une méthode d'accès de type TDMA⁵¹.

⁴⁹ ASK : Amplitude Shift Keying

⁵⁰ FSK : Frequency Shift Keying

⁵¹ TDMA : Time Division Multiple Access

Une passerelle assure un *Polling Selecting* de ces modules. En effet, l'équipement informatique, via la passerelle (RS485/RS232) interroge cycliquement (fréquence de 2 Hz) chaque module d'entrées/sorties par une trame "requête". Après acquisition des données (numériques ou analogiques), le module sollicité retourne une trame "réponse" portant dans une chaîne ASCII les données acquises. Chaque module est adressable individuellement (256 adresses différentes).

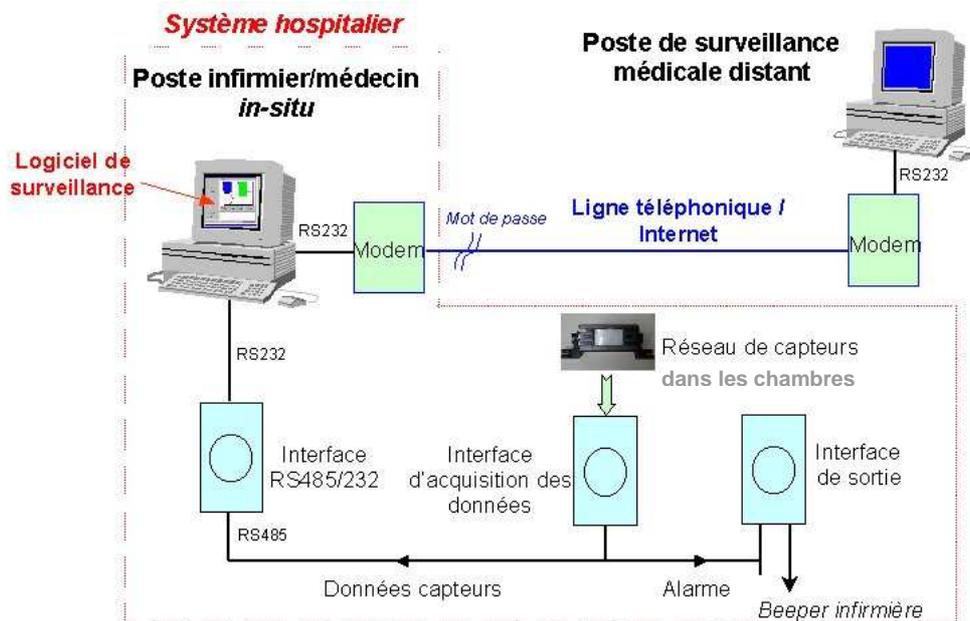


Figure 29. Architecture matérielle du démonstrateur PROSAFE.

III.5.3 Architecture logicielle

- L'architecture

L'analyse et la conception ont été mises en œuvre à travers une démarche orientée objet fondée sur le formalisme UML. Tous les algorithmes ont été développés en langage C++.

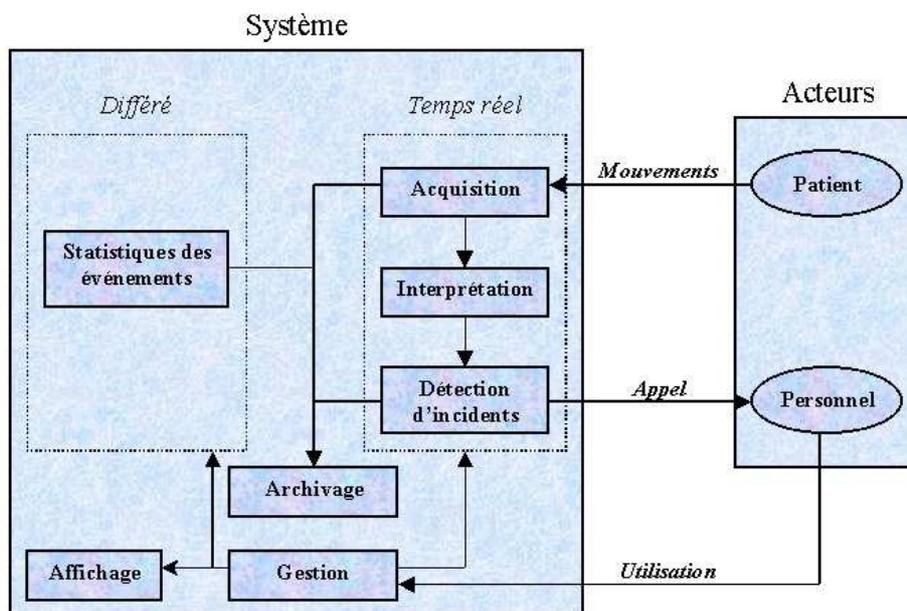


Figure 30. Schéma représentatif du fonctionnement du système PROSAFE.

Les fonctionnalités générales du système PROSAFE peuvent se décomposer en deux catégories distinctes comme le montre la figure 30 [R33] :

- l'analyse des déplacements en temps réel. C'est la partie intelligente du système capable de reconnaître certains événements et de prévenir en cas de danger,
- l'analyse du comportement en temps différé afin de suivre l'évolution du comportement.

- Les modules

L'architecture que nous avons élaboré est constitué de plusieurs modules :

- Un module d'acquisition temps réel capable d'acquérir à chaque instant l'état des capteurs et de les enregistrer sous forme de fichiers exploitables a été conçu.

- Une base de données développée sous MySQL⁵² permet de stocker les informations relatives à chaque usager (état civil, données cliniques, données capteurs, droits d'accès) sur un serveur dédié.

- Un module d'interprétation permet de déduire les mouvements de la personne dans la pièce. Toute analyse est déduite de la reconnaissance temporelle de sa position spatiale. La position est définie par un numéro de secteur déduit à partir d'un masque de bits représentatifs de l'état de tous les capteurs de chaque chambre.

De plus, pour dissocier la position de la personne surveillée de celle d'un surveillant, lorsque ces deux personnes se trouvent dans la même pièce, nous avons implémenté un automate à états finis permettant de les différencier. Les états de base correspondent aux différents secteurs de la chambre couverts par les capteurs infrarouges. Nous y avons ajouté des états intermédiaires de sorte qu'il soit possible pour une personne d'être entre deux secteurs. Ce cas correspond, dans la pratique, à deux activations de capteurs différents pour une même personne.

Le graphe ainsi constitué représente les séquences d'activation de capteurs observables lors des déplacements d'une seule personne dans la chambre.

L'avantage d'utiliser un automate à états finis est de déduire rapidement des déplacements cohérents d'individus. En revanche, il est difficile d'interpréter, de façon certaine, le croisement de plusieurs personnes.

- Un module de détection basé sur des règles prédéfinies (système expert) permet lui, de reconnaître les évènements inhabituels ou des situations de danger.

- Enfin, l'ensemble des fonctionnalités est conçu autour d'un module de gestion des incidents temps réel. Lorsque certaines situations sont identifiées (chute, fugue et agitation), une alarme est générée. Cette alarme est suivie d'un ensemble de traitements (archivage, affichage et émission d'un message au *beeper* du personnel), puis évolue au cours du temps (retour à la normale, situations empiriques, changements d'états...). Ce "gestionnaire d'incidents" contrôle l'ensemble des traitements internes en vérifiant la cohérence de l'appel de chaque procédure assurant une certaine sûreté de fonctionnement des modules. Ainsi, la justification du contexte de l'appel d'une procédure est vérifiée avant son exécution assurant alors une parfaite chronologie des traitements et un filtrage d'erreurs internes.

Pour éviter toute alarme intempestive, nous avons volontairement dissocié les termes Alerte et Alarme. Ainsi, une alerte est considérée comme toute situation susceptible d'être un incident alors qu'une alarme définit tout incident détecté par le système.

Dans ces conditions, toutes les alarmes sont précédées d'une alerte (figure 31).

⁵² MySQL : Système de gestion de base de données

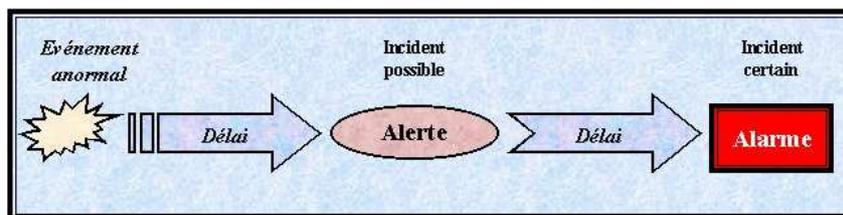


Figure 31. Principe du concept "Alerte - Alarme".

Les alarmes sont déclenchées à partir de seuils spécifiques au type d'incidents et à la tolérance souhaitée. La quantification de ces seuils détermine directement l'efficacité et la pertinence du système. Ainsi, certains seuils varient en fonction du temps (pour l'immobilité) alors que d'autres sont fixes (pour la sortie et l'agitation).

Les alertes et les alarmes représentent un ensemble d'informations. Celles-ci sont insérées dans une structure alarme nommée "s_alarme". Elle peut représenter à la fois une alerte ou une alarme.

<u>s_alarme</u>	{	Nombre	Numéro	: numéro de l'alarme
		Nombre	Chambre	: numéro de la chambre associée
		Nombre	Type	: <u>0 = alerte ; 1 = alarme</u>
		Nombre	DescEvt	: description de l'incident*
		Position	Secteur	: secteur de l'incident
		Date	Date	: heure de déclenchement de l'incident
		Duree	Duree	: durée de l'incident

* Description des incidents

Patient sorti	0
Chute	1
Patient agité	2

Un ensemble de fonctions basées sur des calculs statistiques complète le système en permettant, en temps différé, de faire ressortir des données exploitables à partir des fichiers préalablement enregistrés.

- Les seuils

Différentes techniques peuvent être utilisées pour la détection de situations critiques immédiates : on peut citer celles basées sur le modèle de Markov caché ou sur les réseaux Bayésiens dynamiques (implémentées par les équipes de Grenoble et de Nancy dans le cadre de TIISSAD [O1]).

L'approche que nous avons retenue dans un premier temps est celle du calcul par la méthode statistique basée sur des seuils. Ce calcul a été réalisé de différentes façons. Les seuils d'agitation ont été adaptés suivant le retour d'expérience du personnel surveillant. Les seuils pour la détection de chute quant à eux sont basés sur l'immobilité habituelle (expériences passées) du patient à chaque endroit et ont été définis de deux manières :

- fixes, à partir de tableaux synthétiques représentant les durées d'immobilité quotidiennes de chaque patient sur 128 fichiers de données. Il est important de définir le seuil minimum afin de détecter toutes les chutes possibles et d'éviter au maximum le nombre de fausses alarmes.

- variables, à partir du comportement passé du patient lors des nuits précédentes.

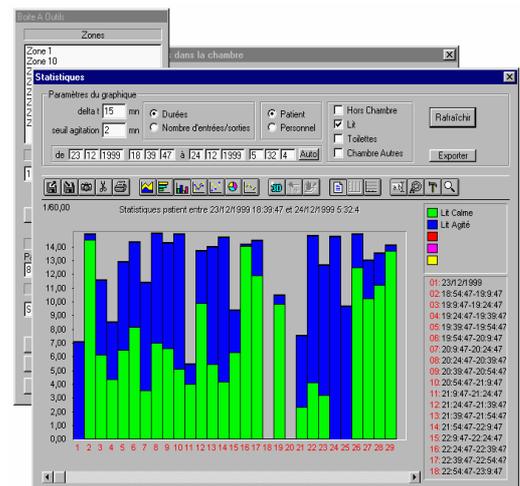
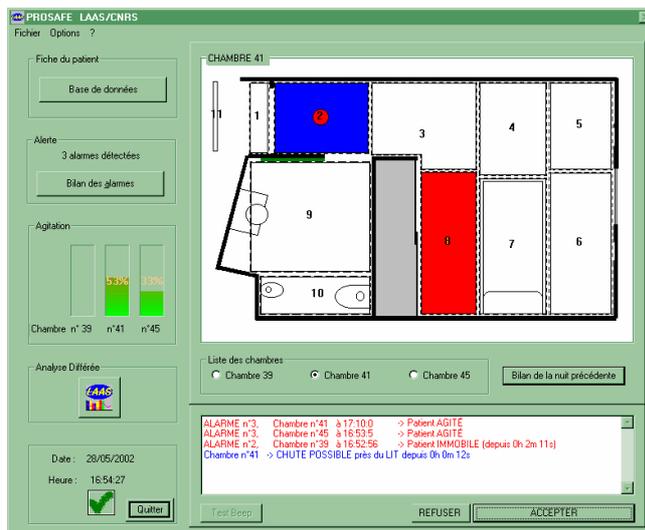
- L'interface

• Une interface utilisateur locale a été élaborée permettant d'accéder soit de manière automatique, soit manuellement à toutes les informations utiles pour le personnel de surveillance. A partir de l'interface principale représentée par la figure 32, il est ainsi possible de visualiser en temps réel :

- les déplacements d'un patient dans une chambre donnée et de les discriminer de ceux du personnel (une couleur différente leur est dédiée),
- les taux d'agitations des différents patients surveillés (exprimé en pourcentage de danger),
- le nombre d'alarmes générées,
- l'apparition et le traitement chronologiques des alertes et des alarmes dans une fenêtre dédiée.

Des boutons sont aussi accessibles pour permettre instantanément de lire des fichiers comportant :

- l'ensemble des alarmes de la nuit en cours (il peut être activé durant la nuit),
- l'ensemble des mouvements du patient au cours de la nuit passée (il doit être activé lorsque l'acquisition des données est achevée),
- les statistiques relatives à l'évolution du comportement de la personne durant un intervalle de temps réglable.



Analyse différée du comportement

Figure 32. IHM locales de PROSAFE.

• Une interface utilisateur distante a été conçue et développée sous PHP⁵³ et permet d'accéder de façon partielle ou totale (suivant les autorisations d'accès) aux données de la base depuis un poste distant via une liaison de type RTC⁵⁴ ou Internet (figure 29).

III.5.4 Expérimentations

Des tests en laboratoire ont permis de mettre au point les différents réglages matériels du dispositif multicapteurs ainsi que de simuler les comportements des malades selon des scénarios déterminés à l'avance (mis au point par un médecin) [MI24-25].

⁵³ PHP : Personal Home Page

⁵⁴ RTC : Réseau Téléphonique Commuté

Le système multicapteurs a été ainsi implanté dans des hôpitaux toulousains (Hôpital de Casselardit-Purpan, Centre de Long Séjour de Muret) et grenoblois (Hôpital La Tronche) et dans une maison d'accueil pour personnes âgées (Charron-La Rochelle). Ces actions ont pu être menées grâce à des aides régionales et industrielles (cf. Partie 4).

Ces différents sites expérimentaux ont permis de valider les algorithmes basés sur des traitements statistiques à partir de mesures de suivi de patients sur plusieurs mois. Ces validations se sont déroulées en deux phases :

- la 1^{ère} phase a consisté à comparer les résultats obtenus automatiquement (fréquences des levers, couchers, allers aux toilettes, entrées et sorties) aux fiches d'observations relevées par les infirmières au cours de leurs rondes de nuits par la technique d'observation directe (cf. III.4.1) pour chacun des patients. La très bonne corrélation obtenue a permis de valider l'analyse automatique des évènements.

- la 2^{ème} phase a consisté à diagnostiquer les situations dites "à risques" et à déclencher des alarmes à destination du personnel soignant. Une validation des bonnes et fausses alarmes a été demandé au personnel. Actuellement, les fausses alarmes rencontrées proviennent essentiellement des capteurs de mouvements et de l'interprétation de ces mouvements par l'automate.

Nous présentons ci-après deux illustrations de résultats proposés par le système :

• Relevés automatiques des activités nocturnes :

La figure 33 illustre un exemple du relevé des activités motrices d'une personne âgée. Ces résultats montrent la possibilité d'obtenir automatiquement avec les paramètres de mobilité, une base de données des habitudes de vie journalières ou nocturnes.

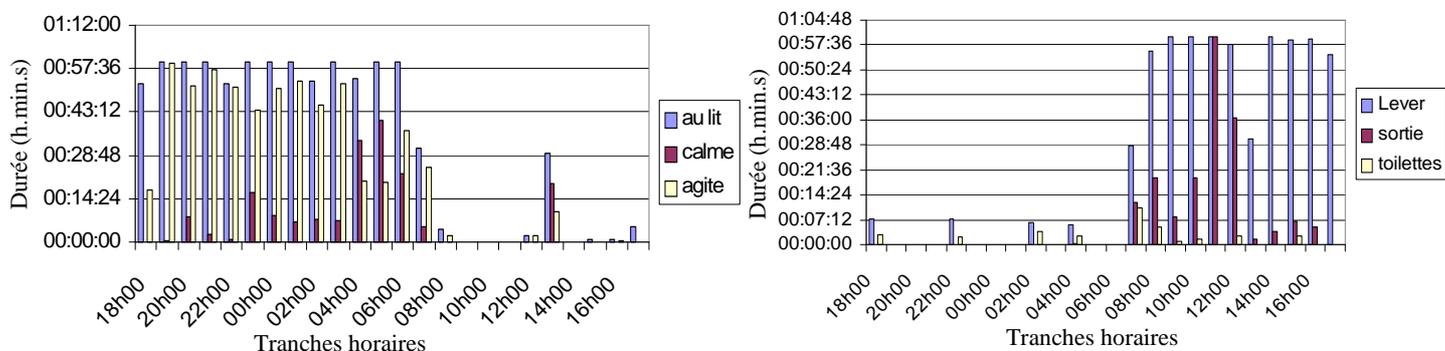


Figure 33. Exemple de courbes d'activités d'une personne âgée.

• Suivi des activités des individus sur le long terme :

Le tableau 1 donne, pour 4 sujets suivis, des éléments caractéristiques : levers du lit, sorties de chambre, visites aux toilettes... obtenus pour **huit mois d'observation continue**.

Sujets	1	2	3	4
Nombre de nuits traitées	249	237	22	204
Nombre de levers	30	1	0	38
Nombre de sorties	6	0	0	8
Nombre de visites aux toilettes	9	0	0	31

Tableau 1. Fréquence des activités caractéristiques de 4 patients pour 8 mois de suivi.

