



UNIVERSITÉ D'ORLÉANS



ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Institut PRISME

THÈSE présentée par :
Antoine BELCONDE

soutenue le : **28 Septembre 2010**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline : Sciences et Technologies Industrielles

Modélisation de la détection de présence humaine

THÈSE dirigée par :
Frédéric KRATZ

Professeur des Universités, ENSIB

RAPPORTEURS :
Monique POLIT
Francis BRAUN

Professeur des Universités, Université de Perpignan
Professeur des Universités, Université de Strasbourg

JURY :

Monique POLIT
Francis BRAUN
Pierres VIEYRES
Frédéric KRATZ
Mihaela HNATIUC
Nathalie CISLO
Jean-François GOBEAU

Professeur des Universités, Université de Perpignan
Professeur des Universités, Université de Strasbourg
Professeur des Universités, Université d'Orléans (président)
Professeur des Universités, ENSIB
Maître de Conférences, Constanta Maritime University
Maître de Conférences, Université d'Orléans
Ingénieur de recherche, Legrand

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein de l'équipe MCDS de l'institut PRISME à Bourges. Je tiens donc en premier lieu à en remercier son directeur, le Professeur Youssoufi Touré pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien et les conseils de mon directeur de thèse, le Professeur Frédéric Kratz à qui j'exprime ma profonde reconnaissance. Je retiendrai de lui son humour et sa sympathie. Je le remercie également pour avoir relu avec attention ce manuscrit et y avoir apporté les corrections nécessaires.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude au Professeur Francis Brown et au Professeur Monique Polit pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail.

J'adresse ma sincère reconnaissance au Professeur Pierre Vieyres (que je connais depuis mon D.U.T), à Nathalie Cislo (qui m'a aidé pour la correction de mon mémoire) et à Jean-François Gobeau (de Legrand qui a toujours été très disponible) pour leur participation à ce jury de thèse.

Je tiens également à exprimer un grand merci à notre secrétaire de choc, Madame Laure Spina, pour son dévouement et sa très grande gentillesse.

Merci également aux (anciens) collègues doctorants de l'ex-LVR et tout spécialement : les *capthomiens* : Damien, Pierre et Yannick pour les bons moments passés ensemble ; Laurent Arcese, Gwenaël Charron et Nicolas Morette (que je connais depuis le D.U.T.) pour leur grande amitié. Merci aussi à la dernière venue Sophie Seuillet pour la relecture de mon manuscrit.

Table des matières

Remerciements	iii
Table des matières	v
Introduction	1
1 État de l'Art sur la détection de présence humaine	7
1.1 Les caractéristiques de la présence et différents systèmes de détections	9
1.1.1 Les caractéristiques du corps humain	9
1.1.2 Influence de la présence humaine sur l'environnement	10
1.1.3 Les solutions de détection de présence humaine	13
1.1.4 Les solutions commerciales pour la détection de présence humaine	18
1.1.5 Les dispositifs de détection Infrarouge	27
1.2 Habitat intelligent	30
1.3 Conclusion	32
2 Validation des choix technologiques, tests de caractérisations et applications	33
2.1 Évaluation des missions de Capthom	35
2.2 Identification des technologies	38

2.2.1	Tests sur multi-capteurs de différentes natures technologiques	38
2.2.2	Capteur de CO_2	54
2.2.3	Système entrée/sortie	56
2.2.4	Essais avec un capteur de type thermopile	56
2.3	Caractérisations des capteurs	64
2.3.1	SNOOPS	64
2.3.2	Essais préliminaires avant la mise en place du banc de tests	65
2.3.3	Le banc d'essai	69
2.3.4	Méthode de caractérisation des capteurs Infrarouges	69
2.3.5	Résultats de la caractérisation pour simulation en 2 dimensions	74
2.4	Application à la détection de présence des capteurs type thermopile	80
2.5	Conclusion sur les besoins du projet	83
3	Localisation d'une personne à l'aide d'un réseau de capteurs	85
3.1	Introduction	87
3.2	Chaîne de Markov cachée	87
3.2.1	Les éléments d'une chaîne de Markov Cachée	87
3.2.2	Les trois problèmes de base d'une chaîne de Markov	89
3.3	Utilisation des Chaînes de Markov cachées	95
3.3.1	Définition de l'étude	95
3.3.2	Application	95
3.3.3	Application de certains scénarios	98
3.3.4	Simulation	99
3.3.5	Conclusion	101
3.4	Système multi-Capteurs pour la localisation	102
3.4.1	Triangulation	102
3.4.2	Localisation par la méthode d'optimisation de Levenberg-Marquardt . . .	104
3.5	Conclusion sur la localisation	112

4 Test sur un appartement témoin	115
4.1 L'Appartement pilote	117
4.2 Les équipements à disposition	118
4.3 Expérimentation avec un habitant	119
4.3.1 Résultats obtenus	119
4.3.2 Impression de l'habitant	123
4.3.3 Première approche de localisation de la personne	123
4.3.4 Installation des capthoms	129
4.4 Validation de la méthode de localisation	131
4.5 Les perspectives	134
Conclusion	135
Bibliographie	139

La sensibilisation sur les problèmes environnementaux bat son plein aujourd'hui avec des objectifs européens renforcés par le Grenelle de l'environnement, à savoir réduire de 20 % les émissions de gaz à effet de serre et de 20% la consommation d'énergie. Ces objectifs ambitieux induisent la notion d'efficacité énergétique active et seraient basés sur des produits performants et des systèmes intelligents de régulation, d'automatismes et de mesures pour permettre de [Giméec, 2008] :

- réduire la facture énergétique,
- réduire les consommations d'énergie,
- améliorer la qualité et la disponibilité de l'énergie en consommant et en produisant l'énergie juste nécessaire.

Effectivement, selon le livre Blanc sur les énergies [Fontaine, 2003], la demande d'énergie n'arrête pas d'augmenter. La France compte 29,3 millions de logements, dont 83 % de résidences principales, 57 % de maisons individuelles et 43 % de logements en immeubles collectifs. Le nombre de résidences principales a crû de 17,8 à 24,4 millions entre 1975 et 2000, soit une augmentation de 37 %, beaucoup plus rapide que celle de la population, du fait de phénomènes sociétaux structurants comme le vieillissement de la population, le prolongement de la durée des études, l'apparition des familles monoparentales ... 65 % de ce parc a été construit avant 1975, date de l'entrée en application de la première réglementation de construction des logements neufs en faveur de l'efficacité énergétique. Du fait de l'accroissement du parc de bâtiments et du taux d'équipement en appareils électrodomestiques, la consommation d'énergie finale du secteur résidentiel a progressé depuis 20 ans pour atteindre 47 Mtep¹ en 2000 (+ 6 Mtep depuis 1990). La consommation finale des logements est en croissance de +1,4 % par an, toujours selon [Fontaine, 2003]. L'utilisation des ressources énergétiques de la maison pour le confort (électricité, chauffage, ...) est très clairement pointée du doigt.

Les secteurs du tertiaire aussi sont visés bien que l'usage des énergies soit différent d'une branche à une autre. Ainsi le chauffage et l'eau chaude sanitaire représentent 84 % des consom-

1. Mtep : tonne d'équivalent pétrole, unité d'énergie d'un point de vue économique et industriel; $1\text{tep} = 41,855\text{ GJ}$ ou $1\text{tep} = 11628\text{ kWh}$

mations dans l'enseignement, 50 % dans les commerces, mais seulement 33 % dans les bureaux. Les périodes d'occupation jouent en effet un rôle déterminant dans les consommations des bâtiments.

Il est clair que de tels chiffres poussent la politique énergétique à s'appuyer sur des mesures capables de diminuer la forte croissance de la demande énergétique. Dans le cadre du bâtiment, il va falloir, par exemple, utiliser des solutions dites "passives" en améliorant la structure du bâtiment (isolation, ventilation, prévention de fissures sur les dalles, etc...). Des solutions d'automatisation des ressources énergétiques peuvent être mises en place et méritent d'être des thèmes de recherche. Pour permettre le développement de ces solutions, il va être indispensable de disposer d'informations diverses aidant à la prise de décision, et l'une des informations qui s'avère être primordiale est l'information d'occupation d'une pièce ou du bâtiment.

Le projet CAPTHOM (CAPteur universel de présence HUMaine pour le bâtiment et l'habitat) s'inscrit dans la thématique "Gestion de l'énergie dans le bâtiment" du pôle de compétitivité de la région Centre "Sciences et Systèmes de l'Énergie Électrique" (S2E2). Les partenaires industriels de ce projet sont STMicroelectronics, Legrand, Agilicom, Thermor, Sorec, et Wirecom Technologies. L'équipe MCDS (Modélisation, Commande, et Diagnostic des Systèmes) de l'institut PRISME (Institut Pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes, Mécanique et Énergétique), le Pôle Capteurs et le Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologie (CRESITT Industrie) participent également au projet. L'objectif du projet est de développer un capteur détectant la présence d'un homme dans son habitat ou dans un bâtiment du tertiaire. Le capteur devra s'insérer dans un environnement résidentiel ou un environnement tertiaire. L'intérêt de disposer d'un système capable de fournir des informations sur la présence ou l'absence d'un homme dans une maison ou un bureau est de permettre le développement de systèmes de gestion de l'énergie électrique. L'objectif d'un tel système pourrait être le confort des habitants ou l'économie d'énergie. Nous avons déjà abordé en introduction les problèmes qui accompagnent la croissance de la demande énergétique. Il est fort probable qu'à moyen terme, le prix du pétrole continuera d'augmenter et l'exigence de la maîtrise de la consommation électrique sera très forte pour la planète ainsi que pour des raisons économiques et environnementales. De plus, il est prévu que le capteur capthom soit facilement intégrable dans d'autres domaines d'application liés à la sécurité, à la surveillance, à la santé et au contrôle d'accès. La société Sorec prévoit un développement dans le domaine de la surveillance et de l'assistance des personnes à domicile ou en institution spécialisée. Une autre application envisagée est la surveillance de zones à risque (par exemple : piscine, cuisine ...).

Pour assurer une avance technologique dans ce secteur, il est nécessaire d'apporter une rupture technologique et/ou une rupture du concept du capteur. Malgré la maturité des capteurs utilisés actuellement, leur niveau de performance mérite d'être amélioré. Ce capteur ne doit pas se déclencher de façon intempestive, ou détecter la présence d'animaux domestiques, il doit être robuste aux changements de luminosité et aux sources de chaleur. Ce capteur doit aussi avoir une grande fiabilité de détection et ne pas être influencé par la morphologie de la personne ou par ses activités. Un adulte endormi ou un enfant qui court, par exemple, devront être détectés par le capteur. Enfin, la solution proposée devra être économiquement acceptable (environ 15 euros). Le coût sera primordial puisque le Capthom sera comparé aux capteurs actuels de détection de mouvement, bon marché, basé sur la technologie pyroélectrique. Pour arriver à une mesure de l'activité ou de la non-activité et obtenir de bonnes performances, le capthom sera vraisemblablement composé de plusieurs capteurs (vision, ultrasons, hygrométrie ...). Une fu-

sion des données issues de ces capteurs, judicieusement placés dans l’environnement, associée à de l’intelligence artificielle donnera un diagnostic quant à l’occupation des locaux et le mode de réglage des besoins énergétiques. Le projet s’articule donc sur quatre thèses :

- Détection de la présence humaine par vision (soutenue en 2009) [Benezeth, 2009],
- Contribution à l’analyse de sûreté de fonctionnement des systèmes complexes en phase de conception : application à l’évaluation des missions d’un réseau de capteurs de présence humaine (soutenue en 2009) [David, 2009],
- Détection de la présence humaine par fusion de données multi-capteurs [Brulin *et al.*, 2009],
- Modélisation de la détection de présence humaine [Belconde et Kratz, 2008].

Au fur et à mesure de l’avancement du projet CAPTHOM, il a été établi par nos partenaires qu’il est nécessaire que le projet possède deux axes de recherche : le capthom basique et le capthom étendu. La fonction prioritaire des deux capthoms est toujours la détection de la personne. Le capthom basique est l’amélioration des détecteurs de présence actuels (autrement dit les détecteurs de mouvements), il doit être capable de donner une réponse de type “tout ou rien” en fonction de la présence d’une personne. Le prix final du produit doit être au plus bas pour concurrencer les solutions actuelles d’où la nécessité de limiter les éléments de détection qui vont composer le capteur. Par contre, le capthom étendu n’a pas de contrainte de prix et pourra donc être composé de plusieurs technologies de détection. La technologie principale sera la vision. Ce capteur saura quant à lui fournir des informations complémentaires à la présence comme : le nombre de personnes, la localisation ou l’activité.

Il est évident que détecter la présence d’une personne est beaucoup plus complexe que d’autres types de détections, comme par exemple, la détection de métaux. En effet, un détecteur de métaux fonctionne en exploitant un phénomène physique : l’induction électromagnétique. Il se trouve que seuls les objets métalliques peuvent induire un courant. Malheureusement, il n’existe pas un phénomène en particulier qui pourrait caractériser la présence d’une personne. On peut essayer de recenser les caractéristiques qui peuvent permettre la détection d’un humain (cette liste n’est pas exhaustive) :

- toutes les informations visuelles,
- le son émis (bruit dû à une quelconque activité ...),
- le dégagement de la chaleur du corps humain (méthode infrarouge passive),
- les mouvements (cette caractéristique est liée aux informations visuelles et aux dégagements de chaleur),
- le poids,
- la respiration (émission de dioxygène ou de dioxyde de carbone)...

Une réelle détection de présence humaine ne peut pas se limiter à la détection d’une des caractéristiques de sa présence, bien que les solutions proposées aujourd’hui se limitent, souvent pour des raisons de coût, à l’une de ces caractéristiques plus ou moins efficacement.

Posons-nous la question suivante : Comment savons-nous qu’une personne est dans une pièce ? Imaginons que l’on est dans une pièce. On va se rendre compte qu’une personne va rentrer si la porte s’ouvre, et instinctivement nos yeux vont se porter vers la porte pour confirmer l’information qu’une personne est belle et bien rentrée. Savoir qu’une porte est ouverte est possible : en intégrant, par exemple, un détecteur de mouvement au-dessus de la porte. C’est un système que l’on retrouve généralement pour les portes automatiques. Il existe aussi des barrières immatérielles qui font partie de la détection active dans l’infrarouge (détection d’une coupure d’un

faisceau infrarouge). D'autres méthodes sont envisageables, nous aborderons différentes méthodes au cours de ce mémoire. Il est évident qu'une ouverture et une fermeture de la porte ne sont pas des éléments suffisants pour prouver la présence d'une personne, de nombreux éléments ont pu provoquer l'ouverture de la porte (courant d'air, animaux domestiques, ...). D'ailleurs, tout capteur domotique pourrait être sujet à des stimuli perturbateurs menant à une fausse détection. Une solution serait de coupler cette information avec une autre information pour la confirmer.

Si on compare la capacité de l'homme à reconnaître une autre personne à celle d'un détecteur de présence, il est clair que la vue joue un rôle des plus importants ; sans parler du traitement de l'information visuelle par le cerveau. Pour notre problématique de détection de présence humaine, l'imagerie serait, à première vue, la solution la plus évidente et la plus efficace. Il existe de nombreux outils d'imagerie qui permettent l'acquisition de données et d'algorithmes qui permettent leur interprétation. Il est vrai que dans certains cas un dispositif de vision sera très approprié. Mais le projet CAPTHOM a un cahier des charges qui risque de mettre en doute les méthodes de vision pour notre cas. Deux points méritent d'être passés en revue vis-à-vis de la vision : le prix final du capteur et son intégration dans un habitat, supportant les contraintes d'éclairage du quotidien et le respect de l'intimité. Les prix des capteurs CCD sont en baisse, il suffit de constater le prix des webcams. Ce point sur le coût final d'un capteur utilisant la vision pourrait être surmonté si on reste dans le visible. Le réel problème est de pouvoir combiner nos deux problèmes ; à savoir : utiliser la vision dans l'obscurité en utilisant l'imagerie infrarouge et rester dans un coût raisonnable. En effet, un dispositif d'imagerie infrarouge coûte très cher (minimum 3000 euros environ chez Flir Systems). Pour contourner l'utilisation d'un tel dispositif, on pourrait essayer d'utiliser des filtres optiques pour essayer de travailler dans l'infrarouge ; on travaillerait donc sur du proche infrarouge. Il serait judicieux de déterminer l'efficacité d'un tel matériel d'acquisition : un filtre est-il suffisant pour recueillir le rayonnement infrarouge d'un humain ? Le projet CAPTHOM a une branche prévue sur l'aspect vision et ces questions y sont abordées [Benezeth, 2009].

On peut aussi prendre le problème inverse, c'est-à-dire, au lieu de chercher à détecter la personne dans la pièce, on peut chercher à caractériser la pièce et évaluer les perturbations apportées par la présence humaine. Le but serait d'abord de connaître l'environnement du capteur par différents paramètres tels que, par exemple :

- la température de la pièce,
- son niveau sonore,
- la luminosité,
- l'ouverture ou la fermeture de la porte,
- la distance des différents objets par rapport au capteur, ...

Pour avoir un capteur fiable, il faudra vraisemblablement coupler la caractérisation de la pièce ou de la zone à surveiller et la caractérisation de la présence d'une personne.

Le but du projet est d'avoir un capteur de détection de présence répondant au cahier des charges établi avec les partenaires industriels du projet.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Le chapitre 1 présente un état de l'art sur les différents capteurs existants qui permettent la détection de présence. On insistera sur les solutions commerciales et particulièrement sur les

détecteurs infrarouges passifs (PIR). Une partie sera consacrée à l'utilisation de ces capteurs dans des projets de recherche sur les habitats intelligents.

Le chapitre 2 présente les attentes du projet CAPTHOM par rapport à son cahier des charges défini avec nos partenaires industriels. Nous présenterons le résultat de l'évaluation de différents capteurs et le choix d'un capteur en particulier à savoir un capteur basé sur la détection d'émission infrarouge (IR) de la personne. Par rapport à ce choix, nous verrons qu'il a été nécessaire de mettre en place une méthode de caractérisation permettant d'évaluer un modèle de la réponse du capteur. Une application sur une installation dans une pièce spécifique, les WC, sera présentée à la fin de ce chapitre.

Le chapitre 3 présente le résultat de recherche sur la localisation de la personne. Les outils de modélisation par chaîne de Markov et chaîne de Markov cachée seront abordés. Un cas d'étude sera traité pour évaluer la méthode. D'autres méthodes seront présentées et nous utiliserons particulièrement un algorithme d'optimisation par la méthode de Levenberg-Marquardt.

Le chapitre 4 présente une application pour le maintien à domicile. Nous avons eu la chance de pouvoir nous pencher sur la problématique du maintien à domicile à travers l'utilisation d'un appartement pilote. Des résultats sur le quotidien d'une personne âgée, volontaire pour tester l'habitat, ont été recueillis. Les premières réflexions sur l'utilisation de ces données et l'utilisation de chaîne de Markov cachée seront proposées.

CHAPITRE 1

État de l'Art sur la détection de présence humaine

Sommaire

1.1	Les caractéristiques de la présence et différents systèmes de détections	9
1.1.1	Les caractéristiques du corps humain	9
1.1.2	Influence de la présence humaine sur l'environnement	10
1.1.3	Les solutions de détection de présence humaine	13
1.1.3.1	Les systèmes biométriques	13
1.1.3.2	Les capteurs pour la détection de présence humaine	14
1.1.4	Les solutions commerciales pour la détection de présence humaine	18
1.1.4.1	Fonctionnement des détecteurs de mouvements	23
1.1.5	Les dispositifs de détection Infrarouge	27
1.1.5.1	Les émissions infrarouges	27
1.1.5.2	Les détecteurs thermiques	28
1.2	Habitat intelligent	30
1.3	Conclusion	32

Dans ce chapitre, nous mettons en évidence les phénomènes physiques qui peuvent entrer en jeu pour la détection de la présence humaine et les différents moyens de détection existants basés sur différentes technologies. Nous nous arrêterons particulièrement sur les détecteurs infrarouges passifs (PIR) qui sont les plus utilisés pour détecter une personne et nous en profiterons pour mettre en évidence les phénomènes physiques en jeu avec ce capteur. Une liste de concurrents potentiels pour le PIR sera donnée où se trouve mentionné la technologie qui sera utilisée dans les chapitres suivants.

Enfin, la thématique de recherche sur les habitats intelligents sera présentée ce qui permettra de situer le contexte d'implantation du capthom.

1.1 Les caractéristiques de la présence humaine et présentation de différents systèmes de détections

Quels phénomènes physiques peuvent caractériser la présence humaine? Intuitivement, on reconnaît une personne à l'aide de nos yeux et du traitement de l'information visuelle par notre cerveau. En réalité, si cette seule information suffisait, alors un mannequin ayant la taille et la silhouette d'un homme passerait pour un être humain.

En effet, nous arrivons à reconnaître un être humain à l'aide de différentes informations. Nous voyons la silhouette d'une personne avec nos yeux, on va recueillir d'autres types d'informations qui vont confirmer que c'est une personne. La personne va sans doute respirer, cligner des yeux, etc. . . On l'a vue se déplacer. Elle peut aussi nous parler donc nous allons dans ce cas l'entendre. Elle peut aussi passer à côté de nous et nous sentirons, à ce moment là, le déplacement de l'air. Si la personne nous touche, pour nous saluer par exemple, on peut avoir d'autres types d'informations comme la température.

Bien que toutes ces informations puissent être recueillies par nos propres récepteurs naturels, un être humain (sans handicap) est capable d'identifier un être humain avec la vue seulement. Dans le cadre du projet Capthom, un sujet de thèse dédié à la détection de présence par la vision est réalisé par Yannick Benezeth [Benezeth, 2009], donc cette méthode ne sera qu'évoquée dans cette thèse.

Nous nous plaçons donc dans un cas particulier, à savoir : détecter la présence humaine sans la vue. Si on prend l'exemple d'une personne aveugle, elle utilisera les autres sens à sa disposition comme le toucher, l'ouïe ou l'odorat. De la même façon, pour identifier une personne, on peut utiliser d'autres technologies qui permettent d'avoir des informations qui identifieront la personne.

1.1.1 Les caractéristiques du corps humain

Bien que chaque individu soit différent et même unique, nous avons tous en commun notre morphologie. Une personne normalement constituée a deux bras, deux jambes, une tête, etc . . . ce qui implique qu'une silhouette humaine pourra être différenciée d'une silhouette d'un animal.

La masse du corps humain, appelée aussi masse corporelle ou abusivement "poids", peut permettre la caractérisation d'une personne. On rappelle que le poids d'un corps est la force exercée sur ce corps par la pesanteur et est donné par la formule suivante : $P = mg$, m étant la masse (en kg) et g l'accélération de pesanteur¹. En 2005, le poids moyen d'un homme en France est de $77,1kg$ et celui de la femme de $62,7kg$ [Statbel, 2005]. La différence de poids entre un adulte et un enfant est facilement repérable.

De la même façon, la taille peut permettre de différencier un homme ($175,7cm$ en moyenne) d'une femme ($162,3cm$ en moyenne) ou un adulte et d'un enfant [Synthèse, 2006].

L'homme va produire deux types de sons. Le premier type de sons est celui produit par son corps : sa voix, des applaudissements, le bruit de pas, la respiration, ... L'autre type est dû à son influence de par son activité sur son environnement, par exemple, s'il utilise un marteau ou écoute de la musique. La figure 1.1 nous donne une échelle des bruits liée à différentes activités.

La respiration est une caractéristique propre aux êtres vivants qui se traduit par un échange gazeux avec le milieu extérieur, dans notre cas on consomme du dioxygène pour rejeter du dioxyde de carbone. Le taux de dioxygène ou de dioxyde de carbone, dans l'environnement où la personne est, est forcément modifié.

La température du corps humain de base est de $37^{\circ}C$ environ. Cette valeur de base est donnée au repos et peut augmenter sous l'effet d'un effort important. Les pertes thermiques d'un homme au repos sont de l'ordre de $100W$ dissipés majoritairement par les infrarouges émis par la peau mais qui peuvent être augmentés en fonction de l'activité comme nous le montre la figure 1.2. [Dittmar *et al.*, 1995] explique aussi que lorsque la température ambiante est froide la répartition de la chaleur est modifiée comme nous le montre la figure 1.3. Les animaux ont une température corporelle différente selon l'espèce, information à exploiter sachant qu'aujourd'hui beaucoup de capteurs utilisent le rayonnement infrarouge pour détecter l'information d'occupation et que de nombreuses fausses détections sont dues à la détection d'animaux (chien, chat, souris, oiseaux, etc ...).

Nous pouvons réaliser de nombreuses activités qui nécessitent de notre part de faire des mouvements, déjà pour nous déplacer dans la pièce où nous nous trouvons. En fonction de notre activité, nous pouvons avoir des mouvements ou des gestes plus ou moins amples. Il est évident qu'une personne qui fait son ménage bouge plus qu'une personne qui regarde la télévision sur son canapé. On comprend que la détection de mouvement pour déceler une présence humaine dans une pièce va dépendre de l'activité de la cible.

1.1.2 Influence de la présence humaine sur l'environnement

Pour améliorer le confort dans l'habitat, il faut prendre en compte les conditions climatiques (ensoleillement, température de l'air, hygrométrie), les équipements comme le chauffage et le système de ventilation et les apports internes comme la chaleur produite par les occupants et les équipements divers.

1. On rappelle que g dépend et vaut $9,81 m/s^2$ à Paris

Echelle des bruits Les sons peuvent être répartis selon une échelle qui va des ambiances très calmes aux sons habituels, aux sons gênants et aux sons très nocifs.				
Audition	dB	Bruits intérieurs	Bruits extérieurs	Bruits de véhicules
<i>Seuil d'audibilité</i>	0 dB			
	5 dB	Laboratoire d'acoustique		
<i>Silence inhabituel</i>	7 dB		Désert	
	10 dB	Cabines de prise de son		
<i>Très calme</i>	15 dB		Feuilles agitées par vent doux	
	20 dB		Jardin tranquille	
	25 dB	Conversation à voix basse à 1,50 m		
<i>Calme</i>	30 dB	Appartement dans quartier tranquille		
	35 dB			Bateau à voiles
	40 dB	Bureau tranquille dans quartier calme		
<i>Assez calme</i>	45 dB	Appartement normal		Paquebot
	50 dB	Restaurant tranquille		
<i>Bruits courants</i>	60 dB	Grands magasins	Rue résidentielle	
	65 dB	Appartement bruyant		
<i>Bruyant mais supportable</i>	70 dB	Restaurant bruyant	Circulation importante	
<i>Pénible à entendre</i>	85 dB	Radio très puissante		Klaxons d'autos
	90 dB		Route à trafic intense	
	100 dB	Niveau réglementé pour les baladeurs	Marteau piqueur	Moto de course à 2 m
<i>Sons nocifs (au-delà de 110 dB, risque de traumatisme sonore aigu)</i>	110 dB	Atelier de chaudronnerie	Discothèque (niveau réglementé) Concert sonorisé	
	120 dB			Train circulant à grande vitesse dans une gare
	130 dB			Réacteur d'avion

FIGURE 1.1 – Échelle de bruits (tableau tiré de [Adosen, avril 2003])

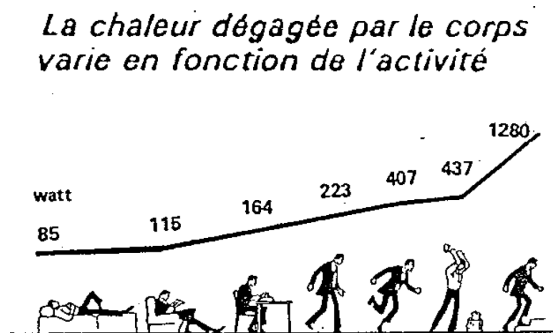


FIGURE 1.2 – Chaleur dégagée en fonction de l'activité physique

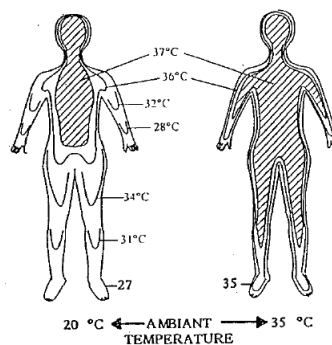


FIGURE 1.3 – Dépendance thermique de la peau en fonction de la température ambiante.

Notre cas d'étude se situe dans un environnement domestique (chambre, cuisine, bureau, ...). Dans une pièce, une personne va forcément avoir une influence sur des paramètres physiques tels que la température ou le taux de CO_2 comme nous l'avons vu précédemment. Notre corps est maintenu à une température constante de $37 \pm 0,8^\circ\text{C}$ et celle de la peau est comprise entre 32 et 33°C . Comme nous le montre la figure 1.4, la régulation de la température du corps s'effectue par convection, rayonnement et évaporation (dans une moindre mesure par conduction et respiration).

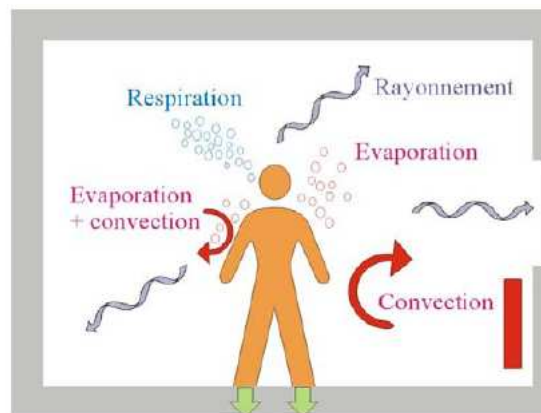


FIGURE 1.4 – la régulation de température d'un homme dans une pièce

Dans une pièce, une personne va interagir avec des objets : la porte, la fenêtre, l'interrupteur de la lumière, les meubles, l'électroménager, ... Certains éléments de la pièce auront des effets sur l'environnement : ouvrir la porte ou la fenêtre peut entraîner des courants d'air, allumer la lumière ou ouvrir les rideaux va changer la luminosité de la pièce. Cependant, il est à noter que certains éléments ne vont pas changer les paramètres de l'environnement mais peuvent avoir une influence sur la personne : une personne debout qui prend une chaise va s'asseoir ou une personne qui allume la télévision a de fortes chances d'être assise.

Il est à noter que certains équipements peuvent compenser une partie des besoins thermiques en hiver mais induiront des besoins de rafraîchissement en été : par exemple, dans le cadre du tertiaire un bureau où se trouvent plusieurs ordinateurs verra sa température fortement influencée. Autre exemple dans un cadre domestique, dans la cuisine quand quelqu'un prépare à manger.

1.1.3 Les solutions de détection de présence humaine

1.1.3.1 Les systèmes biométriques

Le domaine de la biométrie s'inscrit dans un cadre plus large que la domotique. Les applications sont souvent d'ordre professionnel et privé comme le contrôle d'accès à des lieux sensibles. À part les systèmes basés sur la capture d'image, l'identification d'une personne se fait si la personne se prête au scan pour la détection.

Il existe aujourd'hui de nombreux travaux sur des systèmes biométriques notamment dans les domaines les plus connus (décrites aussi dans [Dorizzi *et al.*, 2004]) comme :

- empreintes digitales,
- vérification par le visage,
- photographie de l'iris,
- géométrie de la main,
- voix,
- signature dynamique.

La figure 1.5 propose une comparaison en fonction de différents paramètres.

Il existe des travaux qui ont pour ambition de proposer un système d'identification de la personne à faible coût ("low-cost") en utilisant des détecteurs pyroélectriques et différentes méthodes de classifications. Cette méthode sous-entend un apprentissage sur les signaux des personnes à identifier [Burchett *et al.*, 2006]. Des travaux américo-taïwanais proposent un module composé de quatre détecteurs pyroélectriques et un algorithme qui génère des modèles de Markov cachés pour chaque personne. Le résultat va dépendre du nombre de détecteurs que comprend le module et le taux d'identification demande encore à être amélioré [Fang *et al.*, 2006a]. Il a été décidé dans le cadre du projet de ne pas aborder la problématique de reconnaissance et d'identification de la personne.

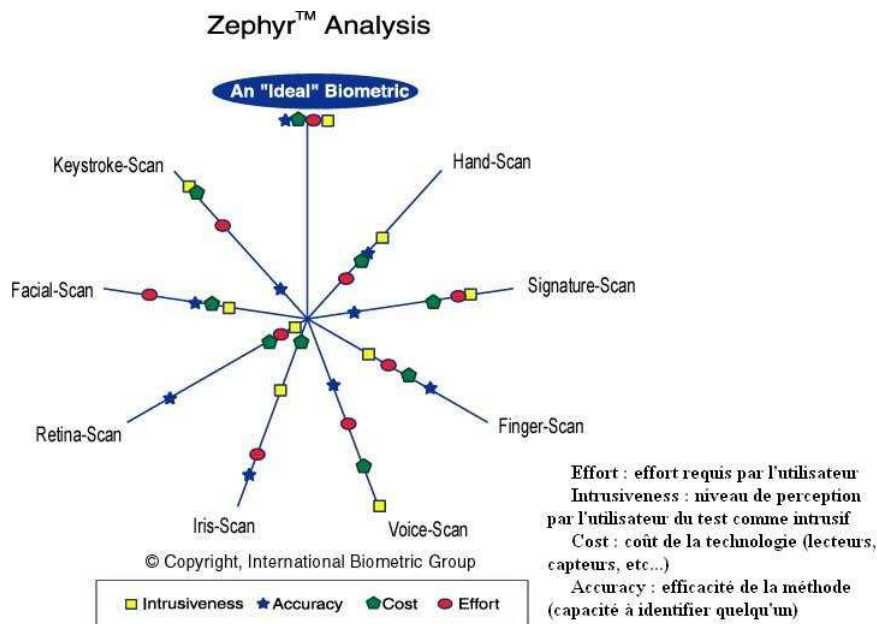


FIGURE 1.5 – Comparaison des différents systèmes biométriques

1.1.3.2 Les capteurs pour la détection de présence humaine

La volonté de détecter la présence humaine est une information recherchée en particulier dans des applications de type domotique (dans le cadre de contrôle de ressource énergétique). Il existe des applications dans le cadre de la sécurité des biens, appelée aussi détection d'intrusion. Dans le domaine de la sécurité industrielle, de nombreux systèmes sont mis en place et font l'objet de recherches pour protéger les ouvriers qui travaillent dans des usines possédant des zones à sécuriser (machine automatisée)[Stellman, 2000] [INRS, 2005].

Il existe un large éventail de capteurs, qui selon leur utilisation, permettent d'obtenir une information de type "localisation" par la détection de proximité, de passage, de mouvement ou la mesure d'une distance, d'une vitesse, ... Nous allons présenter quelques capteurs qui sont utilisés dans des dispositifs de détection de présence humaine.

Les contacteurs mécaniques (figure 1.6) permettent d'établir un contact électrique quand ils sont activés mécaniquement. On retrouve ce type de dispositif dans des interfaces utilisées dans le maintien à domicile de personnes âgées ou handicapées [Noguchi *et al.*, 2007], [Youcef *et al.*, 2008]. Les contacteurs magnétiques (figure 1.6) sont en général utilisés dans le cadre de l'anti-intrusion. Les contacteurs sont placés sur la porte (ou la fenêtre) de façon à être en contact lorsque la porte est fermée. Lorsqu'on ouvre la porte, les deux contacteurs ne sont plus en contact, on peut alors déceler une ouverture de la porte.

Il existe aussi des capteurs magnétiques basés sur l'effet Hall et qui sont utilisés dans une grande variété d'applications. En industrie, les capteurs magnétiques sont utilisés pour le comptage, le contrôle de vitesse, la sécurité des machines, ... En domotique, ces capteurs peuvent être utilisés pour une alarme anti-effraction, le contrôle de store, la position de fenêtre, etc. ...

Les capteurs de pression mécanique ou FSR (Force Sensitive Resistance) sont des dispositifs



FIGURE 1.6 – à gauche un contacteur mécanique, à droite un contacteur magnétique

dont la résistance électrique diminue lorsqu'on applique une pression (1.7). Ils sont donc sensibles à la force qui va leur être appliquée. Ils peuvent être placés sur des objets et fournir des informations d'utilisations de ces derniers (par exemple, une chaise ou un lit) [Gerhome, 2010].



FIGURE 1.7 – Capteur FSR

Finalement, la masse d'une personne est un élément très intéressant pour la détection de présence. Ainsi, de nombreux constructeurs proposent des tapis qui permettent de surveiller une zone (1.8) pour des applications de sécurité industrielle ou dans le cadre du maintien à domicile. Il existe des systèmes permettant de compter les passagers ou des sauts avec chute. Le problème est que ces tapis ne sont pas forcément très esthétiques (parfois des efforts sont faits) et les vendeurs peuvent préconiser de le dissimuler sous un tapis ou une moquette existante. Il existe de nombreux travaux de recherche qui utilisent des tapis pour la détection de personne [Noguchi *et al.*, 2007]. Ce genre de tapis est utilisé dans le cadre de la localisation d'une personne dans une maison.

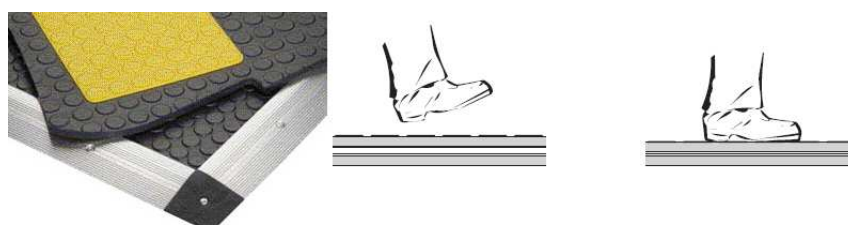


FIGURE 1.8 – tapis de contact proposé par Bircher Reglomat

Un autre moyen, a priori simple, de détecter une personne est l'utilisation d'émetteur porté par la personne sous forme de bracelet (par exemple) et qui communique avec un récepteur

[INRS, 2005]. Ce type de technologie peut être contraignant pour l'utilisateur qui doit penser à porter l'émetteur systématiquement. Dans le cadre du maintien à domicile, cette solution est souvent proposée. Certaines équipes de recherches proposent des systèmes équipés en plus d'accéléromètres [Noury *et al.*, 2009]. Un accéléromètre est un capteur qui permet de mesurer l'accélération d'une cible sur laquelle il est fixé. Le principe des accéléromètres est basé sur la loi fondamentale de la dynamique $F = M.a$ (F : la force, M : la masse, a : l'accélération). Ce type de capteur se retrouve dans des produits «grand public» :

- en sport : ils sont utilisés pour déterminer la vitesse et la distance parcourue,
- dans les appareils photos et caméras : pour la stabilisation de l'image,
- dans les manettes de jeux vidéos : la console Wii détecte directement le mouvement du joueur grâce à des accéléromètres placés dans la manette,
- en téléphonie : pour retrouver des fonctions décrites précédemment.

L'utilisation d'un accéléromètre est une piste qui est la plus privilégiée pour la détection de chute des personnes âgées.