Ces éléments caractéristiques montrent des différences entre patients et des modes de comportements différents. On peut noter, par exemple, que deux des 4 sujets présentent un taux de levers plus importants. Ces activités sont représentées de manière plus détaillée sur les courbes de la figure 34 pour le sujet 4. Les tracés ont été découpés selon deux périodes, une période où le patient ne reçoit aucune médication et une deuxième période où le sujet a reçu une prescription médicale pour trouble du sommeil. On peut ici suivre une baisse évidente de l'agitation à la suite de la prise de médicaments.

On voit bien l'originalité d'un tel outil pour l'aide au suivi des troubles du comportement des personnes âgées.

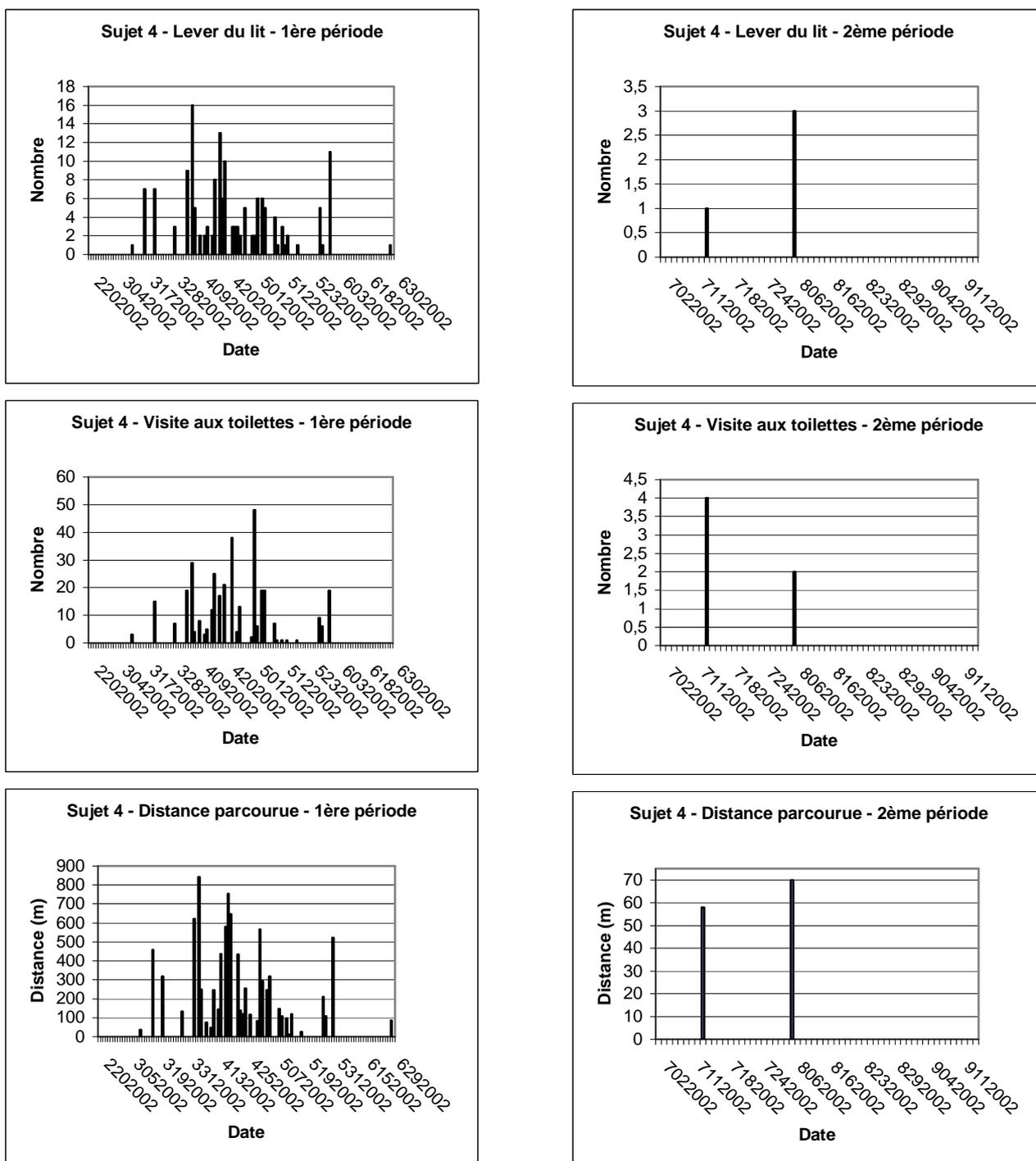


Figure 34. Tracés des activités caractéristiques d'un sujet sur 8 mois de suivi.

De plus, la détection et le déclenchement automatique d'alarmes ont été testés et ajustés *in-situ* avec l'aide des personnels soignants de nuits dont la tâche était de valider ou de refuser les alarmes émises.

Les expérimentations ont permis de constituer pour la première fois une importante banque de données sur le comportement de patients présentant ou non des troubles comportementaux, notamment au niveau de la déambulation nocturne [MI16,26].

III.5.5 Perspectives d'améliorations

L'appui de EDF R&D nous a permis d'améliorer les premières versions du système et de rédiger des documents techniques détaillés [R29,33]. Cette collaboration a donné lieu à un dépôt de brevet sur le procédé [B3] et est actuellement au stade de l'évaluation du potentiel du système à constituer un support pour une offre de services liés au maintien à domicile.

Les pistes d'améliorations portent essentiellement sur :

- La méthode de diagnostic qui consiste à évaluer l'anormalité du comportement par la détection de déviations. De nombreuses approches peuvent être utilisées dans ce sens mais il est toutefois difficile de détecter un danger relatif aux changements d'habitudes. Celle que nous avons retenue est non-supervisée et consiste à comparer de manière continue le modèle comportemental habituel (trajectoires, événements) "mémorisé" d'une personne par rapport à son comportement instantané [MI23]. Toute situation sortant de ce modèle pourra alors être considérée comme une détérioration de sa condition physique pouvant entraîner une situation imminente de risques.
- L'optimisation de l'automate utilisé pour différencier les déplacements de deux personnes.
- Le développement de capteurs de présence pour augmenter la fiabilité de la détection.

IV. SYSTEME DE GESTION AUTOMATIQUE DU CONFORT THERMIQUE : LE PROJET ERGDOM

IV.1 CONTEXTE ECONOMIQUE

Devant le besoin économique et les recommandations incitatives (par l'instauration de normes) aux économies d'énergie électrique, beaucoup d'efforts ont été déployés ces dernières décennies pour mieux maîtriser l'énergie dans l'habitat. Les efforts se sont concentrés essentiellement sur l'isolation thermique des habitations avec pour double objectif de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer le confort de l'occupant.

Pour compléter ces offres, plusieurs options de gestionnaires d'énergie ont été développées et proposées tout en tenant compte des souhaits de confort des utilisateurs [54-57]. Des systèmes électroniques programmables ont ainsi vu le jour pour automatiser le démarrage et l'arrêt du chauffage dans une habitation. Toutefois, dans tous les cas, le système suppose l'intervention de l'utilisateur pour configurer les dispositifs. Les programmations s'avèrent le plus souvent assez complexes et ne s'adaptent pas automatiquement aux changements de comportement de l'utilisateur.

IV.2 LE SYSTEME ERGDOM

IV.2.1 Principe

Le système ERGDOM que nous avons développé associe le LAAS, le département "habitat intelligent" de EDF R&D (Renardières) et deux industriels de la domotique : LEGRAND et DELTA-DORE.

L'objectif est de proposer une gestion intelligente du confort thermique dans l'habitat fondé sur des commandes apprises et auto-adaptatives [R8]. Le concept basé sur l'usage de techniques d'apprentissage est identique à celui appliqué dans le projet PROSAFE. Il consiste à faire une modélisation du comportement des usagers sur la base de l'identification de leurs modes vie, en l'occurrence de leur probabilité de présence en un instant donné, en un endroit donné de l'habitat et leurs habitudes de confort dans des conditions connues d'environnement.

La mise en oeuvre de cette idée implique :

- l'implantation d'un capteur de présence sur les endroits les plus pertinents de l'habitat dont la fonction est de permettre le calcul de la probabilité d'occupation de l'endroit,
- la collecte des informations de tous les capteurs pour calculer et mettre en oeuvre une commande optimale équilibrant les dépenses et le confort. Des paramètres tels que la température extérieure, les données météorologiques et les tarifications électriques sont aussi prises en compte pour des objectifs d'optimisation multicritères (figure 35).

Une interface utilisateur spécifique regroupant deux capteurs intégrés (présence et température) a été conçue. Ce développement a donné lieu à un brevet [58]. Cette interface sert de lien entre le gestionnaire central (PC) et l'utilisateur. Installée dans chaque pièce de l'habitation, elle permet un dialogue précis avec l'utilisateur en lui fournissant :

- des informations à l'utilisateur telles que l'heure, la température de la pièce, la température extérieure et la tarification électrique,
- un contrôle de son niveau de confort. Par un simple appui sur des touches +/-, l'utilisateur peut indiquer au système s'il souhaite une température de confort plus ou moins élevée,
- une mise en dérogation. L'utilisateur peut déroger le système pendant le temps qu'il désire.

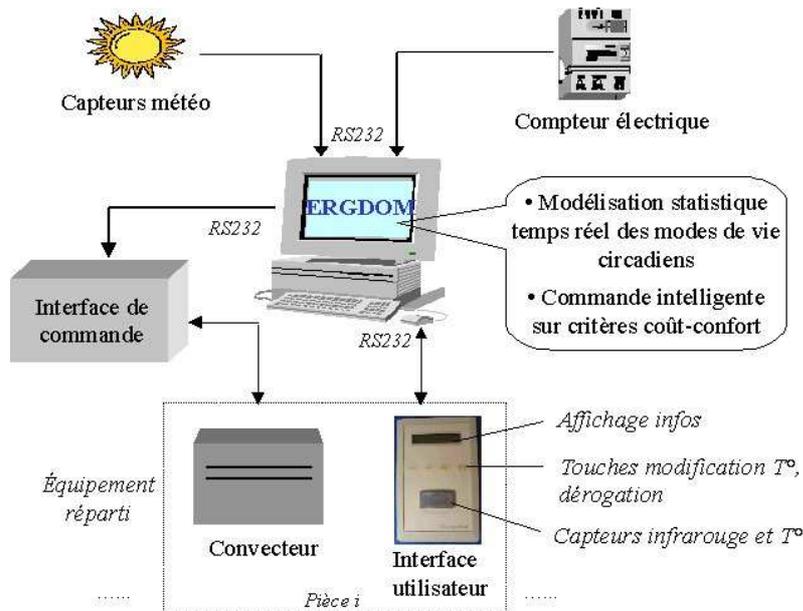


Figure 35. Schéma général de principe du gestionnaire ERGDOM.

Le système comporte plusieurs éléments distincts répartis : convecteurs, compteur électrique, capteurs météorologiques gérés par une unité centrale de traitement.

Le compteur électrique fournit les indications de tarification. Les changements de tarification entraînent des modifications de consigne envoyées aux convecteurs. Les fonctions de diagnostic et de commande sont purement des modules logiciels : il s'agit d'algorithmes de contrôle et de gestion de l'ensemble du système qui collectent les informations provenant de tous les éléments matériels (capteurs, bornes ...). Ces algorithmes font le traitement et définissent les consignes de commande des convecteurs. Ce sont en fait la reproduction des consignes collectées pendant la période d'apprentissage et proposées dans des conditions équivalentes d'environnement [RN6].

La figure 36 illustre le comportement du système dans ses fonctions de régulation et d'anticipation.

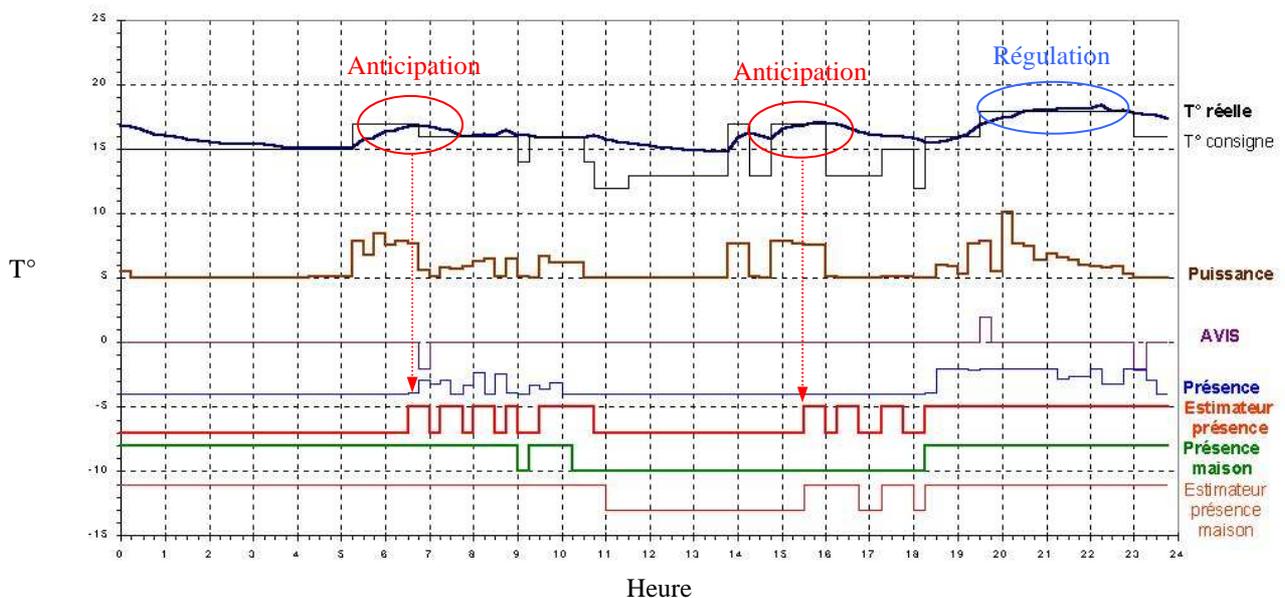


Figure 36. Courbes de régulation et d'anticipation du chauffage.

Basé sur trois modules logiciels d'estimation du confort, de la présence et de la réponse thermique de l'habitat, le système que nous avons développé procède par zone et par découpage du temps en tranches horaires. On peut ainsi établir un tableau par zone et par tranche horaire et chiffrer le taux de présence pour chacune d'entre elles. Pour que le système puisse anticiper, il faut que les probabilités de présence soient répétitives ce qui sera d'autant plus vrai que la grille de tranche horaire sera construite selon un découpage optimisé. Ce découpage peut être réalisé par une analyse préalable de présence mais le plus souvent ce découpage recoupe le rythme familial : lever, petit-déjeuner, déjeuner, dîner, coucher. Cette méthode fait l'objet d'un dépôt de brevet [B5].

IV.2.2 Validation expérimentale

Le système a été installé et testé durant deux saisons hivernales dans huit habitations individuelles avec des occupants au mode de vie différent, selon l'architecture fonctionnelle de la figure 35. Deux architectures matérielles (LEGRAND et DELTA-DORE) ont été implémentées (filaire et sans fil) avec la même approche logicielle.

Ces expérimentations sur sites réels ont permis de valider le concept proposé sur plusieurs niveaux :

- validation technique détaillée règle par règle, c'est à dire que le dispositif est auto-adaptatif conformément au cahier des charges,
- validation opérationnelle et architecturale,
- démonstration d'efficacité du gestionnaire sous l'angle du confort et du coût,
- appréciation des utilisateurs.

La figure 37 compare le système ERGDOM en termes de coût moyen énergétique et d'insatisfaction constatée par les usagers par rapport à d'autres solutions telles qu'un simple système de réglage manuel (basique), un système idéal (température de confort permanente) et un système programmable évolué (du commerce). En se fondant sur des critères objectifs de conformité aux températures souhaitées par l'utilisateur quand il est présent, on peut constater que le système ERGDOM se situe à niveau intermédiaire entre un système idéal et un système basé sur la programmation la plus sophistiquée. Son coût d'installation est très légèrement plus élevé mais il offre un meilleur confort et aucune programmation n'est nécessaire.

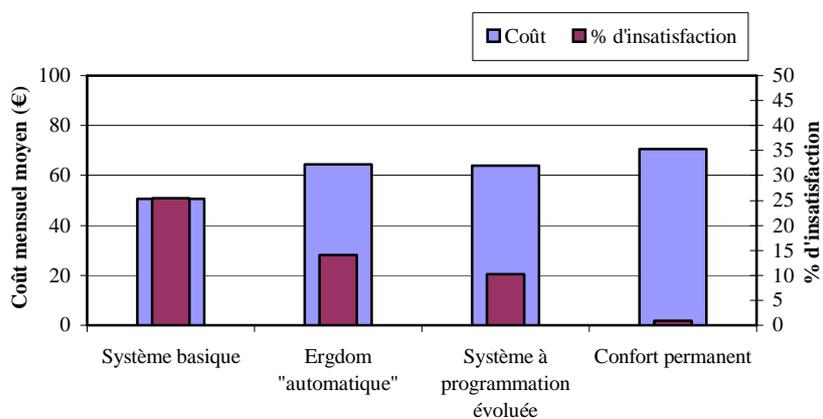


Figure 37. Positionnement du système ERGDOM en termes de coût et d'insatisfaction de l'utilisateur par rapport à d'autres systèmes de gestion de la température.

De même, les retours d'expériences (analyses des données, niveaux de satisfaction, suivis sociologiques) ont été jugés très satisfaisants [59].

L'expérience a été prolongée dans le domaine du petit Tertiaire (bureaux collectifs) et étendue à la climatisation et à l'éclairage, pour laquelle une version adaptée a été conçue. Les résultats ont confirmé le bon fonctionnement du dispositif et la validité du concept aux petits locaux de bureaux [60].

Actuellement, le système a atteint un bon niveau de maturité et entre en phase terminale de valorisation et de transfert industriel avec la société DELTA-DORE avant l'étape d'industrialisation et de commercialisation qui pourrait avoir lieu en 2003-2004.

L'application du concept et des fondements techniques de mise en œuvre devrait être élargie au domaine du chauffage gaz et fioul dans le cadre d'un projet ADEME⁵⁵ (cf. Partie 4, Annexe 2).

⁵⁵ ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

V. CONCLUSION

Les résultats de ce chapitre montre que l'apprentissage des habitudes de vie peut être efficacement utilisé dans la gestion du confort domotique et dans la surveillance des personnes âgées. Cette approche par apprentissage exploitée sur deux exemples d'application a l'avantage d'être globale et très attractive pour traiter des diagnostics dans tous les systèmes où "l'homme est dans la boucle".

Pour PROSAFE, nous réalisons l'apprentissage des habitudes de déplacements par des mesures non intrusives de la mobilité des personnes. Des capteurs de présence sont répartis dans le logement de manière à pouvoir établir un modèle des déplacements habituels. Ces modèles mémorisés sont comparés aux déplacements instantanés pour y détecter des évolutions, par exemple, en période de convalescence, et des incidents comme les chutes, les fugues et les déambulations. Le système que nous avons développé permet ainsi :

- l'analyse statistique des activités spatio-temporelles d'une personne (durée, fréquence),
- le diagnostic temps réel des situations de danger (chute, fugue, agitation),
- le déclenchement automatique d'alarmes,
- le contrôle et l'accès à toutes ces informations via une interface dédiée.

Des sites hospitaliers et maisons médicalisées ont été instrumentés et les expérimentations menées ont permis d'obtenir des résultats tout à fait satisfaisants avec des perspectives d'amélioration encourageantes. Les bases de données recueillies contiennent plusieurs mois de données qui vont nous permettre d'évaluer en laboratoire la qualité et la pertinence de nouveaux diagnostics automatiques.

Pour ERGDOM, nous avons réalisé l'apprentissage des habitudes de présence et des habitudes de confort en fonction des horaires et des conditions climatiques. Cet apprentissage s'appuie sur le traitement des données issues des capteurs de présence et des capteurs thermiques répartis dans la plupart des pièces de l'habitat et utilise des méthodes statistiques simples. Des modèles ont été développés (estimateur de présence, estimateur de confort, modèle thermique) et une interface utilisateur proposée (brevet AVIS). Des prototypes ont été conçus avec l'aide d'industriels et ont été installés dans le résidentiel (habitations individuelles) et dans le petit tertiaire (bureaux professionnels) durant deux saisons hivernales. Le système, sans aucune programmation, réalise en quelques jours la gestion de confort et est capable d'anticiper les entrées/sorties pour réduire les coûts énergétiques tout en maintenant un confort satisfaisant. Les critères de coût-confort et de satisfaction des utilisateurs permettent d'envisager actuellement l'étape de valorisation industrielle.

Ces applications sont de très bons champs de démonstration pour les spécifications et l'intégration complète des microsystèmes communicants associés aux algorithmes d'aide à la décision que nous développons.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

I. CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire constitue une synthèse de mes activités de recherche. Ces travaux se sont déroulés depuis la thèse parallèlement dans le groupe MIS du LAAS et dans l'équipe ICARE de l'IUT de Blagnac. L'essentiel de mon activité s'est centrée sur la conception et la réalisation d'ensembles microsystemes autonomes, répartis et communicants. Le champ d'application privilégié est lié au développement d'un habitat intelligent. La figure 39 illustre les thèmes abordés.

Nos contributions ont porté sur trois aspects :

- i) la technologie appliquée aux microsystemes,**
- ii) l'intégration des communications sans fil,**
- iii) la réalisation de démonstrateurs-systemes.**

i) La technologie appliquée aux microsystemes.

Mes premières expériences dans le domaine de la technologie, ont été effectuées dans le cadre de ma thèse. Il s'agissait de concevoir et de réaliser des structures de **transistors à films minces de polysilicium** ($< 500 \text{ \AA}$). L'objectif final était la réalisation de circuits d'adressage de matrices à cristaux liquides pour des écrans plats. La contrainte d'un coût de réalisation faible était forte. Il a donc été nécessaire de parfaitement maîtriser les propriétés des matériaux utilisés. Ceci a impliqué la mise en place d'un processus technologique précis en atmosphère entièrement contrôlée. Nous avons mis au point des procédés thermiques rapides à faibles bilans thermiques (RT : température élevée pendant des temps courts) assurant au mieux l'indépendance des diverses étapes technologiques. Nous avons étudié les caractéristiques structurales des couches de polysilicium sous des filières gazeuses différentes et pour des conditions de dépôts variés. Les performances électriques ont ainsi été optimisées. Une comparaison avec les procédés conventionnels (LT : faible température pendant des temps élevés) a été effectuée tout au long de ces études. Ceci nous a permis de montrer qu'une combinaison des étapes RT et LT pouvait augmenter les performances électriques grâce à l'amélioration des défauts cristallins des couches. Nous avons également montré que la mesure du coefficient d'absorption des couches de polysilicium pouvait permettre d'optimiser la performance des transistors. Les mesures obtenues par les procédés rapides ont donné des résultats tout à fait comparables à ceux de la littérature.

Nos travaux en technologie ont repris après une période d'analyse des besoins sur le développement de **capteurs de présence** répondant à la nécessité, dans le domaine de l'habitat, de modéliser le comportement humain. Les spécifications déduites de cette analyse des besoins ont conduit à ce que de nouveaux capteurs soient étudiés et développés. Ces capteurs doivent être performants autant dans la détection de présence statique que dans la détection de mouvements. La voie que nous avons prise est celle des capteurs radiatifs. Ils sont basés sur l'absorption du rayonnement thermique humain. Le détecteur repose sur la conception et la réalisation d'un capteur à thermopiles. Nous avons ainsi réalisé un ensemble de structures à base de silicium micro-usiné que nous testerons et comparerons. Cette réalisation permet d'évaluer l'influence des formes et des dimensions géométriques sur les réponses des capteurs. Parallèlement, des modèles analytiques et technologiques ont été développés et les résultats des simulations seront comparés à ceux obtenus expérimentalement. La réalisation de "vrais" capteurs de présence fonctionnant à température ambiante et à faible coût ouvriront des perspectives d'application très étendues.

ii) L'intégration des communications sans fil.

Les communications sans fil présentent un intérêt majeur dans l'intégration des systèmes autonomes communicants et les domaines d'application sont très nombreux :

- la domotique : gestion de l'énergie, surveillance comportementale de personnes,
- le médical : surveillance ambulatoire des paramètres physiologiques: ECG, pouls, tension...
- l'automobile : mutualisation des ressources entre des éléments intégrés à l'habitacle,
- la robotique : télécommande de robots mobiles en milieux hostiles,
- le génie civil : suivi de l'évolution de grandeurs physiques (température, pression, humidité, gaz...).

Notre contribution scientifique a porté sur l'étude et l'intégration de systèmes radiofréquences.

Notre approche a visé à rechercher des solutions flexibles grâce à la mise en place de plateformes de développement et d'évaluation.

Deux aspects ont été abordés :

- le premier aspect est celui du **prototypage virtuel** : à partir de la définition précise des spécifications fonctionnelles et techniques du système, nous avons effectué des travaux de modélisation et de simulation comportementale (logiciel SABER). Une communication radiofréquence à 2,4 GHz a été retenue. Celle-ci applique la technique de l'étalement de spectre particulièrement appropriée pour des applications en environnement *indoor*. Les avantages sont nombreux : immunités aux interférences et aux multi-trajets, fonctionnement en multi-utilisateurs. La chaîne radiofréquence (émetteur/récepteur) proposée permet l'adaptation du débit en fonction du type de données à transmettre. Comparée aux modèles théoriques, elle a été complètement validée. Des modèles et des outils de mesure ont été élaborés pour l'évaluation des performances. Les principaux étages numériques du système ont été étudiés et intégrés dans un circuit ASIC (code VHDL). Une plate-forme de test basée sur un circuit FPGA a été mise en oeuvre pour caractériser l'ASIC : fréquences, débits, puissance consommée.

- le deuxième aspect concerne **l'intégration de composants Bluetooth** : Bluetooth n'est certes pas la seule technologie disponible pour les connexions locales sans fil (IrDA⁵⁶, UWB⁵⁷ radio, Home RF) mais elle semble être une solution très intéressante et adaptée. Elle peut être envisagée de part son faible coût, ses petites dimensions, sa faible consommation dans une multitude d'applications où la mobilité est la contrainte principale. Un effort important a dû être consenti pour correctement maîtriser le fonctionnement des couches physiques mais également protocolaires utilisées par cette technologie.

Une première plate-forme de conception modulaire a été constituée. Grâce à des mesures mettant en évidence certaines limites dans la communication synchrone de données numériques, nous pouvons actuellement proposer des solutions flexibles pour des applications embarquées à fortes contraintes temporelles. Ces solutions reposent sur la réalisation d'interfaces matérielles spécifiques pour les signaux PCM entre un module complet Bluetooth et un système hôte. Des outils logiciels de modélisation ont d'ores et déjà été évalués. Actuellement, des idées originales basées sur la notion de relais sont proposées à partir de modules complets Bluetooth pour la réalisation de réseaux de transmission à portée étendue.

Une deuxième plate-forme reposant sur le circuit radio Bluetooth seul (PBA) et architecturée autour d'un microcontrôleur implémentant une couche physique Bluetooth dédiée, est proposée afin de profiter de ses performances intrinsèques (notamment un usage contrôlé et déterministe du saut de fréquence). On pourra envisager le couplage de cette plate-forme avec le module numérique ASIC déjà évoqué. Les applications potentielles en terme de rapport sécurisation des données - nombres d'utilisateurs dans le réseau sont dès lors vastes.

⁵⁶ IrDA : Infrared Data Association

⁵⁷ UWB : Ultra Wide Band

iii) La réalisation de démonstrateurs-systèmes.

Dans le domaine des applications domotiques, nous avons présenté deux démonstrateurs avec l'objectif de contribuer à l'émergence de concepts et de fonctionnalités supplémentaires pour un habitat intelligent. Ces exemples sont à la base de deux grands projets que nous menons et qui portent sur la surveillance du comportement des personnes âgées (projet PROSAFE) et sur la gestion intelligente du confort thermique dans l'habitat (projet ERGDOM). Ils ont servi de support pour la spécification des microsystèmes autonomes, communicants et ont permis de montrer la faisabilité de nouveaux concepts pour la commande de systèmes où "l'homme est dans la boucle".

Ces deux expérimentations ont reçu le soutien de contrats régionaux, nationaux ou industriels avec un partenaire privilégié : EDF R&D, qui nous a permis de progresser plus rapidement sur les définitions des concepts et des approches retenues. Le projet national TISSAD en est une parfaite illustration. Grâce à ces appuis, des architectures matérielles et logicielles modulaires et ouvertes ont pu être proposées et une méthodologie spécifique a pu être déployée : analyse de données, fusion de données, modélisation du comportement. Ces architectures ont été développées et testées dans des situations réelles.

PROSAFE est un système de surveillance pour les personnes âgées et dépendantes. Il s'apparente à des microsystèmes de mesure connectés à un processeur central pour l'aide à la décision. Le développement de ce système nous a conduit à prendre part à, voire à initier, la mise en place de groupes de travail pluridisciplinaires regroupant les techniques de l'ingénieur et les sciences médicales. Les développements ont été menés avec le souci constant d'adapter l'architecture matérielle et logicielle des solutions expérimentales implémentées aux besoins exprimés par les utilisateurs potentiels. Après plusieurs années d'investigation et de développement, nous avons pu formaliser, intégrer et valider une solution logicielle et matérielle permettant de surveiller automatiquement les personnes âgées. L'originalité de l'approche que nous avons adoptée est celle de se fonder sur l'usage des techniques d'apprentissage. On mémorise les modes de vie de la personne dans son milieu de vie et on suit les évolutions du comportement, et ce, par une localisation de présence spatio-temporelle. On constitue ainsi une base de données sur laquelle on greffe des fonctionnalités telles que :

- l'analyse des "habitudes" pour réaliser l'apprentissage et détecter les évolutions de comportement. Ces analyses pourraient permettre aux médecins d'évaluer de manière fiable les capacités motrices de leurs patients et de mettre en évidence l'évolution de certains troubles. Ils pourraient ainsi déterminer le seuil à partir duquel les risques de chute augmentent et nécessitent une surveillance accrue,

- la création d'un système automatique personnalisé de diagnostic et d'alarme lorsque, en temps réel, le mode de vie diffère trop des "habitudes" mémorisées dans la base d'apprentissage. Une méthode statistique par seuils basés sur l'expérience passée a été retenue dans un premier temps pour la détection de la chute, de la fugue et de l'agitation.

Tous les événements détectés sont mis en évidence à travers une IHM adaptée qui fait apparaître les informations relatives aux différentes situations (comportements, incidents, analyses, bilans...). Près de 800 fichiers de données issues de mesures *in-situ* nous permettent d'explorer par voie statistique des modèles de comportements typiques (événements, trajectoires, activités...).

L'approche adoptée dans ERGDOM est la même. Les travaux ont consisté à proposer et à développer une architecture matérielle-logicielle réalisant une gestion complexe automatique optimale du confort thermique fondé sur des commandes apprises et auto-adaptatives. Des techniques d'apprentissage ont été utilisées pour l'identification des habitudes de l'occupant : température de confort, horaires d'arrivée et de départ, circulations habituelles dans l'habitation... Sur cette base, le système délivre des consignes parfaitement adaptées au besoin pour autant que celui-ci soit conforme aux habitudes. Les commandes peuvent, le cas échéant, tenir compte des facteurs de coût comme les tarifs instantanés de l'énergie utilisée. Dans nos expérimentations en site

réel, trois modèles ont été principalement développés reposant sur des estimateurs de présence et de confort de l'occupant et de réponse thermique de l'habitat. Les expérimentations ont été réalisées sur une dizaine d'habitations en France grâce à la participation de deux partenaires industriels LEGRAND et DELTA-DORE. L'expérimentation en maison individuelle a duré deux saisons hivernales et a permis de valider complètement le concept proposé à plusieurs niveaux :

- validation technique détaillée règle par règle, qui revient à valider le fait que le produit est conforme au cahier des charges,
- validation opérationnelle et architecturale;
- démonstration d'efficacité du gestionnaire sous l'angle du confort et du coût et appréciation des utilisateurs.

Une version d'ERGDOM pour le secteur du tertiaire (bureaux collectifs) étendue à la gestion de la climatisation et ventilation a aussi été proposée et validée. Ces solutions technologiques, brevetées, sont en position de franchir l'obstacle de la recherche vers l'industrialisation. L'appui de EDF R&D a été prépondérant avec des partenariats industriels importants.

Les applications rentrent maintenant dans une phase où le traitement des données et le diagnostic sont essentiels. Des collaborations nouvelles se sont ouvertes sur la base de données considérable en volume qui intéressent de nombreux chercheurs compte tenu de la spécificité d'avoir l'"homme dans la boucle".

En résumé, durant ces années écoulées, nous avons conduit une activité de recherche au service du développement de microsystemes autonomes, répartis et communicants. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur une application privilégiée : l'habitat intelligent en travaillant selon trois axes d'efforts :

- la technologie des microsystemes dont le résultat le plus récent est celui de la conception d'un détecteur de présence nouveau centré sur la détection à thermopiles,
- le développement d'interfaces de communications adaptées à cette problématique des microsystemes répartis : prototype virtuel, protocole Bluetooth,
- les démonstrateurs ERGDOM et PROSAFE, où, au delà des questions de capteurs, nous avons développé une approche originale basée sur l'apprentissage des habitudes pour éviter l'inconfort de la programmation.

Pour conclure, à partir de notre expérience, nous pensons que les technologies nouvelles de la microélectronique et des microsystemes pour réaliser des systemes intégrés communicants sont disponibles. Elles permettent de concevoir de nouveaux produits plus complets possédant la capacité de communiquer dans un environnement en réseau.

Parmi les divers secteurs d'activités potentiels, nous avons retenu en premier lieu celui de l'habitat qui doit répondre à des fonctionnalités liées à la sécurité, à la santé et au bien-être des utilisateurs. Les motivations économiques (réduction des coûts) et techniques (intelligence, performances) sont énormes.

Aujourd'hui, la majeure partie des produits microsystemes sur le marché et en cours de développement sont des capteurs associés à une électronique de conversion et de traitement du signal. Notre objectif pour l'avenir sera de développer des systemes plus complexes ou plutôt plus complets c'est-à-dire des dispositifs intégrant à la fois des capteurs (éléments sensibles), l'électronique de traitement et éventuellement les actionneurs. Tout ceci devant fonctionner dans des architectures en réseau si possible sans fil. Mais le succès ne peut s'envisager sans des programmes de recherche et des concertations pluridisciplinaires répétées et approfondies. Aussi, il est nécessaire d'engager des travaux de recherche tant sur le plan technologique qu'au niveau des méthodes de conception et de caractérisation. Sur le plan applicatif, la réalisation de plates-formes de conception matérielle-logicielle adaptatives est souhaitable pour faire face aux évolutions des spécifications.

Enfin, malgré les difficultés récemment rencontrées, tous les experts s'accordent à donner un bel avenir aux télécommunications pour systèmes embarqués. Pour notre part, l'idée sera d'explorer les applications dans le domaine des réseaux locaux en préparant des expériences de démonstration mais aussi en participant à l'élaboration ou à l'amélioration des normes. Par l'expérience acquise lors de nos expérimentations, notre contribution au sein du groupe de travail du Club Télédomotis (cf. Partie 4, Annexes 2) s'est par exemple matérialisée par un projet de normalisation qui définit une architecture capable d'offrir un service qui assure l'interconnexion des solutions domotiques privées aux services de télécommunications proposés actuellement.

De manière générale, nous pensons qu'il est très important, parallèlement au développement des connaissances de base, d'être à l'écoute des besoins techniques pour pouvoir proposer des solutions adaptées et réalistes. C'est avec cette vision que nous avons répondu ponctuellement tout au long de nos travaux à des demandes industrielles parfois originales mais toujours enrichissantes et fédératrices en terme de domaines de compétences. C'est le cas de l'expérience très intéressante acquise lors d'un contrat industriel avec la société HUMIREL (cf. Partie 4, Annexes 2) pour la proposition et la mise en place d'une architecture globale d'un système intégré d'acquisition à distance de données issues de capteurs installés dans des ruches pour le contrôle de la production de miel.