Les informations sonores peuvent être récoltées par un microphone qui permet la conversion des ondes sonores acoustiques en signaux électriques. À l'ère du multimedia, cet outil nous est très familier, nos PC en sont souvent équipés, sans parler des téléphones. Il existe plusieurs types de microphones, les deux plus courants sont les microphones dynamiques et les microphones à condensateur (voir figure 1.9) :

- **Microphone dynamique.** Une membrane en plastique ou en métal est fixée à une bobine en cuivre, située dans un champ magnétique. Les ondes de pression sonore qui percutent la membrane provoquent son déplacement, qui entraîne à son tour celui de la bobine située dans le champ magnétique (créé par l'aimant fixe). Les variations magnétiques qui en résultent se traduisent par des variations électriques correspondant généralement aux variations physiques de l'onde sonore d'origine.
- **Microphone à condensateur.** Leur mince membrane conducteur est suspendue au-dessus d'une armature arrière, ce qui forme un fin condensateur flexible. Lorsque les ondes sonores stimulent le diaphragme, la distance entre ce dernier et la plaque arrière varie et avec elle la capacitance. Cette variation de capacitance produit à son tour une variation de la tension. Le circuit associé convertit ces modifications de tension en un signal qui est envoyé au préamplificateur.

Il existe des travaux basés sur l'utilisation de microphones pour localiser une personne [Guentchev et Weng, 1998].

Les capteurs à ultrason sont composés d'un émetteur et d'un récepteur et utilisent la méthode de la télémétrie à ultrason pour calculer la distance entre l'émetteur et un objet distant. Cette méthode consiste à mesurer le temps que prend une impulsion ultrasonique pour atteindre l'objet et revenir par réflexion à son point de départ. L'onde sonore utilisée a une fréquence de plus de 20 kHz. Connaissant la vitesse de propagation de ce type d'onde, qui est environ de 30 cm/ms, la distance franchie par les ultrasons est donnée par la formule suivante [Laurin, 2000] :

$$d = \frac{v \cdot t}{2}$$

où d est la distance totale parcourue, v la vitesse de propagation et t le temps écoulé.

Il existe aussi des capteurs ultrasoniques basés sur la mesure du décalage de fréquence de l'onde entre l'émission et la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie

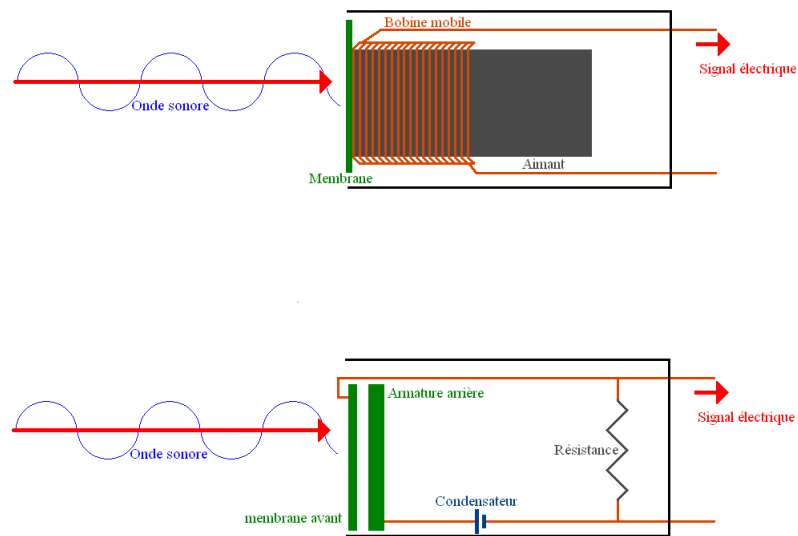


FIGURE 1.9 – Schéma de fonctionnement d'un microphone dynamique (en haut) et d'un microphone à condensateur (en bas)

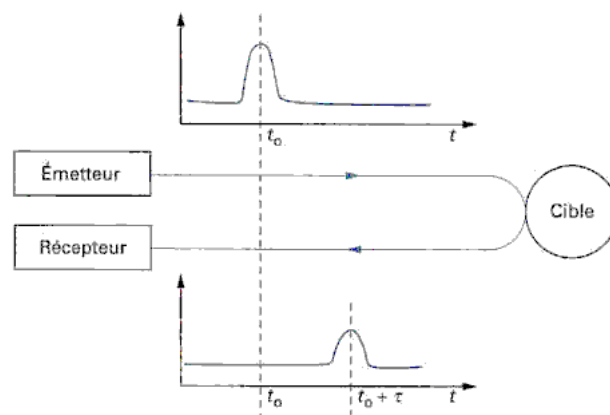


FIGURE 1.10 – Principe utilisé par les radars pour la mesure de distance



FIGURE 1.11 – capteur à Ultrason

au cours du temps (effet Doppler). Ce procédé est utilisé dans les radars. Cette méthode est un moyen de détecter le mouvement [Filloux, 1997][Ruser et Mágori, 1998].

Des mesures sur les ondes électromagnétiques à basses fréquences sont très souvent utilisées dans la détection de mouvement en domotique. Des précautions d'utilisation s'imposent car les ondes radio traversent les murs donc deux capteurs dans une pièce ou juste séparés par un mur risquent de donner des résultats incohérents [Filloux, 1997].

Un télémètre laser permet de connaître la distance d'une cible. Un rayon modulé en fréquence est projeté sur une cible. La cible renvoie ce rayon vers l'appareil. Le temps mis par le rayon pour revenir est mesuré et la distance séparant l'utilisateur de la cible est calculée, de la même façon que le capteur à ultrason décrit précédemment [Gouaux, 1999].

Les ondes lumineuses visibles peuvent être exploitées pour la détection de présence. Les capteurs photoélectriques sont sensibles à la quantité de lumière reçue. Il existe de nombreux moyens de numériser une capture d'image à l'aide des barrettes CCD (Charge-Coupled Device) dont l'utilisation est courante dans les appareils photos et les caméras. L'information à obtenir doit être traitée après capture de l'image. De nombreux travaux existent sur les algorithmes de traitements d'images. Aujourd'hui, on est donc capable de détecter une personne, de la localiser et de la suivre (tracking) [Ivanov *et al.*, 2002][Benezeth, 2009]. Les problèmes à résoudre sont liés à l'éclairage de la scène et à l'existence des zones d'obstructions.

Enfin, l'utilisation des ondes infrarouges pour la détection de présence est le moyen le plus populaire. Nous nous attarderons plus loin sur les dispositifs Infrarouges qui sont courants dans l'utilisation de la détection de présence. Il existe des capteurs pyroélectriques, sensibles aux variations de température et très répandus dans les détecteurs de mouvements. Cette détection est qualifiée de passive car le signal électrique est généré en fonction du rayonnement thermique naturel émis par la cible [Escriba, 2005]. L'autre type de détection est appelée détection active car elle utilise un émetteur Infrarouge et un récepteur. S'il n'y a pas d'objet entre l'émetteur et le récepteur, ce dernier détectera le rayonnement IR. Par contre, si un objet coupe le faisceau infrarouge, alors l'émetteur décèlera une présence [Escriba, 2005][Ivanov *et al.*, 2002] [Laurin, 2000]. Des recherches sont effectuées également dans le cadre de l'imagerie IR. Par exemple, [Burion, 2004] présente une application de la détection d'humain pour la robotique à l'aide de la vision dans le visible mais aussi dans l'infrarouge. Dans le cadre du projet CAPTHOM, Yannick Benezeth a travaillé sur cette partie [Benezeth *et al.*, 2008].

On peut retrouver une comparaison des différents capteurs présentée sous une forme plus ou moins similaire à la table 1.1 dans différents travaux, issue de [Ivanov *et al.*, 2002].

1.1.4 Les solutions commerciales pour la détection de présence humaine

La domotique (encore appelée technologie de la maison intelligente) recouvre un ensemble de techniques faisant appel à l'électronique et à l'automatique [Filloux, 1997]. L'utilisateur porte son intérêt pour la domotique pour :

- la gestion et la distribution d'énergie,
- la surveillance et la sécurité,
- le confort et la commodité.

1.1. LES CARACTÉRISTIQUES DE LA PRÉSENCE ET DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE DÉTECTIONS

Type de détecteurs	Précision / résolution de l'information	Information					Coût	Inconvénients
		Détection de mouvement	Nombre d'occupants	Identification	Localisation	Activité physique		
Infrarouge passif	Basse	+	-	-	-	+/-	Faible	Résolution faible
Barrières lumineuses	Basse	+/-	+	-	-	-	Faible	Résolution faible
Détecteurs micro-ondes	Basse	+	-	-	-	-	Moyen	Résolution faible et prix élevé
Ultrasons (simple)	Basse	+	-	-	-	-	Faible	Résolution faible
Ultrasons (intelligent)	Relativement basse	+	-	-	+/-	+/-	Moyen	Précision faible
Détecteurs de chocs	Haute	+	-	-	-	+/-	Moyen	Installation relativement complexe
Caméra infrarouge	Très haute	+	+	-	+	+	Très élevé	Prix très élevé
Pyrodétecteurs 360°	Très haute	+	+	-	+	+	Moyen	Bruits mécaniques
Transpondeurs	Basse	+	-	+	-	-	Moyen	Résolution et portée faible
Caméra vidéo	Très haute	+	+	+/-	+	+	Elevé	Algorithmique complexe, intrusion dans la vie privée, critique par luminosité insuffisante
Systèmes biométriques	Basse	-	+	+	-	-	Elevé	Résolution faible, facteurs psychologiques

TABLE 1.1 – comparaison de différents capteurs pour la détection de présence [Ivanov *et al.*, 2002]

Selon l'état de l'art du marché *des cahiers de domotique news* [Domotique News, Mai 2004], quatre domaines d'activité ont été identifiés :

- les services de programmes audio-vidéo et d'informations (évolution autour d'un téléviseur évolué, du câble et du satellite permettant par exemple le choix de films ou d'information à la commande ; des services bancaires à domiciles sont imaginés) ;
- les services de communication des données et de la voix (utilisation de la ligne téléphonique pour le transport de la voix, des données (e-mail, fax) et la connexion internet ; le but étant de faciliter la communication avec un interlocuteur de type télé-service) ;
- la sécurité (ce domaine est déjà développé dans l'habitat domestique ; des capteurs sont reliés à un système de sécurité qui communique par un réseau de type téléphonique généralement) ;
- la gestion de l'énergie (ce domaine existe déjà aussi pour la gestion de l'énergie électrique domestique).

Notre problématique se situe au niveau du dernier domaine. Le fait de détecter la présence humaine est en fait une solution pour la prise de décision de la commande de l'énergie domestique.

Lorsque l'on veut surveiller l'intérieur d'une zone considérée, pour nous une pièce intérieure, on parle de détection intérieure [Csee-Métiers, 2006]. Plusieurs détecteurs existent :

- détecteur hyperfréquence : il détecte les perturbations qu'une personne crée sur la transmission d'un signal hyperfréquence (2,4 GHz, 9,9 GHz ou 24 GHz). La modification du signal réfléchi est de type électromagnétique [Csee-Métiers, 2006] [Filloux, 1997],
- détecteur ultrason : un peu comme le détecteur hyperfréquence, il détecte les perturbations qu'une personne crée sur la transmission d'un signal hyperfréquence (40 KHz). La modification du signal réfléchi n'est pas de type électromagnétique, la propagation des ondes est limitée à l'enceinte [Csee-Métiers, 2006] [Filloux, 1997],
- détecteur infrarouge passif : il détecte le rayonnement par la personne qui franchit le ou les faisceaux de détection. Ce type de détecteurs est produit notamment par l'entreprise Legrand (voir figure 1.12). Une personne émettra un rayonnement thermique naturellement. Le détecteur générera un signal électrique en fonction des variations infrarouges de la cible [Csee-Métiers, 2006] [Escriba, 2005],
- détecteur bivolumétrique : il assure une protection optimum contre les perturbations et regroupe soit un infrarouge passif et un ultrason soit un infrarouge passif et un hyperfréquence. Ce couplage de technologie permet de corriger certaines erreurs de détection si les détecteurs sont utilisés seuls.

On remarque que les détecteurs de mouvement sont des solutions pour détecter une présence humaine et que leurs prix sont variables mais restent accessibles à tous. Il existe toutefois sur le marché des capteurs qui ont la même vocation, à savoir détecter une personne, mais dont l'information fournie n'est pas simplement "présence" ou "personne". Par exemple, l'entreprise IRISYS propose un capteur composé d'une matrice d'éléments sensibles à l'infrarouge 16×16 pixels (voir figure 1.13a). Cette combinaison permet d'obtenir une image basse résolution et à l'aide d'un algorithme qui traite l'image du capteur, on peut avoir l'information sur le nombre de personnes qui est passé entre deux lignes définies par l'utilisateur (voir figure 1.13b). L'application ici n'est pas du tout dans le cadre de la domotique mais plus dans le cadre tels que les commerces, les gares, les aéroports, les parcs de loisirs, les musées, les banques, etc. ... À la vue de ces possibilités, il existe donc d'autres types de systèmes de comptage basés sur la détection infrarouge active comme le propose l'entreprise DILAX (voir figure 1.14). Dans un cadre plus domestique, certaines entreprises proposent des systèmes composés de caméras et de capteurs de mouvements

1.1. LES CARACTÉRISTIQUES DE LA PRÉSENCE ET DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE DÉTECTIONS

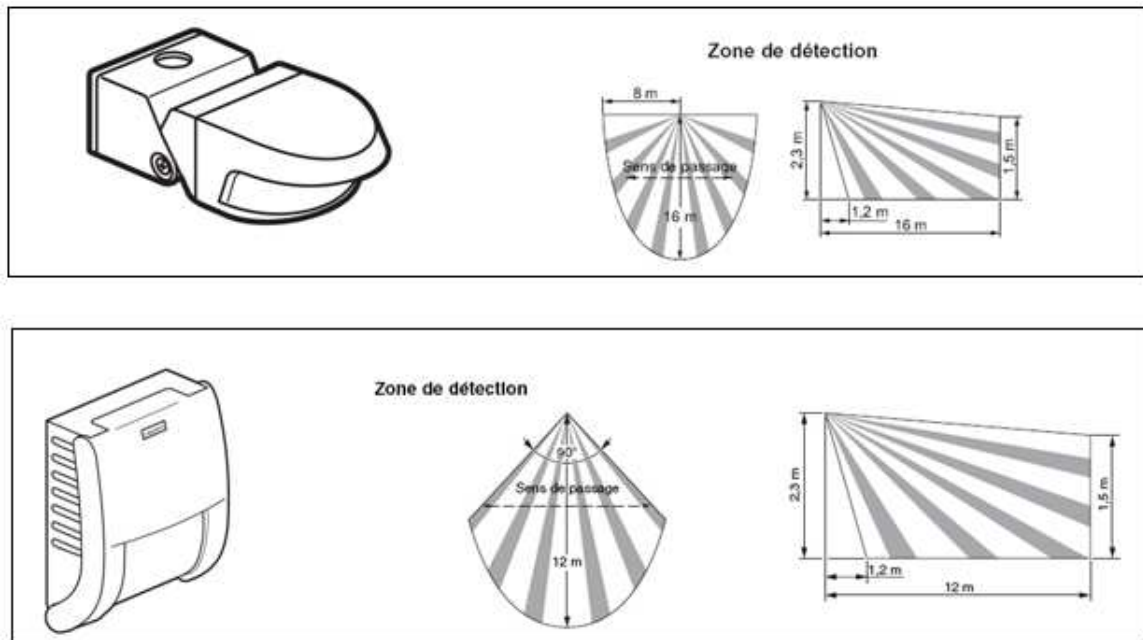


FIGURE 1.12 – Détecteurs infrarouges passifs vendus par Legrand (en haut, 882 10 et en bas, le 882 09)

comme Panasonic (voir figure 1.15), types de produit que l'on peut retrouver également chez leurs concurrents comme Siemens.

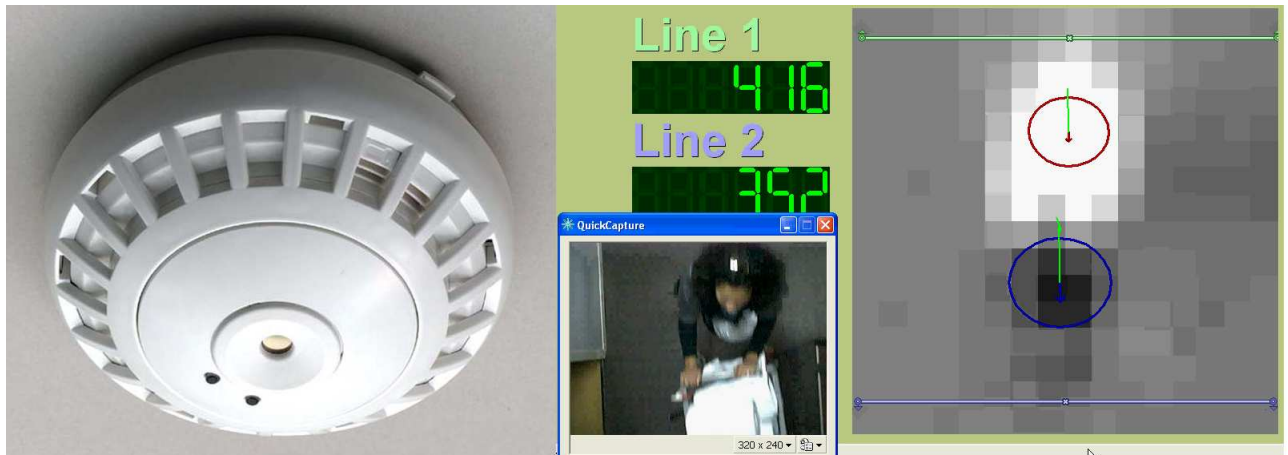


FIGURE 1.13 – a) à gauche, capteur de IRISYS - b) à droite, une scène de passage vue par une webcam et le capteur IRISYS (image basse résolution)

Finalement, les détecteurs de mouvement basés sur la détection infrarouge existent depuis plus de trois décennies, et sont complètement acceptés par le grand public malgré quelques dysfonctionnements qui sont acceptés par les utilisateurs. Pour ces raisons, nous allons aborder le fonctionnement de ce type de capteur plus en détails.

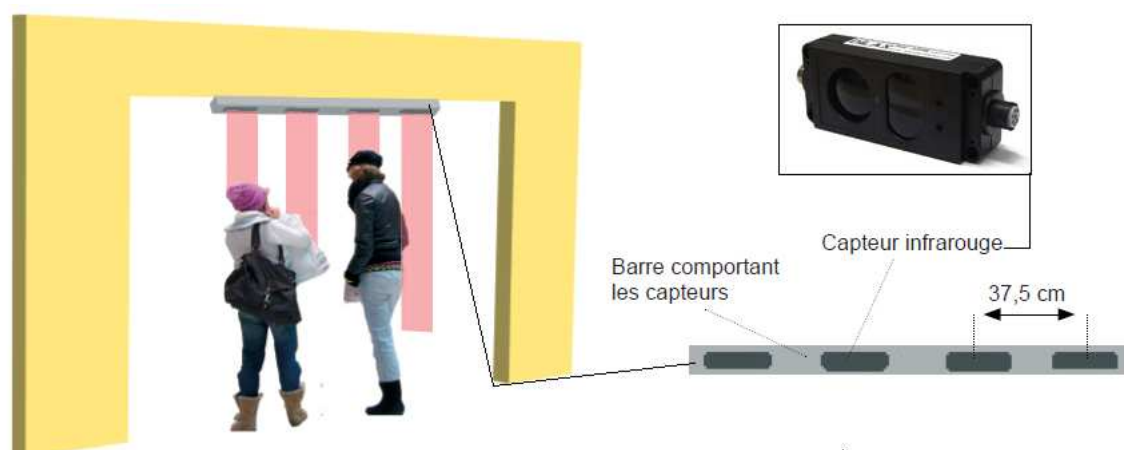


FIGURE 1.14 – Capteur dilax IRS 320



FIGURE 1.15 – Capteur Panasonic BL-WV10

1.1.4.1 Fonctionnement des détecteurs de mouvements

L'effet pyroélectrique a été découvert par Brewster en 1824, mais l'application dans les détecteurs infrarouges n'a été introduit qu'au début des années 1970. Aujourd'hui, le détecteur pyroélectrique est le détecteur le plus utilisé pour la détection infrarouge thermique [Schilz, 1999].

L'application de détection de mouvement est possible par :

- la génération d'un stimulus dont la réflexion est détectée,
- une détection d'un signal généré par un objet.

Généralement, pour des raisons de coût, on choisit la deuxième option [Ess, 2003]. Lorsqu'une personne se déplace dans le champ de détection, son rayonnement infrarouge est focalisé par les lentilles de Fresnel sur le détecteur pyroélectrique qui génère un signal (voir figure 1.16) qui après traitement peut commander toutes sortes d'équipements [Gobeau, 2006].

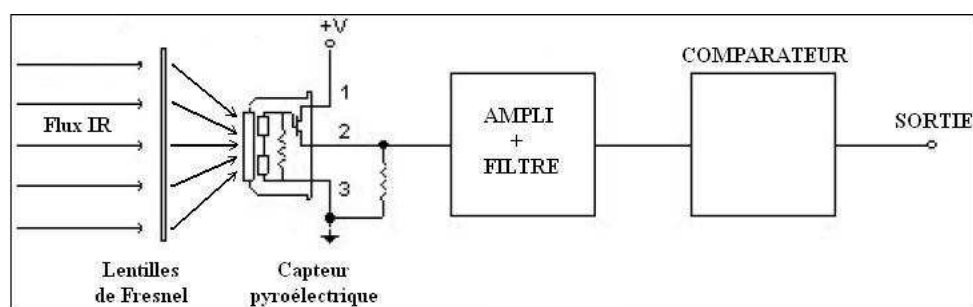


FIGURE 1.16 – Principe de fonctionnement des capteurs PIR

On rappelle que les ondes infrarouges sont une partie du spectre électromagnétique qui se trouve entre les micro-ondes et la lumière visible. Les humains, à la température normale du corps, rayonnent plus fortement dans le spectre infrarouge, avec un maximum pour une longueur d'onde d'environ $10\mu m$ comme nous le montre la figure 1.17 [Keller, 1984]. Pour détecter ce genre de signal, il faut donc utiliser un transducteur capable de convertir le signal infrarouge sous une forme exploitable par un circuit classique : des thermistances, des thermocouples (thermopiles) ou, comme nous allons le voir ici, un système pyroélectrique.

Un capteur pyroélectrique est fait d'un matériau céramique qui génère une charge lorsqu'il est exposé à un rayonnement infrarouge. La charge émise dépend de la quantité de radiation reçue. Ce capteur est sensible sur une large bande de longueur d'onde de rayonnements. Pour optimiser la détection de l'homme, un filtre est ajouté pour limiter le rayonnement incident à une portée de $8\mu m$ à $14\mu m$.

Ce capteur peut être affecté par les vibrations, les interférences radio et le rayonnement du soleil, c'est pourquoi le dispositif de détection de mouvements possède deux éléments sensibles (figure 1.18). Les éléments sensibles sont connectés de telle sorte que le signal de l'un est soustrait à l'autre. Ce système permet d'avoir un signal nul à la sortie. Une cible qui passe devant le capteur actionne l'un après l'autre les éléments sensibles, tandis que les vibrations et autres bruits de fond affectent les deux éléments simultanément et sont annulés. La présentation des deux éléments

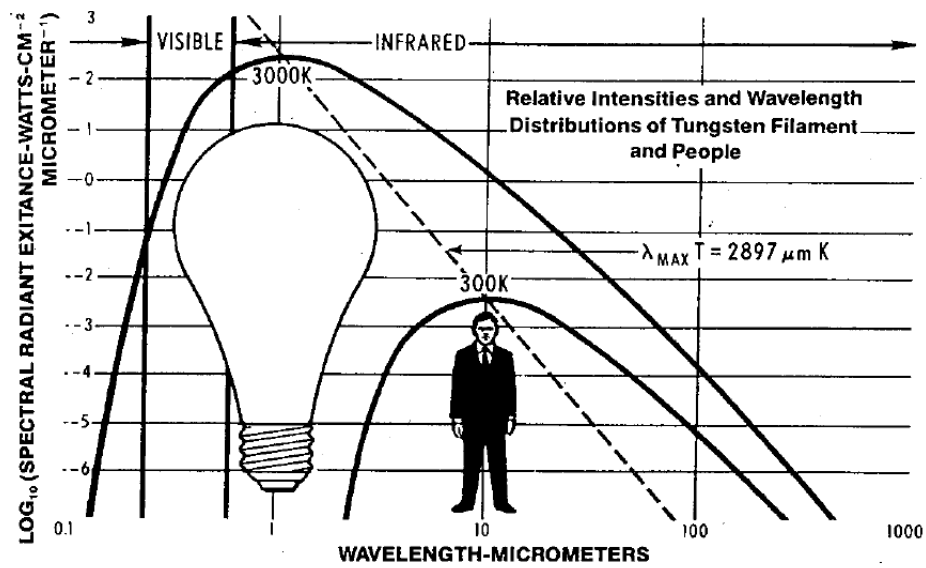


FIGURE 1.17 – rapport d'intensité et de longueur d'onde entre une ampoule et une personne

permet une sensibilité maximale le long d'un seul axe comme nous le montre la figure 1.19 [Close up, 2002].

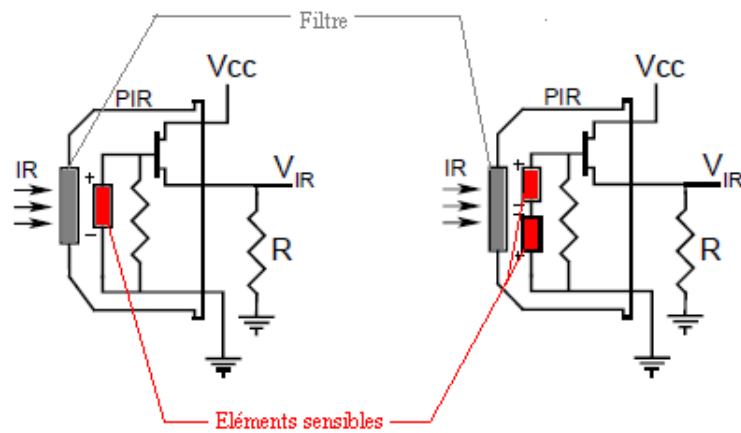


FIGURE 1.18 – à gauche, détecteur pyroélectrique à 1 élément, à droite, détecteur pyroélectrique à 2 éléments

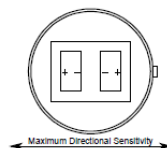


FIGURE 1.19 – agencement classique d'un détecteur pyroélectrique à 2 éléments

Le détecteur infrarouge, que nous utiliserons dans nos manipulations présentées plus tard, est le RE200B (fabriqué par NICERA); remarquez que ce capteur équipe de nombreux détecteurs de mouvements vendus dans le commerce. Ce capteur possède deux éléments sensibles qui lorsqu'une personne passe, vont créer un pic positif (appelé abusivement "polarisation") et un pic négatif (appelé abusivement "dépolérisation") comme nous le montre la figure 1.20. Comme nous l'avons décrit précédemment, chaque pic correspond à la réponse d'un des éléments. Leurs signaux s'annulent devant le bruit de fond mais aussi devant une personne immobile.

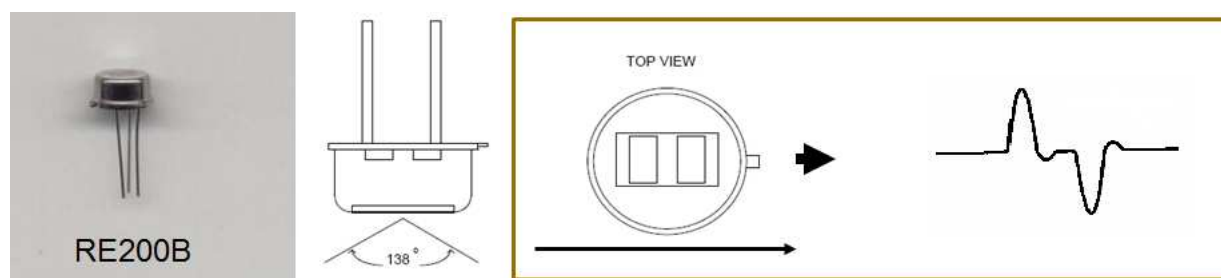


FIGURE 1.20 – De gauche à droite : photo d'un détecteur infrarouge RE200B, schéma de son champ de détection et signal obtenu lors du passage d'une cible

Pour une meilleur utilisation, une optique est utilisée : une lentille de Fresnel. Pour être exact, on utilise une matrice de lentilles de Fresnel. Comme le montre la figure 1.21, le champ de détection du capteur est plus grand, ce qui permet d'obtenir plus d'information dans l'espace.

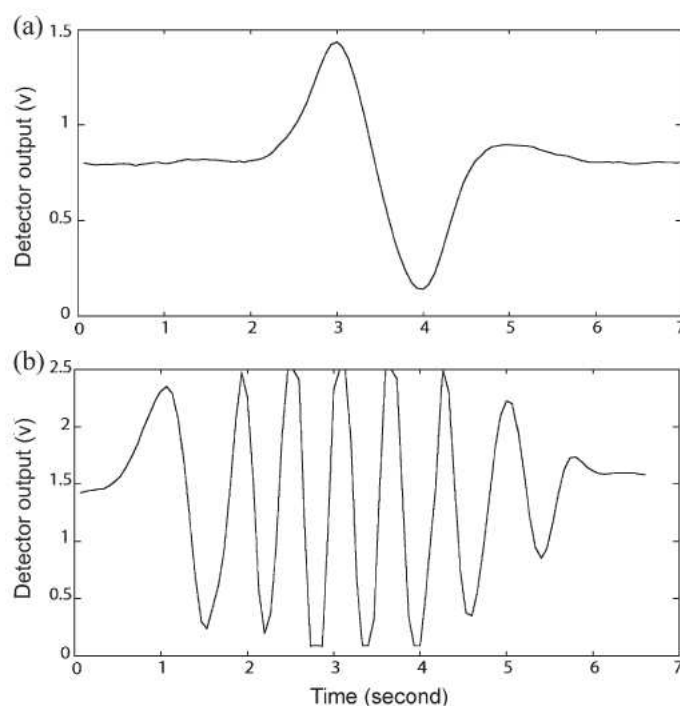


FIGURE 1.21 – réponse d'un détecteur pyroélectrique lors du passage d'une source chaude - (a) sans système optique - (b) avec la lentille de Fresnel

La figure 1.22 nous présente l'action de la lentille de Fresnel. En fait, à l'aide de cette optique, le capteur voit son champ de détection divisé en plusieurs lobes de détections. Chaque lobe est composé de deux cônes de détection très légèrement décalés qui sont chacun affecté à la focalisation du rayonnement infrarouge sur un des deux éléments sensibles. Le passage d'une personne dans un lobe de détections va engendrer un pic correspondant à l'élément excité en premier puis un second pic opposé correspondant à l'autre cellule sensible. Ce phénomène est aussi représenté sur la figure 1.20 et sur le premier graphe de la figure 1.21. En fait, la lentille de Fresnel va permettre de découper la pièce à l'aide de plusieurs lobes de détection. Il y aura effectivement des zones de non-détection entre chaque lobe (qui, nous le rappelons, est jumelé par deux cônes). Cependant, ces zones sont très petite ce qui n'empêche pas la détection d'une personne qui se déplace dans la pièce, comme nous le rappelle le deuxième graphe de la figure 1.21. Cette configuration reste, toutefois, fragile quand une personne reste sur place et fait de légers mouvements. En effet, il faut se rappeler que le capteur est sensible à la variation de température dans son champs de détection. Ainsi, la variation de flux infrarouge perçue par le capteur peut être le même si la personne bouge peu et par conséquent le capteur ne détecte personne. Pour compenser la non détection de mouvement d'une personne, les produits commercialisés possèdent une temporisation réglable par l'utilisateur pour la commande de la lumière par exemple. En effet, après une détection et s'il n'y a plus de mouvement, on considère qu'il n'y a plus personne dans la pièce et on éteint la lumière après le temps réglé. Durant cette période, si un mouvement est détecté alors la temporisation est relancé.

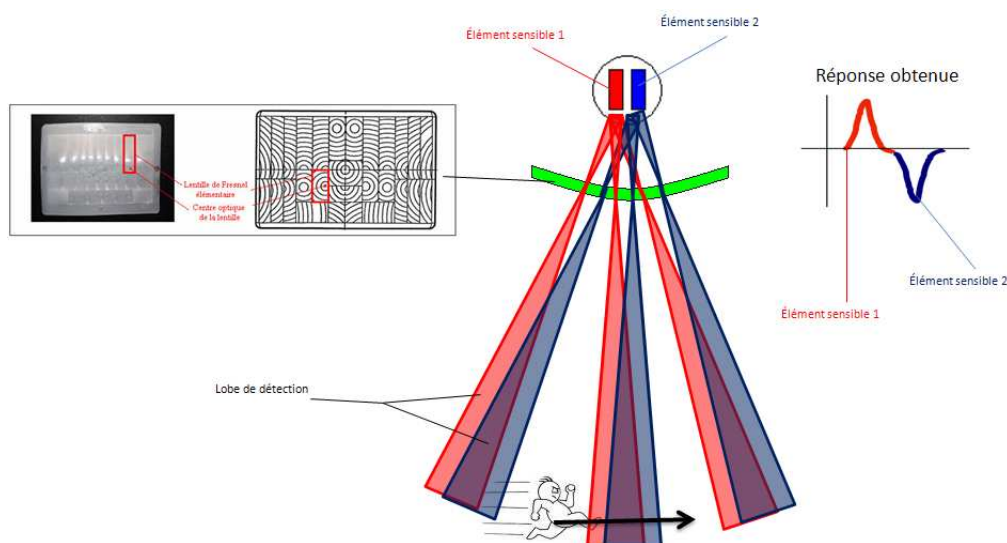


FIGURE 1.22 – schéma de principe d'une détection avec une lentille de Fresnel

Les résultats satisfaisants des détecteurs infrarouges passifs, pour détecter les mouvements d'une personne, alimentent de nombreux thèmes de recherche. Par exemple, il n'est pas rare de trouver des travaux sur le suivi de personne à l'aide de détecteur infrarouge [Fang *et al.*, 2006a] [Hosokawa et Kudo, 2005][Shankar *et al.*, 2006]. Pour réussir le "tracking" d'une personne, on utilise plusieurs capteurs afin de couvrir une plus grande surface et l'exploitation des informations issues de ce réseau de capteurs est réalisée par des algorithmes basés sur les filtres de Kalman, des réseaux de neurones, des chaînes de Markov cachées ou autre [Hao *et al.*, 2006][Fang *et al.*, 2006b].

Au Japon, il a été proposé un module composé d'un détecteur pyroélectrique et d'un télémètre qui permet d'avoir une information sur la présence mais aussi de localisation et de dénombrement [Yoshiike *et al.*, 1995]. Toutefois, les notions de coût et d'encombrement ne sont pas des paramètres pris en compte. Plus tard, la même équipe de recherche va proposer d'utiliser une matrice de détecteurs IR 16×16 capable de donner une image basse résolution [Hashimoto *et al.*, 2000].

[Yoshiike *et al.*, 1999] proposent un capteur, utilisant une matrice linéaire de 8 capteurs pyroélectriques, qui à l'aide d'un moteur de rotation, peut voir sur 360° étant fixé sur le plafond. Au final, le principe revient à réaliser du traitement d'image basse résolution.

Finalement, ces détecteurs sont en quelque sorte détournés habilement pour détecter la présence humaine. En réalité, on détecte un mouvement. Si la personne ne bouge pas, le détecteur ne la détectera pas. Pour résumer, avec ce genre de détecteur, l'absence de mouvement signifie qu'il n'y a personne dans la pièce. Ce principe est gênant surtout quand la personne dort, par exemple. Il était important dans un premier temps de chercher toutes les pistes imaginables pour avoir une idée d'ensemble sur la détection de la présence humaine. Au cours de cette thèse, nous avons été particulièrement attiré par la piste de la détection de la chaleur humaine par émission infrarouge, c'est pour cette raison que nous abordons le sujet plus en détail dans la partie suivante.

1.1.5 Les dispositifs de détection Infrarouge

Il existe effectivement un large éventail de capteurs de différentes technologies qui pourraient aider à la détection de la présence humaine, mais il faut avouer que le moyen le plus utilisé reste les techniques basées sur la détection de variation de flux de chaleur dégagé par une personne. En effet, les détecteurs de mouvement, qui sont acceptés en tant que détecteurs de présence sur le marché, sont pour la plupart des capteurs infrarouges. Il est à noter que ces détecteurs sont souvent à faible coût sur le marché et qu'il existe de nombreux travaux visant à améliorer leur conception avec de nouveaux matériaux par exemple [Haffar, 2007][Escriva, 2005][Nougaret, 2007].

1.1.5.1 Les émissions infrarouges

Tout objet émet un rayonnement qui est en grande partie dû à sa température. Un objet qui n'a "pas de couleur", signifie qu'aucune longueur d'onde n'est sélectivement émise ou absorbée, le spectre de rayonnement est complètement déterminé par la température seulement. C'est ce qu'on appelle un "corps noir". Les caractéristiques spectrales de rayonnement d'un corps noir peuvent être calculées théoriquement comme le montre la figure 1.23 obtenue à l'aide de la loi de Planck [Schilz, 1999] :

$$\frac{dR_{CN}(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) \right]} \quad (1.1)$$

avec :

- $\frac{dR_{CN}(\lambda, T)}{d\lambda}$: émittance ou existence spectrale du corps noir ($W.cm^{(-2)}. \mu m^{(-1)}$),
- h : la constante de Planck ($6,06261776.10^{(-34)} J.s$),
- k : la constante de Boltzmann ($1,380662.10^{(-23)} J.K^{(-1)}$),
- λ : la longueur d'onde (μm),
- T : la température du corps noir (K).