II. PERSPECTIVES D'APPLICATION A D'AUTRES DOMAINES

L'émergence de ces nouveaux dispositifs en réseau et les possibilités que l'on peut déjà envisager grâce aux résultats obtenus, nous permettent de penser que de simples adaptations ouvriraient ces solutions initialement étudiées pour l'habitat, à des domaines d'application différents tels que la robotique, le domaine du génie civil ou le domaine aquatique.

C'est avec cette ambition que nous contribuons à l'encadrement de deux nouveaux travaux de thèse dans les deux derniers domaines cités.

II.1 MICROSYSTEME MULTICAPTEURS POUR DES MESURES DE GENIE CIVIL

Tous les travaux d'intégration que nous avons effectués jusqu'ici trouve dans la conception d'un microsystème multicapteurs communicant un point de convergence. C'est dans ce contexte que démarre actuellement le travail de thèse de R. MAURICE [T5].

Cette étude s'effectue dans le cadre d'une convention CIFRE entre le LAAS et EDF R&D (équipe systèmes et mesures) et a pour objectif de mettre à profit les expériences acquises dans les travaux précédemment présentés en vue d'applications élargies au domaine du génie civil.

Il s'agit de proposer et de développer un système modulaire de mesures embarquées se présentant sous la forme d'un microsystème multicapteurs sans fil autonome (figure 38).

Les mesures concernent la température, la pression, l'humidité et la déformation à la surface d'une paroi de béton précontraint protégeant un réacteur nucléaire.

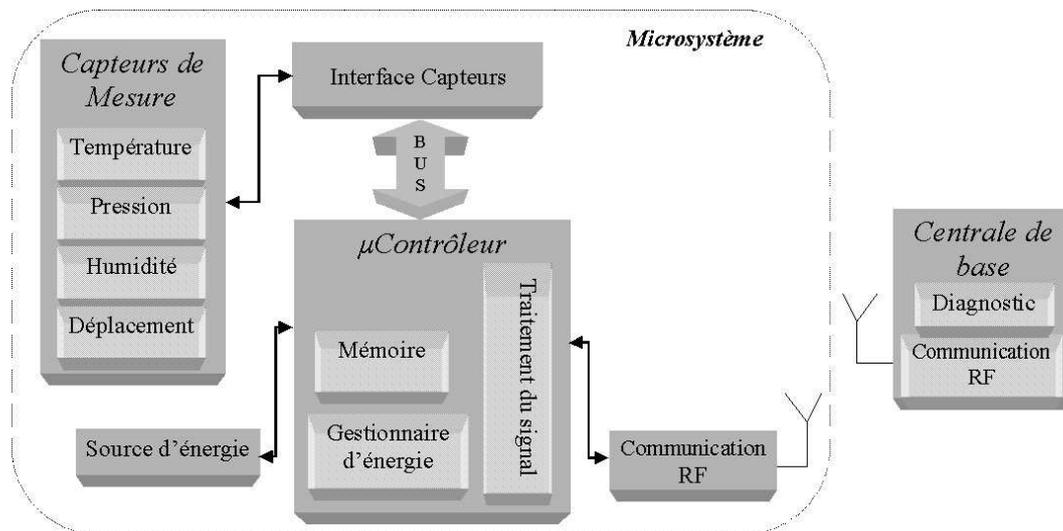


Figure 38. *Microsystème communicant pour la mesure multicapteurs.*

Il s'agit d'effectuer tout d'abord une étude bibliographique poussée sur les capteurs ou microcapteurs qui seront utilisés ou développés (principe de fonctionnement, technologie, intégration), sur la gestion de l'énergie (contraintes d'une faible consommation) et sur la communication à distance (protocole utilisé, limitations technologiques : fréquence, portée, nombre de points....).

Dans une deuxième phase, une étude technique portera sur la définition d'un cahier des charges précis et sur la faisabilité du dispositif tenant compte des technologies d'assemblage disponibles au laboratoire.

Enfin, l'utilisation d'outils logiciels devra permettre le prototypage virtuel de l'ensemble du dispositif avant la réalisation et le test du dispositif suivant une démarche de conception descendante. Une architecture réutilisable SOC (System On Chip) sera envisagée.

II.2 RESEAU LOCAL DE COMMUNICATION POUR LE MILIEU AQUATIQUE

Nous voyons bien que les solutions techniques proposées pour les microsystèmes communicants peuvent s'ouvrir, sous la condition d'une certaine adaptation, à d'autres champs d'application.

En effet, les études radiofréquences menées jusqu'ici sont basées sur des couches physiques radio utilisant l'interface air. Dans ce domaine, des outils et des méthodes d'ingénierie ont été développés. La propagation du signal dans l'air impose des contraintes au niveau de la transmission du signal (puissance, codage, protocole...) dues entre autres aux perturbations, atténuation ou multitrajets du signal émis. Ces phénomènes peuvent se retrouver sous d'autres aspects dans des milieux différents tels que le milieu aquatique. C'est l'objectif de la thèse de A. BOUZOUALEGH [T6] que je co-encadre (aspect couche physique) avec deux autres membres de l'équipe ICARE (aspect couches protocolaires et réseaux).

L'objectif est de proposer un système de communication local sans fil adapté à ce milieu. Pour cela, une architecture *ad-hoc* sera proposée et validée par prototypage virtuel et une maquette sera réalisée [MN8], [MI28,29].

Plusieurs applications potentielles sont identifiées : les systèmes domotiques pour les piscines (capteur et régulation de Ph, capteurs de température, surveillance de baignade, nettoyage par robot...), les applications militaires (hommes-grenouilles, sous-marins de poche, mines...) ou l'étude des fonds sous-marins.

SYSTEMES ET MICROSYSTEMES MULTICAPTEURS COMMUNICANTS

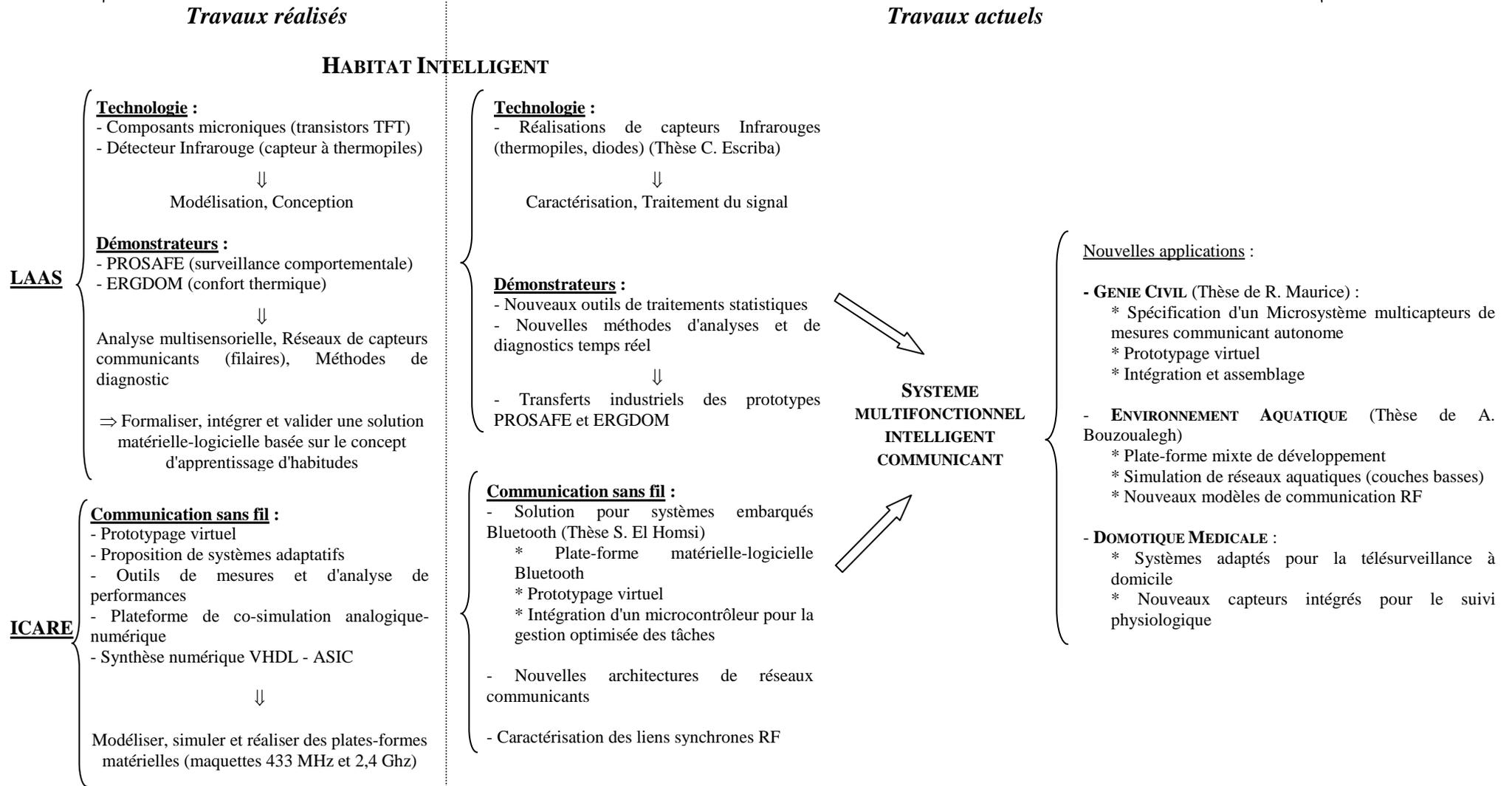


Figure 39. Résumé des thèmes abordés et perspectives d'application.

PARTIE 2

BIBLIOGRAPHIE, CONTRATS

ENCADREMENTS

ANNEXE 1

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] P. TAURINES
 "Faisabilité de structures MOS sur films minces de Si-LPCVD par procédé technologique à basse température (600°C)"
Thèse de Doctorat en Electronique, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, n°168, 125p., octobre 1991.
- [2] J.J. PEDROVIEJO
 "Films de silicium déposés par LPCVD à partir de disilane : Mécanismes de dépôt, propriétés et aptitude à la réalisation de transistors sur films minces"
Thèse de Doctorat en Electronique, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, n°233, 119p., avril 1993.
- [3] F. VOLKLEIN ET H. BALTES
 "Optimization tool for the performance parameters of thermoelectric microsensors"
Sensors and Actuators A:Physical, Vol. 36, Issue 1, Elsevier, pp. 65-71, mars 1993.
- [4] M. MORENO
 "Uncooled low-cost CMOS integrated bulk micromachined thermopile infrared imaging array"
 Proposition d'étude dans le cadre du projet européen "Impact".
- [5] C. CALAZA, L. FONSECA, M. MORENO, S. MARCO, C. CANE ET I. GRACIA
 "Miniaturised Gas Analysis System based on Silicon MOEMS"
 Rapport interne, Laboratoire CNM (groupe IMB-CSIC), Barcelone, Espagne, 2001.
- [6] M. RUBEINSTEIN
 "Domotique et bâtiments intelligents"
Techniques de l'ingénieur, traité Construction, C3780, pp. 1-20, 1990.
- [7] T. VAL
 "Etude d'un réseau local industriel permettant l'interconnexion de stations fixes et de stations mobiles"
Thèse de doctorat en informatique, Université Blaise-Pascal II, Clermont-Ferrand, 1994.
- [8] R. KOHNO, R. MEIDAN ET L. B. MILSTEIN
 "Spread Spectrum Access Method for Wilres Communications"
IEEE Communications magazine, pp. 58-67, janvier 1995.
- [9] K PAHLAVAN
 "Wireless communication for office information network"
IEEE Communications magazine, Vol. 23, pp. 19-28, Juin 1985.
- [10] P.W. BAIER, P. JUNG ET A. KLEIN
 "Taking the Challenge of Multiple Access for Third-Generation Cellular Mobile Radio Systems – A European View"
IEEE Communications magazine, pp. 82-89, Février 1996.
- [11] R.L. PICKHOLTZ, D.L. SCHILLING ET L.B. MILSTEIN
 "Theory of spread-spectrum communications - A tutorial"
IEEE Trans. Commun., Vol. Com-30, pp. 855-884, Mai 1982.

- [12] P. NOBLES, D. ASHWORTH ET F. HALSALL
 "Propagation measurements in an indoor radio environment at 2.5 GHz, and 17 GHz"
Proc. IEE Colloq. 'High Bit Rate UHF/SHF Channel Sounders-Technol. Meas., London, U.K., pp. 4/1-4/6, 1993.
- [13] THE OFFICIAL BLUETOOTH WEBSITE FROM SIG GROUP : www.bluetooth.com, Date viewed, *Bluetooth Specification Version 1.1*, 21 mars 2001.
- [14] BLUETOOTH COMMITTEE, *Specifications of the Bluetooth System (Core)*, V1.0B, décembre 1999.
- [15] ERICSSON MOBILE COMMUNICATIONS AB, *User Manual-Bluetooth PC Reference Stack*, 1543 VNX 2/901 184 U en Version R1a, avril 2000.
- [16] J. HAARSTEN
 "Bluetooth-the universal radio interface for ad-hoc wireless connectivity"
Ericsson Rev., Vol. 77, 3, pp. 110-117.1-5, 1998.
http://www.ericsson.se/Review/er3_98/art1/art1.html
- [17] J. HAARTSEN ET C. JAAP
 "The Bluetooth Radio System"
IEEE Personal Communications, Vol. 7, 1, pp. 28-36, février 2000.
- [18] J. WAKEFIELD
 "Bluetooth: what is the potential ?"
Analysts Disagree, ZDNet UK News, avril 1999.
<http://www.zdnet.co.uk/news/1999/14/ns-7758.html>
- [19] ERICSSON MICROELECTRONICS, ROK 101007 *Bluetooth Module Datasheet Rev.*, PA5, avril 2000.
- [20] PIC16F877 Microchip Technology Inc. DS 30292A, www.microchip.com, 1998.
- [21] T. VAL ET G. JUANOLE
 "Développement d'applications de Métrologie pour le WPAN Bluetooth"
Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles, CFIP'02, Montréal, mai 2002.
- [22] O. KASTEN ET M. LANGHEINRICH
 "First Experiences with Bluetooth in the Smart-Its Distributed Sensor Network"
Proceedings PACT 2001, Workshop on Ubiquitous Computing and Communications, octobre 2001. <http://www.smart-its.org>.
- [23] R.G. LOGSDON, L. TERI, S.M. MCCURRY, L.E. GIBBONS, WA KUKULL, E.B. LARSON
 "Wandering: a significant problem among community-residing individuals with Alzheimer's disease"
Journal of Gerontology & Psychology Science, Social Science, Vol. 53, n°5, pp. 294-299, septembre 1998 .
- [24] J. COHEN-MANSFIELD, P. WERNER, W. CULPEPPER, M. WOLFSON ET E. BICKEL
 "Assessment of ambulatory behavior in nursing residents who pace or wander: a comparison of four commercially available devices"
Dementia and Geriatric Cognitive Disorders, 8(6), pp. 359-365, 1997.

- [25] E.J.W. VAN SOMEREN
 "Actigraphic monitoring of movement and rest activity rhythms in aging Alzheimer's disease and Parkinson's disease"
IEEE Transaction on Rehabilitation Engineering, 5(4), pp. 394-398, 1997.
- [26] K.D. MELILLO ET M. FUTRELL
 "Wandering and technology devices"
Journal of Gerontological Nursing, 24(8), pp. 32-38, 1998.
- [27] M. GRAFSTRÖM ET B. WINBLAD
 "Family burden in the care of the demented and nondemented elderly – a longitudinal study"
Alzheimer Disease and Associated Disorders, 9(2), pp. 78-86, 1995.
- [28] E.D. RANKIN, M.W. HAUT ET R.W. KEEFOVER
 "Clinical assessment of family caregivers in dementia"
The Gerontologist, pp. 813-821, 1992.
- [29] S. BAILLON, G. SCOTHERN, P.G. NEVILLE ET A. BOYLE
 "Factors that contribute to stress in care staff in residential homes for the elderly"
International Journal of Geriatric Psychiatry, 11, pp. 219-226, 1996.
- [30] M.C. CHENIER
 "Review and analysis of caregiver burden and nursing home placement"
Geriatrics Nursing 18(3), pp. 121-126, 1997.
- [31] M. GRAFSTRÖM ET B. WINBLAD
 Family burden in the care of the demented and nondemented elderly – a longitudinal study,
Alzheimer Disease and Associated Disorders 9(2), pp. 78-86, 1995.
- [32] D.L. ALGASE, B. KUPFERSCHMID, C.A. BEEL-BATES ET E.R. BEATTIE
 "Estimates of stabilities of daily wandering behavior among cognitively impaired long-term care residents"
Nursing Research, 46(3), pp. 172-178, 1997.
- [33] C.P. POLLACK, P.E. STOKES ET D.R. WAGNER
 "Nocturnal interactions between community elders and caregivers as measured by cross-correlation of their motor activity"
Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology 10(4), pp. 168-173, 1997.
- [34] G. KOCHERSBERGER, E. MCCONNELL, M.N. KUCHIBHATLA ET C. PIEPER
 "The reliability, validity, and stability of a measure of physical activity in the elderly"
Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 77(8), pp. 793-799, 1996.
- [35] D. MARTINO-SALTZMAN, B. B. BLASCH, R. D. MORRIS ET L. WYNN MCNEAL
 "Travel behavior of nursing home residents perceived as wanderers and non wanderers"
The Gerontologist, 31(5), pp. 666-672, 1991.
- [36] I. HARITAOGU, D. HARWOOD ET L. S. DAVIS
 "W4: Real-Time Surveillance of People and Their Activities"
IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(8), pp. 809-830, 2000.
- [37] Y. RICQUEBOURG ET P. BOUTHEMY
 "Real-Time tracking of Moving Persons by Exploiting Spatio-Temporal Image Slices"
IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence 22(8), pp. 797-808, 2000.

- [38] M. J. FISK
 "Telecare equipment in the home. Issues of intrusiveness and control"
Journal of Telemedicine Telecare, Vol. 3, pp. 30-32, 1997.
- [39] R. MCSHANE, T. HOPE ET J. WILKINSON
 "Tracking patients who wander: ethics and technology"
Lancet, 343, pp. 1274, 1994.
- [40] S. BJORNEBY ET A. VAN BERLO
 "Ethical Issues in Use of Technology for Dementia Care"
Knegsel: Akontes Publishing, 1997.
- [41] A. VAN BERLO
 "A smart model house as research and demonstration tool for telematics development"
Proc. 3rd TIDE Congress : Technology for Inclusive Design and Equality Improving the Quality of Life for the European Citizen, 23–25 June, Helsinki, Finland, 1998.
- [42] M. J. RODRIGUEZ, M. T. ARREDONDO, F. DEL POZO, E. J. GOMEZ, A. MARTINEZ ET A. DOPICO
 "A home telecare management system"
Journal of telemedecine and telecare, Vol. 1, pp. 86-94, 1995.
- [43] N. NOURY, T. HERVE, V. RIALLE, G. VIRONE ET E. MERCIER
 "Monitoring behavior in home using a smart fall sensor and position sensors"
IEEE-EMBS "Microtechnologies in Medicine & Biology ", Lyon-France, 2000.
- [44] V. RIALLE, N. LAUVERNAY, A. FRANCO, J.F. PIQUARD ET P. COUTURIER
 "A smart room for hospitalised elderly people: essay of modelling and first steps of an experiment"
Journal of Technology and Health Care, 7, pp. 343-357, 1999.
- [45] A. SIXSMITH
 "New technology and community care"
Health and Social Care, 2, pp. 367-378, 1994.
- [46] P. TANG ET T. VENABLES
 "Smart homes and telecare for independent living"
Journal of Telemedicine Telecare, 6 (1), pp. 8-14, 2000.
- [47] M. OGAWA ET T. TOGAWA
 "Attempt at Monitoring Health Status in the Home"
 In *Proceedings of the 1st International IEEE-EMBS Special Topics Conference on Microtechnology*, pp. 552-556. Lyon, France, Ed: A. Dittmar et D. Beebe, 2000.
- [48] T. TOGAWA, T. TAMURA, M. OGAWA ET M. YODA
 "Home health monitoring for the elderly"
 In *Proceedings of ICBME '95 et ISMRE'95*, pp. 51-52, 1998.
- [49] B.G. CELLER, T. HESKETH, W. EARNSHAW ET E. ILSAR
 "An instrumentation system for the remote monitoring of changes in functional health status of the elderly at home"
 In *N.F. Sheppard, M. Eden et G. Cantor*, 2, pp. 908-909. New York : Eds IEEE, 1994.

- [50] P.H.F. PEETERS
 "Design criteria for an automatic safety-alarm system for elderly"
Technology and Health Care, 8, pp. 81-91, 2000.
- [51] P. Y. DURAND *et al.*
 "Diatélic : a new intelligent telemedicine system to avoid disorders in CAPD patients"
Perit Dial Int, Vol. 20 (Suppl 1), 2000.
- [52] R. EL DAJANI, M. MIQUEL ET P. RUBEL
 "Approach for predicting and modeling the dynamical behavior of cardiac ventricular repolarisation"
6th International Work-Conference on Artificial and Natural Neural Networks, J. Mira et A. Prieto (eds): IWANN 2001, Lecture Notes in Computer Science 2085, pp. 377-384, 2001.
- [53] D. ESTEVE, B. JAMMES, A. TITLI, M. GONZALEZ-MENDOZA ET A. SANTANA-DIAZ
 "Hypovigilance diagnosis module: developments and experiments"
 Contrat AWAKE, n°IST-2000-28062, 16pp. , septembre 2002.
- [54] P. TORCELLINI, R. SHOURESCHI ET K. RAHMANI
 "Intelligent Occupant Control System"
Intelligent Control Systems, Vol. 45, ASME, 1992.
- [55] J. HABERL ET D. CLARIDGE
 "An expert system for building energy consumption analysis: prototype results"
ASHRAE Trans., Symp., 93 (1), pp. 979-998, 1987.
- [56] A. GUILLEMIN ET N. MOREL
 "An innovative lighting controller integrated in a self-adaptive building control system"
Energy and Build. Vol. 33, 2001.
- [57] A.I. DOUNIS, M.J. SANTAMOURIS, C.C. LEFAS ET A. ARGIRIOU
 "Design of a fuzzy set environment comfort system"
Energy and Build., Vol. 22, pp. 81-87, 1995.
- [58] N. BAILLY ET D. ESTEVE
 "Procédé de gestion d'énergie auto-configurable pour l'habitat"
 Brevet AVIS, INPI n°9706870 du 4 juin 1997.
- [59] Rapport interne EDF R&D
 "Le gestionnaire d'énergie ERGDOM : retour d'expérience sur les usages"
 Equipe GRETS, HE-71/2001/012/A, 2001.
- [60] F. BENARD ET J.P. SCOTTO
 "Gestionnaire autoconfigurable ERGDOM : Bilan final de l'expérimentation du prototype tertiaire sur site réel"
 Rapport Interne EDF R&D, Groupe Domotique, Immotique, Services, HE-18/01/015/A, Novembre 2002.

ANNEXE 2

CONTRATS DE RECHERCHE

Cette partie a pour objectif de lister les responsabilités prises dans les différents contrats de recherches académiques (régionaux, nationaux, et européens) et industriels auxquels nous avons participé.

Ces contrats ont été établis avec l'équipe ICARE et/ou le LAAS et ont fortement contribué à l'avancée de nos travaux.

Enfin, nous avons fait figurer les montants budgétaires alloués pour chaque projet ainsi que les publications associées.

I. PROJETS CONTRACTUELS ACADEMIQUES ET INDUSTRIELS

I.1 REGIONAUX :

✓ 1995-1996 : Programme de recherche méthodologique pour la mise en place d'une technologie de suivi des personnes âgées

Déposé par l'INSERM sur les bases d'un projet antérieur, l'idée a été de mettre en œuvre une réalisation expérimentale. Il s'agissait de compléter les recherches méthodologiques de mise en place de réseau multicapteurs et de traitement de bases de données par des recherches orientées plus particulièrement vers les sciences sociales et humaines pour analyser et comprendre comment la personne âgée intègre ou non l'habitat ainsi instrumenté. Ce projet a associé l'INSERM (CJF94-06), le LAAS, le CERPP (université Toulouse II).

Responsabilité : Co-Responsable régional du projet.

Financement obtenu : 15 K€ sur 1 an.

Publications : [R16].

✓ 1996-1998 : Programme de recherche méthodologique pour la mise en place d'une technologie de suivi des personnes âgées – ESCAPE

La 2^{ème} et 3^{ème} année du projet précédent se sont déroulées dans le cadre du programme transpyrénéen (CTP⁵⁸) mis en place par le conseil régional. Ceci a nécessité la mise en place d'une équipe de travail pluridisciplinaire associant pour la région Midi-Pyrénées (France) : l'INSERM, des équipes de psychologues et sociologues (université du Mirail-Toulouse), des hôpitaux, ICARE et le LAAS en France, et pour la région d'Aragon (Espagne) : l'Institut Technologique d'Aragon (ITA) et la société Bioingenieria A.

Cette étude a fait suite à la mise en place d'une technologie domotique intelligente de surveillance de personnes âgées et handicapées par l'étude de l'architecture multicapteurs et le développement de méthodes d'apprentissages. La contribution des partenaires espagnols consistait à développer un système de localisation et d'identification embarqué sur des personnes.

Responsabilité : Coordonnateur général du projet.

Financement obtenu : 20 K€ sur 2 ans.

Publications : [R9], [R10], [PI2].

⁵⁸ CTP : Communauté de travail TransPyrénéenne

✓ **1998-2000 : Programme de recherche intelligence artificielle et personnes âgées dépendantes**

Ce travail a continué d'associer les équipes du LAAS et de l'INSERM de Toulouse pour une implémentation et une première évaluation du système de surveillance automatisée sur site réel. Il s'agissait en outre d'élargir les conditions d'utilisation du dispositif. Les sites retenus ont été le centre de long séjour de l'hôpital de Muret et le service gérontologique clinique de Casselardit de l'hôpital Purpan de Toulouse. Le système a été testé sur des personnes âgées souffrant de dépendances diverses.

Responsabilité : Co-Responsable du projet.

Financement obtenu : 30 K€ sur 2 ans.

Publications : [R15], [R22].

✓ **1998-2000 : Audio-guide, interactif et d'accès à l'information dans les lieux publics pour les non voyants - TESEO**

Ce projet piloté par nos partenaires espagnols dans le cadre du programme CTP a été engagé dans le souci de continuer la collaboration déjà existante entre les équipes ITA et ICARE.

Ce projet a eu pour but d'étudier, de concevoir et de réaliser un système d'audio-guidage permettant de délivrer une information vocale personnalisée et interactive dans les lieux publics et les musées, notamment pour les non-voyants. Nos travaux visaient à concevoir et à développer les capteurs d'émission et de réception infrarouges reposant sur des standards existants.

Responsabilité : Co-Responsable régional du projet.

Financement obtenu : 15,2 K€ sur 2 ans.

Publications : [R11], [R19].

I.2 NATIONAUX

✓ **2000 - 2002 : Projet TIISSAD**

Le projet national TIISSAD (Technologies de l'Information Intégrées aux Services des Soins A Domicile) regroupait plusieurs laboratoires CNRS et organismes publics (hôpitaux, universités, industriels) d'expériences et de compétences complémentaires dans le domaine de la technologie pour la santé.

Cette étude a été soutenue par le MENRT⁵⁹ dans le cadre du Réseau National des Technologies pour la Santé (RNTS).

Ce consortium (LORIA de Nancy, CHU de Lyon, U 558 INSERM et LAAS de Toulouse, TIMC de Grenoble et quelques industriels) a eu pour objectif d'une part, d'apporter des solutions innovantes à la Télé-assistance :

- des personnes âgées,
- de certains cardiopathes,
- et des dialysés à domicile.

et d'autre part, d'identifier des modèles et des solutions architecturales génériques, modulaires et ouvertes.

⁵⁹ MENRT : Ministère de l'Education Nationale, de la Recherche et de la Technologie

Il avait également des objectifs médicaux spécifiques aux pathologies précédemment citées, qui allaient du développement de capteurs et de systèmes intelligents à des expérimentations dans la télésurveillance des malades atteints de ces pathologies.

Notre travail a consisté à contribuer au développement de méthodes de suivi pour le maintien à domicile des personnes âgées par la mise en place d'une plate-forme montrant les fonctionnalités du système.

Ces travaux sont présentés dans le Chapitre 4 (III.4.3).

Responsabilité : Co-Responsable du projet pour le pôle toulousain.

Financement obtenu : 30,50 K€ sur 2 ans.

Publications : [O1], [MI20], [MI21], [MN5], [R25], [R27].

✓ **2003 - 2005 : *Projet PROSAFE (2)***

L'élaboration de ce projet national RNTS, dans le thème Maintien à Domicile, consiste à franchir l'étape finale pour une valorisation et un transfert industriel du système PROSAFE développé au cours de ces différents travaux de recherche (Chapitre 4, II.5).

Il associe le LAAS pour les aspects de diagnostics temps réel à un fabricant de capteurs infrarouges et à EDF R&D pour les aspects valorisation et offre de services. Cette étude est motivée par la nécessité de proposer un système technique complet et ouvert de surveillance, conçu pour être de coût maîtrisé, compatible avec un véritable développement industriel.

Responsabilité : Responsable du projet.

Financement obtenu : 108 K€ sur 2 ans.

I.3 INDUSTRIELS

✓ **1998-2002 : *Projet ERGDOM***

Ce projet portait sur une collaboration entre EDF R&D (groupe habitat) et le LAAS. Il a consisté à proposer et développer un système de gestion thermique de l'habitat.

Le principe et les résultats ont été présentés dans le Chapitre 4 (IV). Ce projet a associé les sociétés DELTA-DORE et LEGRAND et a atteint actuellement l'étape de transfert industriel. Ces travaux ont donné lieu à 2 brevets LAAS-EDF dont 1 est en cours.

Responsabilité : Responsable local du projet.

Financement EDF : 245 K€.

Publications : [B5], [PI6], [RN6], [R8], [40].

✓ **1997 et 1998 : *Projet Télédomotis***

Deux contrats d'étude entre l'équipe ICARE et le CNET (actuellement France-Télécom R&D) ont été engagés avec l'objectif pour France Télécom d'étudier et de proposer un système de communication WAN associé à un service d'accès à l'habitat.

Ces études ont consisté pour notre part à contribuer :

- à l'élaboration d'une nouvelle norme de transmission de données sécurisée à distance (Interface Télédomotis) dont l'applicatif était la surveillance de personnes âgées,
- à la conception d'une interface (Améris) de téléservice appliqué à un réseau domotique.

Ces travaux avaient la volonté de permettre une surveillance à distance de personnes en offrant un haut niveau de sécurisation pour le transfert des données.

Dans ce cadre, nous avons participé au groupe de travail "Télédomotis" organisé par le CNET regroupant un nombre important d'acteurs industriels de la domotique et consistant à définir de manière normative les caractéristiques précises de l'interface générique (référence UTE U215/SC25). Nous avons participé à la réalisation, dans une deuxième phase, d'une maquette de l'interface répondant aux exigences de la norme ainsi définie.

Responsabilité : Co-Responsable du projet.

Financement obtenu : 30,5 K€ sur 1 an.

Publications : [N1], [MI18], [RN2], [RN3], [R18].

✓ **2000 : *Projet MAIA***

Le projet MAIA (Moniteur d'Acquisition d'Informations sur les Abeilles) en partenariat avec la société HUMIREL⁶⁰ (Toulouse) pour le compte de la société Bernard Michaud⁶¹ (Pau) a impliqué tous les membres permanents de l'équipe ICARE.

Issu d'une demande industrielle spécifique, ce projet consistait à développer un système de surveillance à distance de l'activité des abeilles. HUMIREL avait en charge la conception des capteurs (humidité, poids, son, température) alors que nous devions proposer une architecture complète communicante sans fil.

Cette architecture devait assurer l'acquisition des données associant une station de base (ruche fictive) à des stations mobiles (ruches réelles équipées de capteurs) ainsi qu'un centre distant à la station de base.

Dans ce cadre, nous avons développé un module de réception HF (433 MHz) basé sur un circuit intégré de MOTOROLA et un dispositif d'économie d'énergie. L'équipe ICARE était également en charge de la programmation d'un processeur permettant le stockage et l'émission sécurisés des données vers un poste distant via une liaison GSM.

Nous avons enfin participé à l'installation et aux tests sur site des dispositifs ainsi conçus.

Les résultats très satisfaisants ont été valorisés par le dépôt d'un brevet national et d'un brevet international commun (HUMIREL - ICARE UTM - Société B. Michaud).

Responsabilité : Coordonnateur académique du projet et Responsable du développement électronique.

Financement obtenu : 7,6 K€ sur 6 mois.

Publications : [B1], [B2].

✓ **2002 : *Projet d'étude spécifique : Capteur de Présence***

Ce projet LAAS financé par EDF R&D porte sur la proposition et l'évaluation de capteurs de présence basés sur la technique bolométrique et la technique pyroélectrique. L'application visée est la détection de présence dans l'habitat. Cette étude fait suite aux conclusions du projet ERGDOM indiquant les limites constatées sur la détection des capteurs infrarouges utilisés (Chapitre 2, III).

Responsabilité : Responsable du projet.

Financement obtenu : 18 K€ sur 6 mois.

Publications : [B4], [MN7], [R23], [R26], [R30], [R32].

⁶⁰ HUMIREL : <http://www.humirel.fr>

⁶¹ Bernard Michaud (Apiculteur) : <http://www.lunedemiel.fr>

✓ **2002 : *Projet PROSAFE***

Ce contrat d'étude PROSAFE (PRO SAFety and Follow-up for the Elderly) (Chapitre 4, III.5) a associé le LAAS et EDF R&D et a porté sur la mise en place d'un système de surveillance dans 3 pièces de vie d'une maison d'accueil pour personnes âgées à Charron (près de la Rochelle).

Les expérimentations ont été réalisées sur une période de huit mois avec le concours du personnel médical de la maison d'accueil.

L'objectif était d'une part, de conforter et de valider les algorithmes de fusion multisensorielle développés jusqu'à ce jour grâce à une analyse d'expertise médicale, et d'autre part d'élaborer la génération automatique d'alarme en temps réel en cas d'événements caractérisés comme anormaux (chute, séjour prolongé dans la salle de bain, fugue...).

Une Interface IHM répondant aux besoins exprimés des utilisateurs (personnel médical) a été conçue et implémentée.

Le système a été validé dans son ensemble et a permis de recueillir une base de données importante pour les développements à venir.

Des rapports de modélisation et de spécifications (matériel et logiciel) ont été rédigés.

Responsabilité : Responsable du projet.

Financement obtenu : 40,55 K€ sur 8 mois (96,20 K€ coût total du projet entre LAAS et EDF).

Publications : [B3], [MI26], [R28], [R29], [R33].

✓ **2003 : *Projet ADEME : Gestionnaire d'énergie auto-configurable pour l'habitat***

Ce contrat d'étude associe le LAAS, EDF R&D et la société DELTA-DORE et a pour objectif de concevoir, d'évaluer et de rechercher des voies de valorisation du gestionnaire ERGDOM (étendu au chauffage gaz, à la ventilation et à l'éclairage). Nous participons à la recherche de capteurs de présence adaptés et à l'optimisation du nombre de ceux-ci dans l'installation. Une analyse des coûts est également envisagée.

Responsabilité : Partenaire du projet (aspect instrumentation).

Financement obtenu : 10 K€ (total 26 k€ demandés) sur 6 mois.

I.4 RESEAUX NATIONAUX ET EUROPEENS

I.4.1 Réseau National

Nous participons à la constitution d'un réseau national sur l'habitat intelligent. Ce réseau regroupe différentes entités et organismes (laboratoires, instituts universitaires et médicaux, hôpitaux, sociétés, associations). Le public cible est celui de la surveillance et de l'aide aux personnes âgées avec un objectif de confort et de maintien à domicile. Ce réseau devra répondre de façon concertée à des actions de recherche spécifiques.