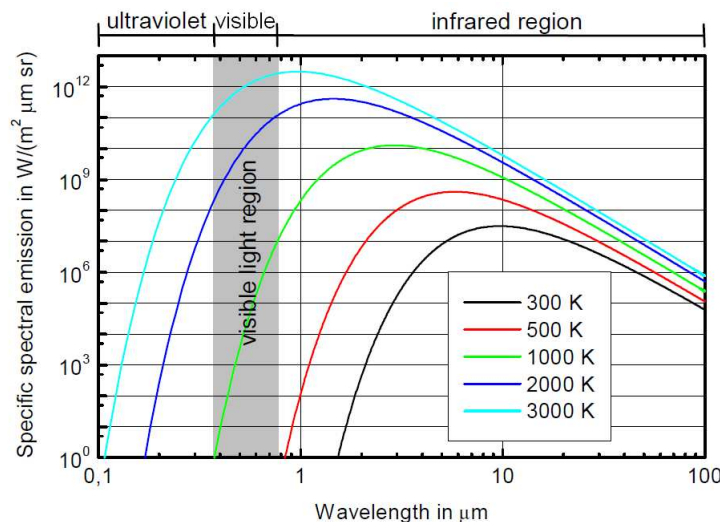


FIGURE 1.23 – Spectre de rayonnement d'un corps noir pour différentes températures

Quand la température augmente, l'intensité à chaque longueur d'onde du spectre de rayonnement augmente aussi. Cela signifie que l'on peut déterminer la température à distance d'un objet en mesurant la puissance apparente rayonnée. Une telle mesure peut être réalisée en utilisant l'œil nu. L'œil humain est sensible aux rayonnements dans la gamme $0,38$ à $0,75 \mu m$, appelé «spectre visible» (marqué dans la figure 1.23 et dans la figure 1.24). Si la température d'un objet dépasse $400^\circ C$ ($700 K$), une grande partie du rayonnement va être émis dans la partie rouge du spectre visible. L'objet va commencer à briller d'une couleur rouge foncé, comme par exemple des poêles de chauffage électrique. Si on continue à chauffer jusqu'à $1000^\circ C$ ($1300 K$), sa couleur devient rouge léger, car il y a maintenant du rayonnements vert et jaune qui s'ajoutent. Le rayonnement d'un objet qui a une température de $6000 K$ apparaît blanc pour nos yeux. $6000 K$ est la température du soleil et nos yeux sont habitués à voir ce rayonnement comme une lumière blanche [Schilz, 1999].

1.1.5.2 Les détecteurs thermiques

Cette partie est inspirée des états de l'art de [Escriba, 2005] et [Haffar, 2007] qui, à mon avis, proposent un état de l'art de qualité.

Les détecteurs thermiques sont des transducteurs dans lesquels le rayonnement infrarouge est directement transformé en chaleur par absorption [Escriba, 2005]. Les variations du flux thermique sur le transducteur permet d'obtenir une information sous la forme d'un signal électrique en fonction de la température. La figure 1.25 issue de [Escriba, 2005] décompose les différents éléments des détecteurs : un absorbeur, le corps d'épreuve primaire, un thermomètre, le transducteur et une isolation thermique. Tous ces éléments réunis permettent la mesure de faibles

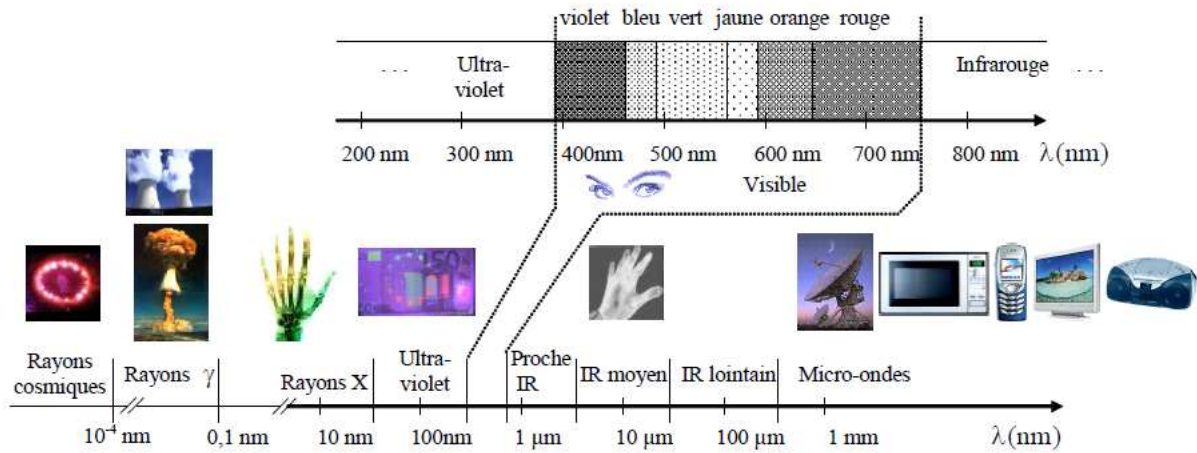


FIGURE 1.24 – Spectre des rayonnements électromagnétiques

variations de température moyennant l'un des effets suivants : pyroélectrique, bolométrique ou thermoélectrique.

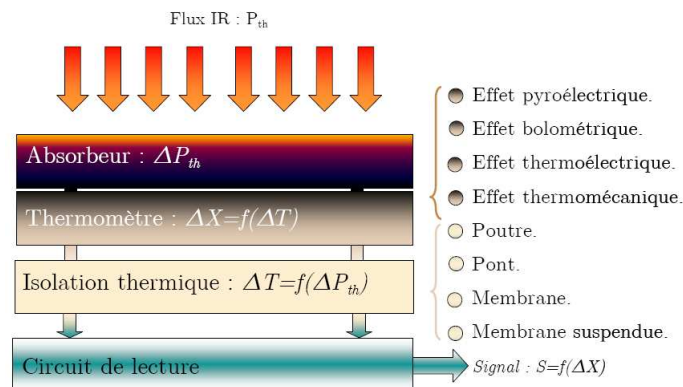


FIGURE 1.25 – Structure fondamentale d'un détecteur thermique

Nous avons déjà présenté l'application de détection de mouvements avec les détecteurs pyroélectriques. Les matériaux utilisés pour la conception de ces capteurs permettent une variation de polarisation électrique due à un changement de température. Cette variation de polarisation crée une différence de potentiel temporaire, celle-ci disparaissant après le temps de relaxation diélectrique. Cette variation est détectable sous forme d'un courant électrique.

Dans les détecteurs bolométriques l'échauffement thermique, provoqué par l'absorption de rayonnements infrarouges, modifie la conductivité électrique d'un matériau thermosensible. Ce type de capteur est souvent utilisé sous forme de matrice pour des applications d'imagerie.

Les capteurs thermoélectriques sont aussi appelés thermopiles et sont constitués de plusieurs thermocouples en série. Un thermocouple est composé de deux conducteurs différents (figure 1.26). L'effet Seebeck met en évidence la génération d'une f.e.m. par ce thermocouple soumis à une différence de température ΔT entre deux jonctions consécutives. La relation suivante permet

de calculer cette différence de potentiel notée v :

$$v = (\alpha_1 - \alpha_2) \times \Delta T$$

avec α_1 et α_2 les coefficients Seebeck des matériaux 1 et 2
 ΔT : la différence de température entre les deux jonctions.

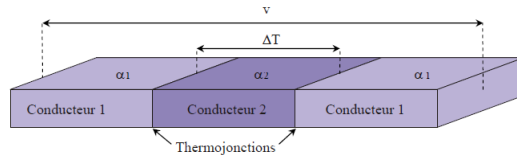


FIGURE 1.26 – Dessin d'un thermocouple

L'utilisation de plusieurs thermocouples pour constituer la thermopile permet l'obtention du potentiel suivant :

$$v = N \times (\alpha_1 - \alpha_2) \times \Delta T$$

avec N le nombre de thermocouples.

Sur la base de cette technologie, des matrices sont réalisées pour des application d'imagerie basse résolution. D'ailleurs, il existe des travaux sur la détection d'humain à l'aide d'une matrice de thermopile, notamment en utilisant le TPA81 qui est une matrice 1×8 [Honorato *et al.*, 2008] (voir la figure 1.27).



FIGURE 1.27 – TPA81

1.2 Habitat intelligent

L'application des capthoms pourrait toucher de nombreux domaines notamment ceux développés sur le thème de recherche des habitats intelligents. Il existe de nombreux travaux sur les habitats intelligents ("smart home"). L'utilisation des capteurs dans ce genre de projet est une problématique centrale. Ces projets ont souvent pour vocation d'améliorer le confort des habitants. Nous avons vu précédemment que l'information de présence peut être une information utile pour les problématiques liées aux économies d'énergie domestique. Cependant, les projets sur le

maintien à domicile utilisent l'information de présence humaine pour améliorer l'autonomie et la sécurité de la personne dans son habitat (dans ce cadre, les soucis d'économie d'énergie ne sont pas une priorité). Il n'est pas rare que ce genre de projet vise à toucher des utilisateurs précis réclamant une aide au quotidien : personnes âgées, handicapées, personnes touchées par une maladie dégénérative, etc... À ce sujet, un excellent travail de synthèse a été réalisé dans l'article de [Chan *et al.*, 2008] qui présente les projets mondiaux présents sur le sujet. Cette synthèse est présentée [Chan *et al.*, 2008][Bonhomme, 2008] dans qui regroupent les différents projets selon le type de détecteurs choisis et des méthodes pour les traitements des données.

On remarque dans ces différents projets que l'application prioritaire de l'habitat intelligent est la santé. L'article [Noury et Rialle, 2003], qui présente aussi des projets utilisant plusieurs sortes de capteurs, parle même du "concept d'habitat intelligent pour la santé (HIS)" qui a pour but de redonner la possibilité de vivre avec une certaine autonomie malgré certains handicaps ou pathologies qui normalement contraignent à l'hospitalisation ou à un placement dans une institution spécialisée. Bien sûr, les applications développées peuvent profiter aux personnes âgées. Dans ces projets orientés santé, on notera l'importance de récolter des données physiologiques :

- la masse corporelle,
- la température,
- la tension artérielle,
- la saturation en oxygène du sang,
- le pouls.

On cherche aussi à compléter ces données par des informations d'activité. Des capteurs de mouvements sont utilisés pour détecter les déplacements de la personne. Des accéléromètres permettent de détecter la chute qui est une préoccupation majeure du maintien à domicile des personnes âgées. [Noury *et al.*, 2009] et [Cislo *et al.*, 2007] référencent différents capteurs pour la télésurveillance médicale et différents projets participants à l'avancement de la thématique maintien à domicile. Les résultats sont intéressants, des verrous technologiques sont souvent levés mais il reste maintenant des problématiques d'utilisation de ces technologies par les patients.

Une des techniques les plus étudiées pour le maintien à domicile reste l'étude des habitudes de la personne basée sur un algorithme d'apprentissage. Nous avons l'exemple en France du système PROSAFE réalisé par le LAAS et EDF qui a pour ambition d'analyser les habitudes pour réaliser leur apprentissage puis de créer un système automatique de diagnostic en temps réel lorsque la personne dévie de son comportement habituel [Campo *et al.*, 2003]. Il n'est donc pas rare de trouver des travaux de recherches dédiés aux personnes atteintes de démence ou de déficience cognitive (Alzheimer) [Pigot *et al.*, 2003].

Bien entendu, les applications de l'habitat intelligent ne s'arrêtent pas à l'application maintien à domicile. De nombreux travaux ont pour but d'améliorer la vie de n'importe quelle personne [Ivanov *et al.*, 2002]. Les trois principaux objectifs de ces systèmes sont :

- la sécurité (détection d'intrusion),
- l'utilisation économique des ressources de la maison (commande de la lumière, du chauffage et de la ventilation),
- le confort.

Pour atteindre ces objectifs, on peut avoir besoin de différentes informations tels que :

- le nombre de personnes dans la pièce,
- identifier la personne,
- l'activité de la personne,

- la localisation de la personne dans la pièce.

Le projet DOMUS, (non recensé dans l'article [Chan *et al.*, 2008] cité précédemment), propose un appartement équipé par différents capteurs dans le but d'améliorer le confort des habitants. La question de la localisation a été l'une de leurs préoccupations et pour y arriver, l'utilisation d'un filtre bayésien est proposée [Youcef *et al.*, 2008]. EDF-R&D travaille aussi avec les laboratoires de recherches tel que le LAAS sur le projet ERGDOM depuis presque dix ans et dont le but est d'optimiser la gestion du confort et l'économie d'énergie [Bonhomme, 2008].

Cette section présente les différents travaux liés à notre problématique (à savoir détecter la présence humaine) mais n'apporte pas la réponse des pistes à suivre. Cependant, ce tour d'horizon sur les différents projets nous a montré le vif intérêt pour l'information de présence humaine dans ces habitats intelligents. D'autant plus que l'information de présence peut être complétée par le dénombrement, la localisation ou l'activité. Cependant, l'objectif du projet CAPTHOM est la commercialisation d'un produit fini, ce qui implique des contraintes de coût, d'acceptabilité par l'utilisateur (non-intrusive), d'encombrement, de simplicité d'utilisation pour le client et de standardisation de l'installation du capteur. À ne pas en douter, le développement d'un détecteur de présence humaine fiable sera un capteur incontournable dans les projets de recherche sur les habitats intelligents que ce soit pour la domotique ou pour le maintien à domicile.

1.3 Conclusion

Cette partie avait pour objectif de répertorier les phénomènes physiques qui peuvent faire l'objet de mesures pour la détection de présence humaine. La grande quantité d'informations qui peuvent être utiles risque de nous amener à développer un système de détection assez lourd. D'où la nécessité de choisir un ou deux phénomènes physiques les plus appropriés pour notre application. La présentation des différents détecteurs existants dans le commerce ou dans les laboratoires de recherche nous permet de nous rendre compte qu'avec la vision, la capture de l'information de chaleur émise par le corps humain est le moyen le plus utilisé et sûrement le plus approprié pour une détection de présence humaine. D'ailleurs, ce sont des dispositifs qui sont utilisés dans la recherche pour les habitats intelligents qu'ils soient orientés vers la domotique ou vers le maintien à domicile.

Validation des choix technologiques, tests de caractérisations et applications

Sommaire

2.1	Évaluation des missions de Capthom	35
2.2	Identification des technologies	38
2.2.1	Tests sur multi-capteurs de différentes natures technologiques	38
2.2.1.1	Scénario 1	40
2.2.1.2	Scénario 2	43
2.2.1.3	Scénario 3	46
2.2.1.4	Scénario 4	48
2.2.1.5	Scénario 5	50
2.2.1.6	Scénario 6	51
2.2.1.7	Scénario 7	52
2.2.1.8	Conclusion sur les scénarios	52
2.2.2	Capteur de CO_2	54
2.2.3	Système entrée/sortie	56
2.2.4	Essais avec un capteur de type thermopile	56
2.2.4.1	Etude comparative	59
2.2.4.2	Scénario 1	60
2.3	Caractérisations des capteurs	64
2.3.1	SNOOPS	64
2.3.2	Essais préliminaires avant la mise en place du banc de tests	65
2.3.3	Le banc d'essai	69
2.3.4	Méthode de caractérisation des capteurs Infrarouges	69
2.3.4.1	Détermination du zéro	69
2.3.4.2	Caractérisation en fonction de l'angle α	70
2.3.4.3	Caractérisation en fonction de l'azimuth θ	71
2.3.4.4	Caractérisation en distance et obtention d'un modèle	73

2.3.5	Résultats de la caractérisation pour simulation en 2 dimensions	74
2.3.5.1	Détermination du zéro	74
2.3.5.2	Erreur sur la réponse du capteur	74
2.3.5.3	Caractérisation en fonction de l'angle	76
2.3.5.4	Caractérisation en fonction de la distance	76
2.3.5.5	Modèle de la réponse du capteur	77
2.3.5.6	Caractérisation d'un capteur commercialisé	78
2.4	Application à la détection de présence des capteurs type thermopile	80
2.5	Conclusion sur les besoins du projet	83

Dans ce chapitre, nous présenterons l'évaluation des missions que le capthom doit remplir, proposée par les travaux de Pierre David. Au cours du projet, nous avons pu réaliser de nombreux tests sur différents capteurs de natures technologiques différentes dont nous présenterons les résultats effectués pour des scénarios d'essais variés. Après ces différents essais sur les capteurs en notre possession, notre intérêt s'est porté sur une technologie particulière : les thermopiles. Pour pouvoir les utiliser, nous avons réalisé de nombreux tests et développé une méthode de caractérisation décrite dans ce chapitre. Nous finirons par proposer une application possible dans le cadre de la détection de personne.

2.1 Évaluation des missions de Capthom

[David, 2009] propose une modélisation des besoins du projet CAPTHOM à l'aide du langage SysML. Les besoins que doivent remplir le capthom dépendent des exigences attendues par nos partenaires industriels. Bien entendu, il est demandé que le capthom n'ait pas les défauts du PIR (bien que connus et acceptés par les utilisateurs). Devant les différentes visions et attentes de nos partenaires, il a été nécessaire de proposer un formalisme capable de traduire les objectifs à remplir par le capthom devant différentes situations. Ce travail a été réalisé avec succès par Pierre David à l'aide d'une fiche qui a été soumise à tous les interlocuteurs du projet et a permis l'écriture de plus de 30 scénarios dont les déclinaisons conduisent à plus de 100 tests concrets [David, 2009]. Ce nombre important de scénarios a traduit le besoin d'un outil de simulation capable d'évaluer les technologies dans des environnements aux caractéristiques variées. En effet, on imagine aisément que réaliser autant de tests demandent beaucoup de temps. Bien entendu, l'aspect test réel n'est pas mis de côté. [David, 2009] définit très clairement quatre types de situations représentatives des missions confiées aux futurs capthoms qui feront l'objet de tests :

- l'occupation normale et active d'une pièce : debout, assis, marche, lecture, travail de bureau, cuisine, ...
- le sommeil dans un lieu classique : lit, canapé, fauteuil
- les activités anormales : chutes, agitations, comportement en décalage avec le lieu
- les stimuli de fausses détections (flash lumineux, ondes électromagnétiques, objets mobiles, ...) et des causes d'inhibition de détection (vêtements froids, occultations, ...).

La figure 2.1 permet de définir les limites de l'étude. Deux types d'acteurs humains sont identifiés : l'"installateur" et l'"utilisateur". Bien entendu, ces deux acteurs peuvent être confondus dans une situation donnée. Le terme "utilisateur" qualifie une cible humaine qui doit être détectée par le capthom. Il est à noter que les "utilisateurs" sont en concurrence avec l'environnement lorsque le capthom doit "capter les flux physiques trahissant la présence humaine" d'où la nécessité de discriminer toutes les informations inutiles ou perturbantes présentes dans le champ de détection. Ce diagramme permet de traduire les besoins définis par le cahier des charges, à savoir qu'il nous faut en priorité être capable d'identifier la présence, et au plus haut niveau déterminer la posture et/ou l'activité, localiser ou identifier la personne. La figure 2.1 traduit la connexion à un "superviseur du système domotique", autrement dit, si le capthom est capable de donner différentes informations sur la présence, il ne commande en aucun cas les équipements de l'habitat intelligent.

Le cahier des charges du projet CAPTHOM est le résultat de l'agrégation des cahiers des charges particuliers de chaque participant au projet. Les exigences exprimées souffraient du

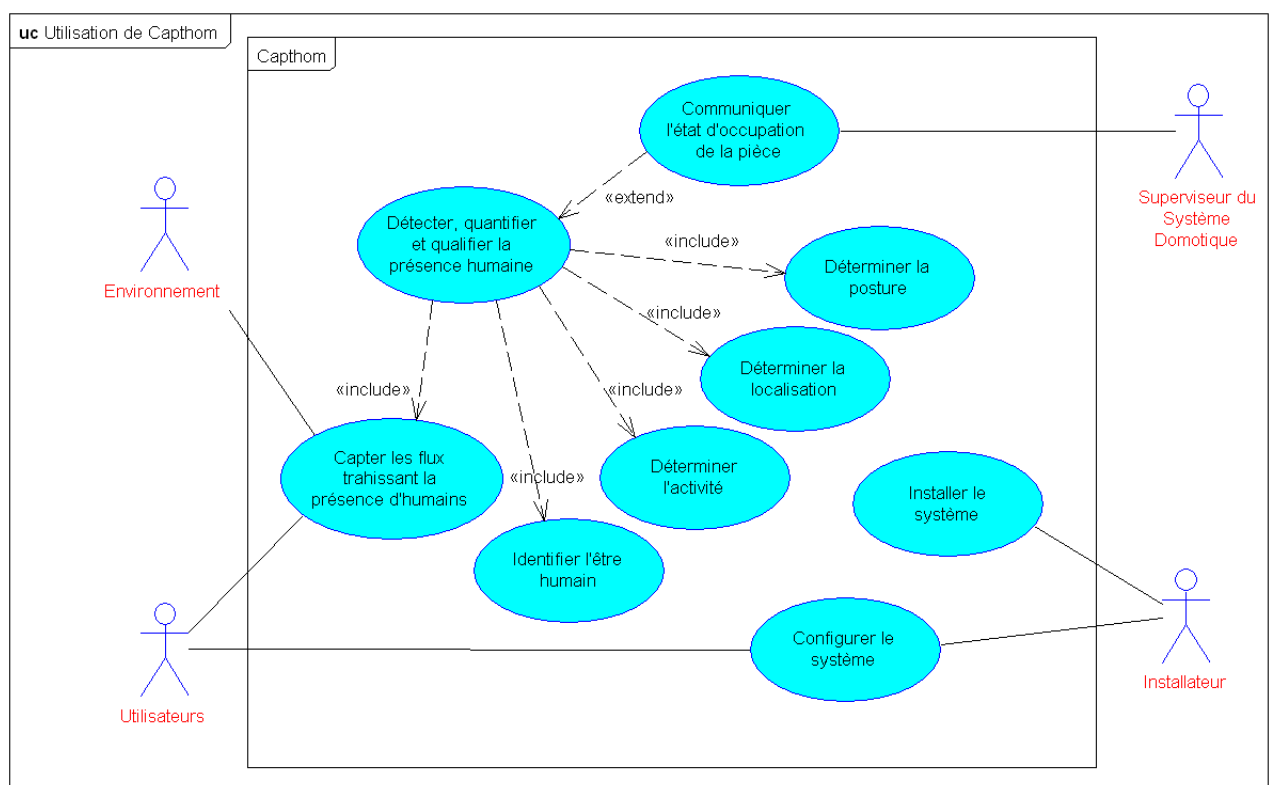


FIGURE 2.1 – cas d'utilisation d'un capthom

manque d’une représentation commune, d’un vocabulaire commun et d’une hiérarchisation. Cela conduisait à des exigences dupliquées, peu claires pour l’ensemble des intervenants et grandement désorganisées. La rédaction du modèle d’exigences en SysML, par l’intermédiaire de “Requirements Diagrams”, a permis de pallier nombre de ces problèmes et d’obtenir un modèle d’exigences simple, précis et robuste face aux différentes modifications [David, 2009]. La figure 2.2 nous donne les exigences de la “qualité de la détection” en fonction du “temps de réponse”, “la portée” et “la fiabilité”. La figure 2.3 est un “Requirement Diagram” qui regroupe des exigences relatives à l’alimentation, la fixation, le prix, ...

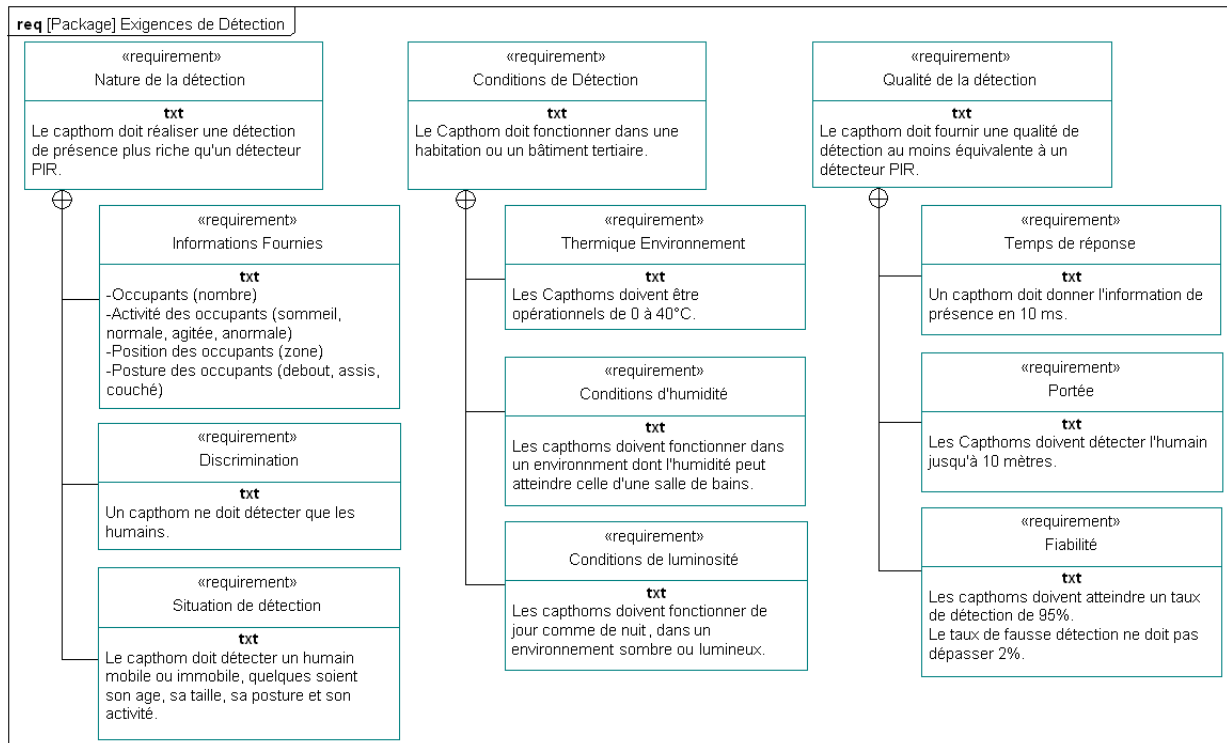


FIGURE 2.2 – Requirement Diagram des Exigences de Détection

Une architecture de Capthom est proposée dans [David, 2009]. Le modèle spécifie les composants principaux du futur capteur de présence. On identifie trois composants intervenant dans le traitement du signal. Le “conditionneur” effectue une mise en forme du signal issu du “transducteur”, l’“unité de traitement” élabore la réponse du capthom en fonction du signal transmis par le “conditionneur”. Cette prise de décision peut nécessiter des connaissances stockées dans une “mémoire”. Le module chargé de rendre le capthom communicant est représenté par l’“interface de communication ” reliée au “système superviseur”. Le “transducteur” est le point d’entrée du capthom, il rend sensible le capteur à son environnement. Il constitue un point crucial de l’architecture, car il est le seul composant en relation avec le phénomène recherché : les flux provenant des humains. Néanmoins, on remarque aussi qu’il est en relation avec l’environnement et qu’il est donc soumis à plus d’influences que nous le désirons. Les variations de typage des flow ports expriment, dans ce modèle, la transformation du flux intervenant au cœur du capthom, jusqu’à l’obtention de la “réponse capthom” transmise sous forme de “signal numérique”.

Nous avons donc décrit dans l’introduction de notre mémoire les exigences initiales formulées

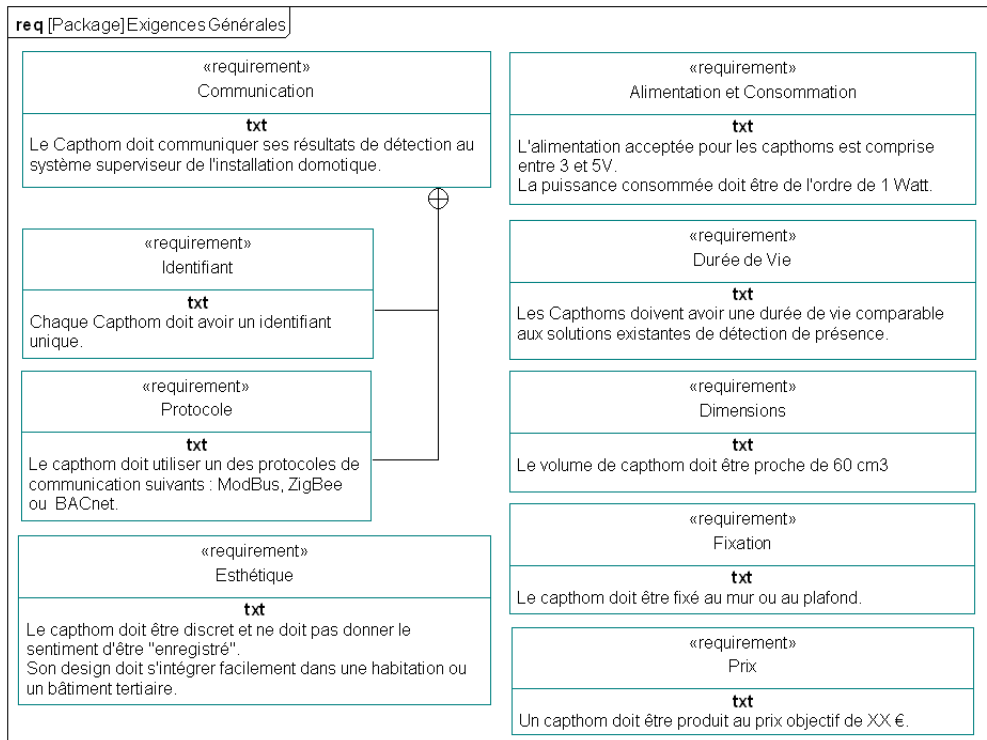


FIGURE 2.3 – Requirement Diagram des Exigences générales

au démarrage du projet CAPTHOM. Le travail décrit dans [David, 2009] nous permet de mieux décrire les besoins du projet. Ainsi, au fur et à mesure de l'avancement du projet, deux axes de recherches ont été définis. Le premier est appelé "capthom basique" : la réponse de ce capteur est du type "tout ou rien" à savoir "présence" ou "non-présence". Il est prévu que le capteur ne soit composé que d'un élément et que son coût soit très faible comme prévu initialement. L'autre axe est appelé "capthom étendu" dont la réponse pourrait remplir un registre des différentes informations complémentaires à la présence (nombre de personnes, localisation, activité, etc ...). La technologie avancée est basée sur du traitement d'images. La possibilité que le système soit multicapteurs (et de différentes technologies) n'est pas à écarter.

2.2 Identification des technologies

Pour commencer nos recherches, ils nous a fallu appréhender le comportement réel des différents capteurs. Cet objectif nécessite la réalisation de multiples essais. Différents scénarios divers et variés ont été réalisés dont sept vont être présentés dans cette thèse, le but, ici, étant d'appréhender le potentiel de chaque capteur pour notre application dans le projet CAPTHOM.

2.2.1 Tests sur multi-capteurs de différentes natures technologiques

A l'aide de scénarios de base, on cherche à évaluer les performances de divers détecteurs de technologies différentes en confrontant les résultats face aux différents événements. On équipe la

pièce de différents capteurs :

- 3 détecteurs pyroélectriques,
- 3 barrières infrarouges,
- un capteur de CO_2 (IAQ),
- un capteur de l'IEMN,
- une webcam.

La figure 2.4 nous donne la configuration du placement des différents capteurs. Les quatre cases, numérotées de 1 à 4, représentent des fauteuils autour du bureau. Le laboratoire de l'IEMN a développé des capteurs de type thermopile qui ont un plus grand nombre de thermocouples que les capteurs thermopiles commerciaux, nous avons eu la possibilité de les utiliser pour nos tests. L'IEMN¹ et le pyromètre qui l'accompagnent sont placés de façon à viser la pièce dans son ensemble ; bien sûr nous ne l'avons pas placé dans le coin à côté de l'armoire pour ne pas avoir une obstruction dans le champ de détection des capteurs.

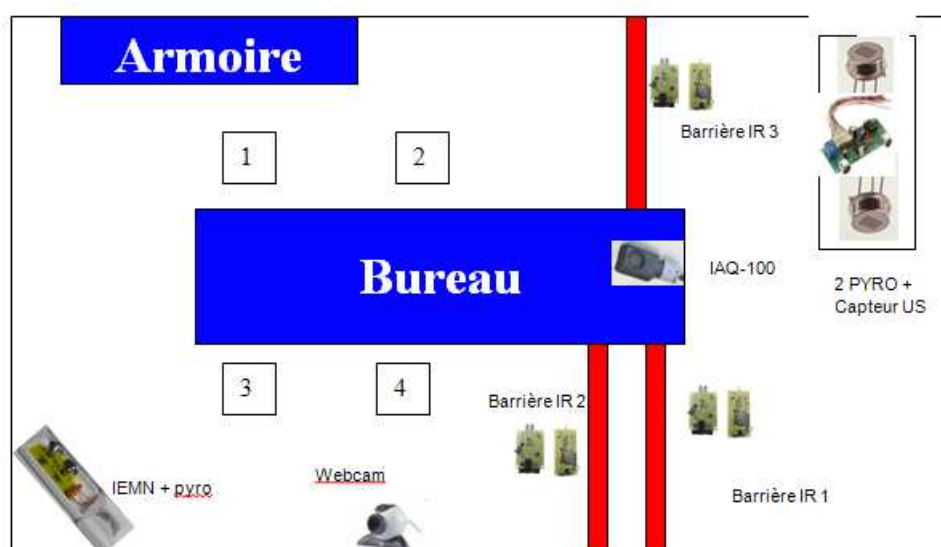


FIGURE 2.4 – Instrumentation d'une pièce

On propose un système composé de deux détecteurs pyroélectriques (RE200B) et d'un capteur à ultrason placés au dessus de la porte pour avoir une information d'entrée et de sortie. Les détecteurs pyroélectriques sont utilisés sans lentilles de Fresnel mais leur portée est suffisante dans l'utilisation présente quand une personne entre ou sort par la porte. Ils sont aussi placés dans le sens du passage de façon à discriminer une personne qui entre ou qui sort. Un capteur à ultrason (télémètre) est placé entre les deux détecteurs infrarouges. Au repos, ce capteur va mesurer la distance entre le sol et lui-même. Lorsqu'une personne passera, le signal recueilli correspondra à la distance entre la cible et lui-même. Du fait de son principe de fonctionnement, le capteur donne une information de distance que la cible soit humaine ou non, d'où l'idée de combiner sa mesure avec les informations des détecteurs RE200B qui possèdent un filtre qui laisse passer le rayonnement infrarouge d'un humain.

1. Nous désignons ici, et dans la suite du mémoire, par "IEMN" le capteur infrarouge développé par le laboratoire de Lille IEMN (Institut Électronique, de Microélectronique et de nanotechnologie). Lorsque nous parlerons du laboratoire en lui-même nous le spécifierons ainsi : "laboratoire IEMN"

D'un côté du bureau, on place une barrière IR ; de l'autre, on en place deux. Les deux barrières IR, ont pour ambition de déterminer le sens de passage de la cible. On veut comparer la pertinence des résultats d'une barrière par rapport à deux barrières en parallèle. Intuitivement, l'utilisation de 2 capteurs paraît être plus intéressante car plus que le passage, l'utilisation de deux barrières nous donne l'information du sens de passage en fonction de l'ordre de détection. Mais dans une finalité d'industrialisation et donc de commercialisation, la multiplication des capteurs n'est pas un facteur en faveur du coût final du produit donc si des besoins du cahier des charges peuvent être remplis par un seul capteur au lieu de deux, alors il est évident que la solution dite "low-cost" sera privilégiée.

La webcam surveille les entrées et les sorties au niveau de la porte. Les images prises ont été utilisées pour l'évaluation et le développement de l'algorithme de la thèse de Yannick Benezeth [Benezeth, 2009]. L'inconvénient de cette technologie est qu'il faut une luminosité suffisante pour avoir des images correctes utilisables par l'algorithme de vision pour la reconnaissance de personne. Cette condition nous rappelle que l'utilisation d'une caméra seule pour la commande de l'éclairage n'est pas une solution adéquate. Il est vrai qu'un algorithme de vision peut être utilisé avec une caméra IR [Benezeth *et al.*, 2008] mais le prix de ces instruments de vision de pointe ne sont pas encore abordables pour le coût final visé par le cahier des charges.

Nous avons réalisé une campagne de mesures, nous allons présenter ici sept scénarios sur les différents tests réalisés :

- Scénario 1 : Une personne entre, s'assoit en 1 puis ressort.
- Scénario 2 : Une personne entre, s'assoit en 2 puis ressort.
- Scénario 3 : Une personne entre, s'assoit en 4 puis ressort.
- Scénario 4 : Une personne entre, s'assoit en 3 puis ressort.
- Scénario 5 : Une personne entre, puis une deuxième, les deux sont assises, puis elles ressortent l'une après l'autre.
- Scénario 6 : Une personne est en mouvement dans la pièce.
- Scénario 7 : Deux personnes sont dans la pièce, une personne est mobile, l'autre reste assise, puis les deux sortent.

2.2.1.1 Scénario 1 : Une personne entre, s'assoit en 1 puis ressort

Le premier scénario est un événement simple et courant du quotidien. Une personne entre dans la pièce, elle s'assoit puis ressort de la pièce. Comme indiqué sur la figure 2.5, on demande à l'acteur du test de s'asseoir en 1, puis de sortir. Le résultat de tous les capteurs est donné dans la figure 2.6.

En entrant dans la pièce, la personne est détectée par les deux détecteurs pyroélectriques et le capteur à ultrason. Le premier détecteur pyroélectrique n'est pas placé de façon à ce que ces deux éléments sensibles soient dans le sens de la marche contrairement au deuxième détecteur. La figure 2.7 nous montre justement que le placement des capteurs est important pour avoir un signal similaire au signal décrit sur la figure 1.21 (page 25) pour un détecteur sans lentille. Une étude sur un système d'entrées/sorties basé sur les détecteurs infrarouges sera proposée plus loin où les éléments sensibles des détecteurs seront placés tous les deux dans le sens de passage. Malgré ce placement peu favorable à une bonne détection, une information d'entrée a pu être confirmée sur la figure 2.7 par comparaison du Δt entre les pics des réponses des détecteurs

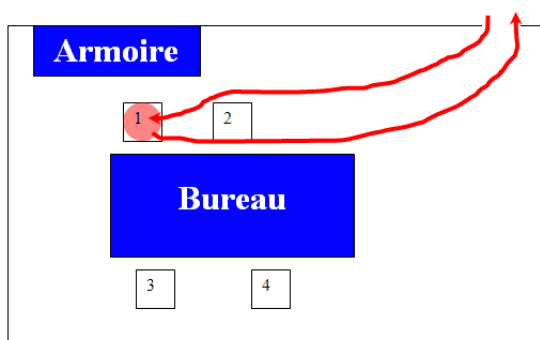


FIGURE 2.5 – Action réalisée dans la pièce pour le scénario 1

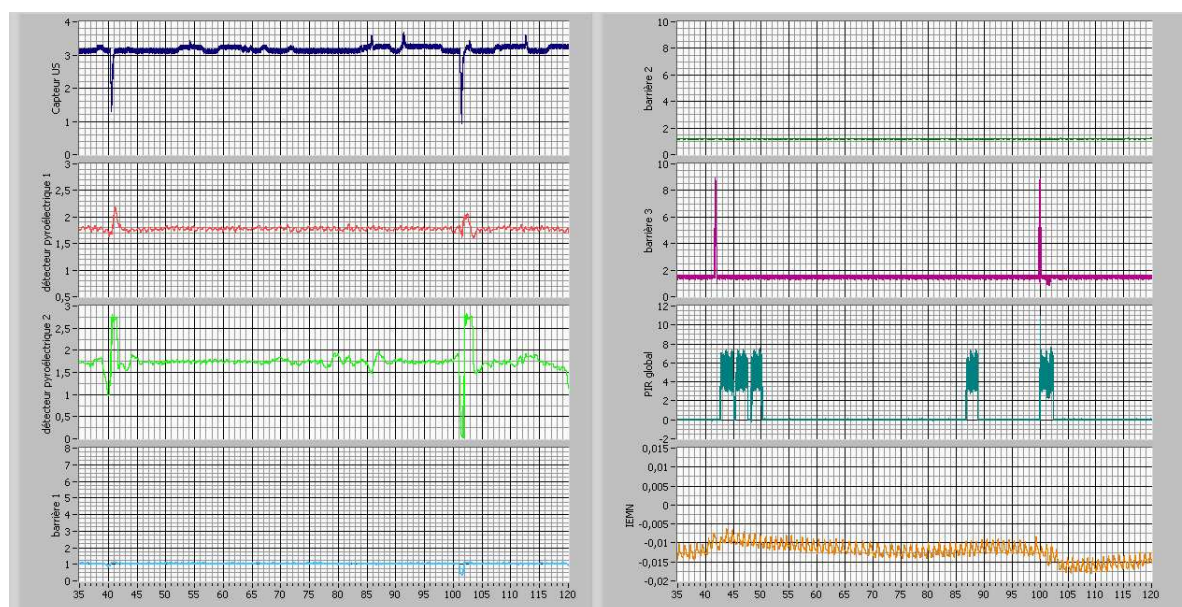


FIGURE 2.6 – Résultat des réponses des capteurs pour le scénario 1

pyroélectriques. Le capteur à Ultrason permet de confirmer le passage de cette personne. La figure 2.8 nous donne un résultat similaire pour la sortie de la personne de la pièce, même si la réponse du premier détecteur infrarouge n'est pas aussi satisfaisante que la réponse du deuxième.