I.4.2 Réseau Européen

Nous sommes impliqués comme partenaires potentiels dans trois Réseaux d'Excellence Européens EoI :

- ***SHoNE : Smart Home and Networks for Elderly Citizens***

Thème : Réseau d'excellence.

Pilote : Université de Technologie de Troyes.

- AIFA : Autonomous Life For All

Thème : FP6 Projet Intégré.

Pilote: EDF R&D.

- CareWell : Dynamic Healthcare Provision Through Continuous Wellbeing and Independence Assessment

Thème : Réseau d'excellence.

Pilote : BTextact Technologies (GB).

Les trois propositions portent sur la prévention des risques encourus par les personnes âgées dans leur domicile.

Les travaux concernent ainsi l'élaboration d'une solution technique complète, fiable et non intrusive ainsi que l'implémentation de cette solution chez différents partenaires européens. Chacun d'entre eux apportant ses compétences dans un des trois domaines que sont :

- les systèmes d'acquisition des données (capteurs et réseaux de communication),
- l'environnement intelligent (algorithmes multisensoriels, méthodes de diagnostic temps réel),
- et réseau social et de santé (services, évaluation, alertes, interventions, éthique).

Notre niveau d'intervention se situe sur les deux premiers points cités.

Actuellement, dans le cadre du projet CareWell un groupe de partenaires dont nous faisons partie a été constitué et tente de rédiger une proposition de projet dans le cadre de l'appel d'offres européen "E-Health".

II- LIENS AVEC LA COMMUNAUTE SCIENTIFIQUE

Outre les liens tissés avec le monde académique et industriel dans le cadre des différents travaux de recherche présentés dans ce mémoire, nous avons participé :

- Au groupe de travail "Bioautonomie" dans le cadre de l'association BATIMIP (Bâtiment Intelligent en Midi-Pyrénées). Il s'agissait de mettre en place une structure adaptée pour l'accessibilité des personnes dépendantes aux services de proximité.
- Au groupe de travail sur les "transports" dans le cadre de l'IERSET (Institut Européen de Recherche sur les Systèmes Electroniques pour les Transports) ainsi que sur la réflexion au "projet 134" portant sur la caractérisation des liens physiques Bluetooth.

Un "projet 135 : Wireless" regroupant plusieurs partenaires industriels devrait faire suite au précédent en proposant des solutions techniques innovantes dans le domaine des transports notamment.

- Au groupe de travail "Télédomotis" organisé par France Télécom R&D dans le cadre du club "Périnuméris" dont l'objectif était de définir une interface générique pour interconnecter les principaux bus domotiques et réseaux de communications existants.

Nous avons également été :

- Reviewer d'articles de revues et de conférences (IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Journal of Material Science Letters, SCI Conference, congrès HealthCom).

- Contacté pour organiser et présider une session "Multisensor Communication Systems for Telemonitoring Applications" au congrès SCI2003 (*Systemics, Cybernetics and Informatics*), Orlando, USA.
- Membre de comités de programme et d'organisation de colloques :
 - Colloque National de Recherche Universitaire CNRIUT'97, qui a eu lieu en Mai 1997 à l'IUT B sous le haut patronage de la conférence des Présidents d'Université et de l'assemblée des Directeurs d'I.U.T.
 - HealthCom2002 "*4^{ème} International Workshop on Enterprise Networking and Computing in Health Care Industry*" à Nancy le 6 et 7 juin 2002.
- Membre SEE (Société des Electriciens et des Electroniciens) depuis 1997.
- Invité pour des présentations thématiques, d'ordre scientifique [PI1,2,5,6] et de vulgarisation [PI3,4].
- Candidat aux Concours Innovation organisés par l'ADERMIP en 2001 et 2002. Nous avons été sélectionné avec le projet de recherche PROSAFE pour le 21^{ème} concours en 2001.

ANNEXE 3

ENCADREMENTS SCIENTIFIQUES

Mes activités de recherche sont partagées depuis 1995 entre l'équipe ICARE et le LAAS avec des thèmes très complémentaires et font appel aux compétences et aux moyens scientifiques de chaque entité.

Dans ce cadre, je coordonne les activités en électronique sans fil (couches basses) menées dans l'équipe ICARE ainsi que les activités menées sur l'habitat intelligent au LAAS.

Co-Encadrements de Thèses

[T1] S. BOURDEL

Modélisation et simulation fonctionnelles d'un émetteur et d'un récepteur radiofréquence à étalement de spectre pour une application domotique.

Thèse de doctorat de l'INSA Toulouse

Mention Très Honorable avec félicitations du jury

Jury : M. Campo, M. Citerne, M. Estève, M. Khat, M. Martinez, M. Mercier, M. Rouzet

24 octobre 2000, LAAS-CNRS n°569, 189p.

Encadrement : E. CAMPO 100% (Dérogation accordée par le conseil scientifique de l'INSA).

Publications co-signées dans le cadre de la thèse : [RI5], [MI14,15,17], [MN2,3], [R12,14,18, 20, 21]

[T2] P. MELET

Conception et réalisation d'un circuit numérique spécifique à étalement de spectre pour système multicateurs en milieu clos.

Thèse de doctorat de l'Université Paul-Sabatier - Toulouse III

Mention Très Honorable

Jury : M. Andrieux, A. Cazarré, Y. Deval, P. Dupuy, L. Escotte, O. Garelli, G. Juanole, J.M. Nebus, M. Mercier, J.L. Noullet

14 décembre 2001, LAAS-CNRS n°01645, 190p.

Encadrement : L. ANDRIEUX 50%, A. CAZARRE 30%, E. CAMPO 20%

Publications co-signées dans le cadre de la thèse : [MI19,21], [MN6], [R13,17]

[T3] S. EL HOMSI

Conception d'un système communicant autonome basé sur Bluetooth : Application à la commande à distance de capteurs/actionneurs

Thèse de doctorat de l'Université du Mirail - Toulouse II

Soutenance prévue en octobre 2004

Encadrement : E. CAMPO 60%, T. VAL 30%, J.J. MERCIER 10%

Publications co-signées dans le cadre de la thèse : [MN6,7]

[T4] C. ESCRIBA

Conception et réalisation d'un capteur de présence thermopile dédié au domaine domotique

Thèse de doctorat de l'Université Paul-Sabatier - Toulouse III

Soutenance prévue en octobre 2004

Encadrement : E. CAMPO 80%, D. ESTEVE 20%

Publications co-signées dans le cadre de la thèse : [MN7], [R26,30,32]

[T5] **R. MAURICE**

Conception et réalisation d'un microsysteme multicapteurs embarqué dédié à des mesures de Génie Civil.

Convention CIFRE EDF R&D - LAAS-CNRS

Thèse de doctorat de l'INP - Toulouse III

Soutenance prévue en octobre 2005

Encadrement : E. CAMPO 80%, D. ESTEVE 20%

Publication co-signée dans le cadre de la thèse : [MN8]

[T6] **A. BOUZOUALEGH**

Contribution à la réalisation d'un système de communication local sans fil dédié au domaine aquatique.

Thèse de doctorat de l'Université du Mirail - Toulouse II

Soutenance prévue en octobre 2005

Encadrement : F. PEYRARD 40 %, E. CAMPO 30%, T. VAL 30%

Co-Encadrements de DEA

[D1] **A. NAZEM**

Etude de faisabilité d'un Système Intégré Multifonctions Communicant pour l'habitat.

Diplôme d'Etudes Approfondies en Electronique (option : Conception des Circuits Micro-électroniques et Microsystèmes)

Juin 1997, Université Paul-Sabatier - Toulouse III

Encadrement : E. CAMPO 50 %, L. ANDRIEUX 50%

[D2] **S. DE SOUZA**

Conception et réalisation des étages radiofréquences d'un émetteur et d'un récepteur fonctionnant à 2,4 GHz.

Diplôme d'Etudes Approfondies en Systèmes Electroniques

Juin 2000, Institut de formation d'ingénieurs C. FABRY, Marseille

Encadrement : L. ANDRIEUX 90%, E. CAMPO 10 %

[D3] **S. EL HOMSI**

Etude et mise en place d'une communication Bluetooth pour l'émission et la réception de données issues de capteurs.

Diplôme d'Etudes Approfondies en Electronique (option : Conception des Circuits Micro-électroniques et Microsystèmes)

Juin 2001, Université Paul-Sabatier - Toulouse III

Encadrement : E. CAMPO 70 %, T; VAL 30 %

[D4] **C. ESCRIBA**

Etude et faisabilité d'un capteur de présence de type bolométrique.

Diplôme d'Etudes Approfondies en Electronique (option : Conception des Circuits Micro-électroniques et Microsystèmes)

Juin 2001, Université Paul-Sabatier - Toulouse III

Encadrement : E. CAMPO 100 %

[D5] **S. LEQUATRE**

Etude et conception d'un système de communication adaptatif basé sur un circuit RF spécifique Bluetooth.

Diplôme d'Etudes Approfondies en Electronique (option : Télécommunications et Réseaux)

Septembre 2003, ENSEEIHT - Toulouse III

Encadrement : E. CAMPO 100 %

Co-encadrements DESS

[DES1] **L. MATHIVET**

Conception et développement d'une interface réseau Transveil2G - système multicapteurs.

Rapport de stage de DESS CAMSI, INPT - Option Conception et Architecture des Machines Informatique de l'ENSEEIHT, juillet 97.

[DES2] **H. VENTURA**

Recommandations pour l'interface utilisateur d'un système surveillance à distance de personnes âgées en institutions.

Stage de DESS Sciences Cognitives et Ergonomie, Université Toulouse II, 116p., septembre 2001.

Co-encadrements Ingénieurs

[I1] **J.P. SCOTTO DI RINALDI**

Projet ERGDOM

Contractuel : 1999 à 2002.

[I2] **J.C. HAMON**

Projet PROSAFE

Contractuel : 2001-2002.

Co-encadrements Elèves Ingénieurs

[EI1] **C. BES**

Développement d'une interface pour réseau LAN/WAN : maquette AMERIS de France Télécom.

Rapport de stage de 3^{ème} année Ingénieur - Option Ingénierie et Management des Réseaux de Télécommunications de l'Institut National des Télécommunications d'Evry, juillet 97.

[EI2] **O. NABOULET**

Conception et réalisation d'un générateur/récepteur de trames intégré dans un FPGA.

Stage 2^{ème} année ingénieur ESIGELEC, Mont St Aignan, 77p., septembre 2000.

[EI3] **L. KERDONCUFF**

Modélisation et simulation de bruits par synthèse de fonctions aléatoires dans une chaîne de communication radiofréquence.

Stage 3^{ème} année ingénieur ESME Sudria, Paris, 43p., août 2000.

[EI4] **S. LE GOFF**

Modélisation fonctionnelle de systèmes de synchronisation pour les transmissions à étalement de spectre.

Stage 2^{ème} année INP-ENSEEIH, Toulouse, 30p., août 2000.

[EI5] **R. LEHY**

Conception et mise au point d'un système de diagnostic appliqué à la surveillance de personnes âgées.

Stage de 3^{ème} année Ingénieur en Informatique, Ecole Centrale de Nantes, 32p., août 2001.

[EI6] **S. BONHOMME**

Conception et mise au point d'un système de diagnostic appliqué à la surveillance de personnes âgées.

Stage de 3^{ème} année Ingénieur IMERIR, Perpignan, septembre 2002.

[EI7] **P. Y. BESNARD**

Etude et réalisation d'une interface pour la transmission synchrone Bluetooth de données numériques.

Stage de 5^{ème} année Ingénieur INSA, Toulouse, juin 2003.

Co-encadrements Maîtrises

[M1] **Y. FABRE**

Simulation d'un modèle fort signal de transistor bipolaire pour une émission radiofréquence à l'aide du logiciel SABER.

Rapport de Maîtrise EEA, Université Paul-Sabatier, Toulouse, juillet 1998.

[M2] **F. NIVELLE**

Etude et simulation des principales fonctions de filtrage numérique et analogique dans une chaîne de communication radiofréquence

Maîtrise EEA, Université Paul-Sabatier - Toulouse III, Juillet 1999.

[M3] **E. PAYET**

Modélisation et simulation d'un étage amplificateur à haut rendement à l'aide de l'outil SABER

Maîtrise Physique, Université Paul-Sabatier - Toulouse III, Juillet 1999.

[M4] **C. MICHELLAND**

Simulation d'un émetteur/récepteur à étalement de spectre sous SABER : étude de l'influence du bruit sur la DLL

Maîtrise EEA, Université Paul-Sabatier - Toulouse III, Septembre 1999.

[M5] **L. DAUGE**

"Conception et mise en place d'un système de diagnostic appliqué à la surveillance de personnes âgées".

Stage de Maîtrise Physique, Université Paul-Sabatier, Toulouse, 25p., juillet 2001.

[M6] **F. GBEULI GNOBO**

Mise au point d'un programme d'acquisition de données issues de capteurs domotique sous Visual C++.

Stage de Maîtrise Physique, Université Paul-Sabatier, Toulouse, 12p., juillet 2001.

[M7] **R. GASPAR**

Conception d'une interface graphique adaptée à la surveillance de personnes âgées.
Stage de Maîtrise Physique, Université Paul-Sabatier, Toulouse, 17p., juillet 2001.

[M8] **G. THOONSEN**

Conception d'un outil de diagnostic temps réel pour la surveillance de personnes âgées.
Stage de Maîtrise Informatique, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, juillet 2003.

Ne sont pas reportés ici les nombreux stagiaires techniciens que nous avons encadré et qui ont participé aux développements de nos plates-formes de tests.

ANNEXE 4

LISTE DES PUBLICATIONS PERSONNELLES

Thèse

[Thèse] **E. CAMPO**,

"Procédés Thermiques Rapides RTA,O : Applications à la réalisation de transistors à films minces de silicium déposés à partir de Disilane"

Thèse 3^{ème} cycle de l'INSA Toulouse, 12 juillet 1993, n°250, 171p.

Contribution à ouvrage

[O1] J.P. THOMESSE, **E. CAMPO** *et al.*

"Télémédecine et e-santé". Vol. 13 de la collection "Informatique et Santé" dirigée par P. Degoulet et M. Fieschi, Paris, Springer-Verlag France. Chapitre 1, septembre 2002.

Revue internationale avec comité de lecture

[RI1] J.P. GUILLEMET, B. DE MAUDUIT, B. PIERRAGI, **E. CAMPO**, E. SCHEID

"Crystallization of amorphous thin LPCVD Si films: "in-situ" TEM measurement of grain growth rates".

Journal of Materials Science Letters, 12, pp. 910-915, 1993.

[RI2] **E. CAMPO**, E. SCHEID, D. BIELLE-DASPET, J.P. GUILLEMET

"Influence of rapid thermal and low temperature processing on the electrical properties of polysilicon thin film transistors"

IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, vol. 8, n°3, pp. 298-303, août 1995.

[RI3] **E. CAMPO**, T. VAL, J.J. MERCIER, D. ESTÈVE

"La surveillance multicapteurs dans l'habitat : application à la surveillance des personnes vivant isolées à domicile"

JESA-RAIRO (Journal Européen des Systèmes Automatisés), ISSN 0296-1598, vol. 31, n°9-10, pp. 1565-1585, 1998.

[RI4] M. CHAN, H. BOCQUET, **E. CAMPO**, T. VAL, J. POUS

"Alarm communication network to assist carers of the elderly for safety purposes : a survey of a project"

International Journal of Rehabilitation Research, vol. 22, Chapman & Hall, pp. 131-136, London, 1998.

[RI5] S. BOURDEL, **E. CAMPO**, P. MELET, L. ANDRIEUX

"From Modelling of a CDMA transceiver in indoor environment to an ASIC circuit synthesis"

Journal of Telecommunications and Information Technology, Special Issue on : Signal Processing for Communication Systems, Vol. 3, pp. 36-45, 2001.

- [RI6] T. VAL, E. CAMPO
 "Une plate-forme matérielle et logicielle de prototypage et de tests de réseau WPAN Bluetooth"
 EJNDP/RERIR (Electronic Journal on Networks and Distributed Processing / Revue Electronique sur les Réseaux et l'Informatique Répartie), ISSN 1262-3261, mai 2002.
- [RI7] M. CHAN, E. CAMPO, E. LAVAL, D. ESTÈVE
 "Validation of a remote monitoring system for the elderly: Application to mobility measurement"
 Technology and Health Care, vol. 10, n°5, pp. 391-399, octobre 2002.
- [RI8] S. EL HOMSI, E. CAMPO, T. VAL, J.J. MERCIER
 "Methods and tools for Bluetooth synchronous data transmission"
 Soumis à AdHoc Networks Journal, Elsevier Science, janvier 2003.
- [RI9] E. CAMPO, P. MELET, S. BOURDEL, L. ANDRIEUX
 "Design and fabrication of a frame generator on a FPGA for specific ASIC characterization"
 Soumis à Journal of Electronic Testing: Theory and Applications, Kluwer Academic Publishers, février 2003.
- [RI10] P. MELET, L. ANDRIEUX, S. BOURDEL, E. CAMPO
 "A methodology of computer aided simulation and design dedicated to a multi-rate W-CDMA transceiver circuit"
 Soumis à IEE Proceedings Circuits, Devices and Systems, mars 2003.

Revue nationale avec comité de lecture

- [RN1] E. CAMPO, T. VAL, J.J. MERCIER, D. ESTÈVE
 "Exigences système d'une nouvelle fonctionnalité dans l'habitat individuel : cas de la surveillance de personnes âgées et handicapées"
 REE (Revue de l'Electricité et de l'Electronique), ISSN 1265-6534, n°7, pp. 79-87, Juillet 1998.
- [RN2] E. CAMPO, P. Y. DANET, J. HUBERT, P. KAUFFMANN, M. MISSON, T. VAL
 "De la domotique à la télédomotique"
 Revue du CNET "Innovation et Télécom", octobre 1998.
- [RN3] E. CAMPO, P. Y. DANET, J. HUBERT, P. KAUFFMANN, M. MISSON, T. VAL
 "La domotique s'organise pour devenir télécommunicante avec l'interface telecom-domotique"
 REE (Revue de l'Electricité et de l'Electronique), ISSN 1265-6534, n°11, pp. 87-91, décembre 1998.
- [RN4] F. STEENKESTE, H. BOCQUET, M. CHAN, E. CAMPO
 "La mise en place d'une technologie pour observer le comportement nocturne des personnes âgées en institution"
 ITBM-RBM, Innovation et technologie en biologie et médecine, vol. 22, n° 1, pp. 25-30, 2001.

- [RN5] **E. CAMPO, M. CHAN, D. ESTÈVE**
 "L'apprentissage des modes de vie, une base indispensable au développement d'un habitat "intelligent""
 Les Annales des Télécommunications, Télécommunications et Santé, Tome 58, n°5-6, mai-juin 2003.
- [RN6] **E. CAMPO, J.P. SCOTTO DI RINALDI, D. ESTÈVE, N. BAILLY, F. BENARD**
 "Développement d'une nouvelle génération de gestionnaire d'énergie auto-configurable pour l'habitat : le concept ERGDOM"
 Accepté à Revue Scientifique des Annales du Bâtiment, 2003.

Brevets

- [B1] **J.J. MERCIER, E. CAMPO, T. VAL, F. PEYRARD, J.C. ALLIER, A. SEUBE, V. MICHAUD**
 "Procédé et système de gestion et de surveillance de rûches"
 Brevet français INPI n°0101510, HUMIREL-ICARE (UTM), octobre 2001.
- [B2] **J.J. MERCIER, E. CAMPO, T. VAL, F. PEYRARD, J.C. ALLIER, A. SEUBE, V. MICHAUD**
 "Procédé et système de gestion et de surveillance de rûches"
 Brevet international INPI n°PCT/FR02/00417, HUMIREL-ICARE (UTM), février 2001.
- [B3] **E. FIOLEAU, E. CAMPO, M. CHAN, D. ESTEVE**
 "Procédé autonome de détection de situations anormales encourues par des individus"
 Brevet français INPI n°B13892.4 DB, EDF (LAAS), juillet 2001.
- [B4] **N. BAILLY, F. BENARD, E. CAMPO, D. ESTÈVE**
 "Procédé et système domotique à base de capteurs de présence bi-fonctionnels pour l'habitat",
 Brevet français INPI sous dépôt, EDF (LAAS), 2002.
- [B5] **N. BAILLY, F. BENARD, J.P. SCOTTO DI RINALDI, E. CAMPO, D. ESTÈVE**
 "Système de prédiction des présences habituelles des occupants de locaux professionnels ou domestiques"
 Brevet français INPI sous dépôt, EDF (LAAS), 2002.

Manifestations internationales

- [MI1] **A. YAHIA MESSAOUD, G. SARRABAYROUSE, A. CLAVERIE, A. MARTINEZ, E. SCHEID, E. CAMPO, M. FAYE**
 "The early stage of silicon oxidation by rapid thermal processing: Influence of several parameters on the growth kinetics"
 MRS Spring Meeting, Anaheim - CA, USA. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., vol. 224, mai 1991.
- [MI2] **E. CAMPO, J.J. PEDROVIEJO, A. YAHIA MESSAOUD, E. SCHEID, D. BIELLE-DASPET, G. SARRABAYROUSE, A. MARTINEZ**
 "Poly-si thin film transistors fabricated with rapid thermal processing"
 MRS Spring Meeting, San Francisco, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. vol.303, pp. 389-394, 1993.

- [MI3] **E. CAMPO**, E. SCHEID, D. BIELLE-DASPET, A. MARTINEZ
 "Rapid thermal processing and low thermal processing used in polysilicon thin film transistors fabrication"
 1st International RTP'93 conference, Phoenix - Arizona, pp. 170-171, septembre 1993.
- [MI4] E. SCHEID, **E. CAMPO**, J.J. PEDROVIEJO, S. NAÏMI, G. SARRABAYROUSE
 "Polysilicon Thin Film Transistor: a Study of some Techniques of Realisation of the Channel Region and of the Gate"
 23rd ESSDERC'93, Grenoble, pp. 57-60, septembre 1993.
- [MI5] **E. CAMPO**, J.P. GUILLEMET, J.J. PEDROVIEJO, B. DE MAUDUIT, E. SCHEID
 "Crystalline and electrical properties of polysilicon obtained by annealing of Si films deposited by LPCVD from Si₂H₆"
 POLYSE'93, Saint-Malo, 6p., septembre 1993.
- [MI6] P. TEMPLE BOYER, E. SCHEID, F. OLIVIÉ, **E. CAMPO**
 "Rapid thermal deposition of nitrogen doped silicon from silane and ammonia"
 2nd International Symposium on Rapid Thermal Processing (RTP'94), Monterey, USA, pp. 227-230, septembre 1994.
- [MI7] M. CHAN, T. VIARD, M. L. CAILLAVET, **E. CAMPO**
 "Smart Technology for the Elderly and Disabled Users at Home"
 2nd TIDE Congress. In: The European Context for Assistive Technology, Paris, pp. 393-396, avril 1995.
- [MI8] M. CHAN, C. HARITON, P. RINGEARD, **E. CAMPO**
 "Smart House Automation System for the Elderly and the Disabled"
 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vancouver (Canada), vol. 2, pp. 1586-1589, octobre 1995.
- [MI9] **E. CAMPO**, T. VAL, M. CHAN
 "La surveillance multicapteurs appliquée au suivi comportemental de personnes âgées dans l'habitat"
 IFAC Conference on Control of Industrial Systems, CIS'97, Belfort, vol. 2, pp. 565-569, mai 97.
- [MI10] **E. CAMPO**, T. VAL, M. CHAN
 "A multisensor communication network applied to the monitoring on the elderly"
 3rd IFAC Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications, SICICA'97, Annecy, pp. 479-483, juin 97.
- [MI11] M. CHAN, H. BOCQUET, **E. CAMPO**, T. VAL, D. ESTÈVE, J. POUS
 "Multisensor system and artificial intelligence in housing for the elderly and the disabled"
 2nd International Conference on Gerontechnology, *a sustainable investment in the future*, Helsinki (Finlande), IOS Press, ISBN : 90-5199-367-6, pp. 145-149, 1998.
- [MI12] M. CHAN, H. BOCQUET, **E. CAMPO**, J. POUS
 "Remote monitoring system to measure indoors mobility and transfer of the elderly"
 3rd TIDE Congress, *Improving the quality of life for the European citizen – Assistive Technology Research Series*. Eds. I. Placencia Porrero, E. Ballabio, IOS Press, ISSN 1383-813x, Helsinki, Finlande, vol. 4, pp. 379-383, 1998.

- [MI13] M. CHAN, H. BOCQUET, **E. CAMPO**, F. STEENKESTE, J. POUS
 "Remote monitoring system to measure physical mobility and transfer of elderly people"
 Euroconference Rolduc, *Keeping the elderly mobile, Outdoor Mobility of the elderly : Problems and solutions*. Eds : M. Tacken F. Marcellini, H. Mollenkopf, I. Ruoppila, Trail Conference Proceedings, P98/1, delf University Press, ISBN : 90-407-1930-6, Kerkrade, Hollande, pp. 93-97, juillet 1998.
- [MI14] **E. CAMPO**, S. BOURDEL, L. ANDRIEUX, P. MELET, A. CAZARRE
 "An adaptive data rate spread-spectrum communication system for home automation"
 European Multimedia, Embedded Systems and Electronic Commerce, EMMSEC'99, Stockholm (Suède), Business and work in the information society: new technologies and applications, Eds. JY. Roger, B.Standord-Smith, PT.Kidd, 1999, ISBN N°90-5199-491-5, IOS Press, pp. 737-743, 21-23 juin 1999.
- [MI15] S. BOURDEL, **E. CAMPO**, L. ANDRIEUX, P. MELET
 "Modelling and simulation of a DLL in a BPSK DS-SS communication system"
 10th Internat. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC'99, Osaka (Japon), pp. 388-394, 12-15 septembre 1999.
- [MI16] M. CHAN, H. BOCQUET, F. STEENKESTE, **E. CAMPO**, B. VELLAS, E. LAVAL, J. POUS
 "Remote monitoring system for the assessment of nocturnal behavioral disorders in the demented"
 European Medical & Biological Engineering Conference, EMBEC'99, Vienne (Autriche), pp. II.904-II.905, 4-7 novembre 1999.
- [MI17] S. BOURDEL, P. MELET, L. ANDRIEUX, **E. CAMPO**
 "Modelling and comparative trial of the performance of baseband and IF DLL in noisy environment"
 IEEE 6th International Symposium on Spread Spectrum Techniques & Applications Communications for a new millennium, Sheraton Tara, Parsippany, New Jersey, USA, pp. 685-689, 6-8 septembre 2000.
- [MI18] T. VAL, **E. CAMPO**, P. KAUFFMANN, M. MISSON, P. Y. DANET
 "Using Teledomotis interface for a new multiservice network applied to monitoring the elderly"
 IEEE ECUMN'2000, Colmar, 2-4 octobre 2000.
- [MI19] P. MELET, L. ANDRIEUX, S. BOURDEL, **E. CAMPO**, A. CAZARRÉ
 "Design and evaluation of an all-digital multi-rate BPSK direct-sequence spread-spectrum baseband transceiver architecture for indoor applications"
 5th CDMA International Conference and Exhibition, CIC2000, Séoul (Corée), pp. 19-23, novembre 2000.
- [MI20] V. RIALLE, N. NOURY, J. FAYN, M. CHAN, **E. CAMPO**, L. BAJOLLE, J.P. THOMESSE
 "Health "smart" home information systems : concepts and illustrations"
 3rd International Workshop on Enterprise Networking and Computing in Health Care Industry, Healthcom2001, L'Aquila (Italie), pp. 99-103, juin 2001.

- [MI21] J.P. THOMESSE, D. BELLOT, A. BOYER, **E. CAMPO**, M. CHAN, F. CHARPILLET, J. FAYN, C. LESCHI, N. NOURY, V. RIALLE, L. ROMARY, P. RUBEL, N. SELMAOUI, F. STEENKESTE, G. VIRONE
 "Integrated information technologies for patients remote follow-up and homecare"
 3rd International Workshop on Enterprise Networking and Computing in Health Care Industry, Healthcom2001, L'Aquila (Italie), pp. 3-15, juin 2001.
- [MI22] P. MELET, L. ANDRIEUX, S. BOURDEL, **E. CAMPO**, A. CAZARRE
 "Conception of a DS-SS transceiver ASIC for indoor applications"
 World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, SCI2001, Orlando (USA), pp. 386-390, juillet 2001.
- [MI23] M. CHAN, **E. CAMPO**
 "Multisensor remote monitoring system to measure travel behaviour of elderly people"
 TICD Symposium, Telemedicine in Care Delivery Technology and Application, Pise (Italie), Ed. V. Macellari et R. Bedini, pp. 251-256, 12-16 Juin 2002.
- [MI24] M. CHAN, **E. CAMPO**, D. ESTÈVE
 "Assessment of elderly people mobility using a remote multisensor monitoring system"
 MIE 2002, 17th International Congress of the European Federation for Medical Informatics, Technology and Informatics "Health data in the information society", Chap. I "Data Acquisition", IOS Press ISBN : 1.58603.279.8, Budapest (Hongrie), pp. 72-77, août 2002.
- [MI25] **E. CAMPO**, M. CHAN
 "Real-Time Monitoring of elderly people to detect abnormal behaviour"
 AAAI 2002, 18th National Conference on Artificial Intelligence, Workshop on Automation as Caregiver : The Role of Intelligent Technology in Elder Care, Edmonton (Canada), pp. 8-12, 29 juillet 2002.
- [MI26] M. CHAN, **E. CAMPO**
 "Multisensor remote monitoring system and elderly nocturnal locomotor habits in long stay setting"
 EMBEC 2002, 2nd European Medical and Biological Engineering Conference, SS15 Assistive technology and rehabilitation, Part 2, Vienne (Autriche), pp. 1676-1677, 4-8 décembre 2002.
- [MI27] M. CHAN, **E. CAMPO**
 "Elderly Motor Activity Measure and Correlation Assessment Using a Multi Sensor Monitoring System "
 AIME 2003, 9th Conference on Artificial Intelligence in Medicine Europe, Chypre, 18 - 22 octobre 2003.
- [MI28] A. BOUZOUALEGH, T. VAL, F. PEYRARD, **E. CAMPO**
 "Study and proposal of the underwater acoustic local area networks"
 WSEAS, 7th International Conference on Communications, Mobile Communications Systems, Corfu (Grèce), 7-10 juillet 2003.
- [MI29] A. BOUZOUALEGH, **E. CAMPO**, F. PEYRARD, T. VAL
 " Study and proposal of the underwater acoustic local area networks "
 Soumis à SoftCOM, International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, Split (Croatie) et Venice (Italy), 7-10 octobre 2003.

- [MN1] **E. CAMPO**, T. VAL, M. CHAN
"La communication radiofréquence appliquée à la surveillance de personnes âgées"
Journée d'étude SEE à l'ENSEEIH "les capteurs électromagnétiques et leurs applications",
Toulouse, novembre 97.
- [MN2] S. BOURDEL, **E. CAMPO**
"Etude des caractéristiques d'un système de communication à étalement de spectre dédié à la domotique"
Colloque National des IUT, CNRIUT'98, Modélisation et Simulation, Fontainebleau,
Harmattan, ISBN : 2-7384-6528-5, pp. 95-110, 11-13 mai 1998.
- [MN3] S. BOURDEL, **E. CAMPO**
"Modélisation et analyse comparative des performances d'une DLL dans un système de communication RF en milieu non bruité"
EDET journée GEET, 7-8 mars 2000.
- [MN4] P. MELET, L. ANDRIEUX, S. BOURDEL, **E. CAMPO**, A. CAZARRE
"La communication sans fil dédiée à la domotique : contribution à la conception des étages numériques d'un prototype d'émetteur-récepteur en étalement de spectre à 2,4 GHz"
Coolloque National des IUT CNRIUT'00, Recherche et Innovation, Bourges, Presses Universitaires d'Orléans, ISBN : 2-913454-07-0, Tome 2, pp. 285-294, 14-16 juin 2000.
- [MN5] J.P. THOMESSE, D. BELLOT, A. BOYER, **E. CAMPO**, M. CHAN, F. CHARPILLET, J. FAYN, C. LESCHI, N. NOURY, V. RIALLE, L. ROMARY, P. RUBEL, N. SELMAOUI, F. STEENKESTE, G. VIRONE.
"TISSAD : Technologies de l'Information Intégrées aux Services des Soins à Domicile"
Journée AIM 2001 Télémedecine et eSanté, Paris, 8 juin 2001.
- [MN6] S. EL HOMSI, T. VAL, **E. CAMPO**, J.J. MERCIER
"Méthode et outils d'analyse de trames pour l'étude d'un réseau Bluetooth"
Journées Doctorales Informatique et Réseaux (JDIR'02), Réseaux sans fil et mobilité, LAAS,
pp. 131-137, Toulouse, 04-06 mars 2002.
- [MN7] C. ESCRIBA, **E. CAMPO**, D. ESTÈVE
"Etude et réalisation de capteurs thermopiles compatibles CMOS dédiés aux applications domotiques"
6^{ème} Journées Nationales du Réseau Doctoral de Microélectronique (JNRDM'03), Toulouse,
pp. 109-111, 14-16 mai 2003.
- [MN8] S. EL HOMSI, **E. CAMPO**, T. VAL
"Vers une utilisation étendue originale d'un circuit RF dédié à Bluetooth"
6^{ème} Journées Nationales du Réseau Doctoral de Microélectronique (JNRDM'03), Toulouse,
pp. 365-367, 14-16 mai 2003.
- [MN9] A. BOUZOUALEGH, **E. CAMPO**, F. PEYRARD, T. VAL
"Etude des caractéristiques physiques requises des réseaux aquatiques sans fil"
Colloque National des IUT CNRIUT'03, Recherche et Innovation, Tarbes, pp. 319-326, 15-16 mai 2003.

Contribution à la rédaction de projets de normes

- [N1] **E. CAMPO** *et al.* (groupe de travail Télédomotis)
"Définition d'une interface entre les bus domotiques et les réseaux de télécommunication, Interface Télécom Domotique (ITD)"
Référence UTE U215/SC25, France-Télécom, 1998.

Rapports de recherches et de contrats LAAS-ICARE

- [R1] **E. CAMPO**
"Oxydation du polysilicium par procédé thermique rapide"
Rapport de stage de DEA, 27p., juin 1990.
- [R2] D. BIELLE-DASPET, E. SCHEID, **E. CAMPO**, L. K. KOUASSI, J.J. PEDROVIEJO, G. SARRABAYROUSE
"Dépôts de silicium (Si-poly) et isolants adaptés à une technologie sur verre"
Convention CNET n°90 8B 097 LAB. Rapport LAAS n°91270, octobre 91.
- [R3] D. BIELLE-DASPET, E. SCHEID, **E. CAMPO**, J. J. PEDROVIEJO, L. K. KOUASSI, G. SARRABAYROUSE, A. MARTINEZ, P. FADEL, F. ROSSEL, B. ROUSSET
"Dépôts de silicium (Si-poly) et isolants adaptés à une technologie sur verre"
Convention CNET n°90 8B 097 LAB. Rapport LAAS n°92010, mars 92.
- [R4] D. BIELLE-DASPET, E. SCHEID, L. K. KOUASSI, **E. CAMPO**, J. J. PEDROVIEJO, G. SARRABAYROUSE, A. MARTINEZ, P. FADEL, F. ROSSEL, B. ROUSSET
"Dépôts de silicium (Si-poly) et isolants adaptés à une technologie sur verre"
Convention CNET n°90 8B 097 LAB. Rapport LAAS n°92279, juin 92.
- [R5] D. BIELLE-DASPET, E. SCHEID, **E. CAMPO**, J. J. PEDROVIEJO, A. MARTINEZ, G. SARRABAYROUSE, B. ROUSSET, B. DE MAUDUIT, J.P. GUILLEMET
"Dépôts de silicium (Si-poly) et isolants adaptés à une technologie sur verre"
Convention CNET n°90 8B 097 LAB. Rapport LAAS n°92418, octobre 92.
- [R6] D. BIELLE-DASPET, E. SCHEID, G. SARRABAYROUSE, A. MARTINEZ, J. J. PEDROVIEJO, **E. CAMPO**, L. K. KOUASSI, R. HENDA, B. DE MAUDUIT, J.P. GUILLEMET, J. P. COUDERC, B. PIERAGGI
"Dépôts de silicium (Si-poly) et isolants adaptés à une technologie sur verre"
Convention CNET n°90 8B 097 LAB. Rapport LAAS final n°93142, juin 93.
- [R7] J.J. MERCIER, L. ANDRIEUX, **E. CAMPO**, L. REDON, C. SOUTOU, T. VAL, T. VILLEMUR
Rapport d'activités (1994-1996) du groupe de recherche ICARE de l'I.U.T. B de l'Unité Scientifique et Technologique de l'Université de Toulouse II.
- [R8] C. VERCAUTEREN, **E. CAMPO**, D. ESTÈVE, N. BAILLY
"Conception d'un gestionnaire intelligent d'énergie pour l'habitat utilisant les réseaux de neurones"
Rapport interne LAAS-EDF, février 1997.