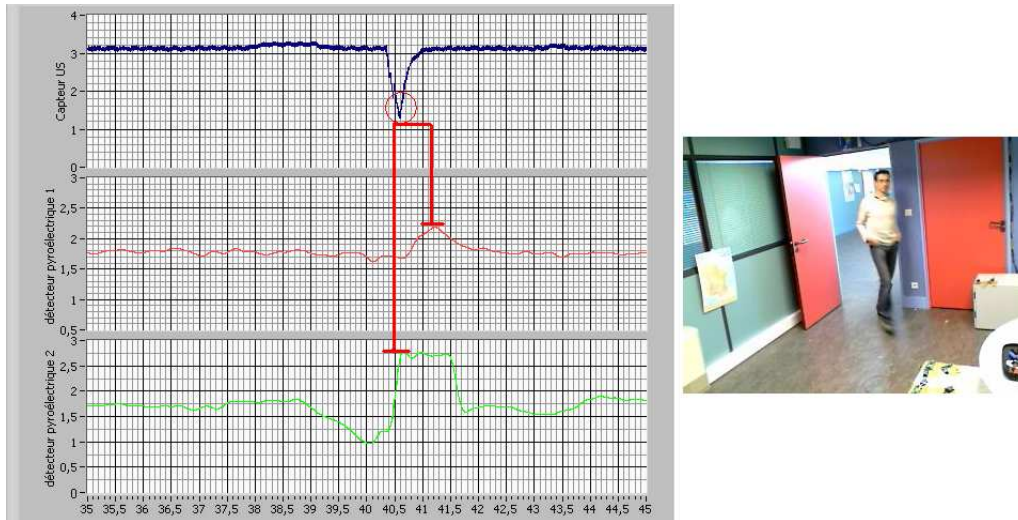


FIGURE 2.7 – Résultat des détecteurs pyroélectriques et du capteur à ultrason pour une entrée et une image donnée par la webcam sur l'événement

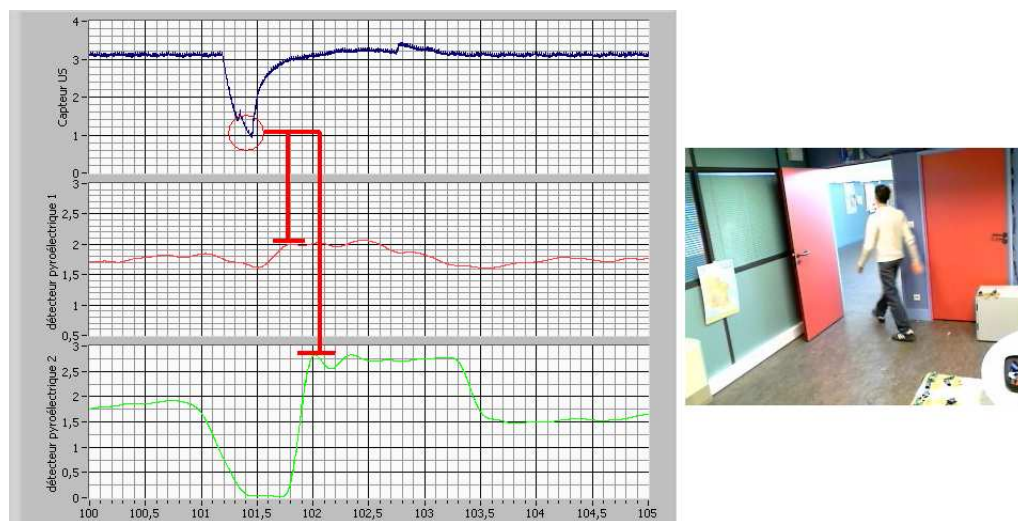


FIGURE 2.8 – Résultat des détecteurs pyroélectriques et du capteur à ultrason pour une sortie et une image donnée par la webcam sur l'événement

L'observation des réponses des barrières infrarouges est en harmonie avec les événements attendus du scénario. Seule la barrière IR3 a été franchie (figure 2.9, page 43). Lors du premier franchissement, un créneau à $t = 41$ s est observé qui correspond bien à une détection de passage d'une personne. Par contre, plus tard dans le scénario, quand la personne passe à nouveau devant la barrière à $t = 99,75$ s, deux créneaux sont observés au lieu d'un créneau. Le scénario 1 étant bien défini pour des actions menées par une personne, il est évident que les deux créneaux ne correspondent pas au passage de deux personnes. Notre cobaye avait aussi la responsabilité de

suivre le scénario simple qu'il lui a été indiqué au départ, donc il lui a été interdit d'avancer et de reculer au niveau de la barrière. En fait, les deux créneaux obtenus pour un passage s'expliquent par le placement des barrières. En effet, nous avons placé nos barrières pour une détection de passage au niveau des jambes. Finalement, le fait d'avoir deux créneaux pour un passage peut arriver souvent ; d'ailleurs c'est ce que nous constaterons par la suite.

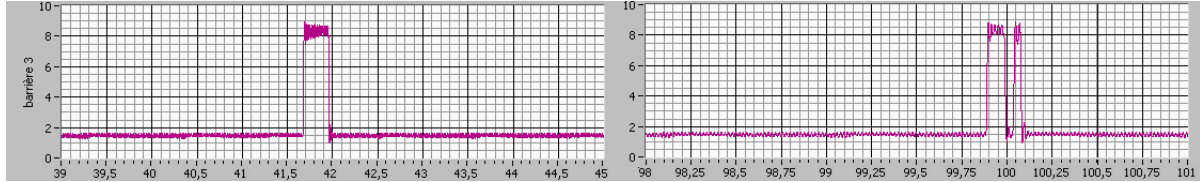


FIGURE 2.9 – Résultat pour le franchissement d'une barrière à deux instants différents

Le capteur IEMN est mis en concurrence avec un PIR (appelé ici "PIR global") pour la surveillance de la pièce. Le PIR détecte du mouvement après chaque pic de franchissement de la barrière IR3, ce qui est tout à fait cohérent. Par contre, tout le temps où la personne est assise, il n'y a aucune détection. Il y aura juste un pic autour du temps $t = 87$ s qui correspond à la personne qui se lève. En ce qui concerne l'IEMN, sa portée est un peu faible pour pouvoir vraiment prétendre à un résultat fiable dans ce scénario. Toutefois, sa réponse est au-dessus d'un certain niveau tout le temps que la personne est dans la pièce.

2.2.1.2 Scénario 2 : Une personne entre, s'assoit en 2 puis ressort.

Le deuxième scénario est sensiblement ressemblant au premier : une personne entre dans la pièce, elle s'assoit sur le fauteuil 2 (au lieu du 1) puis ressort de la pièce, comme indiqué sur la figure 2.10. Le résultat de tous les capteurs est donné par la figure 2.11.

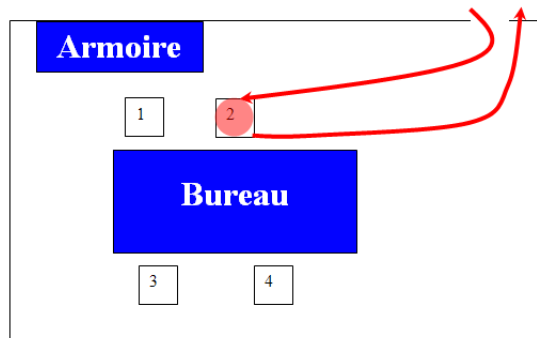


FIGURE 2.10 – Action réalisée dans la pièce pour le scénario 2

Les résultats des détecteurs pyroélectriques, du capteur à ultrason et de la barrière IR3 sont donnés dans les figures 2.12, 2.13 et 2.14 (page 44). Les observations sont très proches des commentaires faits précédemment pour les réponses des capteurs dans le premier scénario. Une nuance peut être apportée, car la personne qui s'est prêtée à l'expérience n'est pas la même que celle du premier scénario. Ce deuxième sujet nous permet d'avoir de meilleures réponses au niveau des détecteurs infrarouges placés au-dessus de la porte. Cette amélioration peut s'expliquer

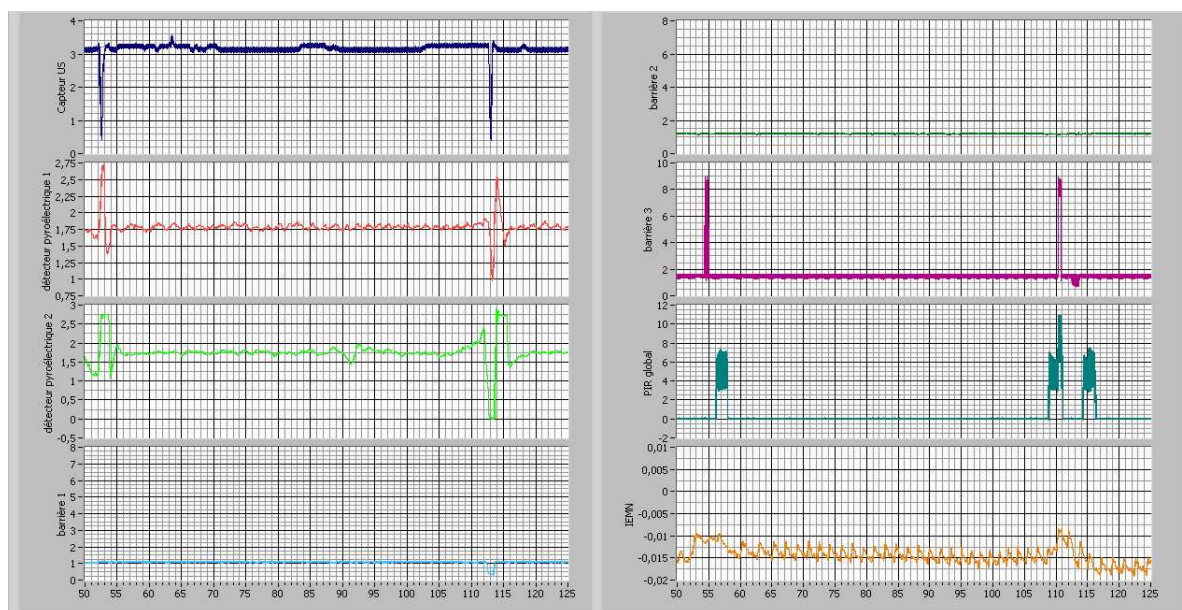


FIGURE 2.11 – Résultat des réponses des capteurs pour le scénario 2

par l'habillement et/ou la corpulence de la personne. Ceci étant, le montage électronique des détecteurs pyroélectriques nous permet de jouer aussi sur la sensibilité du capteur à l'aide de potentiomètre. Nous avons préféré ne pas toucher au réglage et utiliser la deuxième personne pour le reste des scénarios. Conformément au changement de personne entre les deux scénarios, le pic donné par le capteur à ultrason n'est pas le même, on rappelle que ce capteur est un télémètre donc comme la seconde personne est plus grande, le pic observé est supérieur au pic observé pour la première personne.

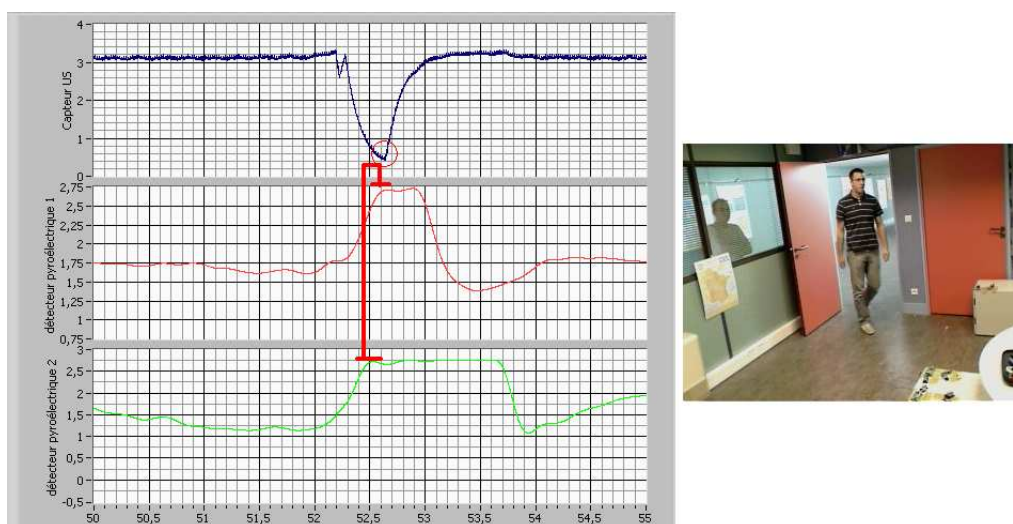


FIGURE 2.12 – Résultat des détecteurs pyroélectriques et du capteur à ultrason pour une entrée et une image donnée par la webcam sur l'événement

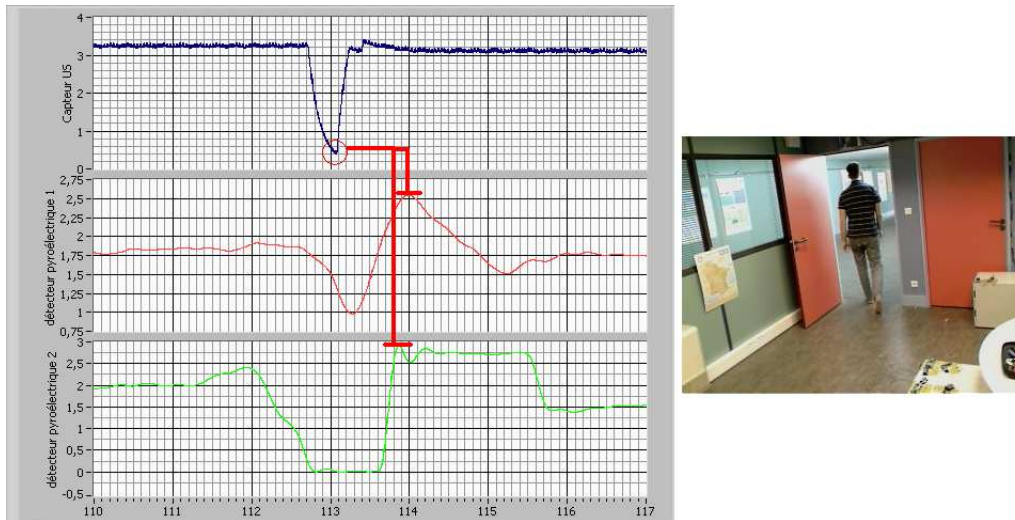


FIGURE 2.13 – Résultat des détecteurs pyroélectriques et du capteur à ultrason pour une sortie et une image donnée par la webcam sur l'événement

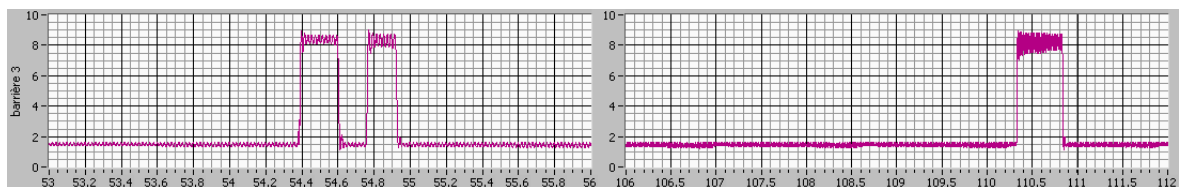


FIGURE 2.14 – Résultat pour le franchissement d'une barrière

2.2.1.3 Scénario 3 : Une personne entre, s’assoit en 4 puis ressort.

Le scénario 3 ressemble aux deux premiers : une personne entre dans la pièce, elle s’assoit sur le fauteuil 4 pour cette expérience puis ressort de la pièce, comme indiqué sur la figure 2.15. Les actions attendues semblent être identiques aux autres scénarios, mais les capteurs sollicités ne sont pas les mêmes du fait du parcours à suivre. Le résultat de tous les capteurs est donné par la figure 2.16.

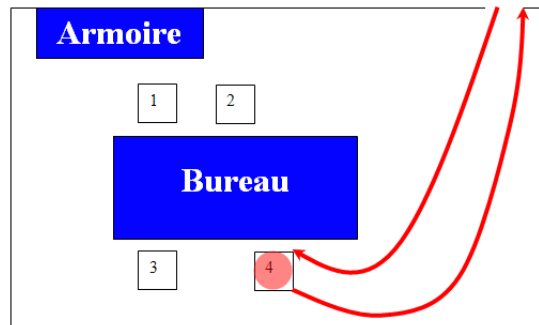


FIGURE 2.15 – Action réalisée dans la pièce pour le scénario 3

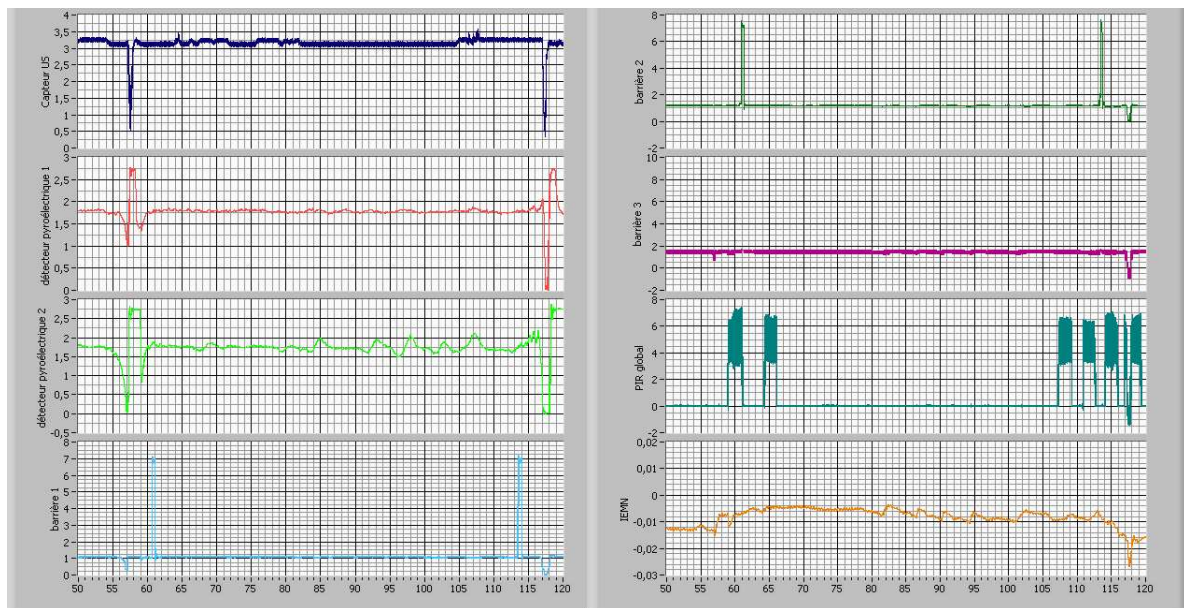


FIGURE 2.16 – Résultat des réponses des capteurs pour le scénario 3

Les résultats des détecteurs pyroélectriques et du capteur à ultrason sont donnés dans les figures 2.17 et 2.18. Nous observons des résultats aussi encourageants que dans les deux premiers scénarios. Pour ne pas alourdir le mémoire, nous ne ferons pas apparaître le zoom sur les réponses des capteurs au niveaux de la porte pour les entrées et les sorties car les résultats sont très similaires.

Ce scénario nous permet de mettre en valeur l’utilisation de deux barrières IR en parallèle.

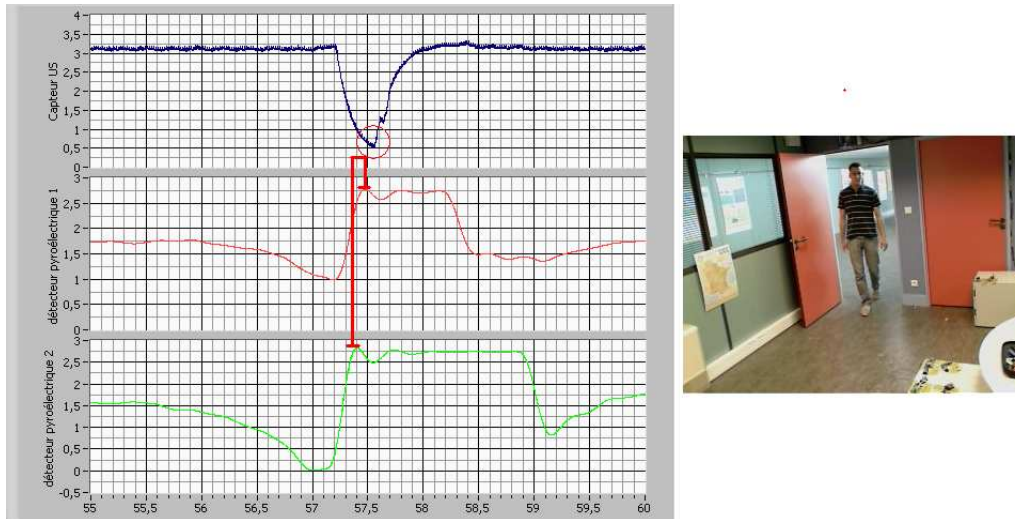


FIGURE 2.17 – Résultat des détecteurs pyroélectriques et du capteur à ultrason pour une entrée et une image donnée par la webcam sur l'événement

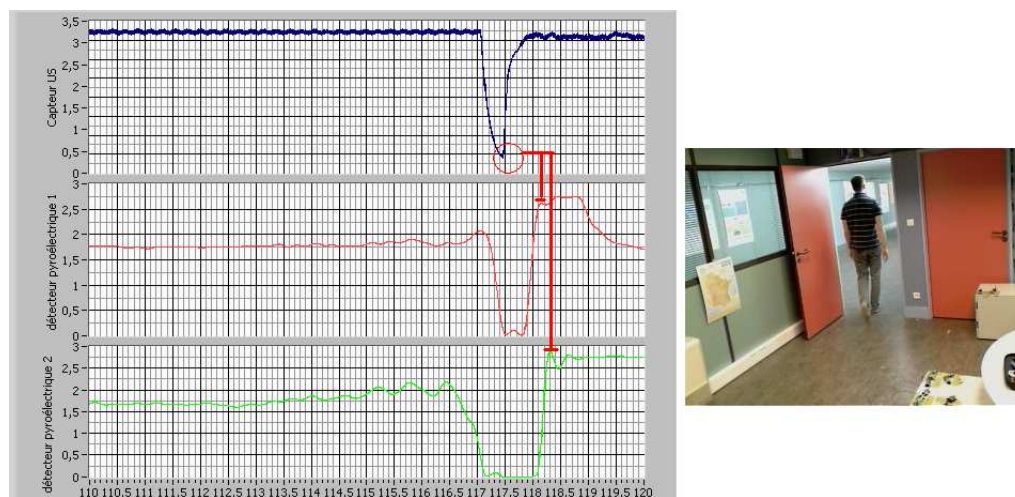


FIGURE 2.18 – Résultat des détecteurs pyroélectriques et du capteur à ultrason pour une sortie et une image donnée par la webcam sur l'événement

La figure 2.19 nous montre le franchissement des barrières à deux moments différents. Le sens de passage peut être déterminé à l'aide du front montant des créneaux.

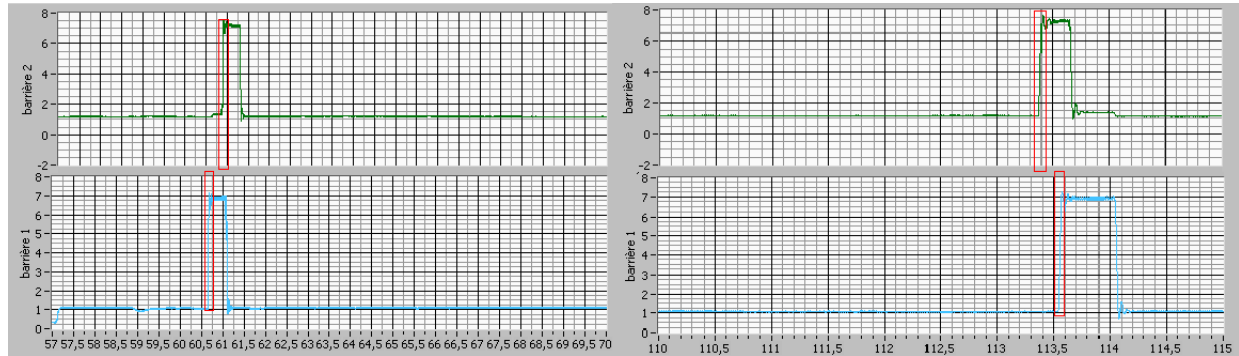


FIGURE 2.19 – Résultat pour le franchissement d'une barrière

La réponse du PIR global est fidèle à sa réputation, il détecte une présence s'il y a suffisamment de mouvement. Pour l'IEMN, le résultat obtenu est un peu plus satisfaisant que dans les cas précédents, sûrement grâce à la proximité des actions. De façon plus visible que dans les scénarios précédents, le signal de l'IEMN lorsque la personne est dans la pièce est supérieur au signal obtenu lorsque la pièce est vide.

2.2.1.4 Scénario 4 : Une personne entre, s'assoit en 3 puis ressort.

Le scénario 4 ressemble au scénario 3 : une personne entre dans la pièce, elle s'assoit sur le fauteuil 3 puis ressort de la pièce, comme indiqué sur la figure 2.20. Le résultat de tous les capteurs est donné par la figure 2.21.

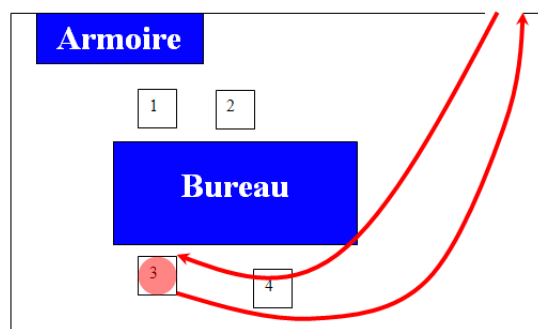


FIGURE 2.20 – Action réalisée dans la pièce pour le scénario 4

Les réponses des capteurs sont très similaires aux réponses obtenues par le scénario 3. Toutefois, comme le fauteuil 3 est plus proche de l'IEMN, nous avons donc pu recueillir pour ce capteur un signal pour la présence d'une personne qui peut être dissociée du signal plus faible pour une pièce vide comme nous le suggère la figure 2.22.

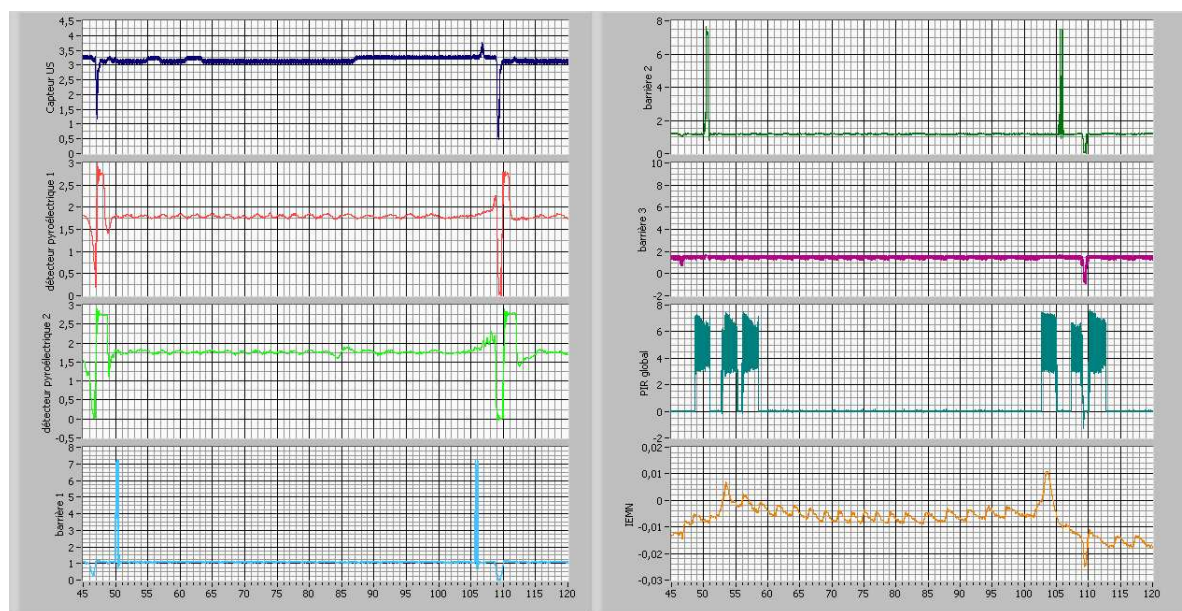


FIGURE 2.21 – Résultat des réponses des capteurs pour le scénario 4

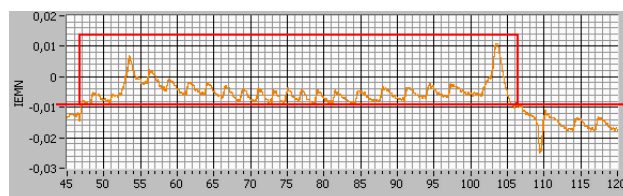


FIGURE 2.22 – Résultat de la réponse de l'IEMN sur le scénario 4

2.2.1.5 Scénario 5 : Une personne entre, puis une deuxième, les deux sont assises, puis elles ressortent l'une après l'autre.

Le scénario 5 propose de faire intervenir deux personnes : une personne entre et s'assoit dans le fauteuil 1, une deuxième arrive puis s'assoit sur le fauteuil 4 (voir figure 2.23). Le résultat de tous les capteurs est donné par la figure 2.24.

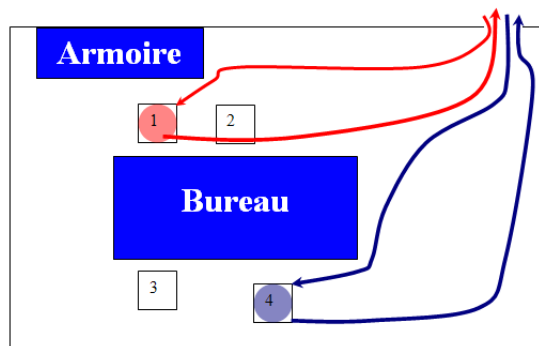


FIGURE 2.23 – Action réalisée dans la pièce pour le scénario 5

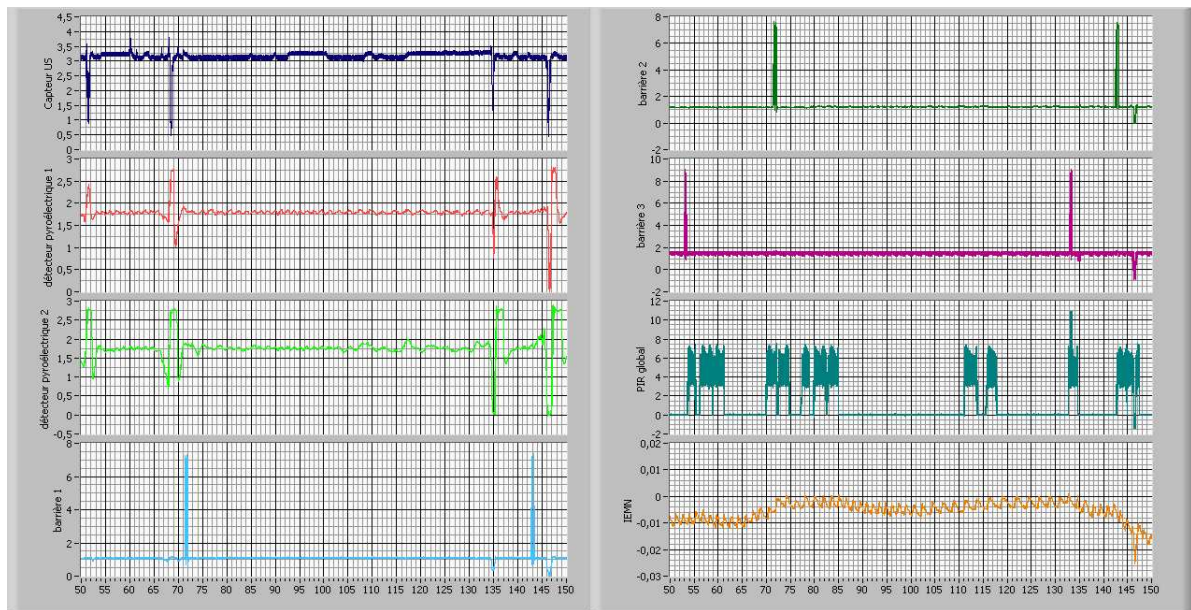


FIGURE 2.24 – Résultat des réponses des capteurs pour le scénario 5

Finalement, ce scénario n'est qu'une superposition des scénarios 1 et 3. Toutefois, l'information du nombre de personnes ne peut être donnée que par les capteurs situés au niveau de la porte. Si les informations données par les trois premiers graphes de la figure 2.24 sont supprimées, on pourrait croire que c'est une seule personne qui fait le tour de la pièce.

2.2.1.6 Scénario 6 : Une personne est en mouvement dans la pièce.

Dans ce scénario, la personne fait le tour de la pièce comme indiqué sur la figure 2.25. Les résultats de tous les capteurs sont donnés par la figure 2.26.

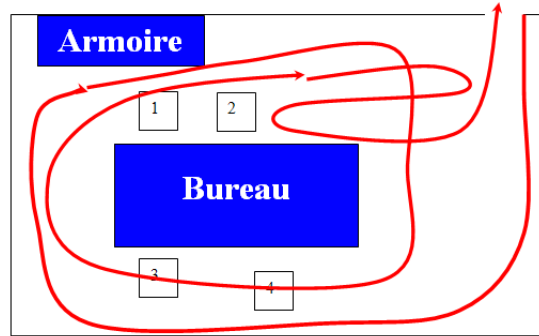


FIGURE 2.25 – Action réalisée dans la pièce pour le scénario 6

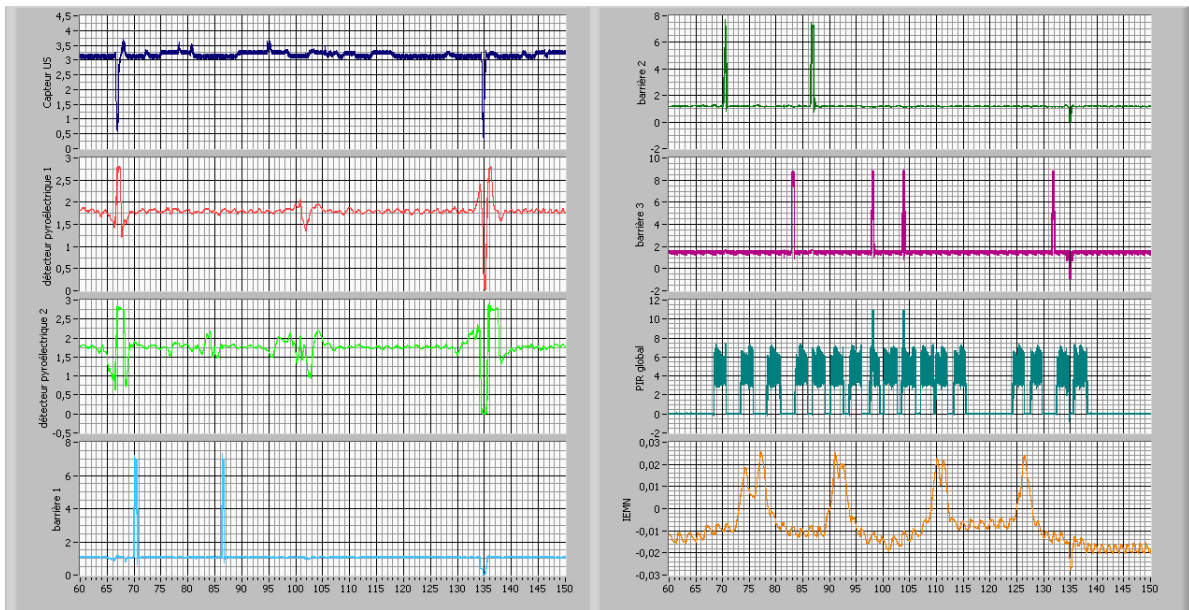


FIGURE 2.26 – Résultat des réponses des capteurs pour le scénario 6

On remarque que pour $t = 103s$, les signaux donnés par les deux détecteurs pyroélectriques pourraient nous faire penser qu'il y a une entrée ou une sortie mais l'information n'est pas confirmée par le capteur à Ultrason qui est plus directif et plus immunisé aux perturbations (courants d'air) que les deux autres capteurs. Il est possible que la trajectoire de la personne en mouvement passe dans le champ de détection des détecteurs pyroélectriques.

Il est intéressant de souligner l'apport d'informations données par les capteurs au-dessus de la porte (détecteurs pyroélectriques et capteur à ultrason) : pas de supposition hasardeuse sur le nombre de personnes pour expliquer éventuellement le franchissement des barrières IR (comme il a été observé dans le scénario 5).

2.2.1.7 Scénario 7 : Deux personnes sont dans la pièce, une personne est mobile, l'autre reste assise, puis les deux sortent.

Dans ce scénario, les protagonistes sont déjà dans la salle. Le premier est déjà assis et le reste jusqu'à sa sortie. Le deuxième est assis, puis est en mouvement dans la pièce (environ à $t = 47s$), il s'assoit (environ à $t = 94s$) puis les deux sortent. La figure 2.27 donne un aperçu de l'activité de la personne et les résultats sont donnés sur la figure 2.28.