- [R9] **E. CAMPO**, D. ESTEVE, T. VAL, J.J. MERCIER, M. CHAN, H. BOCQUET, J. POUS
 "Système de suivi automatique des personnes âgées et handicapées"
 Contrat Région Transpyrénéen, n°RECH/960399, Projet ESCAPE / rapport intermédiaire,
 9p., juin 1997.
- [R10] **E. CAMPO**, D. ESTEVE, T. VAL, J.J. MERCIER, M. CHAN, H. BOCQUET, J. POUS
 "Système de suivi automatique des personnes âgées et handicapées"
 Contrat Région Transpyrénéen, n°RECH/960399, Projet ESCAPE / rapport final LAAS
 n°98485, 63p., décembre 98.
- [R11] L. ANDRIEUX, **E. CAMPO**
 "Audio-guide, interactif et d'accès à l'information dans les lieux publics pour les non
 voyants"
 Contrat Région Transpyrénéen, n°RECH/9705991, Projet TESEO / rapport intermédiaire,
 15p., septembre 1998.
- [R12] S. BOURDEL, **E. CAMPO**, L. ANDRIEUX, P. MELET
 "Etude des caractéristiques et simulation d'un modèle fonctionnel de communication en
 étalement de spectre dédié à l'habitat"
 Rapport LAAS n°99019, 33p., janvier 1999.
- [R13] P. MELET, L. ANDRIEUX, S. BOURDEL, **E. CAMPO**, A. CAZARRE
 "Généralités sur des télécommunications numériques sans fil en vue de la réalisation d'un
 prototype d'émission-réception dédié à la domotique"
 Rapport LAAS n°99113, 12p., mars 1999.
- [R14] S. BOURDEL, **E. CAMPO**, L. ANDRIEUX, P. MELET, A. CAZARRE
 "A global design methodology using a co-simulation approach for communication systems"
 Rapport LAAS n°99189, 10p., avril 1999.
- [R15] M. CHAN, J. POUS, H. BOCQUET, F. STEENKESTE, D. ESTEVE, **E. CAMPO**, T. VAL, J.J.
 MERCIER, B. VELLAS
 "Programme de recherche intelligence artificielle et personnes âgées dépendantes"
 Rapport d'étape, Contrat Conseil Régional Midi-Pyrénées. Décision N°RECH/9609587, 5p.,
 juin 1999.
- [R16] M. CHAN, J. POUS, H. BOCQUET, D. ESTEVE, **E. CAMPO**, T. VAL, J.J. MERCIER
 "Programme de recherche méthodologique pour la mise en place d'une technologie de suivi
 des personnes âgées"
 Rapport final LAAS n°99312, Contrat Conseil Régional Midi-Pyrénées. Décision
 N°RECH/9407589, 11p., juin 1999.
- [R17] P. MELET, L. ANDRIEUX, S. BOURDEL, **E. CAMPO**, A. CAZARRE, A. MARTINEZ
 "Généralités et théorie d'éléments de communications analogiques et numériques : vers la
 réalisation d'un émetteur/récepteur dédié à l'habitat"
 Rapport LAAS n°99317, 53p., juin 1999.
- [R18] T. VAL, **E. CAMPO**, P. Y. DANET, J. HUBERT, P. KAUFFMANN, M. MISSON
 "A new end-to-end service for telemonitoring of the elderly via the Teledomotis interface"
 Rapport final ICARE-CNET France Télécom, janvier 2000.

- [R19] L. ANDRIEUX, **E. CAMPO**
 "Audio-guide, interactif et d'accès à l'information dans les lieux publics pour les non voyants"
 Contrat Transpyrénéen, n°RECH/9705991, Projet TESEO / rapport final LAAS n°00164, 23p., mars 2000.
- [R20] S. BOURDEL, P. MELET, L. ANDRIEUX, **E. CAMPO**
 "Computer simulation of the DLL performance as a function of Intermediate Frequencies in AWGN channel for CDMA"
 Rapport LAAS n°00163, 2p., mars 2000.
- [R21] S. BOURDEL, **E. CAMPO**, P. MELET, L. ANDRIEUX
 "Comparative performance analysis of a baseband and an IF delay locked loop"
 Rapport LAAS n°00162, 9p., mars 2000.
- [R22] M. CHAN, H. BOCQUET, F. STEENKESTE, **E. CAMPO**, D. ESTEVE, B. VELLAS
 "Programme de recherche intelligence artificielle et personnes âgées dépendantes"
 Contrat Région N°RECH/9609587, Rapport final LAAS n°00287, 12p., juillet 2000.
- [R23] **E. CAMPO**, D. ESTEVE
 "La détection de présence : Application au projet ERGDOM"
 Rapport interne LAAS, 24p., novembre 2000.
- [R24] T. VAL, **E. CAMPO**, J.J. MERCIER, F. PEYRARD, M. MISSON, P. FRAISSE
 "Utilisation de Bluetooth pour la téléapplication"
 Rapport de recherche ICARE sur la collaboration L2I, septembre 2001.
- [R25] **E. CAMPO**, M. CHAN, D. ESTEVE, F. STEENKESTE
 "Technologies de l'Information Intégrées aux Services des Soins A Domicile"
 Rapport d'étape RNTS TIISSAD, Décision d'aide n°99B0612, Novembre 2001.
- [R26] **E. CAMPO**, C. ESCRIBA, D. ESTÈVE
 "Les détecteurs de présence dans l'habitat : Analyse des besoins et conception de nouveaux modules"
 Collaboration LAAS-EDF R&D, contrat n°E18/E58115, rapport interne intermédiaire, 19p., décembre 2001.
- [R27] J.P. THOMESSE, D. BELLOT, A. BOYER, **E. CAMPO**, M. CHAN, F. CHARPILLET, D. ESTEVE, J. FAYN, C. LESCHI, N. NOURY, V. RIALLE, L. ROMARY, P. RUBEL, F. STEENKESTE
 TIISSAD "Technologies de l'Information Intégrées aux Services des Soins A Domicile"
 Rapport final RNTS, Décisions d'aide n°99 B0611 à 616, Janvier 2002.
- [R28] **E. CAMPO**, M. CHAN, J.C. HAMON, D. ESTÈVE
 "Développement et Expérimentation d'un Système d'Aide à L'Autonomie"
 Collaboration LAAS-EDF R&D, contrat n°E18/E57786, 4 rapports internes intermédiaires, février-juin 2002.
- [R29] **E. CAMPO**
 "Document de spécifications et d'installation - Développement et Expérimentation d'un Système d'Aide à L'Autonomie"
 Collaboration LAAS-EDF R&D, contrat n°E18/E57786, rapport interne, mars 2002.

- [R30] **E. CAMPO**, C. ESCRIBA, D. ESTÈVE
 "Conception d'un module démonstrateur dédié à la détection de présence"
 Collaboration LAAS–EDF R&D, contrat n°E18/E58115, rapport interne intermédiaire, 16p., mai 2002.
- [R31] J.J. MERCIER, L. ANDRIEUX, **E. CAMPO**, F. PEYRARD, C. SOUTOU, T. VAL, T. VILLEMUR
 Rapport d'activités (1998-2002) du groupe de recherche ICARE (IUT Blagnac) de l'Unité Scientifique et Technologique de l'Université de Toulouse II, juillet 2002.
- [R32] **E. CAMPO**, C. ESCRIBA, D. ESTÈVE
 "Conception d'un module démonstrateur dédié à la détection de présence"
 Collaboration LAAS–EDF R&D, contrat n°E18/E58115, rapport interne final, 32p., septembre 2002.
- [R33] **E. CAMPO**, M. CHAN, J.C. HAMON, S. BONHOMME, D. ESTEVE
 "Développement et Expérimentation d'un Système d'Aide à L'Autonomie"
 Collaboration LAAS–EDF R&D, contrat n°E18/E57786, rapport interne final, septembre 2002.

Présentations invitées

- [PI1] D. ESTEVE, **E. CAMPO**, T. VAL, M. CHAN
 "Les nouvelles solutions technologiques"
 VII^{èmes} Rencontres domotiques de Niort, *Service et technologie - une aide à la vie*, Premier Colloque Européen de la Prévention des Risques, Niort, 16-22 octobre 1996.
- [PI2] **E. CAMPO**
 "Système de suivi automatique des personnes âgées et handicapées"
 III^{ème} Rencontre Transpyrénéenne sur la Recherche, la Science et la Technologie, Andorre, 6p., Juin 1997.
- [PI3] **E. CAMPO**
 "Expérience de suivi multicapteurs intelligent"
 Séminaire Domotique et Multimédia, "l'Intelligence de l'Habitat", CNIT, Paris, 7 mai 1998
- [PI4] **E. CAMPO**
 "La domotique au XXI^{ème} siècle. Recherche et Applications"
 Journée CNRS "Oser le Savoir - Nouvelles Technologies et Vie Privée", Cité des Sciences & de l'Industrie, Paris, 26 mai 2000.
- [PI5] **E. CAMPO**
 "PROSAFE : Un système d'aide au suivi des personnes âgées et dépendantes".
 Séminaire TIISSAD, LORIA - Nancy, 21 novembre 2001.
- [PI6] **E. CAMPO**
 "Application au confort thermique : Le projet Ergdom"
 Journée Thématique sur le Confort Thermique, CSTB, Nantes, février 2003.

Liste des Figures

Figure 1. Architectures de réseaux locaux sans fil.....	31
Figure 2. Diagramme de la chaîne d'automatisation par apprentissage.....	34
Figure 3. Outils logiciels associés pour la conception d'un système.....	37
Figure 4. Domaines de contributions de nos travaux.....	38
Figure 5. Transistors à films minces de polysilicium ($W = 500 \text{ \AA}$).....	44
Figure 6. Synoptique d'un système de détection infrarouge.....	45
Figure 7. Principe de l'effet Seebeck.....	46
Figure 8. Structure de la thermopile.....	47
Figure 9. Différentes structures thermopiles réalisées.....	48
Figure 10. Thermopile mono-élément.....	48
Figure 11. Evaluation de la tension de sortie.....	49
Figure 12. Temps de réponse du module.....	49
Figure 13. Etalement de la donnée par un PN-code en DS-SS.....	55
Figure 14. Synoptique du système d'émission/réception utilisant la technique de l'étalement de spectre modélisé.....	56
Figure 15. Topologie multi-utilisateurs modélisée sous SABER.....	58
Figure 16. Simulation globale en environnement <i>indoor</i>	59
Figure 17. Circuit ASIC réalisé.....	60
Figure 18. Platine de test fonctionnelle associant FPGA et ASIC.....	61
Figure 19. a- le circuit Bluetooth "ROK sans le blindage" b- le circuit radio Bluetooth "PBA".....	62
Figure 20. Principe des échanges de paquets Bluetooth en FH-SS/TDD (cas d'un <i>slot</i>).....	64
Figure 21. Principales couches protocolaires Bluetooth (matérielle et logicielle).....	65
Figure 22. Architecture proposée (cas d'un <i>piconet</i>).....	66
Figure 23. Banc de mesures et de tests.....	67
Figure 24. Variation du temps mesuré et calculé en fonction du débit.....	67
Figure 25. Conception d'une carte modulaire Bluetooth.....	69
Figure 26. Taux d'erreur sur les bits en fonction de la portée entre deux modules Bluetooth.....	69
Figure 27. Schéma du principe général de fonctionnement du système de surveillance.....	81
Figure 28. Schéma d'implantation des capteurs dans les chambres expérimentales.....	81
Figure 29. Architecture matérielle du démonstrateur PROSAFE.....	82
Figure 30. Schéma représentatif du fonctionnement du système PROSAFE.....	82
Figure 31. Principe du concept "Alerte-Alarme".....	84
Figure 32. IHM locales de PROSAFE.....	85
Figure 33. Exemple de courbes d'activités d'une personne âgée.....	86
Figure 34. Tracés des activités caractéristiques d'un sujet sur 8 mois de suivi.....	87
Figure 35. Schéma général de principe du gestionnaire ERGDOM.....	90
Figure 36. Courbes de régulation et d'anticipation du chauffage.....	90
Figure 37. Positionnement du système ERGDOM en termes de coût et d'insatisfaction de l'utilisateur par rapport à d'autres systèmes de gestion de la température.....	91
Figure 38. Microsystème communicant pour la mesure multicapteurs.....	100
Figure 39. Résumé des thèmes abordés et perspectives d'application.....	101

Glossaire

LAAS : Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes.....	4
ICARE : Ingénierie des Communications de l'informAtique, des Réseaux et de l'Electronique sans fil.....	4
PROSAFE : PRO Safety And Follow-up of the Elderly.....	11
ERGDOM : ERGonomic and intelligent interface in DOMotic functions.....	11
LPCVD : Low Pressure Chemical Vapor Deposition.....	25
CEMES : Centre d'Elaboration de Matériaux et d'Etudes Structurales.....	25
IMPACT : Structure d'accueil européenne pour l'accès aux technologies microsystèmes.....	31
WPAN : Wireless Personal Area Network.....	37
LAN : Local Area Network.....	38
WAN : Wide Area Network.....	38
EIB : European Installation Bus.....	38
EHS : European Home System.....	38
CSMA : Carrier Sense Multiple Access.....	38
TDMA : Time Division Multiple Access.....	38
FDMA : Frequency Division Multiple Access.....	38
DS-SS : Direct Sequence Spread Spectrum.....	39
UMTS : Universal Mobile Telecommunications System.....	39
CDMA : Code Division Multiple Access.....	40
DLL : Delay Lock Loop.....	40
AWGN : Bruit blanc additif gaussien.....	41
ASIC : Application Specific Integrated Circuit.....	43
VHDL : Very High Description Language.....	43
FPGA : Field Programmable Gate Array.....	44
ISM : Industrielle Scientifique Médicale.....	47
FH-SS : Frequency Hopping Spread Spectrum.....	47
ACL : Asynchronous Connection Less.....	47
SCO : Synchronous Connection Oriented.....	47
GFSK : Gaussian Frequency Shift Keying.....	47
TDD : Time-Division Duplex.....	47
USB : Universal Serial Bus.....	49
PCM : Pulse Code Modulation.....	49
FEC : Forward Error Correction.....	49
ADSL : Asymmetric Digital Subscriber Line.....	50
DECT : Digital Enhanced Cordless Telecommunications.....	50
CODEC : CODeur - DECodeur.....	51
CVSD : Continuous Variable Slope Delta Modulation.....	52
BGA : Ball Grid Array.....	53
UART : Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.....	53
ECG : ElectroCardioGramme.....	62
RNTS : Réseau National des Technologies pour la Santé.....	63
XML : Extensible Markup Language.....	63
UML : Unified Markup Language.....	63
ADL : Activity of Daily Life.....	64
ASK : Amplitude Shift Keying.....	65
FSK : Frequency Shift Keying.....	65
TDMA : Time Division Multiple Access.....	65
MySQL : Système de gestion de base de données.....	67
PHP : Personal Home Page.....	69
RTC : Réseau Téléphonique Commuté.....	69
ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.....	76
IrDA : Infrared Data Association.....	80
UWB : Ultra Wide Band.....	80
CTP : Communauté de travail TransPyrénéene.....	94
MENRT : Ministère de l'Education Nationale, de la Recherche et de la Technologie.....	95

ANNEXE 5

CINQ PUBLICATIONS PRINCIPALES

Ces cinq publications ont été choisies car elles recouvrent les différents aspects des travaux présentés dans ce mémoire de synthèse :

- les quatre premières publications scientifiques exposent l'ensemble des concepts, méthodes et expérimentations proposés et mis en oeuvre,
- la dernière illustre un brevet déposé en partenariat avec une PME locale : HUMIREL. Ce brevet a été choisi car il est un exemple majeur de coopération entre des compétences pluridisciplinaires complémentaires mises au service d'un projet technologique et répondant au besoin d'une PME.

Liste des cinq publications présentées :

[RI3] **E. CAMPO**, T. VAL, J.J. MERCIER, D. ESTÈVE

"La surveillance multicapteurs dans l'habitat : application à la surveillance des personnes vivant isolées à domicile"

Revue scientifique : Journal Européen des Systèmes Automatisés, 1998.

[RI5] S. BOURDEL, **E. CAMPO**, P. MELET, L. ANDRIEUX

"From Modelling of a CDMA transceiver in indoor environment to an ASIC circuit synthesis"

Revue scientifique : International Journal of Information Technology, 2001.

[RI6] T. VAL, **E. CAMPO**

"Une plate-forme matérielle et logicielle de prototypage et de tests de réseau WPAN Bluetooth"

Revue scientifique : Electronic Journal on Networks and Distributed Processing / Revue Electronique sur les Réseaux et l'Informatique Répartie, 2002.

[RN5] **E. CAMPO**, M. CHAN, D. ESTÈVE

"L'apprentissage des modes de vie, une base indispensable au développement d'un habitat "intelligent""

Revue scientifique : Les Annales des Télécommunications, Spécial Santé, Tome 58, n°5-6, Mai-Juin 2003.

[B2] J.J. MERCIER, **E. CAMPO**, T. VAL, F. PEYRARD, J.C. ALLIER, A. SEUBE, V. MICHAUD

"Procédé et système de gestion et de surveillance de ruches"

Brevet international : INPI n°PCT/FR02/00417, HUMIREL-ICARE (UTM), février 2001.