Le franchissement des barrières peut nous donner des informations sur le trajet suivi mais aucun capteur ne saurait nous informer de la présence d'une personne immobile dans la pièce. Il n'y a qu'au moment de la sortie des deux personnes que l'on peut se rendre compte que deux personnes étaient présentes.

Il est intéressant de voir que l'IEMN est à un certain niveau au début du test (présence de deux personnes) et qu'à la sortie de toutes les personnes, la réponse est à un niveau plus bas. On peut imaginer qu'on puisse, à l'aide de cette technologie, détecter une présence ou une absence à condition de connaître le niveau le plus bas correspondant à l'information "aucune présence".

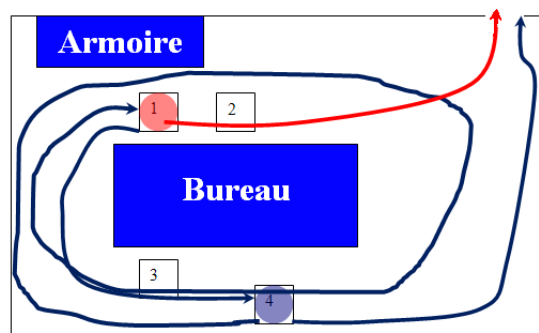


FIGURE 2.27 – Action réalisée dans la pièce pour le scénario 7

2.2.1.8 Conclusion sur les scénarios

Un tableau récapitulatif est donné à la table 2.2.1.8. Un capteur mesure un phénomène physique en particulier. Il paraît donc intéressant de coupler les différentes technologies de capteurs pour déterminer la présence humaine dans la pièce. Cette campagne confirme l'utilité de coupler différentes informations. Une thèse sur la fusion de données dans un réseau de capteurs est menée au sein du projet par Damien Brulin [Brulin *et al.*, 2008][Brulin *et al.*, 2009].

On note que la barrière IR est assez fiable mais il reste néanmoins des problèmes de double détections. Ce problème vient du fait que l'on capte d'abord une jambe puis l'autre. Une solution serait de remonter la hauteur des barrières au détriment peut-être de la détection des enfants en bas âge. Cependant, la barrière IR détecte le passage de tout objet matériel, même inhumain.

Le pyromètre donne des résultats intéressants quand l'individu est en mouvement. Dans le cas où la personne n'est plus en mouvement, le capteur n'est plus stimulé, il reçoit l'information que rien ne se déplace, ce qui est interprété par "il n'y a personne". Certes, aujourd'hui, ce problème

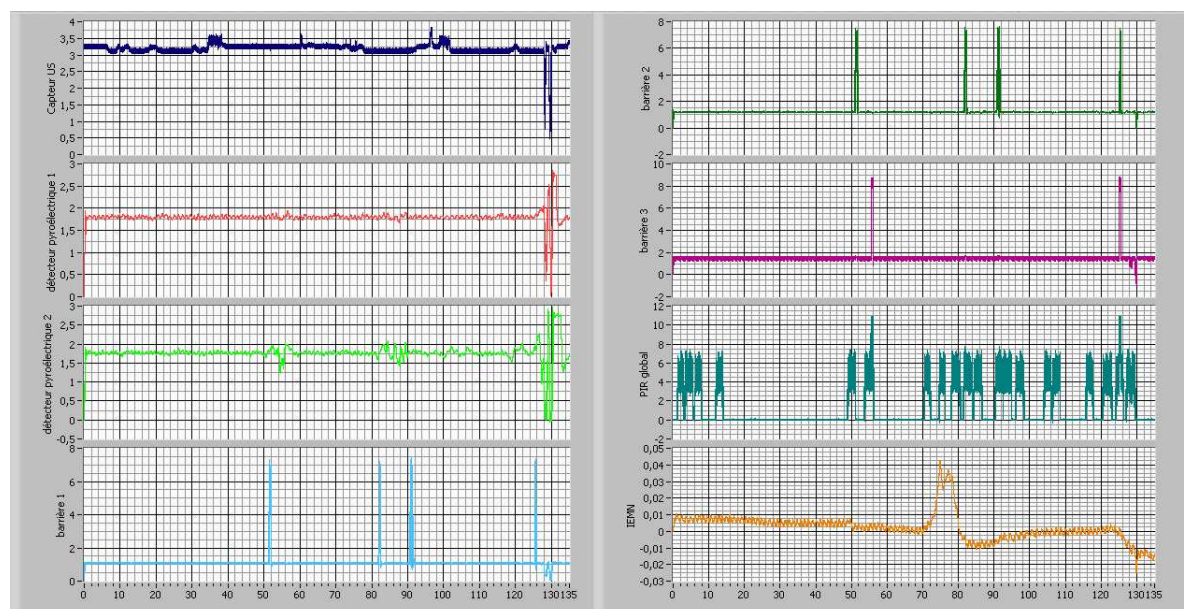


FIGURE 2.28 – Résultat des réponses des capteurs pour le scénario 7

scénario	1	2	3	4	5	6	7
PIR global	période de non détection	période de non détection	période de non détection	période de non détection	période de non détection	bonne détection	bonne détection
2 PIR + Ultrason	identification 1 entrée/1 sortie	identification 1 entrée/1 sortie	identification 1 entrée/1 sortie	identification 1 entrée/1 sortie	identification 1 entrée/1 sortie	identification 1 entrée/1 sortie	identification 2 entrée/2 sortie
Double barrières	non sollicité	non sollicité	identification du sens de passage	identification du sens de passage	identification du sens de passage	identification du sens de passage	identification du sens de passage
Barrière simple	détection de franchissement	détection de franchissement	non sollicité	non sollicité	détection de franchissement	détection de franchissement	détection de franchissement
capteur IEMN	hors zone	hors zone	détection faible	bonne détection	bonne détection	bonne détection	bonne détection

TABLE 2.1 – Récapitulatif du comportement des capteurs

est plus ou moins résolu à l'aide d'une temporisation. Dans nos essais, la temporisation est de 3 à 4 secondes.

Le système entrée/sortie donne également des résultats intéressants mais certains résultats nous confortent dans l'idée de s'appliquer sur le placement des éléments sensibles des détecteurs infrarouges. L'information donnée par des capteurs au niveau de la porte s'avère très précieuse.

Le capteur de l'IEMN offre des possibilités nouvelles dans le domaine de la détection de présence humaine. Si les capteurs qualifiés abusivement de "capteurs de présence" ne sont capables de ne détecter que les mouvements d'une cible, il serait donc innovant de proposer un capteur capable de certifier une présence même quand la cible est immobile.

2.2.2 Capteur de CO_2

Nous avons donc réalisé de nombreux tests sur différents types de capteurs. Nous avons placé dans la salle un capteur de CO_2 comme indiqué sur la figure 2.29. Ce capteur IAQ-100 est produit par l'entreprise "Applied Sensor". Des essais ont été réalisés, quelques résultats sont présentés sur la figure 2.30. Deux informations sont données par le capteur : la courbe bleue nous donne la prédiction de CO_2 en ppm et la courbe rose est la valeur de la résistance. Le premier graphe présente le cas d'une personne dans la pièce à deux moments différents sachant que la porte est ouverte, on se rend compte que le capteur n'apporte pas de résultats satisfaisants. D'ailleurs, le deuxième graphe présente des résultats pour des événements entrée et sortie dans une pièce avec aération : difficile de prédire une présence ou non. Par contre, ce capteur peut s'avérer être un détecteur non pas de présence mais d'absence ! Les deux derniers graphes dans la figure 2.30 nous conduisent à cette conclusion. En effet, après le départ des deux personnes dans la pièce, le taux de CO_2 se stabilise jusqu'au retour d'une personne dans la pièce.

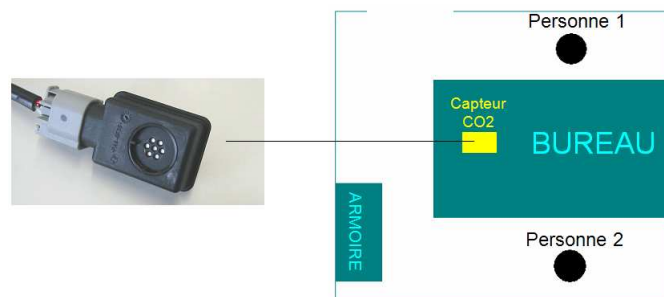
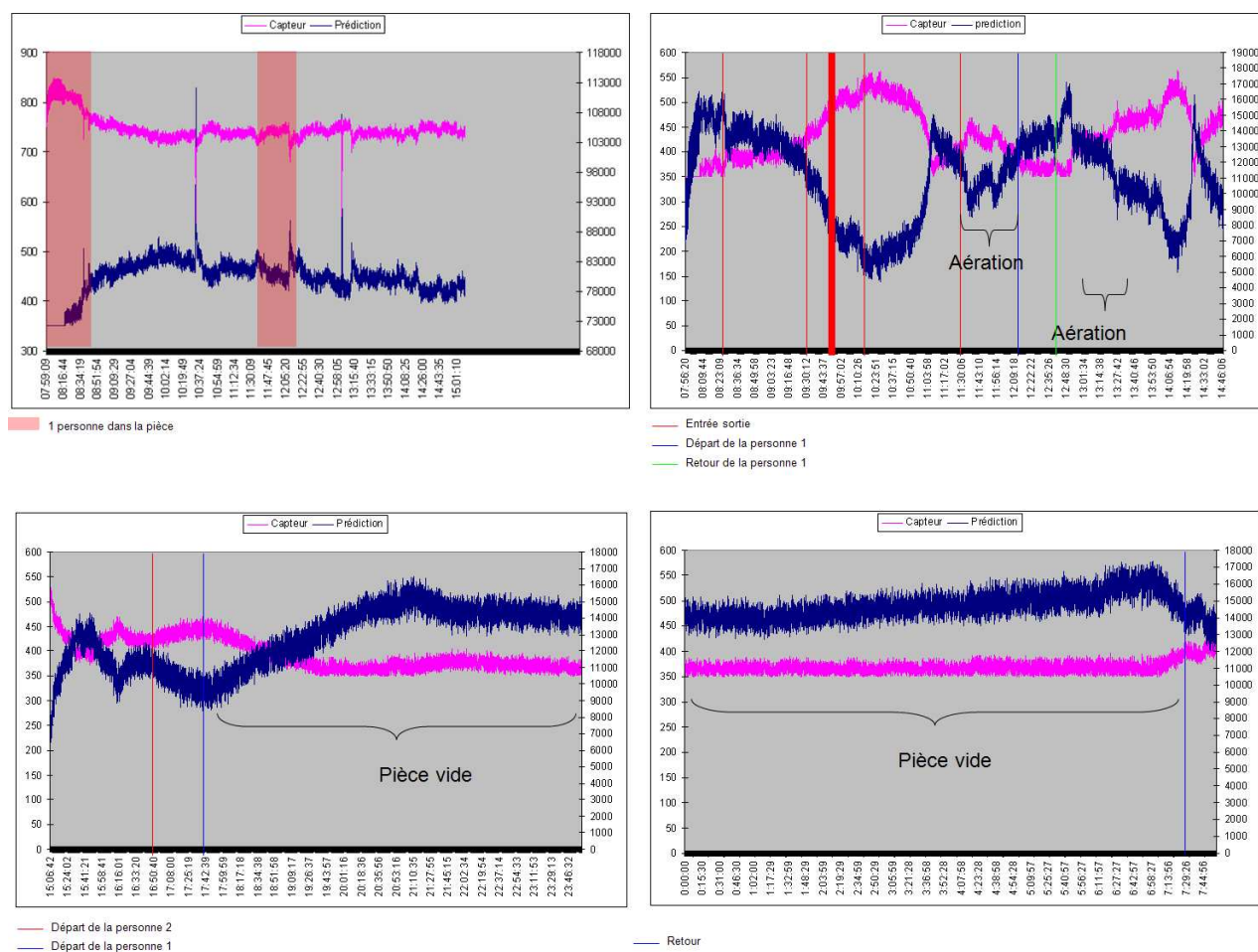


FIGURE 2.29 – capteur de CO_2 IAQ-100

Finalement, ce capteur peut permettre l'identification de l'augmentation du CO_2 en présence d'une personne ou plusieurs personnes si le résultat n'est pas perturbé par des courants d'air : les ouvertures et fermetures des portes ou le mouvement d'une personne. Il faut bien avouer que les courbes sont difficilement exploitables, les résultats sont peu convaincants quand la pièce est occupée. Par contre, la stabilisation du taux de CO_2 , quand la pièce est vide, est une piste intéressante.

FIGURE 2.30 – Résultat obtenu avec le capteur de CO_2 IAQ-100

2.2.3 Système entrée/sortie

Nous allons décrire un peu plus en détail le système Entrée/Sortie (E/S) déjà utilisé dans les tests présentés dans la section 2.2.1 page 38. Nous avons pu identifier l'importance du placement des capteurs pour avoir le meilleur signal possible lors du passage de la cible comme décrit sur la figure 2.31.

On relie la sortie des capteurs à un PSCOC² que l'on programme pour avoir une tension à 4,5V pour une entrée, 1V pour une sortie et 2,5V quand il ne se passe rien. Pour résumer, l'algorithme du PSOC prévoit une période ΔT après le signal d'un premier capteur. Si le deuxième capteur n'est pas excité, alors on remet le compteur à zéro jusqu'au prochain signal de détection de l'un des détecteurs. Dans le cas où le deuxième capteur est excité avant la fin du ΔT prévu, alors le sens de passage est identifié par l'ordre de détection des capteurs :

- PIR1 puis PIR2 : on a une entrée,
- PIR2 puis PIR1 : on a une sortie.

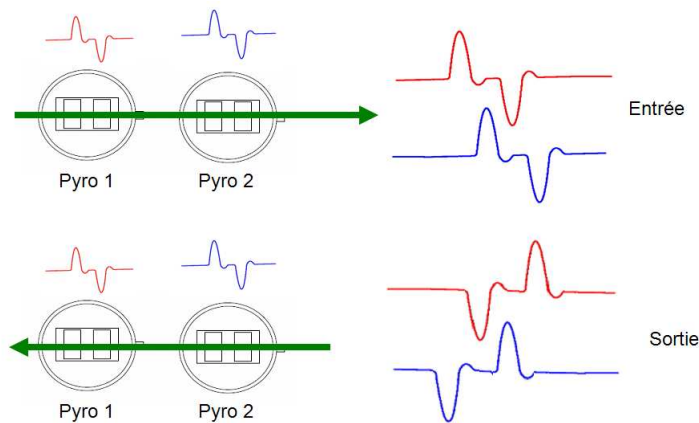


FIGURE 2.31 – comportement de deux détecteurs pyroélectriques mis en parallèle lors du passage d'une cible

Dans la section 2.2.1 page 38, nous avons utilisé un capteur à Ultrason pour confirmer l'information de passage. Nous proposons d'utiliser à la place le TPA81 (voir figure 1.27 page 30) pour avoir confirmation du passage d'un humain. Le tout est mis dans un boîtier que nous avons placé sur le côté de la porte et nous avons pu observer de bons résultats lors du passage d'une personne (voir figure 2.32).

2.2.4 Essais avec un capteur de type thermopile

Dans la section 2.2.1 page 38, nous avons utilisé un microcapteur infrarouge développé et prêté par l'IEMN de Lille pour notre étude sur divers scénarios. La figure 2.33 est une photo

2. PSOC (Programmable System on Chip) est un système électronique propriétaire de Cypress, et est conçu pour remplacer à la fois le microcontrôleur et les circuits périphériques d'un système embarqué. L'intérêt de son utilisation est de pouvoir programmer le système très facilement pour avoir par exemple une réponse en fonction des entrées analogiques ou numériques



FIGURE 2.32 – Résultat du système E/S

de la maquette confiée, un cône est fixé sur le microcapteur pour focaliser un maximum de rayonnement infrarouge et un PIR est fixé à côté pour permettre une étude comparative. La conception du microcapteur est développée dans la thèse de Medhi Haffar [Haffar, 2007]. Il est vrai que l'application visée était l'imagerie basse résolution mais des tests ont été réalisés pour la détection de présence humaine, avec des résultats offrant des perspectives intéressantes pour notre projet.

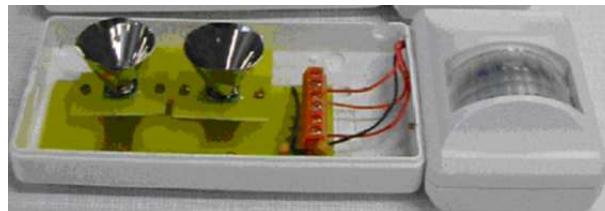


FIGURE 2.33 – Capteur développé par l'IEMN

À l'aide de ce module, on réalise plusieurs tests. La figure 2.34 nous donne un aperçu des résultats obtenus dans un bureau. L'intérêt d'utiliser ce module est de recueillir pour un même événement les signaux pour le pyromètre et pour le capteur IEMN. Ainsi, dans le premier jeu de résultats, une personne est assise dans la pièce : le PIR ne détecte rien, et l'IEMN est à un certain niveau. Au bout d'environ 4 secondes, la personne sort : le PIR détecte du mouvement et l'IEMN descend de quelques microvolt. Au retour de la personne, le PIR la détecte et l'IEMN présente un pic puis regagne quelques microvolts. On observe les mêmes résultats sur le deuxième jeu présenté sur la figure 2.34, à la différence qu'une personne qui passe dans le champ de détection du module mais qui n'entre pas dans la pièce est détectée par nos deux capteurs. Cependant, le pic donné par l'IEMN ne dépasse pas la tension qui a été relevée pour une présence dans la pièce.

Ce capteur nous permettrait d'avoir des informations de présence ou d'absence et ceci que la

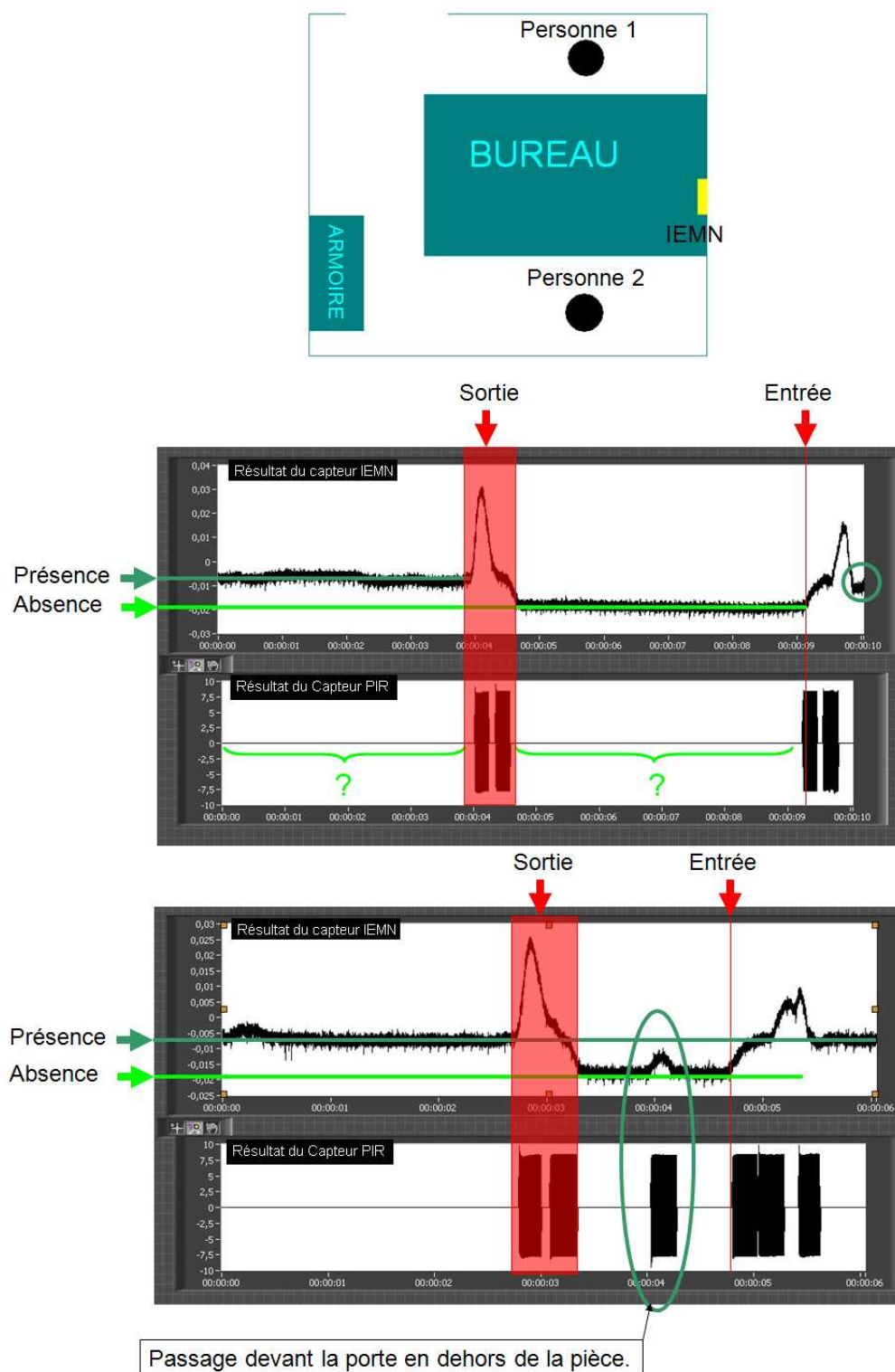


FIGURE 2.34 – Résultat obtenu avec le capteur IEMN

		<i>Classe estimée</i>	
		<i>A</i>	<i>B</i>
<i>Classe réelle</i>	<i>A</i>	VP	FN
	<i>B</i>	FP	VN

TABLE 2.2 – Matrice de confusion

personne soit en mouvement ou immobile. Dans la suite de cette thèse, nous allons nous pencher plus en détail sur les capteurs de type thermopile.

2.2.4.1 Etude comparative

On réalise 19 scénarios en fonction de trois classes :

- occupation normale : personnes assises, réunion de travail, circulation dans un couloir, ...
- événements anormaux : chutes, agitations, ...
- stimuli de fausses détections : éclairage, objets mobiles ...

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux de matrice de confusion comme représentés sur le tableau 2.2, avec :

- A : présence
- B : non présence
- VP : vrai positif
- FP : faux positif
- FN : faux négatif
- VN : vrai négatif

La classe réelle est ce qui se passe vraiment sur la scène (vérité de terrain) dans notre cas : il y a quelqu'un (A) ou non (B). La classe estimée est la réponse du capteur par rapport à la scène. Les vrais positifs sont les cas où la réponse du capteur pour une présence concorde avec la vérité de terrain. Une réponse de non-présence réelle par rapport à la scène est appelée vrai négatif. Ces deux valeurs doivent tendre vers 1 pour avoir un système de détection de qualité. Les faux positifs sont les cas de fausses détections par le capteur et les faux négatifs sont les cas de non détection. Ces deux dernières valeurs doivent tendre vers 0. Lors du dépouillement des résultats obtenus lors des tests, les données obtenues sont transposées à la vérité de terrain. La vérité de terrain est ce qui se passe réellement dans la pièce à savoir "présence ou non" et on espère qu'idéalement les informations obtenues par les capteurs correspondent aux événements attendus décrits par la vérité de terrain. On réalise les opérations suivantes pour constituer notre

matrice de confusion :

$$VP = \frac{\text{nombre de cas de détections réelles}}{\text{nombre total de cas de détections}} \quad (2.1)$$

$$FP = \frac{\text{nombre de cas de mauvaises détections}}{\text{nombre total de cas de détections}} \quad (2.2)$$

$$FN = \frac{\text{nombre de cas de mauvaises non-détections}}{\text{nombre total de cas de non-détections}} \quad (2.3)$$

$$VN = \frac{\text{nombre de cas de non-détections réelles}}{\text{nombre total de cas de non-détections}} \quad (2.4)$$

Le tableau 2.3 donne le résultat obtenu pour les trois classes de scénarios.

occupation normale		événements anormaux		stimuli de fausses détections	
iemn		iemn		iemn	
0,79	0,21	0,63	0,37	0,57	0,43
0,47	0,53	0,49	0,51	0,42	0,58
perkin		perkin		perkin	
0,77	0,23	0,73	0,27	0,63	0,37
0,40	0,60	0,68	0,32	0,37	0,63
pir		pir		pir	
0,24	0,76	0,17	0,83	0,40	0,60
0,47	0,53	0,21	0,79	0,31	0,69

TABLE 2.3 – Matrice de confusion

Les mauvais résultats obtenus pour le PIR s'expliquent par le fait que nous n'utilisons pas de temporisation. En situation réelle, les PIR sont installés en fonction de la pièce à surveiller avec une temporisation réglable, ce qui aura pour effet d'augmenter les vrais positifs mais en contre partie risque d'augmenter le nombre de faux positifs. Il est intéressant de voir le potentiel de détection que peuvent offrir la technologie thermopile. Les résultats présentés dans le tableau sont obtenus juste par comparaison avec un seuil et pourront sûrement être améliorés par l'utilisation d'une autre méthode. Cette étude comparative montre très clairement le potentiel d'innovation que peut apporter ce type de capteur.

2.2.4.2 Tests sur capteurs à l'aide d'un banc de Test de LEGRAND

De nombreux essais ont été effectués sur le capteur de l'IEMN en utilisant une personne comme cible. Il est très difficile de cerner le comportement du capteur avec une référence qui n'est pas statique. Un des premiers besoins qui se fait ressentir dans nos tests est d'avoir une cible d'émission infrarouge connue et contrôlée. Un autre paramètre qui serait intéressant de contrôler est le positionnement relatif de la cible et du capteur (translation ou rotation). Un de nos partenaires industriels, Legrand, possède dans ces locaux un banc de test créé dans le but de tester les PIR en simulant une présence humaine à l'aide d'un corps noir de dimension $12\text{ cm} \times 4\text{ cm}$. Le mouvement d'une personne peut être simulé par un cache motorisé qui obstrue le corps noir durant sa rotation. Nous avons utilisé ce montage avec et sans mouvement pour caractériser le microcapteur IR. Le support du capteur est également motorisé, ce qui permet la simulation de différentes orientations de la cible par rapport au capteur (voir figure 2.35).

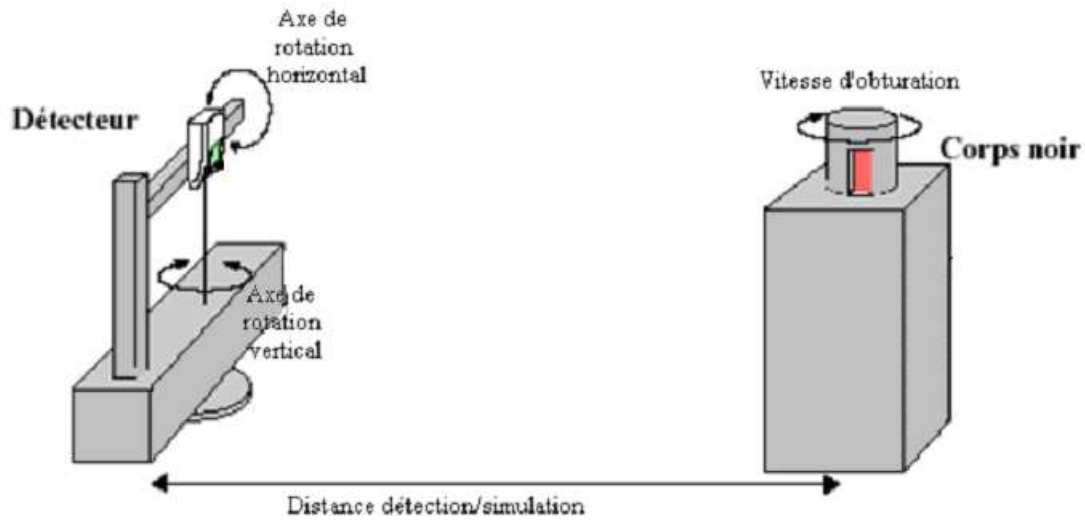


FIGURE 2.35 – Banc de test de Legrand pour tester les PIR

Obturation du corps noir à vitesse lente : Le corps noir est placé à 95 cm dans l'axe du capteur et est chauffé à 150 °C. Le signal obtenu pour le corps noir sans obturation est autour de 28 mV. Dans l'essai suivant, nous avons commandé l'obturateur du corps noir à vitesse lente (fréquence de rotation = 0.35 Hz). Ce type de test permet d'évaluer le temps de réponse du micro-capteur. La figure 2.36 donne le résultat obtenu, les pics observés correspondent à la détection du corps noir, visible lors du passage de la fenêtre devant le corps noir. Les signaux obtenus ont une amplitude qui n'atteint pas les 28 mV obtenus lorsque le corps noir n'est pas obstrué.

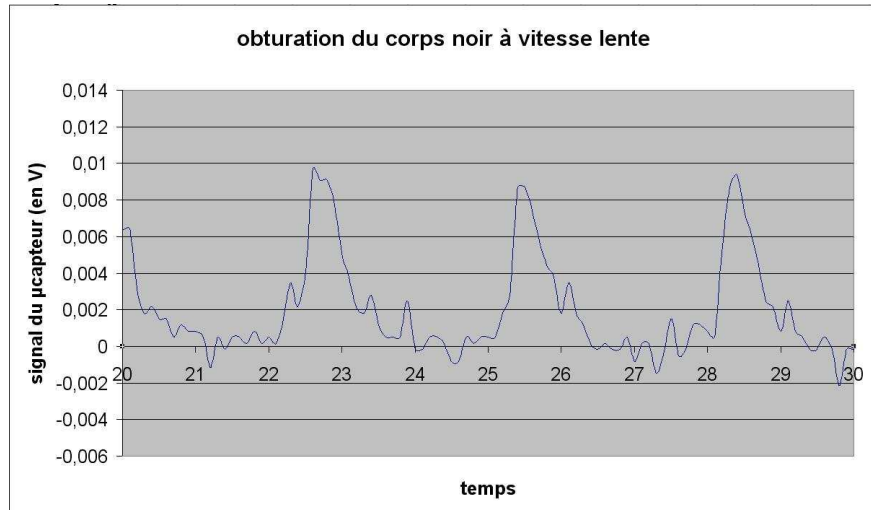


FIGURE 2.36 – résultat sur le corps noir obstrué à vitesse lente

La fréquence des pics peut être donnée par :

$$f_{pic\ de\ detection} = \frac{1}{T_{pic}} = \frac{1}{t_{pic1} - t_{pic2}} \quad (2.5)$$

Avec T_{pic} : la période entre 2 pics,
 $tpic1$ et $tpic2$: l'instant (abscisse) des pics 1 et 2 (en s).

Obturation du corps noir à vitesse rapide : Dans l'essai suivant, nous avons commandé l'obturateur du corps noir à vitesse rapide (fréquence de rotation = 0.6 Hz) (figure 2.37). Comme pour la manipulation à vitesse lente, les signaux ont une amplitude qui n'atteint ni l'amplitude de 28 mV obtenue pour le corps noir non obstrué ni les amplitudes des résultats obtenus pour une obstruction à vitesse lente du corps noir.

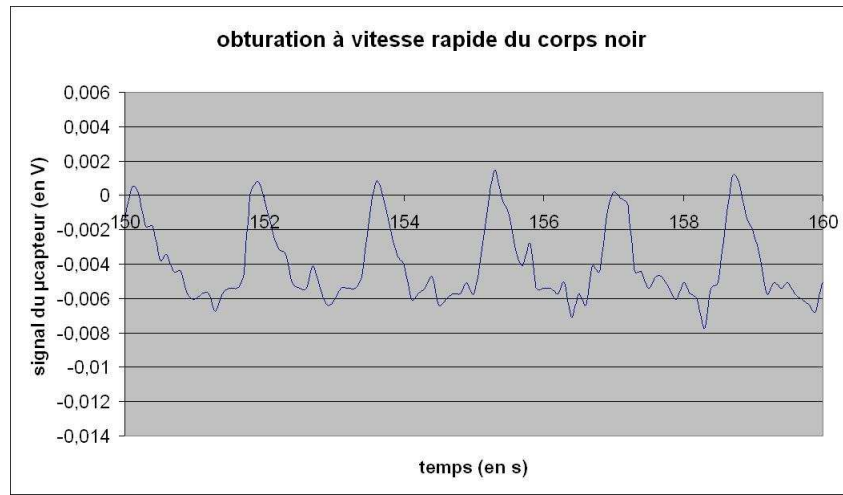


FIGURE 2.37 – résultat sur le corps noir obstrué à vitesse rapide

De la même façon que précédemment, à l'aide de l'équation (2.5), nous trouvons une fréquence de $0,59\text{ Hz}$.

Rotation du capteur par rapport au corps noir de 0 à 90° et de 0° à -90° : Nous commandons le support du capteur en rotation autour d'un axe vertical de 0 à 90° puis de 90 à 0° . Le capteur est positionné à 95 cm de la cible, les résultats sont donnés sur le graphe A de la figure 2.38. A 0° , le capteur est dans l'axe de la cible. Nous observons une répétabilité des mesures dans le sens où l'allure de la courbe pour aller dans un sens puis dans l'autre est presque symétrique. Cependant, nous remarquons que le signal à 0° en début de manipulation est plus haut que le 0° en fin de manipulation, écart que l'on explique par la présence d'une VMC au-dessus du banc (nous n'avions pas la possibilité de couper cette perturbation).

Nous commandons le support du capteur en rotation de 0 à -90° puis de -90 à 0° . Le capteur est positionné à 95 cm de la cible. Sur le graphe B de la figure 2.38, nous obtenons un profil de courbe différent de celui obtenu pour une rotation de 90° (graphe A). En fait, ce résultat est obtenu à cause de la configuration de la pièce ; pour une orientation de -90° , le capteur pointe vers le rideau derrière lequel nous étions. Il est possible que notre émission de chaleur ait induit une perturbation sur le résultat obtenu sur le graphe B de la figure 2.38 (sans parler de la chauffe des ordinateurs), il n'est donc pas étonnant de voir le niveau de la réponse du capteur à 90° inférieur au niveau de la réponse du capteur à -90° .

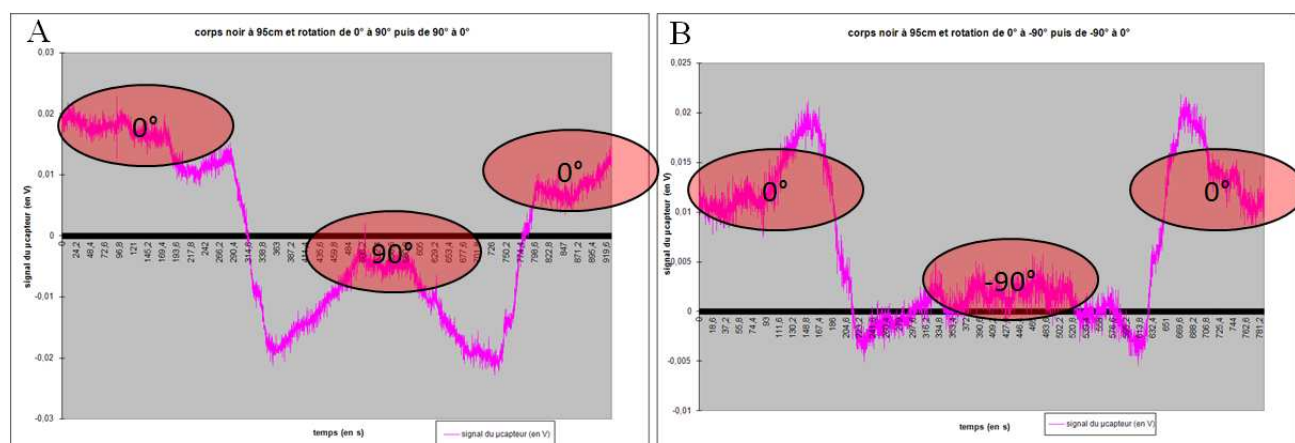


FIGURE 2.38 – Résultat pour la rotation du capteur de 0 à 90° puis de 90 à 0° (graphe A) et pour la rotation du capteur de 0 à 90° puis de 90 à 0°(graphe B)

Variation de la distance entre corps noir et capteur : Nous réalisons des mesures à différentes distances entre le capteur et le corps noir. Les mesures sont réalisées de 95 cm puis de 1,25 à 3 m avec un pas de déplacement de 25 cm et enfin un essai à 4 mètres. La décroissance du signal donnée dans la figure 2.39 est conforme à la variation théorique de l'éclairement du capteur : diminution inversement proportionnelle au carré de la distance entre le corps noir et le capteur.

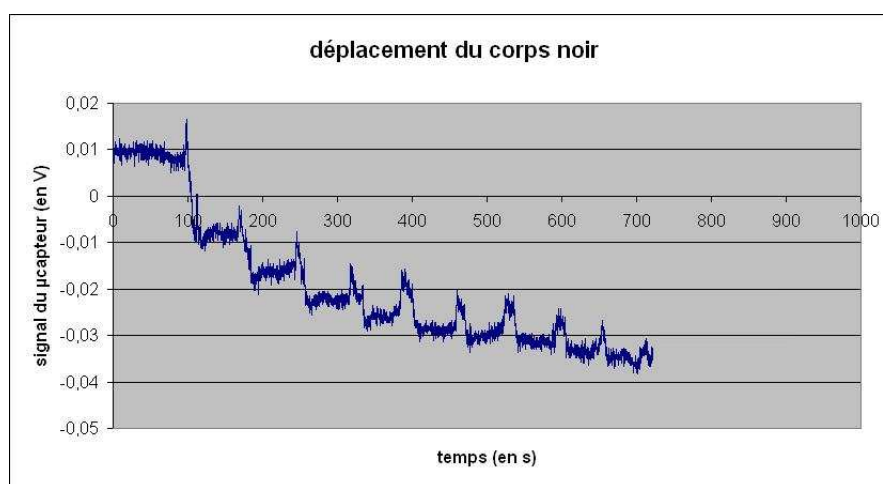


FIGURE 2.39 – Résultat en éloignant le corps noir du capteur

Conclusion sur le banc de test Legrand : Cette série de tests a été réalisée avec nos partenaires de Legrand dans un but qualitatif, afin de se familiariser avec le comportement du capteur. Logiquement, le capteur est sensible aux sources autres que le rayonnement de la cible qui pour nos applications de détection de présence humaine se trouvent être donc des sources de perturbations.

Diagram illustrating the circuit for the fluxmeter (Pads Fluxmètre) using two LTC2055 comparators (IC1A and IC1B).

The circuit includes the following components and connections:

- Power Supply:** The circuit is powered by a 56Hz signal ($F_c = 56\text{Hz}$) and a 23Hz signal ($F_c = 23\text{Hz}$).
- Resistors:**
 - R_1 (50k) is connected to the non-inverting input of IC1A.
 - R_2 (56k) is connected to the inverting input of IC1A.
 - R_3 (1000) is connected to the non-inverting input of IC1B.
 - R_4 (1Meg) is connected to the inverting input of IC1B.
- Capacitors:**
 - C_1 (100n) is connected to the non-inverting input of IC1A.
 - C_2 (100n) is connected to the inverting input of IC1B.
 - C_3 (100n) is connected to the non-inverting input of IC1A.
 - C_4 (100n) is connected to the inverting input of IC1B.
- Connectors:** The circuit is connected to a connector (SV1) which is grounded.

La figure 2.41 présente les expériences réalisées pour la caractérisation des capteurs de type thermopile. Les données sur la réponse du capteur sont recueillies pour être traitées et les résultats sous forme d'un modèle sont implémentés dans un logiciel de simulation que nous décrivons plus loin.

2.3.1 SNOOPS

- simuler les environnements d’emploi des capthoms,
- estimer la couverture spatiale des capthoms,
- modéliser les alternatives technologiques identifiées pour les capthoms,
- simuler un réseau de capthoms et sa réponse en terme d’information sur les occupants,

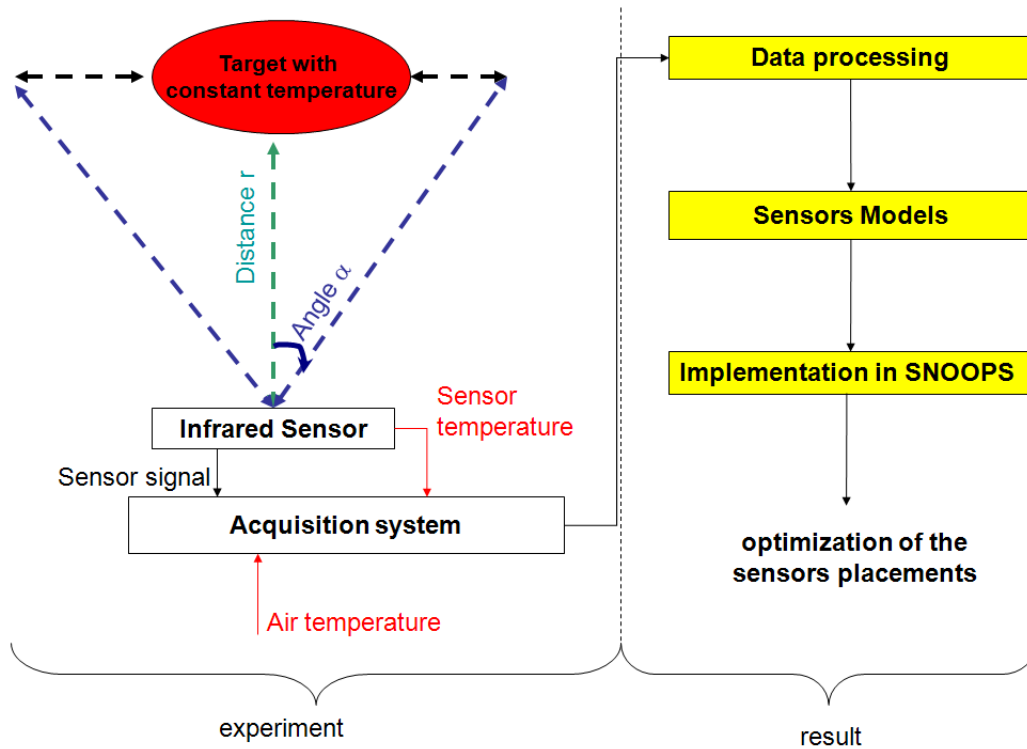


FIGURE 2.41 – Expérience et résultat de la caractérisation d'un capteur Infrarouge

- simuler les scénarios d'emploi des capteurs,
- optimiser le placement de capteurs dans un environnement.

Ce logiciel a pour objectif la validation des exigences formulées sous la forme des scénarios d'utilisation. La réalisation de ce simulateur est abordée plus en détail dans [David, 2009]. Pour réussir à optimiser le placement des capteurs de type thermopile, il faut pouvoir implémenter un modèle de la réponse du capteur, d'où l'intérêt de la caractérisation.

2.3.2 Essais préliminaires avant la mise en place du banc de tests

Nous allons réaliser quelques tests avant la mise en place définitive du banc de tests. Nous voulons caractériser le comportement de nos capteurs en fonction de la distance et de l'angle entre la cible et le capteur (figure 2.42).

Nos partenaires de Legrand nous ont fourni des boîtiers possédant une fenêtre en polyéthylène qui laisse passer le rayonnement infrarouge. On réalise une manipulation selon le protocole suivant :

- la cible recule de 1m toutes les 30s de 0 à 5m,
- puis la cible sort de la pièce pendant 30s,
- enfin, la cible avance de 1m toutes les 30s de 0 à 5m.

Il apparaît nettement sur la figure 2.43, que le boîtier nous permet de minimiser, de manière significative, les flux perturbateurs (courant d'air). Des paliers nets sont visibles de 0 à 2m. On

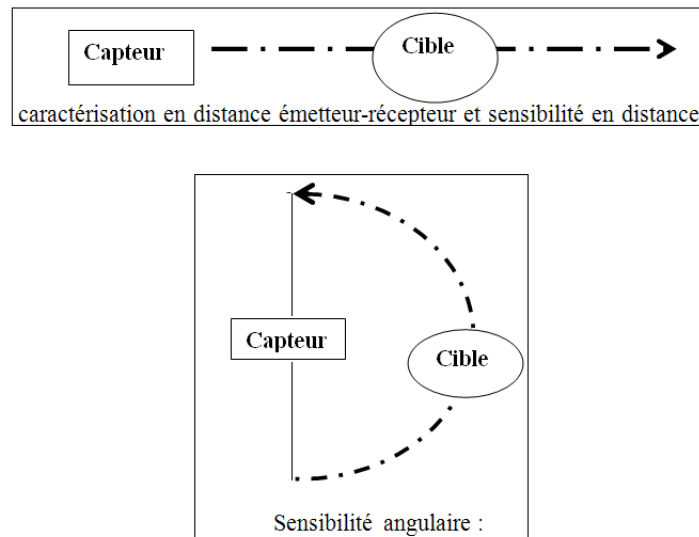


FIGURE 2.42 – Objectif de la caractérisation

devine encore un niveau de présence aux alentours de $3m$. En revanche l'interprétation pour les résultats à $4m$ devient plus difficile. Enfin, la différence entre un positionnement à $5m$ et le signal pour l'absence totale de la cible dans le champ de détection du capteur est minime voire inexistante. On peut donc considérer que le dispositif n'est plus capable de détecter un corps chaud à partir de $5m$ (sous réserve de meilleurs résultats avec une meilleure électronique et/ou optique).

Le capteur commercialisé par Perkin Elmer, du fait de son encapsulation, n'a pas besoin d'avoir le film en polyéthylène, témoin le résultat obtenu sur la figure 2.44. Le graphe est obtenu lorsque nous avons positionné deux capteurs de manière à ne pas recevoir le rayonnement de la lumière naturelle directement sur eux. Dans un premier temps, les volets de la pièce sont ouverts pendant une minute, puis les volets sont fermés (la transition est représentée par un rectangle rouge sur le graphe de la figure 2.44), pendant une minute. On peut constater que le Perkin-Elmer reste stable contrairement au capteur IEMN dont la réponse n'est pas très nette.

On réalise également des essais avec deux personnes différentes (appelées P1 et P2). Les résultats donnés dans la figure 2.45 illustrent des essais réalisés à moins de 2 minutes d'intervalles. Il est rassurant de voir que pour une même personne, on arrive à trouver des résultats similaires, mais il n'est pas étonnant que les résultats diffèrent entre deux personnes. Il apparaît ici qu'un test de caractérisation devra être très clairement réalisé à l'aide d'une source chaude dont la température est contrôlée contrairement à une personne dont la température changée au cours de la journée en fonction de son activité et de la température dans la pièce [Dittmar *et al.*, 1995].

On réalise un test mettant encore en scène deux personnes (P1 et P2). Soit P1 à $1m$, puis P1 à $1m$ et P2 à $1,5m$, ensuite P1 s'en va mais P2 reste, enfin P2 repart, pour finir on recommence les 4 événements précédents. Chaque étape dure 20s. Les résultats présentés dans la figure 2.46 ont été effectués avec deux capteurs de l'IEMN en même temps. On s'attend à avoir des résultats similaires pour les mêmes événements mais on observe un décalage de quelques microvolts pour des signaux qui correspondent aux mêmes événements décalés de 80 s. Il est difficile d'identifier

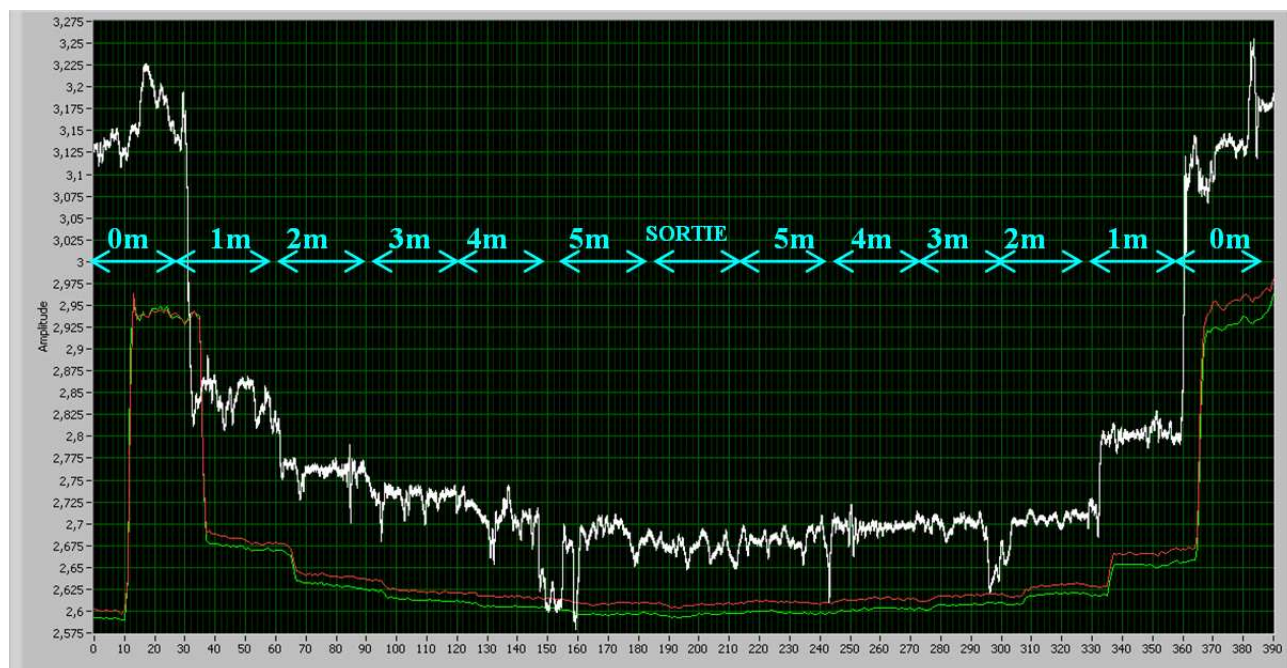


FIGURE 2.43 – Comparaison signal sans boîtier (courbe blanche) et avec boîtier (courbes rouge et vert)



FIGURE 2.44 – représentation de la réponse en tension pour les deux capteurs (en noir, l'iemn et en bleu le Perkin Elmer) dans deux conditions différentes

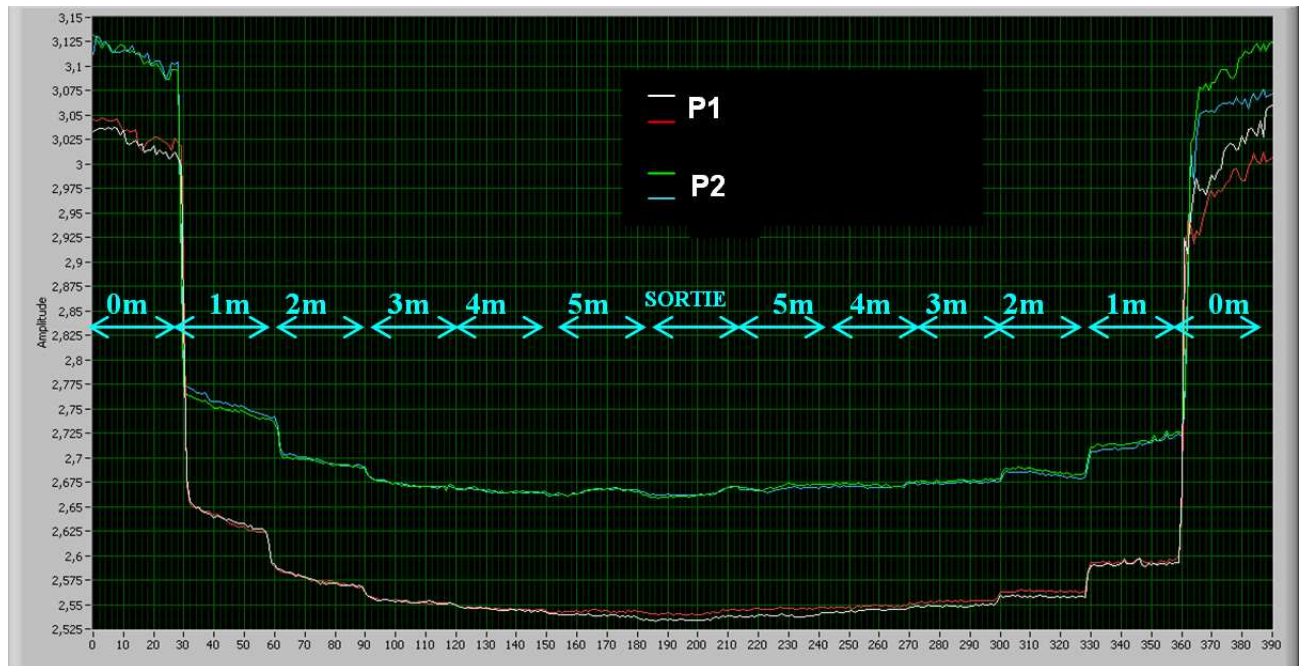


FIGURE 2.45 – Comparaison entre 2 acquisitions avec 2 personnes différentes

le phénomène à l'origine du décalage, sans aucun doute que la température des sujets et de la pièce sont les clés de cette observation. On remarque aussi le décalage entre la courbe blanche et rouge. En effet, le test a été réalisé sur les différents capteurs en notre possession, on pourra sûrement déduire un modèle général de la réponse des capteurs commun à l'ensemble de ce type de technologie mais les coefficients du modèle devront varier en fonction des tests de caractérisation.

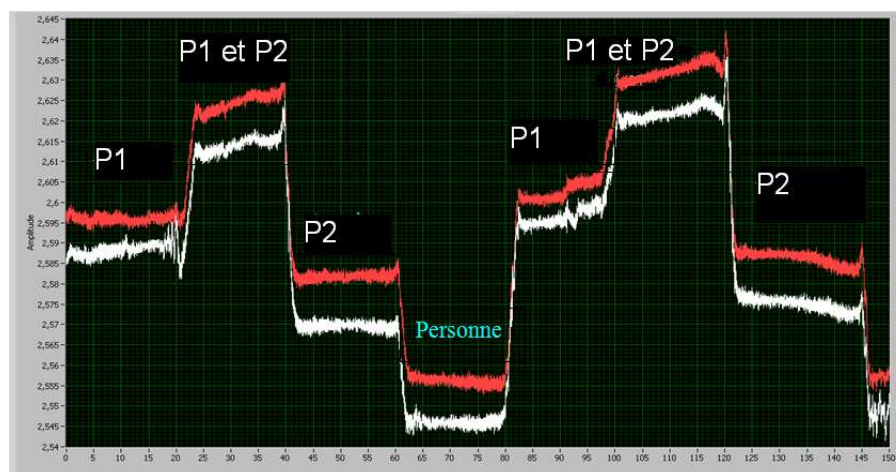


FIGURE 2.46 – Test avec 2 personnes sur deux capteurs

2.3.3 Le banc d'essai

La mission principale de notre travail est de caractériser la micro-sonde infrarouge du rayonnement pour un usage spécifique. La sonde fournit l'information de la présence humaine dans une chambre et permet une localisation de celle-ci. Il existe un banc de mesure spécifique pour la caractérisation des microcapteurs décrit et utilisé dans la thèse de Mehdi Haffar. Ce banc a été réalisé en 1998 et est utilisé pour améliorer la conception de leurs capteurs [Haffar, 2007]. Pour notre application, la réponse du capteur d'une cible à température connue dans une chambre doit être déterminée. Deux types d'essais vont être réalisés pour obtenir le modèle de la réponse du capteur, les essais à mener sont représentés sur la figure 2.42 (page 66). Pour des raisons pratiques, nous déplacerons le capteur et non pas la cible qui est assez encombrante. Le premier essai donne la réponse du capteur par rapport à la variation de la distance entre la cible et lui-même. Dans l'autre essai, la cible demeure fixe mais l'angle entre le capteur et la cible varie. On a observé une sensibilité aux variations de la température de l'environnement externe. Des sondes de température sont utilisées pour obtenir cette information qui affecte la sonde. La cible utilisée est une plaque chauffante (fournie par notre partenaire Thermor) dont la température est commandée (à l'aide d'une électronique réalisée par Sorec) pour être équivalente à la température de surface humaine.

2.3.4 Méthode de caractérisation des capteurs Infrarouges

Selon nos tests préliminaires, les signaux des capteurs infrarouges de type thermopile dépendent de la distance (r), de l'angle (α) et de l'azimut (θ) entre la cible et le capteur. La température de la cible (T_{cible}) et de l'air ambiant (T_{sensor} qui est celle du capteur) sont des paramètres influents sur la réponse du capteur. Nous cherchons donc un modèle de la réponse qui prend en compte tous ces paramètres :

$$U_{\text{modèle}} = f(r, \alpha, \theta) \quad (2.6)$$

On réalise cette méthode sur le A2TPMI de Perkin Elmer qui est un capteur de type thermopile.

2.3.4.1 Détermination du zéro

Les thermopiles infrarouges se composent de plusieurs microthermocouples. Ces thermocouples se composent de deux conducteurs différents. Leurs jonctions sont soumises à une différence de température qui produit une tension. La jonction froide est plaquée sur le substrat massif de la sonde qui est à la température ambiante. Le schéma 2.47 donne la réponse pour différentes températures. Nous avons défini une tension U_{seuil} , appelée aussi zéro, obtenue quand le capteur ne détecte aucune variation de température. Une réponse selon la température de la jonction froide T_{sensor} est déterminée :

$$U_{seuil} = 0,04 \times T_{sensor} + 1,06 \quad (2.7)$$

avec :

$$r^2 = 0,9938 \quad (2.8)$$

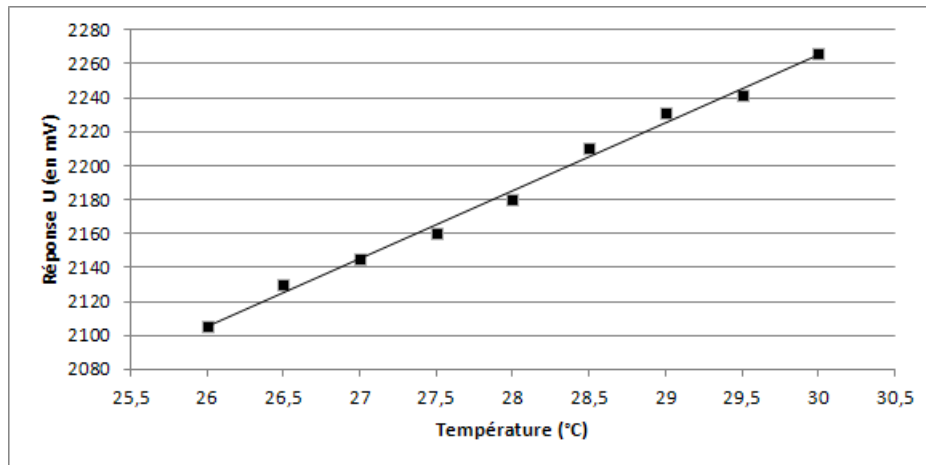


FIGURE 2.47 – Réponse du capteur en fonction de la température pour la détermination du zéro

r^2 , couramment appelé coefficient de détermination (carré du coefficient de corrélation linéaire entre X et Y), exprime le pourcentage de variation de Y que la régression réalisée explique. Ce coefficient donne donc une image de la qualité de la régression (plus r^2 est proche de 1, plus l'ajustement est "parfait"). Sans aller jusqu'à l'utilisation d'un test de Fisher-Snedecor, nous voyons que les écarts-types des estimations des paramètres du modèle, nous donne une bonne idée de la consistance de ce modèle.

Le modèle de la réponse du capteur U_{model} doit vérifier la condition suivante en fonction de la distance r entre la sonde et la cible :

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} U_{model} = U_{seuil} \quad (2.9)$$

2.3.4.2 Caractérisation en fonction de l'angle α

Nous cherchons un modèle sous la forme :

$$U_{modele} = f_{\alpha max}(r) * g(\alpha) * h(\theta) \quad (2.10)$$

Nous définissons α , l'angle entre le capteur et la cible et $g(\alpha)$, la fonction représentant le facteur d'atténuation du signal selon l'angle α . La fonction $f_{\alpha max}(r)$ est le modèle de la réponse du capteur en fonction de la distance pour l'angle α_{max} qui est l'angle où la réponse est maximale. La détermination de α_{max} requiert de connaître le modèle angulaire $g(\alpha)$. La fonction $h(\theta)$ est le modèle de la réponse du capteur sur l'azimuth.

Nous commençons l'acquisition des données avec une cible située à une distance de $2m$. Le capteur est placé au centre d'un plateau tournant qui nous permet de faire varier l'angle de $\Delta\alpha = 10^\circ$. On réalise le profil angulaire de la réponse du capteur pour plusieurs températures de la cible (figure 2.48).

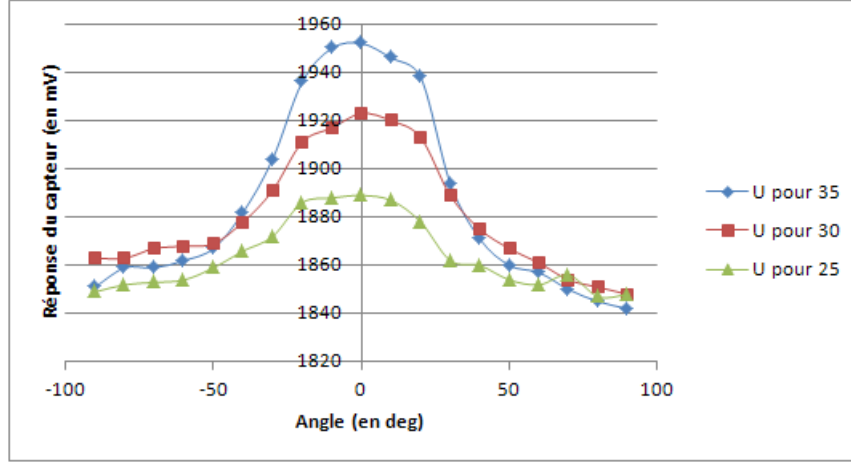


FIGURE 2.48 – Représentation de la réponse U du capteur en fonction de l'angle pour différentes températures de la cible

Pour trouver $g(\alpha)$, la réponse du capteur U_α , qui est fonction de l'angle α , est normalisée de la façon suivante :

$$g(\alpha) = \frac{U_\alpha - U_{min}}{U_{max} - U_{min}} \quad (2.11)$$

avec :

- U_{min} , la valeur maximum de la réponse en Volt,
- U_{max} , la réponse minimale de la sonde,
- U_α , la réponse de la sonde selon l'angle (pour $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$).

Le capteur testé est un capteur encapsulé, ce qui influe sur la réponse angulaire puisque le champ de détection est coupé par le boîtier du capteur comme nous le montre l'allure des courbes de la figure 2.48 et 2.49 pour différentes température de la cible. Cette observation nous amène à proposer un modèle angulaire $g(\alpha)$ composé de trois équations en fonction de l'angle α (en degré) :

- pour $-90 \leq \alpha < -30$,

$$g(\alpha) = 0,00015\alpha^2 + 0,0256\alpha + 1,165 \quad (2.12)$$

- pour $-30 \leq \alpha \leq 30$,

$$g(\alpha) = -0,00049\alpha^2 + 1 \quad (2.13)$$

- pour $30 < \alpha \leq 90$,

$$g(\alpha) = 0,00015\alpha^2 - 0,0256\alpha + 1,165 \quad (2.14)$$

2.3.4.3 Caractérisation en fonction de l'azimuth θ

Pour trouver les différentes fonctions qui composent l'équation 2.10, un test de caractérisation similaire au test pour l'angle α est réalisé. Nous commençons l'acquisition des données avec une cible située à une distance de $2m$. Le capteur est placé au centre d'un plateau tournant qui nous permet de faire varier l'angle de $\Delta\theta = 10^\circ$. On réalise le profil angulaire de la réponse du capteur pour plusieurs températures de la cible (figure 2.50).

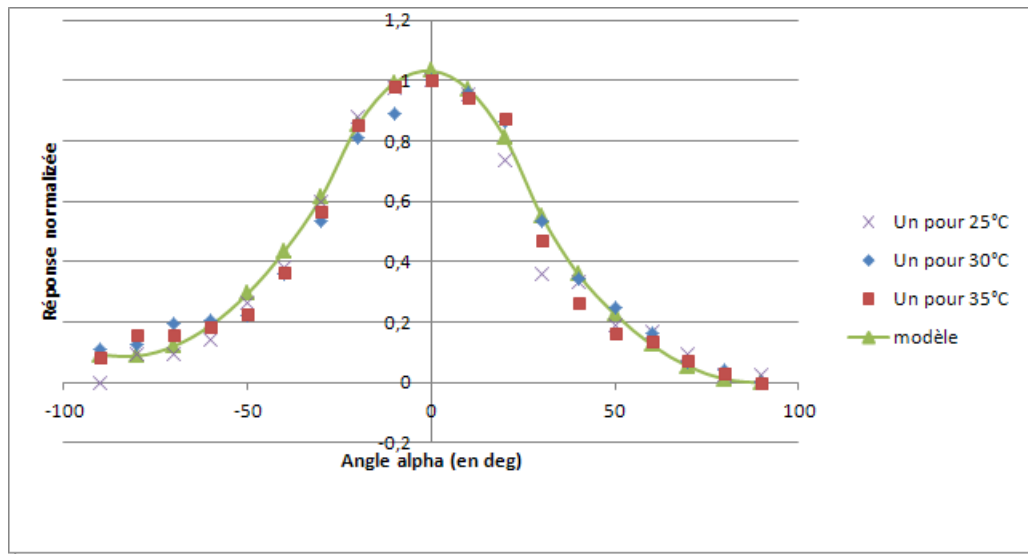


FIGURE 2.49 – Représentation de la réponse normalisée de U du capteur en fonction de l'angle α

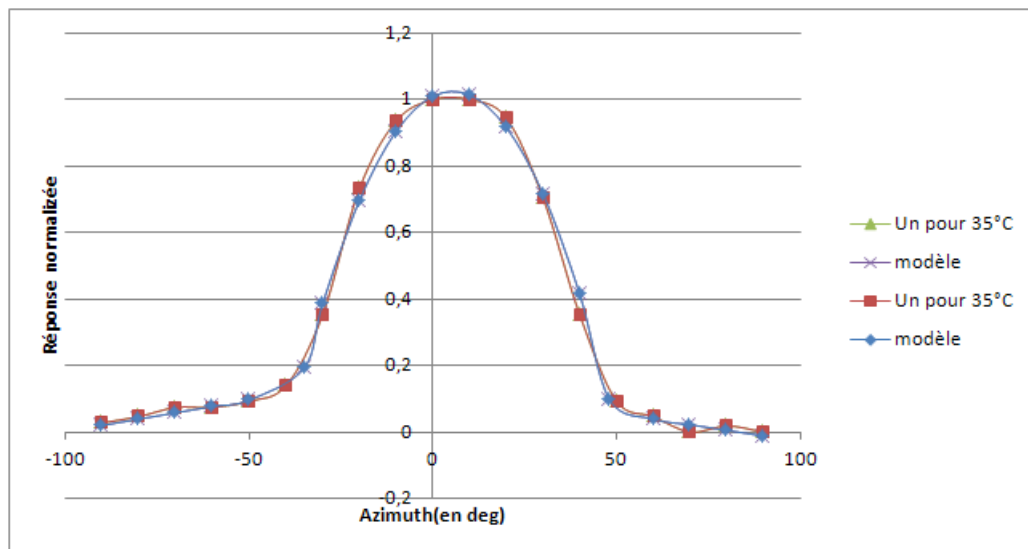


FIGURE 2.50 – Représentation de la réponse normalisée de U du capteur en fonction de l'azimuth θ

Le modèle angulaire se compose de trois équations en fonction de l'azimuth θ (en degré) :

– pour $-90 \leq \theta < -35$,

$$h(\theta) = 0,0019\theta + 0,191 \quad (2.15)$$

– pour $-35 \leq \theta \leq 48$,

$$h(\theta) = -0,00051\theta^2 + 0,0055\theta + 1 \quad (2.16)$$

– pour $40 < \theta \leq 90$,

$$h(\theta) = -0,0017\theta + 0,141 \quad (2.17)$$

2.3.4.4 Caractérisation en distance et obtention d'un modèle

Comme nous pouvons voir sur la figure 2.48, la réponse angulaire est maximale pour un angle $\alpha_{max} = 0^\circ$, quelle que soit la distance r . Ainsi, la caractérisation en distance, permettant la détermination de la fonction $f_{\alpha_{max}}$ est réalisée pour l'angle α_{max} . Nous commençons l'acquisition des données avec une cible située à $4m$. Nous ne commençons pas la série de mesures à $0m$ pour éviter l'échauffement du capteur par la cible. Ensuite, nous faisons varier la distance entre la cible et le capteur jusqu'à atteindre $0m$. On propose le modèle suivant :

$$f_{\alpha_{max}}(r) = \frac{k_1}{(k_2 + r)^2} + k_3 \quad (2.18)$$

Le valeur $f_{\alpha_{max}}$ en volt est la réponse du capteur, la variable r est la distance en mètre entre la sonde et la cible, les constantes k_1 et k_2 réajustent le modèle et la constante k_3 est la norme de tension de référence pour une réponse nulle et est déterminée par l'équation (2.7).

Le modèle, suggéré par les divers essais de la caractérisation en distance (représentée sur la figure 2.51), est donné par cette équation :

$$f_{\alpha_{max}}(r) = \frac{0,048 \times T_{cible} - 0,608}{(0,66 + r)^2} + 0,04 \times T_{sensor} + 1,06 \quad (2.19)$$

À partir des équations (2.7), (2.10) et (2.19), un modèle de la réponse des capteurs est proposé :

$$U_{\text{modèle}} = \frac{0,048 \times T_{cible} - 0,608}{(0,66 + r)^2} \times g(\alpha) \times h(\theta) + 0,04 \times T_{sensor} + 1,06 \quad (2.20)$$

Nous avons montré que ce type de capteur possède un réel potentiel pour la détection de présence. Nous avons proposé une méthode de caractérisation pour ce type de capteur dans l'objectif de pouvoir : détecter une personne, conformément à la mission de base à remplir par les capthoms, mais aussi à l'aide de ce modèle, avoir en plus une information sur la position de la personne en fonction de r , α et θ .

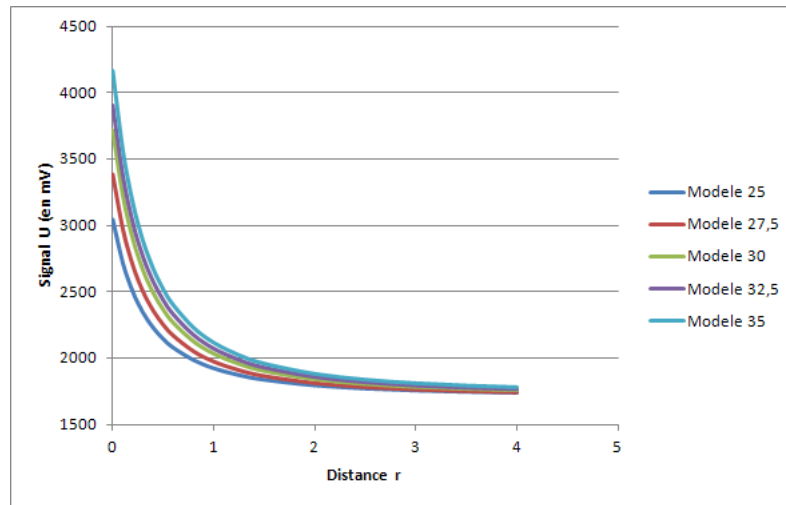


FIGURE 2.51 – Modèles des caractérisations en distance pour différentes températures de la cible

2.3.5 Résultats de la caractérisation pour simulation en 2 dimensions

On propose d'implémenter un modèle de la réponse des capteurs de type thermopile dans le logiciel de simulation SNOOPS. Dans ce but, nous réalisons des tests sur un IEMN et un capteur thermopile du commerce. Le modèle est simplifié, en effet, nous ne prendrons en compte que l'angle α et la distance r (le simulateur calcul pour un résultat en 2D). La température est fixée à $35^\circ C$.

2.3.5.1 Détermination du zéro

Le schéma 2.52 donne la réponse pour différentes températures avec le capteur de l'IEMN. La tension U_{seuil} a été déterminée :

$$U_{seuil} = 0,04 \times T_{sensor} + 1,68 \quad (2.21)$$

Le modèle de la réponse du capteur U_{model} doit vérifier la condition suivante en fonction de la distance r entre la sonde et la cible :

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} U_{model} = U_{seuil} \quad (2.22)$$

2.3.5.2 Erreur sur la réponse du capteur

Sur le schéma 2.53, nous évaluons l'erreur de la sonde sur plusieurs échantillons de mesure pour une cible immobile dont la température est connue.

Le rayonnement détecté par le détecteur est perturbé par l'air ambiant (par exemple, les courants d'air) qui n'est ni uniforme ni statique. Nous estimons que l'erreur de la sonde ΔV est d'environ $0,02V$. Le ΔV peut être réduit si l'IEMN est dans une boîte qui le protège contre les courants d'air et permet toujours la détection du rayonnement IR.

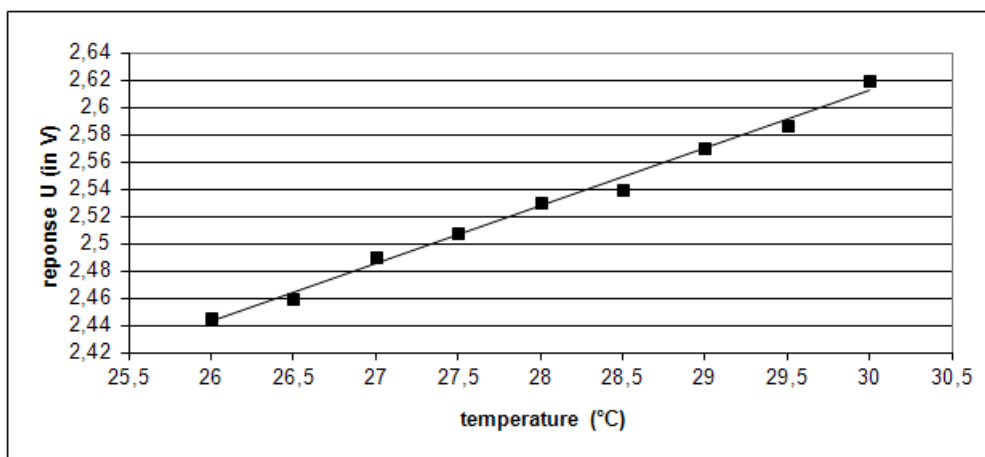


FIGURE 2.52 – réponse du capteur en fonction de la température pour la détermination du zéro

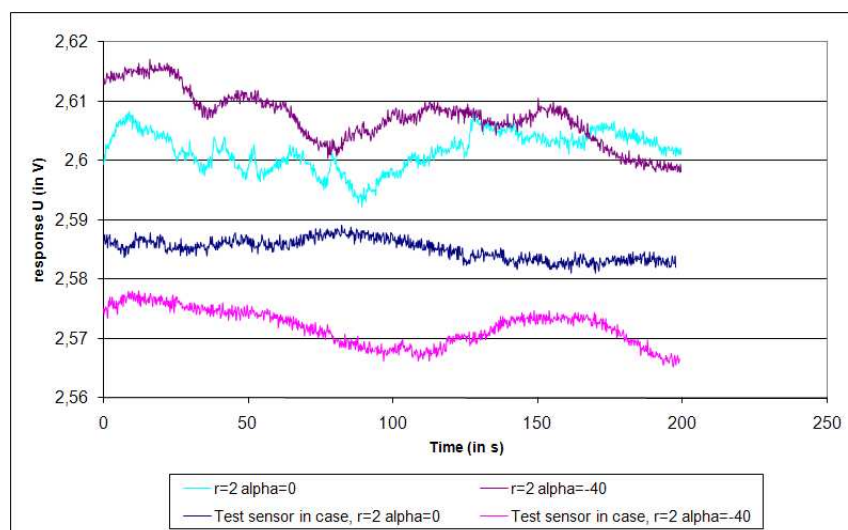


FIGURE 2.53 – Réponse du capteur en fonction de la distance de la cible pour la détermination de l'erreur du capteur

2.3.5.3 Caractérisation en fonction de l'angle

Nous commençons l'acquisition des données avec une cible située à une distance de $2m$. Le capteur est placé au centre d'un plateau tournant qui nous permet de faire varier l'angle de $\Delta\alpha = 10^\circ$

La figure 2.54 donne les résultats normalisés de la caractérisation angulaire en utilisant l'équation (2.11). La réponse du capteur est fonction de l'angle de la cible :

$$g(\alpha) = -0,00014 * \alpha^2 - 0,0015 * \alpha + 0,99 \quad (2.23)$$

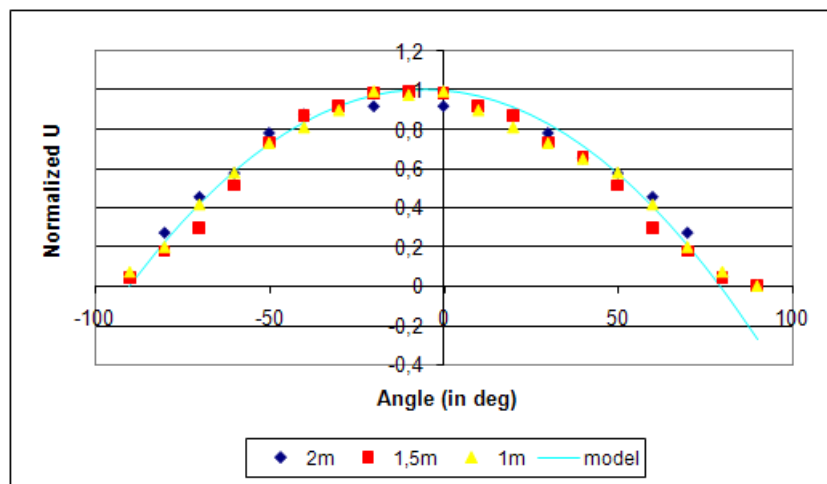


FIGURE 2.54 – Représentation de la réponse normalisée de U du capteur en fonction de l'angle

2.3.5.4 Caractérisation en fonction de la distance

Comme nous pouvons voir sur la figure 2.54, la réponse angulaire est maximale pour un angle $\alpha_{max} = -10^\circ$, quelle que soit la distance r . Ainsi, la caractérisation en distance, permettant la détermination de la fonction $f_{\alpha_{max}}$ a été réalisée pour l'angle α_{max} . Nous commençons l'acquisition des données avec une cible située à $4m$. Nous ne commençons pas la série de mesures à $0m$ pour éviter l'échauffement du capteur par la cible. Ensuite, nous faisons varier la distance entre la cible et le capteur jusqu'à atteindre $0m$. On propose le modèle suivant :

$$f_{\alpha_{max}}(r) = \frac{k_1}{(k_2 + r)^2} + k_3 \quad (2.24)$$

La valeur $f_{\alpha_{max}}$ en volt est la réponse du capteur, la variable r est la distance en mètre entre la sonde et la cible, les constantes k_1 et k_2 réajustent le modèle et la constante k_3 est la norme de tension de référence pour une réponse nulle et est déterminée par l'équation (2.21).

Le modèle, suggéré par les divers essais de la caractérisation en distance (représentée sur la figure 2.55), est donné par cette équation :

$$f_{\alpha_{max}}(r) = \frac{0,14}{(0,42 + r)^2} + 0,04 * T_{sensor} + 1,68 \quad (2.25)$$

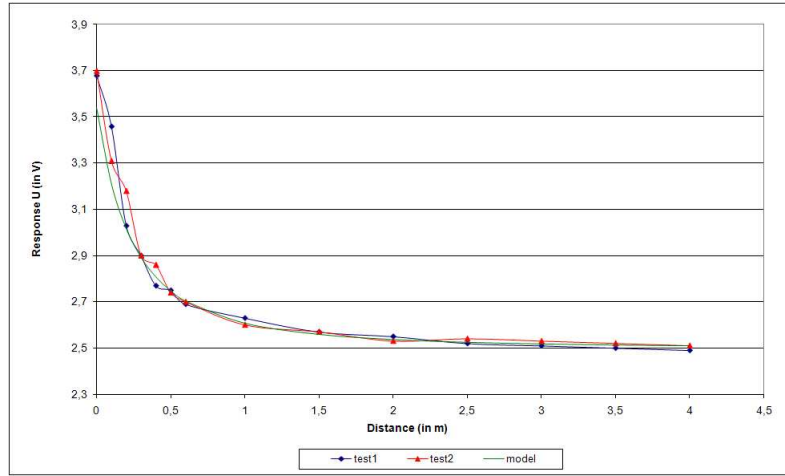


FIGURE 2.55 – Résultat de deux exemples de caractérisations en distance

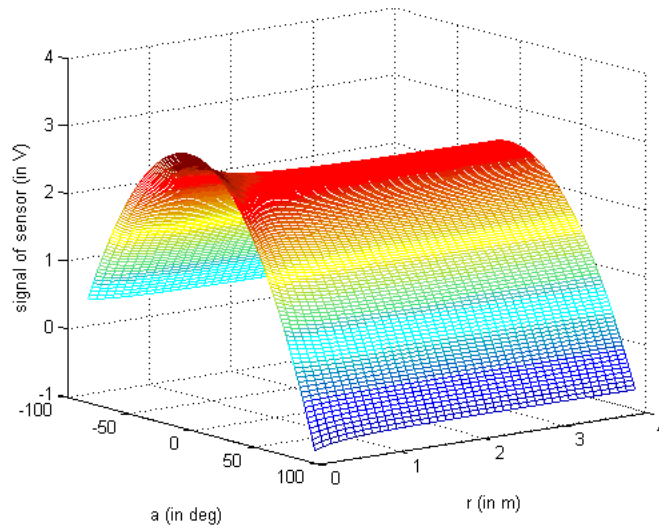
2.3.5.5 Modèle de la réponse du capteur

En remplaçant respectivement $f_{\alpha max}(r)$ et $g(\alpha)$ dans l'équation (2.10), nous obtenons le modèle global suivant :

$$U_{modle} = \left(\frac{0,14}{(0,42 + r)^2} \right) * (-0,00014 * \alpha^2 - 0,0015 * \alpha + 0,99) + 0,04 * T_{sensor} + 1,68 \quad (2.26)$$

La Figure 2.56 représente la réponse du capteur selon la distance r et l'angle α . Ces résultats devront être validés par les résultats des simulations et des nouvelles expériences.

model of the response of the sensor according to the distance r et the angle a of the target

FIGURE 2.56 – Représentation de la réponse U en fonction de l'angle et de la distance

Nous effectuons divers essais pour différentes températures de la salle et à diverses distances (voir la figure 2.57).

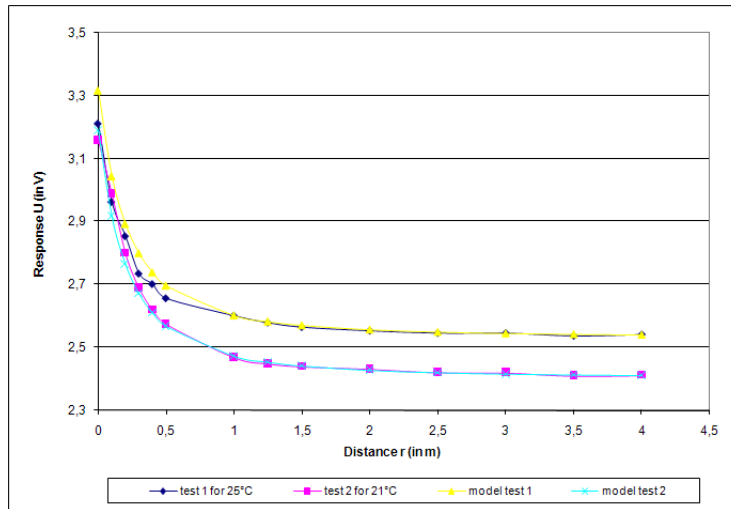


FIGURE 2.57 – représentation de la réponse U en fonction de la distance pour deux températures différentes

Nous proposons d'estimer l'erreur e de modèle à l'aide de l'équation suivante :

$$e = \left| \frac{U - U_{\text{modèle}}}{U_{\text{modèle}}} \right| * 100 \quad (2.27)$$

La valeur U est la réponse mesurée du capteur, $U_{\text{modèle}}$ est la valeur de la réponse du modèle. La distribution de l'erreur e selon la distance est donnée sur le Tableau 2.4. Nous notons que le modèle a de mauvais résultats entre 0 et 0.5m. En effet, plus la cible est proche du capteur, plus la soudure froide du capteur est entre la température de l'air ambiant et la température transmise par la cible.

2.3.5.6 Caractérisation d'un capteur commercialisé

Cette méthode de caractérisation en angle et en distance a été utilisée sur un autre capteur infrarouge de type de thermopile. Les microcapteurs infrarouge, fournis par le Laboratoire, testés précédemment sont un produit original qui n'est pas encapsulé et possède un très grand nombre de thermocouples sensibles à la variation de la température de la cible. Il existe dans le marché des capteurs de même technologie mais qui sont encapsulés et possèdent beaucoup moins de thermocouple. Les mêmes essais sont effectués sur le TP434 de Perkin Elmer. La caractérisation en distance donne l'équation suivante :

$$f_{\alpha\max}(r) = \left(\frac{0,04}{(0,51 + r)^2} \right) + 0,015 * T_{\text{sensor}} + 2,208 \quad (2.28)$$

Le champ de détection de ce capteur disponible sur le marché est plus petit que celui du capteur examiné dans la partie précédente. Le capteur encapsulé perçoit au moins 50% de rayonnement d'IR de la cible pour un angle entre -30° et 35° tandis que la sonde examinée précédemment perçoit au moins 50% pour un angle entre -70° et 60° (figure 2.58).

distance r (en m)	erreur pour l'essai 1 (en %)	erreur pour l'essai 2 (en %)
4	0.10%	0.05%
3.5	0.14%	0.12%
3	0.10%	0.18%
2.5	0.07%	0.04%
2	0.07%	0.19%
1.5	0.16%	0.06%
1.25	0.09%	0.18%
1	0.04%	0.14%
0.5	1.44%	0.29%
0.4	1.32%	0.39%
0.3	2.28%	0.70%
0.2	1.32%	1.29%
0.1	2.67%	2.52%
0	3.18%	0.93%

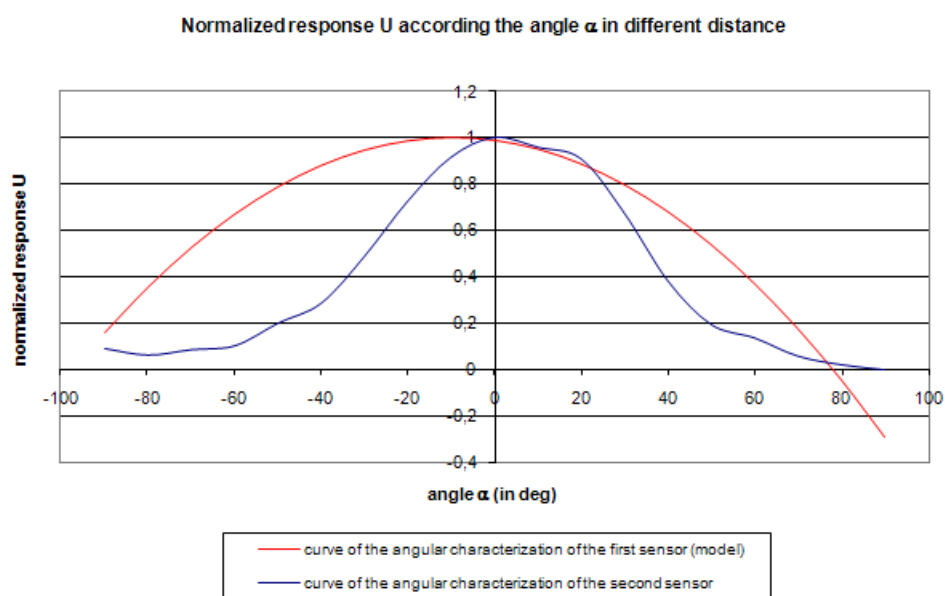
TABLE 2.4 – Distribution de l'erreur e selon la distance r 

FIGURE 2.58 – Comparaison entre le modèle des deux capteurs testés

distance r (en m)	erreur (en %)
4	0.12%
3.5	0.20%
3	0.01%
2.5	0.05%
2	0.21%
1.5	0.00%
1	0.04%
0.5	0.05%
0	0.01%

TABLE 2.5 – Distribution de l’erreur e selon la distance r

Le modèle angulaire se compose de trois équations en fonction de l’angle α (en degré) :

– pour $-90^\circ \leq \alpha < -27,5^\circ$,

$$g(\alpha) = 0,00016 * \alpha^2 + 0,0258 * \alpha + 1,099 \quad (2.29)$$

– pour $-27,5^\circ \leq \alpha \leq 37,5^\circ$,

$$g(\alpha) = -0,00047 * \alpha^2 - 0,0035 * \alpha + 0,995 \quad (2.30)$$

– pour $37,5^\circ < \alpha \leq 90^\circ$,

$$g(\alpha) = 0,00016 * \alpha^2 - 0,0285 * \alpha + 1,253 \quad (2.31)$$

Le modèle final pour la sonde lancée sur le marché est de la même forme que l’équation 2.26 :

$$U_{\text{modèle}} = \left(\frac{0,04}{(0,51 + r)^2} \right) * g(\alpha) + 0,015 * T_{\text{sensor}} + 2,208 \quad (2.32)$$

La distribution de l’erreur e comparée à la distance est donnée sur le Tableau 2.5. Le modèle du détecteur commercialisé est meilleur que le modèle de l’IEMN. Nous avons noté que l’erreur est inférieure à 0.5%. Ces meilleurs résultats peuvent être expliqués par l’encapsulation du capteur qui diminue la perturbation tels que les courants d’air.

2.4 Application à la détection de présence humaine des capteurs de type thermopile

Suite à nos différents essais et caractérisation des capteurs de type thermopile, une application de commande de lumière est proposée. À la vue des différents tests, on choisit de travailler dans une pièce de petite taille. La gestion de l’éclairage dans les toilettes semble être une application intéressante. On équipe nos toilettes qui mesurent $2\text{ m} \times 0,85\text{ m}$ comme nous le montre la figure 2.59. Les tests sont réalisés avec le capteur de Perkin Elmer. On utilise une photorésistance qui permet d’identifier quand la personne allume la lumière, action qui devra être commandé par le système de détection. La réponse du capteur est envoyée au PC via une carte d’acquisition

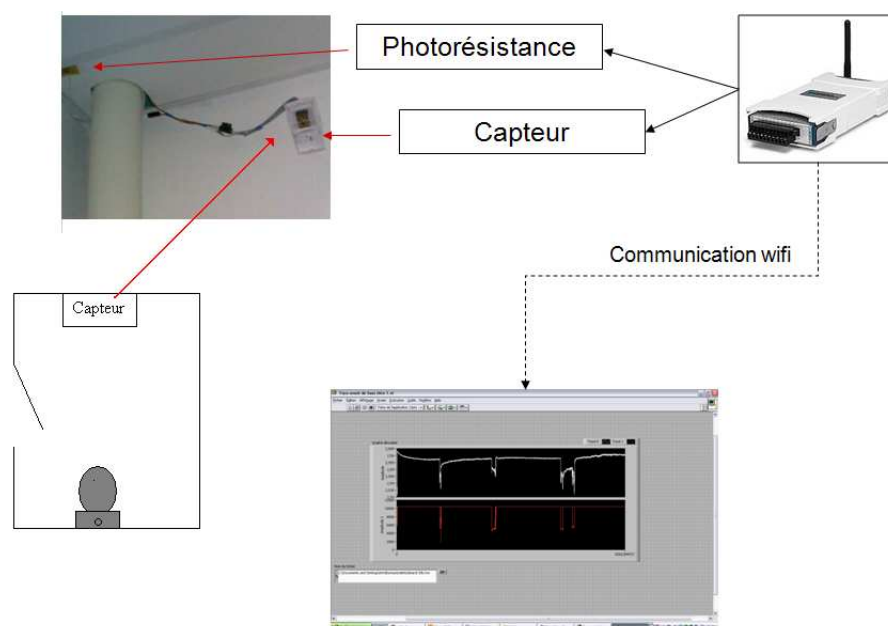


FIGURE 2.59 – Dispositif d'acquisition

wifi, ce qui permet d'avoir un dispositif d'acquisition pas trop encombrant et intrusif pour les utilisateurs des WC. Le but de l'expérience est de pouvoir corréliser les informations de présence avec le besoin de la commande de l'éclairage.

Une base de données est recueillie pour une semaine d'utilisation. La figure 2.60 nous présente quelques résultats. Sur ces graphes, la courbe verte nous donne l'information de présence identifiée par la photorésistance. La courbe violette est la réponse du capteur. Il est encourageant de voir que les pics de réponse du capteur sont en concordance avec l'occupation de la pièce. On propose dans un premier temps d'appliquer un seuil de 2,55V (représenté en rouge sur la figure 2.60) pour que l'algorithme (en bleu) puisse résoudre l'identification de la présence ou non. Deux cas courants se dégagent de notre manipulation. La personne stimule assez le capteur par rapport au seuil défini comme sur le graphe A de la figure 2.60, ou la personne ne stimule pas assez le capteur par rapport au seuil défini comme sur le graphe B de la figure 2.60.

Pour résoudre le problème, une temporisation peut être ajoutée (longueur à définir) comme pour les détecteurs de mouvements actuels mais on risque d'avoir la lumière toujours allumée alors que la personne est sortie. On propose un algorithme de détection de saut représenté sur la figure 2.61 basé sur le calcul de moyenne des signaux à différents instants et soumis à des conditions de tests à remplir pour déterminer une entrée ou une sortie.

La figure 2.62 présente les résultats de l'application de l'algorithme développé. Sur le graphe A, on fait apparaître en bleu les entrées détectées par le programme et en vert les sorties détectées. Cet algorithme fonctionne bien dans la majorité des cas comme nous le confirme le graphe B. Les graphes C et D représentent des cas où pour une occupation, plusieurs pics d'entrée ou de sortie sont détectés. Toutefois, le problème peut être levé si on commande l'allumage pour un pic bleu et l'extinction de la lumière pour un pic vert. Si deux pics bleus se suivent comme sur le graphe C ou deux pics verts se suivent comme sur le graphe D, la première commande n'est

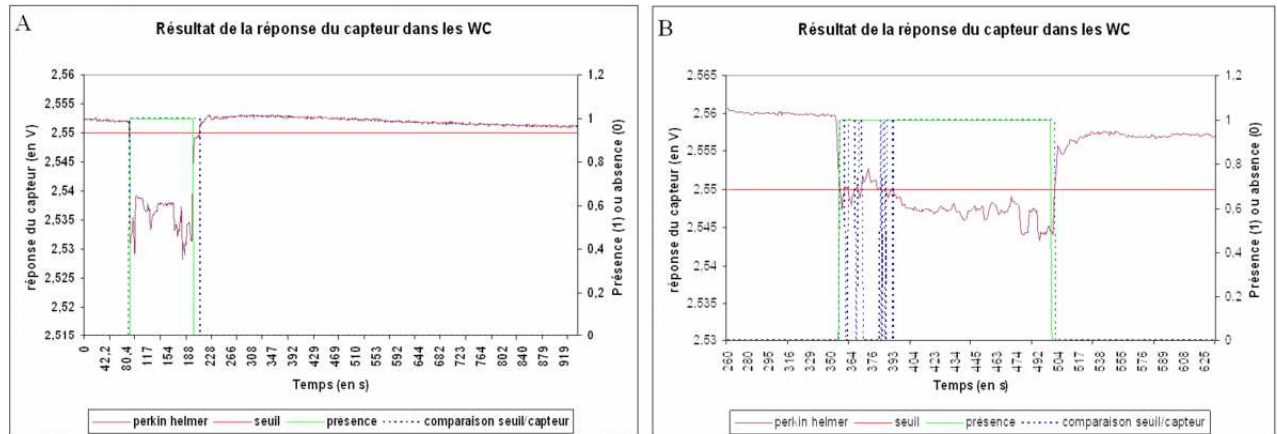


FIGURE 2.60 – Résultats de l'application dans les toilettes

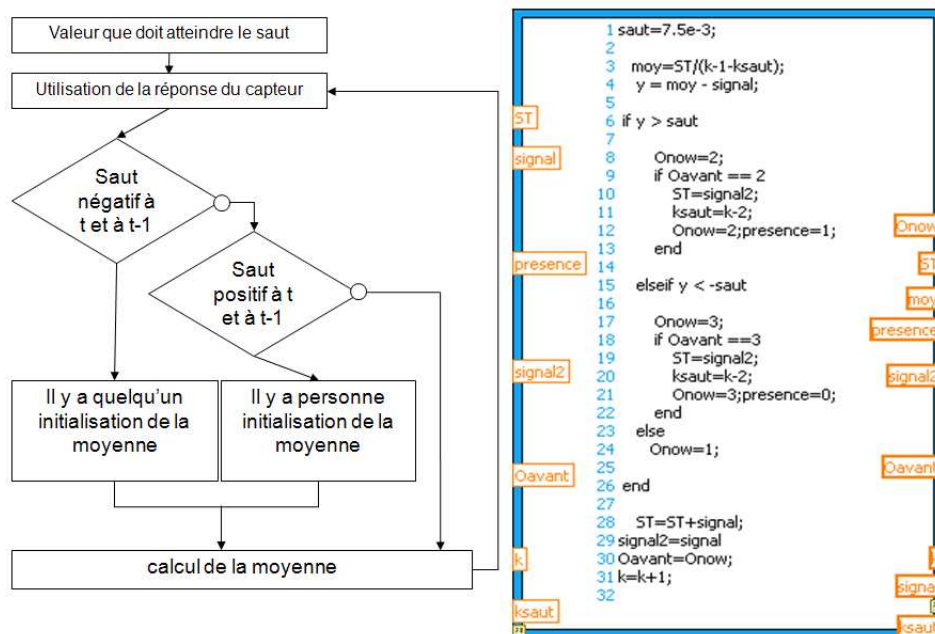


FIGURE 2.61 – Algorithme basé sur le calcul des moyennes

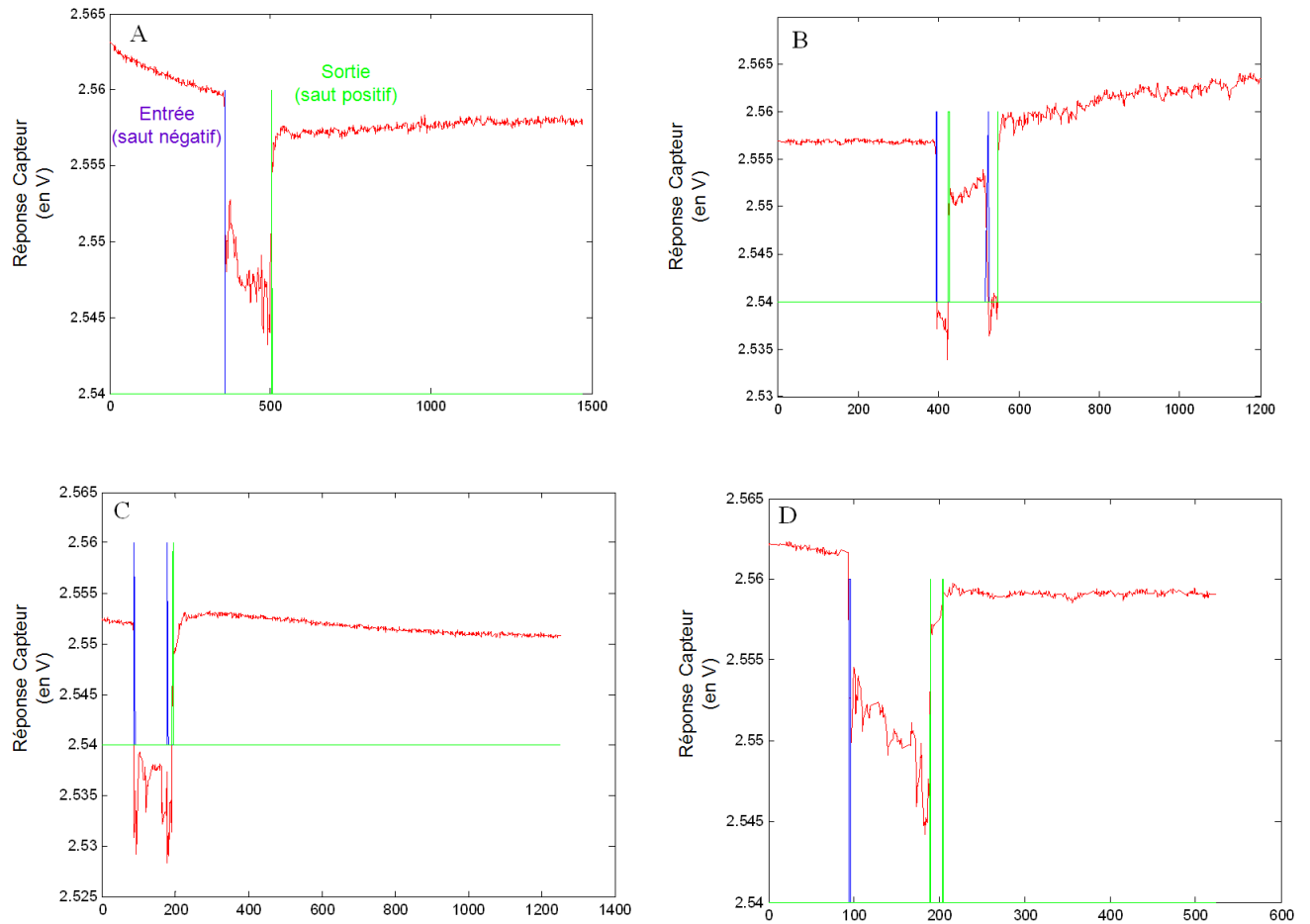


FIGURE 2.62 – résultats avec algorithme

pas annulée mais continue d'être activée.

2.5 Conclusion sur les besoins du projet

Dans ce chapitre, les ambitions de CAPTHOM ont été clairement définies. Nous cherchons un nouveau capteur de présence humaine capable de rivaliser avec les détecteurs de mouvements qui sont utilisés et vendus aujourd'hui. Nos différents tests ont permis de mettre en évidence l'intérêt de surveiller les entrées et les sorties au niveau de la porte. Bien sûr, ce genre de solution ne conviendrait pas pour un système d'anti-intrusion (entrée par effraction par la fenêtre). Cependant, notre état de l'art sur les capteurs et nos essais nous ont menés sur la piste des capteurs à thermopile. Nous avons mis au point une méthode nous permettant d'acquérir un modèle de la réponse du capteur qui pourra être utilisée pour nos simulations et dans les algorithmes de détection. Le potentiel de détection de présence humaine est très clairement exploité dans l'application des toilettes. Il est évident que de nouvelles perspectives avec ce type de capteurs verront le jour.

Localisation d'une personne à l'aide d'un réseau de capteurs

Sommaire

3.1	Introduction	87
3.2	Chaîne de Markov cachée	87
3.2.1	Les éléments d'une chaîne de Markov Cachée	87
3.2.2	Les trois problèmes de base d'une chaîne de Markov	89
3.2.2.1	Solution du Problème 1	89
3.2.2.2	Solution du Problème 2	91
3.2.2.3	Solution du Problème 3	93
3.3	Utilisation des Chaînes de Markov cachées	95
3.3.1	Définition de l'étude	95
3.3.2	Application	95
3.3.3	Application de certains scénarios	98
3.3.3.1	Cas simple : une personne	98
3.3.3.2	Cas avec deux personnes	99
3.3.4	Simulation	99
3.3.5	Conclusion	101
3.4	Système multi-Capteurs pour la localisation	102
3.4.1	Triangulation	102
3.4.2	Localisation par la méthode d'optimisation de Levenberg-Marquardt	104
3.4.2.1	Simulations	105
3.4.2.2	Informations supplémentaires à la localisation	109
3.5	Conclusion sur la localisation	112

Dans ce chapitre, nous proposons deux méthodes pour la localisation d'une personne. La première approche est réalisée à l'aide des chaînes de Markov cachées. La seconde méthode utilise un algorithme d'optimisation de Levenberg-Marquardt.

3.1 Introduction

De nombreux travaux ont pour ambition de localiser une personne ou de la suivre. Des travaux japonais proposent l'utilisation de trois technologies différentes : des caméras, des tapis équipés de détecteurs de pressions et des barrières infrarouges [Murakita *et al.*, 2004]. Les tapis permettent d'obtenir la localisation de la personne directement, contrairement aux caméras et aux barrières IR où la méthode de triangulation est utilisée. D'ailleurs, la méthode de triangulation est souvent utilisée pour résoudre des problèmes de localisation, sous réserve d'utiliser un nombre suffisant de capteurs. D'autres types de technologies sont utilisées pour détecter une personne, comme les capteurs à ultrason.

Comme nous l'avons décrit précédemment, de nombreux projets de type "smart home" proposent d'obtenir l'information de localisation, et mettent en œuvre une grande quantité de capteurs à cette fin. Le projet Domus, par exemple, propose de collecter les informations des tapis de pression, de PIR, de contacteurs de portes et un filtre bayésien pour avoir l'information de localisation [Rahal *et al.*, 2007].

[Kim *et al.*, 2007] proposent l'utilisation de 12 PIRs qui définissent 28 zones de détections sur une pièce de $4 \times 4m$ et utilisent un algorithme utilisant un classifieur bayésien. La précision de la localisation dépend du nombre de PIR. L'application de la localisation sur un cas où il y a plusieurs personnes est dans leurs perspectives. Des outils stochastiques sont proposés pour résoudre la problématique de la localisation de plusieurs personnes dans une pièce [Das *et al.*, 2006].

3.2 Chaîne de Markov cachée

Le champ d'application des chaînes de Markov est très large : traitement d'image, détection de panne capteur [Ricquebourg *et al.*, 2008], localisation en robotique mobile [Burgard *et al.*, 1997], identification d'activité de personnes [Al-ani *et al.*, 2007], détection de chute [Ugur *et al.*, 2007], maintenance [Vrignat *et al.*, 2009], etc ...

3.2.1 Les éléments d'une chaîne de Markov Cachée

Une chaîne de Markov cachée, noté HMM (de l'anglais Hidden Markov Models), est caractérisée par :

1. N : nombre d'états du modèle

Bien que les états soient cachés, pour de nombreuses applications pratiques, il y a souvent une signification physique liée aux états ou à l'ensemble des états du modèle.

En général, les états sont interconnectés de manière à avoir une chaîne irréductible (tous les états pouvant être atteints par tout autre état).

On note les différents états atteignables : $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ et par q_t l'état à l'instant courant t .

2. M : nombre de symboles distincts d'observations par état.

Les symboles d'observations correspondent à la sortie physique du système modélisé.

On note les différents symboles : $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$.

3. A : distribution de la probabilité de transition des états $A = [a_{ij}]$, où

$$a_{ij} = P[q_{t+1} = S_j | q_t = S_i] \quad 1 \leq i, j \leq N \quad (3.1)$$

Dans certains cas particuliers, un état peut atteindre n'importe quel autre état, nous avons $a_{ij} > 0$ pour tout i et j . Pour les autres types de HMMs, on a $a_{ij} = 0$ pour une ou plusieurs paires de (i, j) .

4. B : distribution de la probabilité d'observation des symboles à l'état j , $B = [b_j(k)]$, où

$$b_j(k) = P(V_{(t)} = V_k | q_t = S_j) \quad 1 \leq j \leq N \quad (3.2)$$

$$1 \leq k \leq M \quad (3.3)$$

5. Π distribution d'état initial $\Pi = [\pi_i]$ où

$$\pi_i = P[q_1 = S_i] \quad (3.4)$$

Au vu des valeurs N , M , A , B et Π , la HMM peut être utilisée comme un générateur de séquence d'observation

$$O = O_1 O_2 \dots O_T \quad (3.5)$$

(où chaque observation O_t est un des symboles de V et où T est le nombre d'observations de la séquence) de la façon suivante :

1. Se placer à $t = 1$.
2. Choisir un état initial $q_1 = S_1$.
3. Choisir $O_t = V_k$ selon la distribution de la probabilité d'observation des symboles $b_i(k)$.
4. Se placer vers le nouvel état $q_{t+1} = S_j$ selon la distribution de la probabilité de transition a_{ij} .
5. Se placer à $t = t + 1$; retourner à l'étape 3 si $t < T$; sinon terminer la procédure.

La spécification complète d'une HMM exige d'avoir la spécification des paramètres des 2 modèles (N et M), la spécification des symboles d'observations et la spécification des trois mesures de probabilité A , B et Π . L'ensemble des paramètres du modèle est donné par λ :

$$\lambda = (A, B, \Pi) \quad (3.6)$$

3.2.2 Les trois problèmes de base d'une chaîne de Markov

Il existe trois problèmes fondamentaux qui doivent être résolus pour que le modèle puisse être utile dans une application réelle [Rabiner, 1990].

1. Problème 1 : pour une séquence d'observation $O = O_1 O_2 \dots O_T$ et un modèle $\lambda = (A, B, \Pi)$, comment calculer efficacement la probabilité de la séquence d'observation $P(O|\lambda)$ selon le modèle ?
2. Problème 2 : pour une séquence d'observation $O = O_1 O_2 \dots O_T$, et un modèle λ , comment choisir la séquence d'état correspondante $Q = q_1 q_2 \dots q_T$ qui donne la meilleure "explication" de l'observation ?
3. Problème 3 : comment ajuster les paramètres du modèle $\lambda = (A, B, \Pi)$ pour maximiser $P(O|\lambda)$?

3.2.2.1 Solution du Problème 1

On souhaite calculer la probabilité de la séquence d'observation $P(O|\lambda)$, $O = O_1 O_2 \dots O_T$, selon le modèle λ .

La plus simple des méthodes est l'énumération de chaque séquence d'états possible de longueur T (le nombre d'observations).

On considère un nombre d'états fixé :

$$Q = q_1 q_2 \dots q_T \quad (3.7)$$

où q_1 est l'état initial.

La probabilité de la séquence d'observation Q est :

$$P(O|Q, \lambda) = \prod_{t=1}^T P(O_t|q_t, \lambda) \quad (3.8)$$

où nous supposons une indépendance statistique des observations. Ainsi, nous avons :

$$P(O|Q, \lambda) = b_{q_1}(O_1) \cdot b_{q_2}(O_2) \cdot \dots \cdot b_{q_T}(O_T) \quad (3.9)$$

La probabilité d'une telle séquence d'états Q peut être écrite :

$$P(Q|\lambda) = \pi_{q_1} a_{q_1 q_2} a_{q_2 q_3} \dots a_{q_{T-1} q_T} \quad (3.10)$$

La probabilité jointe de O et Q (la probabilité que O et Q se produisent simultanément) :

$$P(O, Q|\lambda) = P(O|Q, \lambda) P(Q, \lambda) \quad (3.11)$$

La probabilité de O (selon le modèle) est obtenue en additionnant cette probabilité jointe sur toutes les séquences d'états possibles q :

$$P(O|\lambda) = \sum_{\text{tous les } Q} P(O|Q, \lambda) P(Q|\lambda) \quad (3.12)$$

$$= \sum_{q_1, q_2, \dots, q_T} \pi_{q_1} b_{q_1}(O_1) a_{q_1 q_2} b_{q_2}(O_2) \dots a_{q_{T-1} q_T} b_{q_T}(O_T) \quad (3.13)$$

Au temps $t = 1$, nous sommes à l'état q_1 avec une probabilité π_{q_1} et on génère le symbole O_1 avec une probabilité de $b_{q_1}(O_1)$. On passe de $t = 1$ à $t = 2$ donc de l'état q_1 à l'état q_2 avec une probabilité $a_{q_1 q_2}$ et on génère le symbole O_2 avec la probabilité $b_{q_2}(O_2)$. On continue de cette manière jusqu'au temps T de l'état q_{T-1} à q_T avec une probabilité $a_{q_{T-1} q_T}$ et on génère le symbole O_T avec la probabilité $b_{q_T}(O_T)$.

Utiliser la définition de $P(O|\lambda)$ donnée par (3.12) nécessite de faire $2T \cdot N^T$ calculs. En effet, pour chaque instant t ($t = 1, 2, \dots, T$), il y a N états possibles qui peuvent être atteints (soit N^T séquences d'états possibles) et pour chaque séquence d'états $2T$ calculs sont nécessaires pour chaque terme dans la somme de (3.12). Le nombre de calculs pour obtenir $P(O|\lambda)$ est trop important pour être calculé de cette façon. Par exemple, pour $N = 5$, $T = 100$, il y aura $2 \cdot 100 \cdot 5^{100} \approx 10^{72}$ calculs à effectuer. Il apparaît clairement qu'il faut utiliser une méthode plus efficace pour résoudre notre problème 1.

La procédure à utiliser est la méthode de forward-backward [Baum et Eagon, 1967], [Baum et Sell, 1968]. Soit la variable "forward" $\alpha_t(i)$:

$$\alpha_t(i) = P(O_1 O_2 \dots O_t, q_t = S_i | \lambda) \quad (3.14)$$

c'est-à-dire, la probabilité d'avoir la séquence partielle d'observation $O = O_1 O_2 \dots O_t$ (jusqu'au temps t) et l'état S_i au temps t connaissant le modèle λ . On peut résoudre $\alpha_t(i)$:

1. **Initialisation** :

$$\alpha_1(i) = \pi_i b_i(O_1), \quad 1 \leq i \leq N. \quad (3.15)$$

2. **Induction** :

$$\alpha_{t+1}(j) = \left[\sum_{i=1}^N \alpha_t(i) a_{ij} \right] b_j(O_{t+1}) \quad 1 \leq t \leq T-1 \quad (3.16)$$

3. **Final** :

$$P(O|\lambda) = \sum_{j=1}^N \alpha_T(j) \quad (3.17)$$

L'étape 1 nous permet d'initialiser les probabilités "forward" (à venir) comme étant la probabilité jointe de l'état S_i et de l'observation initiale O_1 . L'étape d'induction est illustrée par la figure 3.1. Cette figure nous montre comment l'état S_j peut être atteint au temps $t+1$ à partir de N états possibles S_i , $1 \leq i \leq N$, au temps t . Comme $\alpha_t(j)$ est la probabilité des événements joints que $O_1 O_2 \dots O_t$ soient observés, et que l'état S_j soit atteint au temps $t+1$ via l'état S_i à t , le produit $\alpha_t(i) a_{ij}$ est la probabilité de l'événement joint que $O_1 O_2 \dots O_t$ soient observés, et que S_j soit atteint au temps $t+1$ en passant par S_i au temps t . Le produit de tous les N états possibles S_i , $1 \leq i \leq N$ au temps t résulte dans la probabilité de S_j au temps $t+1$ avec toutes les observations partielles précédentes l'accompagnant. S_j est alors connu, α_{t+1} est obtenu par le comptage des observations O_{t+1} à l'état j , donc par le produit de la somme par la probabilité $b_j(O_{t+1})$. Le calcul de l'étape 2 est effectué pour tous les états j , $1 \leq j \leq N$, pour un t donné ; le calcul est effectué pour $t = 1, 2, \dots, T-1$. Au final, à l'étape 3, $P(O|\lambda)$ est donnée par la somme de la variable $\alpha_T(j)$, car par définition :

$$\alpha_T(i) = P(O_1 O_2 \dots O_T, q_T = S_i | \lambda) \quad (3.18)$$

Le calcul $\alpha_T(i)$ nécessite N^2T itérations.

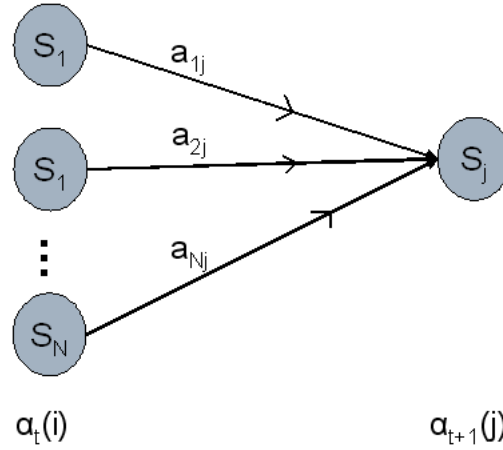


FIGURE 3.1 – Illustration de la séquence d’opérations requises pour le calcul de la variable $\alpha_t(i)$

De la même manière, on peut utiliser la variable “backward” $\beta_t(i)$:

$$\beta_{t+1}(i) = P(O_{t+1} O_{t+2} \cdots O_T | q_T = S_i, \lambda) \quad (3.19)$$

c’est-à-dire, la probabilité de la séquence partielle d’observation de $t + 1$ à la fin, donnée par l’état S_i au temps t et par le modèle λ .

$\beta_t(i)$ peut être résolu de la façon suivante :

1. **Initialisation**

$$\beta_t(i) = 1, \quad 1 \leq i \leq N \quad (3.20)$$

2. **Induction**

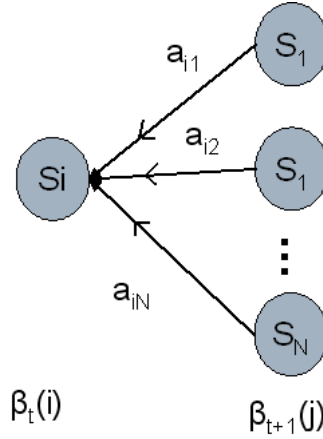
$$\beta_t(i) = \sum_{j=1}^N \alpha_{ij} b_j(O_{t+1} \beta_{t+1}(j)) \quad t = T-1, T-2, \dots, 1, \quad 1 \leq i \leq N \quad (3.21)$$

L’étape d’initiation définit arbitrairement $\beta_t(i)$ à 1 pour tout i . L’étape 2, illustrée par la figure 3.2 montre que pour avoir été au temps t , et pour tenir compte de la séquence d’observation du temps $t + 1$, on considère tous les états possibles à l’état S_i au temps $t + 1$, en comptant les transitions S_i à S_j (les termes α_{ij}) ainsi que les observations O_{t+1} à l’état j (le terme $b_j(O_{t+1})$) et le reste de la séquence partielle d’observation à l’état j (le terme $\beta_{t+1}(j)$).

3.2.2.2 Solution du Problème 2

La difficulté réside dans la définition de la séquence d’état optimal, c’est-à-dire, qu’il existe plusieurs critères optimaux possibles. Par exemple, un critère optimal possible est de choisir les états q qui sont les plus probables. Ce critère optimal maximise le nombre attendu de corrections des différents états. Pour mettre en œuvre la solution du problème 2, on définit la variable :

$$\gamma_t(i) = P(q_t = S_i | O, \lambda) \quad (3.22)$$


 FIGURE 3.2 – Illustration de la séquence d'opérations requises pour le calcul de la variable $\beta_t(i)$

c'est-à-dire, la probabilité d'être à l'état S_i au temps t , donnée pour une séquence d'observation O et pour le modèle λ . On peut écrire cette équation à l'aide des variables forward-backward :

$$\gamma_t(i) = \frac{\alpha_t(i)\beta_t(i)}{P(O|\lambda)} = \frac{\alpha_t(i)\beta_t(i)}{\sum_{i=1}^N \alpha(i)\beta_t(i)} \quad (3.23)$$

car $\alpha_t(i)$ compte pour la séquence partielle d'observation $O = O_1 O_2 \dots O_t$ et l'état S_i à t , alors que $\beta_t(i)$ représente le reste de la séquence d'observation $O = O_{t+1} O_{t+2} \dots O_T$, donnée par l'état S_i à t . Le facteur de normalisation $P(O|\lambda) = \sum_{i=1}^N \alpha(i)\beta_t(i)$ nous donne la relation suivante sur $\gamma_t(i)$:

$$\sum_{i=1}^N \gamma_t(i) = 1 \quad (3.24)$$

À l'aide de $\gamma_t(i)$, on peut résoudre l'état q le plus probable au temps t :

$$q_t = \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq N} [\gamma_t(i)], \quad 1 \leq t \leq T \quad (3.25)$$

Bien que (3.25) maximise le nombre attendu des états "corrects" (par le choix de l'état le plus probable à chaque t), il peut y avoir des problèmes avec le résultat de la séquence d'état. Par exemple, quand la chaîne a des transitions d'état à probabilités nulles ($a_{ij} = 0$ pour certains i et j), la séquence d'état optimal ne sera pas valide. Cela est dû à la solution (3.25) qui détermine l'état le plus probable pour tout instant t sans prendre en compte la probabilité des événements des séquences d'états.

Une solution possible au problème ci-dessus est de modifier le critère d'optimalité. Le critère le plus souvent utilisé consiste à trouver l'unique meilleure séquence d'état (chemin), c'est-à-dire, maximiser $P(Q|O, \lambda)$ qui revient à maximiser $P(Q, O|\lambda)$. Cette méthode est connue sous le nom d'"algorithme de Viterbi" [Forney, 1973].

Pour trouver la meilleure séquence $Q = q_1 q_2 \cdots q_T$ pour une séquence d'observation donnée $O = O_1 O_2 \cdots O_T$, on a besoin de définir :

$$\delta_t(i) = \max_{q_1, q_2, \dots, q_{t-1}} P[q_1 q_2 \cdots q_t = i, O_1 O_2 \cdots O_t | \lambda] \quad (3.26)$$

$\delta_t(i)$ est le meilleur score (la plus grande probabilité) pour un chemin, au temps t , entre la première observation t à la dernière à l'état S_i . Par induction, nous avons :

$$\delta_{t+1}(j) = [\max_i \delta_t(i) a_{ij}] \cdot b_j(O_{t+1}) \quad (3.27)$$

Pour récupérer la séquence d'état, il faut garder l'empreinte de l'argument qui maximise (3.27), pour chaque t et j . Pour y parvenir, nous définissons un tableau $\psi_t(j)$. La procédure pour trouver la meilleure séquence d'état peut être décrite de la manière suivante :

1. **Initialisation** :

$$\delta_1(i) = \pi_i b_i(O_1), \quad 1 \leq j \leq N \quad \psi_1(i) = 0 \quad (3.28)$$

2. **Récursion** :

$$\delta_t(j) = \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_{t-1}(i) a_{ij}] b_j(O_t) \quad \begin{matrix} 2 \leq t \leq T \\ 1 \leq j \leq N \end{matrix} \quad (3.29)$$

$$\psi_t(j) = \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq N} [\delta_{t-1}(i) a_{ij}] \quad \begin{matrix} 2 \leq t \leq T \\ 1 \leq j \leq N \end{matrix} \quad (3.30)$$

3. **Final** :

$$P^* = \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_T(i)] q_T^* = \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq N} [\delta_T(i)] \quad (3.31)$$

4. Séquence d'état obtenue en "backtracking" :

$$q_t^* = \psi_{t+1}(q_{t+1}^*), \quad t = T-1, T-2, \dots, 1 \quad (3.32)$$

3.2.2.3 Solution du Problème 3

Le troisième problème a pour but de réajuster les paramètres du modèle (A, B, π) pour maximiser la probabilité de la séquence d'observation donnée par le modèle. Il n'y a pas de moyen connu pour trouver analytiquement le modèle qui maximise la probabilité de la séquence d'observation. En fait, compte tenu de toutes les séquences d'observations finies utilisées comme données d'apprentissage, il n'y a pas de moyen optimal de l'estimation des paramètres du modèle. Malgré tout, $\lambda = (A, B, \pi)$ peut être choisi de sorte que $P(O|\lambda)$ est maximisée localement en utilisant une procédure itérative telle que la méthode de Baum-Welch (ou la méthode EM, "expectation-modification") [Rabiner, 1990]. On définit $\xi_t(i, j)$, la probabilité d'être à l'état S_i au temps t , et l'état S_j au temps $t+1$, selon le modèle et la séquence d'observation :

$$\xi_t(i, j) = P(q_t = S_i, q_{t+1} = S_j | O, \lambda) \quad (3.33)$$

On peut écrire $\xi_t(i, j)$ en fonction des variables “forward” et “backward” :

$$\begin{aligned}\xi_t(i, j) &= \frac{\alpha_t(i) a_{ij} b_j(O_{t+1} \beta_{t+1}(j))}{P(O|\lambda)} \\ &= \frac{\alpha_t(i) a_{ij} b_j(O_{t+1} \beta_{t+1}(j))}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_t(i) a_{ij} b_j(O_{t+1} \beta_{t+1}(j))}\end{aligned}\quad (3.34)$$

Nous avons défini précédemment $\gamma_t(i)$, la probabilité d'être à l'état S_i au temps t , pour une séquence d'observation et un modèle donné. $\gamma_t(j)$ et $\xi(i, j)$ peuvent être liées ainsi :

$$\gamma_t(j) = \sum_{i=1}^N \xi_t(i, j) \quad (3.35)$$

Si nous sommions tous les $\gamma_t(i)$ par rapport au temps t , on obtient une quantité qui peut être interprétée comme le nombre prévu (par rapport au temps) d'être à l'état S_i , ou autrement dit, le nombre prévu de transitions à partir de l'état S_i (sans prendre en compte dans la somme le temps $t = T$). De même, la somme de $\xi_t(i, j)$ par rapport à t (de $t = 1$ à $t = T - 1$) peut être interprétée comme le nombre prévu de transitions de l'état S_i à l'état S_j . Nous avons donc :

$$\sum_{t=1}^{T-1} \gamma_t(i) = \text{nombre prévu de transitions de } S_i \quad (3.36)$$

$$\sum_{t=1}^{T-1} \xi_t(i, j) = \text{nombre prévu de transitions de } S_i \text{ à } S_j \quad (3.37)$$

A partir des formules précédentes, nous pouvons définir une méthode pour réestimer les paramètres du modèle HMM. L'ensemble des formules de réestimation de π , A et B est donné par :

$$\overline{\pi_i} = \text{fréquence attendue (nombre de fois) d'être à l'état } S_i \text{ au temps } t = 1 = \gamma_1(i) \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned}\overline{a_{ij}} &= \frac{\text{nombre prévu de transitions de } S_i \text{ à } S_j}{\text{nombre prévu de transitions de } S_i} \\ &= \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \xi_t(i, j)}{\sum_{t=1}^{T-1} \gamma_t(i)}\end{aligned}\quad (3.39)$$

$$\begin{aligned}\overline{b(j)}(k) &= \frac{\text{nombre prévu de fois à l'état } j \text{ et d'observer le symbole } v_k}{\text{nombre prévu de fois à l'état } j} \\ &= \frac{\sum_{t=1}^T \gamma_t(j)}{\sum_{t=1}^T \gamma_t(j)}\end{aligned}\quad (3.40)$$

3.3 Utilisation des Chaînes de Markov cachées

3.3.1 Définition de l'étude

Soit une pièce équipée de 4 capteurs de présence ou de mouvement. L'information apportée par chacun des capteurs permet de dire qu'une personne est présente dans la zone de couverture du capteur. On numérote de 1 à 12 les différentes zones obtenues par la couverture des capteurs placés arbitrairement. On se place dans un repère cartésien, les capteurs I, II, III et IV sont placés respectivement en $C(0,5)$, $G(5,5)$, $J(2.36,0.47)$ et $E(7.42,0)$ (voir figure 3.3). On considère

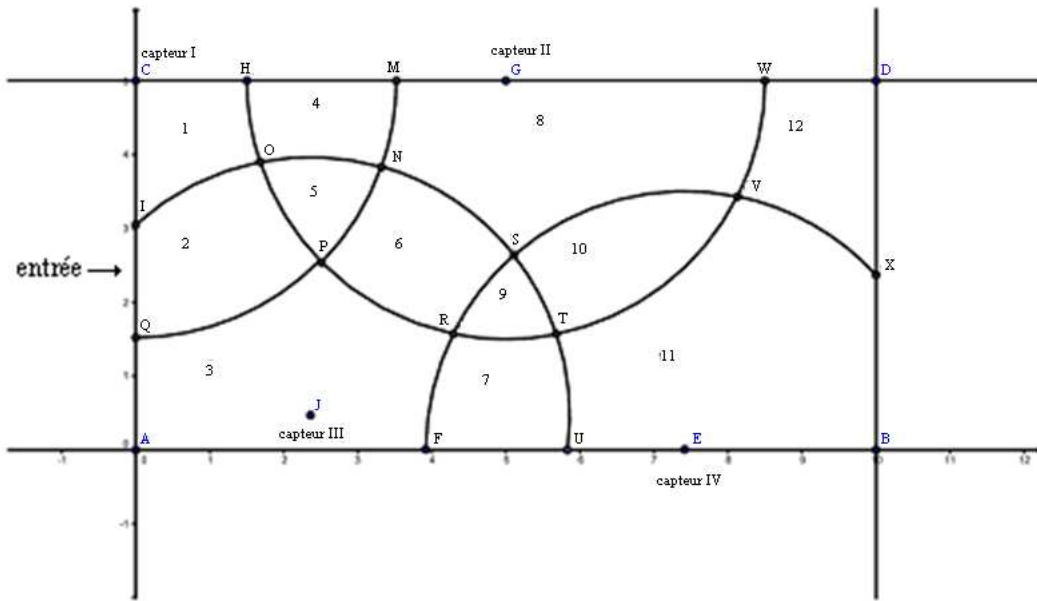


FIGURE 3.3 – La pièce dans un repère cartésien

qu'aucun obstacle ne gêne le champ de couverture des capteurs. La pièce ne comporte qu'une porte d'entrée qui donne sur la zone 2. Pour aller de la zone 2 à la zone 8, la personne peut parcourir, par exemple, les chemins suivants :

- Zone 2 → Zone 5 → Zone 4 → Zone 8
- ou Zone 2 → Zone 3 → Zone 6 → Zone 8
- ou Zone 2 → Zone 1 → Zone 4 → Zone 5 → Zone 4 → Zone 8.

Le zonage de la pièce défini par les différents champs de couvertures des capteurs permet de "localiser" la personne. Le tableau 3.1 indique quels capteurs sont activés, en fonction de la zone d'occupation. On peut aussi envisager de prévoir les déplacements de la personne dans la pièce.

3.3.2 Application

On considère notre pièce de la figure 3.3. La figure 3.4 donne la représentation graphique des possibilités qu'à une personne de passer d'une zone à une autre. Il y a donc des passages qui sont en théorie impossibles, comme par exemple $P(X_{n+1} = 8 | X_n = 2) = 0$.

Zone	CAPTEUR			
	I	II	III	IV
1	1	0	0	0
2	1	0	1	0
3	0	0	1	0
4	1	1	0	0
5	1	1	1	0
6	0	1	1	0
7	0	0	1	1
8	0	1	0	0
9	0	1	1	1
10	0	0	1	1
11	0	0	0	1
12	0	0	0	0

TABLE 3.1 – Fonctionnement des capteurs en fonction des zones

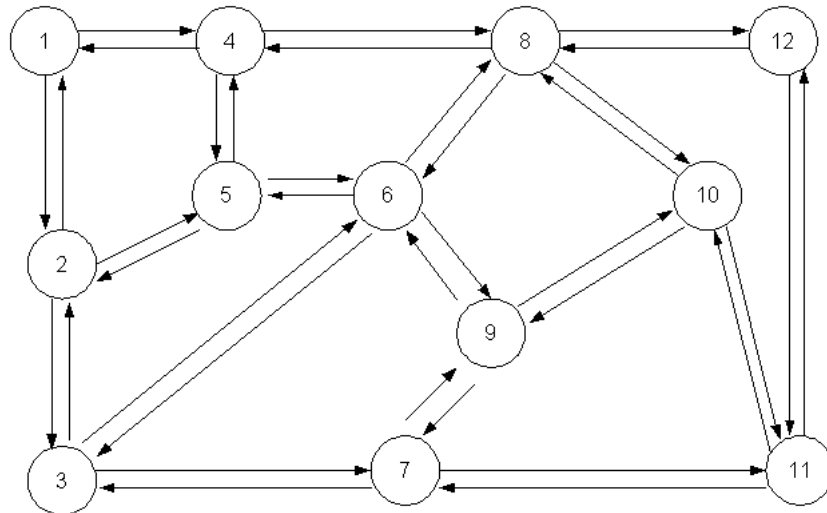


FIGURE 3.4 – Représentation graphique de la chaîne de Markov

Le calcul des probabilités de passage d'une zone i à une zone j a été ainsi réalisé en fonction de la surface de la zone j et de la longueur des lignes de contact d'une zone voisine :

$$P_{i,j} = \frac{1 - S_j}{S_{total}} \times \frac{L_{i/j}}{L_{total\ j}} \quad (3.41)$$

$L_{i/j}$: longueur de la ligne de transition entre la zone i et j ,

$L_{total\ j}$: longueur de la ligne de transition entre la zone j et les autres zones adjacentes,

S_j : surface de la zone j ,

S_{total} : surface de la pièce.

Si la zone j est adjacente à n zones, alors la probabilité de rester dans la zone j est donnée par :

$$P_{j,j} = 1 - \sum_{i=1}^{i=n} P_{i,j} \quad (3.42)$$

On obtient ainsi la matrice de transition A :

$$A = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.60 & 0 & 0.35 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.28 & 0.08 & 0.4 & 0 & 0.24 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.36 & 0.16 & 0 & 0 & 0.27 & 0.21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.27 & 0 & 0 & 0.04 & 0.40 & 0 & 0 & 0.29 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.33 & 0 & 0.34 & 0.03 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.27 & 0 & 0.20 & 0.07 & 0 & 0.28 & 0.18 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.33 & 0 & 0 & 0 & 0.05 & 0 & 0.29 & 0 & 0.33 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.12 & 0 & 0.22 & 0 & 0.17 & 0 & 0.32 & 0 & 0.17 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.34 & 0.34 & 0 & 0.02 & 0.30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.39 & 0.15 & 0.07 & 0.39 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.18 & 0 & 0 & 0.35 & 0.22 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.40 & 0 & 0 & 0.53 & 0.07 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

La matrice d'observation B a pour symboles d'observation les combinaisons de capteurs possibles présentées dans la table 3.1 page 96 plus les quatre combinaisons physiquement impossibles qui ne correspondent à aucune zone ($V_{13} = \{I + IV\}$, $V_{14} = \{I + III + IV\}$, $V_{15} = \{I + II + IV\}$ et $V_{16} = \{I + II + III + IV\}$). Idéalement, nous devrions avoir la matrice d'observation B suivante :

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Nous avons présenté ici un cas d'étude qui nous permet de proposer une solution de localisation à l'aide des HMM. Après un apprentissage à l'aide de Baum-Welch ([Baum et Eagon, 1967][Baum et Sell, 1968]), les valeurs de probabilités définies à 1 peuvent varier en faveur des différents symboles. Ainsi, des erreurs de détection sont mises en valeur et peuvent être corrigées. En effet, il peut arriver que la combinaison de capteurs ne soit pas la bonne pour une zone donnée. Utiliser les HMM nous permet de réaliser un apprentissage sur les habitudes de passage d'une zone à une autre (à l'aide de la matrice A) et sur les observations du réseau de capteurs (à l'aide de la matrice B).

3.3.3 Application de certains scénarios

N'oublions pas que dans notre système, chaque changement de zone va déclencher une détection ou une non détection de nos capteurs (table 3.1). En changeant de zone, la personne ne va changer l'état que d'un seul des quatre capteurs. Par exemple, la zone 1 active le capteur I, on a donc $C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$. En passant dans la zone 2, le capteur II va être également activé, on obtient alors $C = [1 \ 0 \ 1 \ 0]$.

3.3.3.1 Cas simple : une personne

Comme scénario simple, nous pouvons prendre le cas d'une personne qui entre dans la pièce (zone 2) et finit dans la zone 8 par exemple. Comme nous l'avons déjà vu, un des chemins possibles est de passer par les zones 5 et 4. Sur la figure 3.5, on représente quelques chemins possibles avec la réponse des capteurs et la probabilité de passer d'une zone à une autre (obtenue à l'aide de la matrice de passage A).

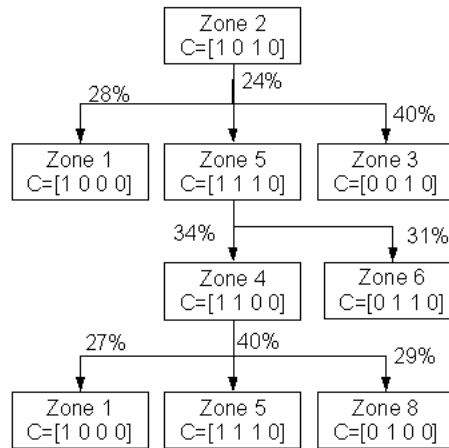


FIGURE 3.5 – Exemple de diagramme possible pour le cas simple

Dans un cas simple comme celui-ci, il est facile de localiser la personne à chacune de ces étapes et de connaître les probabilités de franchissement de la prochaine zone.

3.3.3.2 Cas avec deux personnes

Dans ce nouveau cas, une personne réalise exactement le même chemin décrit précédemment pour aller de la zone 2 à la zone 8 mais une fois arrivée en zone 8, une deuxième personne entre dans la pièce en zone 2. Ce cas est représenté sur la figure 3.6.

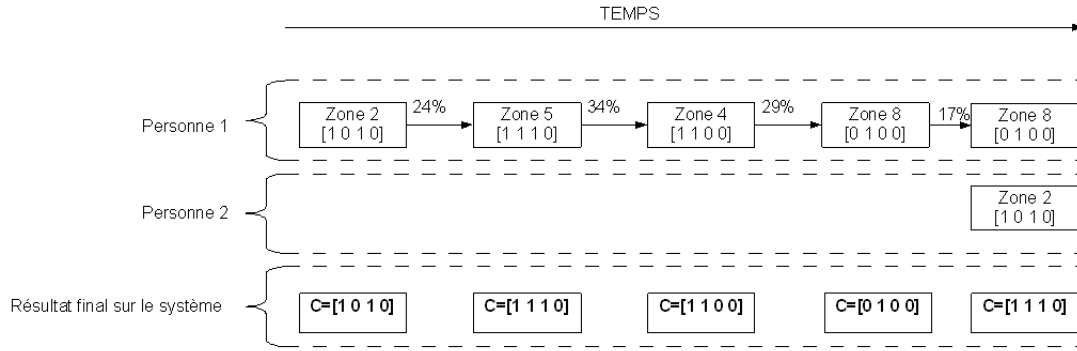


FIGURE 3.6 – Diagramme dans le cas avec 2 personnes

Au final, l'information donnée par la combinaison de capteurs demande une interprétation. Si on traduit le résultat obtenu par le système donné par la dernière ligne de la figure 3.6, les zones occupées ont été dans l'ordre : 2, 5, 4, 8, 5. Or, notre matrice A montre que la transition entre la zone 8 à 5 est impossible ($a_{5,8} = 0$). L'algorithme de traitement doit entrevoir deux possibilités :

- il y a une personne dans la pièce et il y a eu un ou plusieurs franchissements qui n'ont pas été détectés,
- il y a 2 personnes dans la pièce qui faussent le décryptage simple de la localisation donnée par le tableau 1.

3.3.4 Simulation

Nous reprenons ici le cas d'étude de la pièce proposée précédemment dans la partie 3.3.1 page 95. Soit une personne faisant 10000 pas de 0,5 m dans la pièce, une marche aléatoire est donc simulée dans la pièce pour constituer une nouvelle matrice A qui représente les probabilités de franchissement d'une zone à une autre.

$$A = \begin{bmatrix} 0.8394 & 0.0925 & 0 & 0.0663 & 0.0017 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0697 & 0.7487 & 0.1263 & 0.0066 & 0.0487 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0442 & 0.8969 & 0 & 0.0013 & 0.0277 & 0.0299 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0710 & 0.0058 & 0 & 0.7582 & 0.0710 & 0 & 0 & 0.0940 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0110 & 0.1923 & 0.0055 & 0.1813 & 0.3626 & 0.2033 & 0 & 0.0440 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1054 & 0.0093 & 0.0481 & 0.7023 & 0.0093 & 0.0915 & 0.0341 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1238 & 0 & 0 & 0.0131 & 0.7205 & 0 & 0.0525 & 0.0019 & 0.0882 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0269 & 0.0043 & 0.0373 & 0 & 0.8329 & 0.0110 & 0.0490 & 0.0092 & 0.0294 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1793 & 0.1931 & 0.0621 & 0.3862 & 0.1586 & 0.0207 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0078 & 0.2083 & 0.0469 & 0.6094 & 0.1276 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0258 & 0.0086 & 0.0017 & 0.0263 & 0.9061 & 0.0315 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0835 & 0 & 0 & 0.0787 & 0.8378 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

On réalise la simulation du chemin suivant pris par une personne qui donne l'observation suivante (selon la correspondance du tableau 3.1 page 96) :

$$O = [2 \ 1 \ 4 \ 5 \ 6 \ 9 \ 6 \ 9 \ 12 \ 11 \ 7 \ 3 \ 6 \ 4 \ 8 \ 10 \ 9 \ 6 \ 3 \ 2]$$

À l'aide de la séquence d'observation O et de l'algorithme de Viterbi, le chemin pris par la personne peut être estimé comme nous le montre la figure 3.7 en utilisant la matrice A de l'équation 3.3.4 et la matrice B de l'équation 3.44 (page 97).

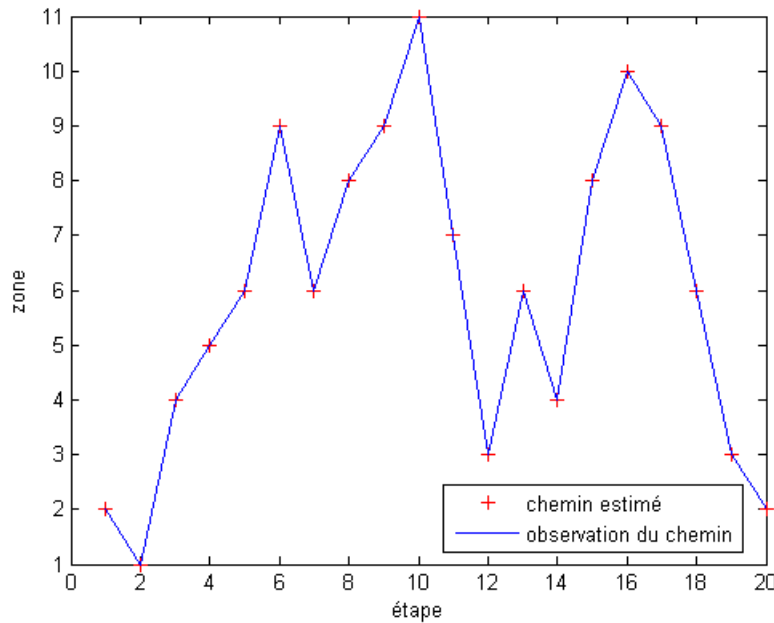


FIGURE 3.7 – Résultats de simulation d'observation du réseau de capteurs et l'estimation à l'aide d'une HMM

Ce premier résultat est obtenu dans des conditions idéales, c'est-à-dire que l'on ne prend pas en compte les erreurs de détection du réseau de capteurs. Si on utilise les matrices A et B comme telles, une erreur de détection ne peut être diagnostiquée et l'estimation du chemin parcouru ne peut être estimé. Si le système doit être installé, on peut lancer une phase d'apprentissage permettant de modifier les éléments des matrices de l'HMM, particulièrement celles de la matrice B . On réalise une simulation similaire à la précédente, mais on insère dans la séquence d'observation des erreurs :

$$O = [2 \ 13 \ 4 \ 5 \ 6 \ 9 \ 6 \ 8 \ 16 \ 11 \ 7 \ 3 \ 6 \ 15 \ 8 \ 10 \ 9 \ 6 \ 3 \ 2]$$

Si on utilise la même matrice B , notre modèle de localisation ne sera pas capable de retrouver le chemin parcouru. On propose donc de modifier la matrice B pour avoir des éléments de la

matrice qui prennent en compte les erreurs de détections, on obtient ainsi :

$$B = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.016 & 0 & 0.014 & 0.014 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.030 & 0.010 & 0.014 & 0.010 \\ 0.0125 & 0.9 & 0.0125 & 0.0125 & 0.0125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0125 & 0.0125 & 0.0125 & 0.0125 \\ 0 & 0.0125 & 0.9 & 0 & 0.0125 & 0.0125 & 0.0125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0125 & 0.0125 & 0.0125 & 0.0125 \\ 0.0125 & 0.0125 & 0 & 0.9 & 0.0125 & 0 & 0 & 0.0125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0125 & 0.0125 & 0.0125 & 0.0125 \\ 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.9 & 0.01 & 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.9 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0 & 0 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 \\ 0 & 0 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0.01 & 0.9 & 0 & 0.01 & 0.01 & 0 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 \\ 0 & 0 & 0 & 0.009 & 0.009 & 0.009 & 0 & 0.9 & 0.01 & 0.009 & 0.009 & 0.009 & 0.009 & 0.009 & 0.009 & 0.009 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.9 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0 & 0.01 & 0.01 & 0.01 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.9 & 0.01 & 0 & 0.01 & 0.01 & 0.01 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.9 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.018 & 0 & 0 & 0.018 & 0.9 & 0.01 & 0.016 & 0.016 \\ 0.9 & 0.016 & 0 & 0.014 & 0.014 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.030 & 0.010 & 0.014 & 0.010 \\ 0.9 & 0.016 & 0 & 0.014 & 0.014 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.030 & 0.010 & 0.014 & 0.010 \\ 0.0125 & 0.0125 & 0 & 0.9 & 0.0125 & 0 & 0 & 0.0125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0125 & 0.0125 & 0.0125 & 0.0125 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.9 & 0.01 & 0.01 & 0 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Comme nous montre la figure 3.8, les erreurs de détections sont réinterprétées et permettent de reconstituer le chemin réellement pris par la personne.

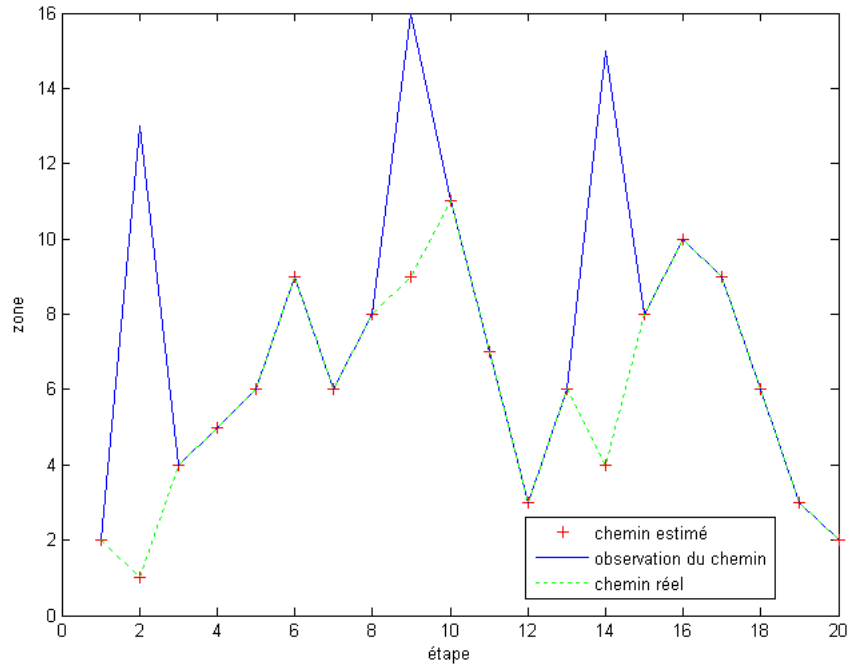


FIGURE 3.8 – Résultats de simulation d’observation du réseau de capteurs et l’estimation à l’aide d’une HMM

3.3.5 Conclusion

Dans cette partie, nous avons proposé un système de localisation et de suivi de la personne à l’aide d’un réseau de capteurs et d’une chaîne de Markov. L’utilisation de cette méthode a été pensée à la base pour un réseau de capteurs de type PIR. Malheureusement, les PIR ne sont que des détecteurs de mouvement donc le codage des capteurs peut être perdu quand il n’y a pas de mouvement. Si cette méthode est utilisée avec des PIR, il faut prendre en compte ce phénomène

dans le système de traitement des données. L'utilisation d'un capthom avec ce modèle est tout à fait appropriée. Il sera appréciable d'avoir l'information de présence dans une zone donnée par un capthom qui délivre une information de type "tout ou rien" et la combinaison de plusieurs capthoms assureraient le codage des zones en continu.

L'HMM nous permet d'avoir en plus un système qui peut se réadapter en fonction des habitudes de la personne dans la pièce en réajustant les matrices A et B en fonction de données de l'usage de la pièce. Cet apprentissage permet la mise en valeur des habitudes mais aussi des défauts qui peuvent apparaître.

3.4 Système multi-Capteurs pour la localisation

3.4.1 Triangulation

La localisation d'une personne dans une pièce est une problématique souvent abordée dans le cadre de la maison intelligente (smart home) comme nous l'avons vu dans la section 1.2 (page 30). Dans le projet maison de Mathilda, des "tags" à ultrason sont utilisés et la méthode de triangulation permet de localiser la personne (voir figure 3.9). L'avantage de cette technologie à ultrason est d'avoir directement l'information de distance entre la cible et les capteurs [Helal *et al.*, 2003].

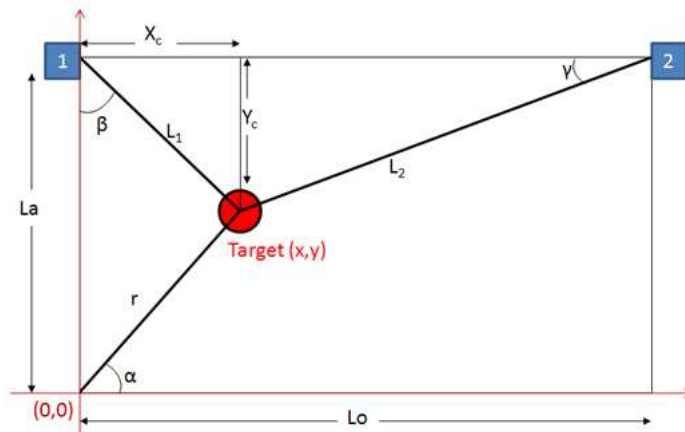


FIGURE 3.9 – schéma pour la méthode de triangulation

Pour simplifier notre étude, nous nous plaçons dans $\mathbb{R}^2$. De manière général, la cible peut être repérée dans le plan par diverses méthodes. Considérons les équations suivantes obtenues à l'aide des relations trigonométriques :

$$Y_C = \sqrt{L_1^2 - X_C^2} \quad (3.46)$$

$$X_C = \frac{L_1^2 - L_2^2 + Lo^2}{2Lo} \quad (3.47)$$

Les coordonnées de la cible (x,y) sont données par :

$$y = La - Y_C \quad (3.48)$$

$$x = X_C \quad (3.49)$$

Les équations (3.46), (3.47), (3.48) et (3.50) sont facilement applicables lorsque les distances L_1 et L_2 sont mesurées directement par des capteurs. Dans nos travaux présentés dans cette thèse, une des réponses des capteurs est donnée par le modèle suivant (on utilise l'équation 2.32 page 80) pour une température de la cible fixée à $35^\circ C$:

$$U_{model} = \frac{0,04}{(0,51 + r_c)^2} \cdot g(\alpha_c) + 0,015T + 2,208 \quad (3.50)$$

avec $g(\alpha_c)$ le modèle d'atténuation angulaire.

La réponse du capteur 1, appelé U_1 , dépend de L_1 et β et la réponse du capteur 2, appelé U_2 , dépend de L_2 et γ . Si on veut exprimer les coordonnées de la cible à l'aide des paramètres x et y par rapport à la réponse des capteurs, on utilise les relations suivantes :

$$L_1 = \sqrt{x^2 + (La - y^2)} \quad (3.51)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{x}{La - y}\right) \quad (3.52)$$

$$L_2 = \sqrt{(Lo - x^2) + (La - y^2)} \quad (3.53)$$

$$\gamma = \arctan \frac{La - y}{Lo - x} \quad (3.54)$$

De plus, les capteurs donnent des réponses sous la forme :

$$U_1 = \frac{0,04}{(0,51 + L_1)^2} \cdot g(\alpha_{c1}) + 0,015T + 2,208 \quad (3.55)$$

$$U_2 = \frac{0,04}{(0,51 + L_2)^2} \cdot g(\alpha_{c2}) + 0,015T + 2,208 \quad (3.56)$$

Dans les équations (3.55) et (3.56), il faut prendre en compte l'orientation des capteurs (Figure 3.10) :

$$\alpha_{c1} = \frac{\pi}{4} - \beta \quad (3.57)$$

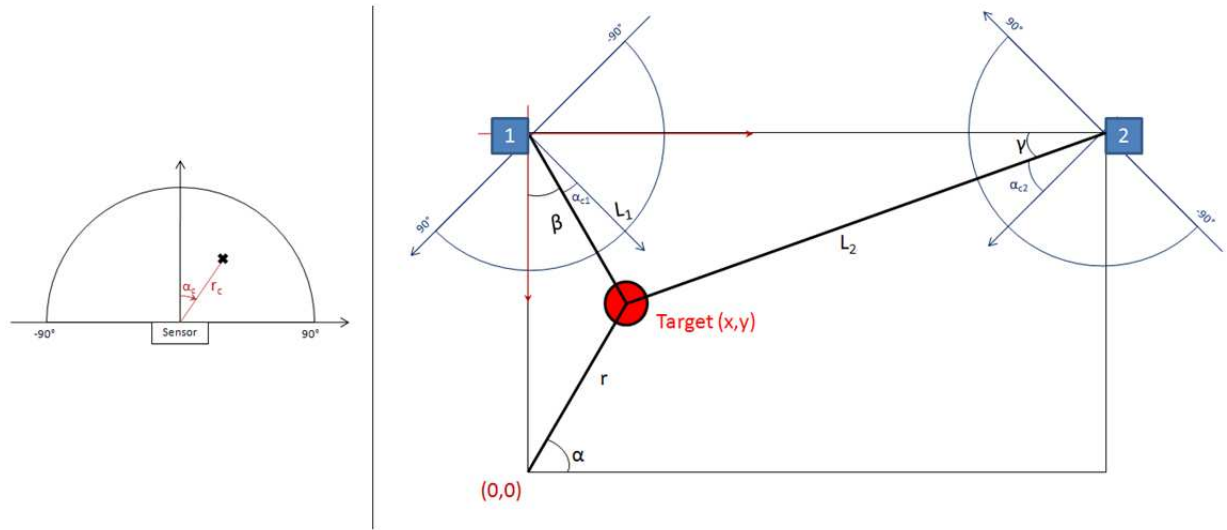


FIGURE 3.10 – Orientation des capteurs dans la pièce

$$\alpha_{c2} = \frac{\pi}{4} - \gamma \quad (3.58)$$

Les équations (3.52) à (3.58) donnent les relations suivantes :

$$U_{model1} = \frac{0,04}{(0,51 + \sqrt{x^2 + (La - y)^2})^2} \cdot g(45 - \arctan(\frac{x}{La - y})) + 0,015T + 2,208 \quad (3.59)$$

$$U_{model2} = \frac{0,04}{(0,51 + \sqrt{(Lo - x)^2 + (La - y)^2})^2} \cdot g(45 - \arctan(\frac{La - y}{Lo - x})) + 0,015T + 2,208 \quad (3.60)$$

On note :

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.61)$$

$$\alpha = \tan \frac{y}{x} \quad (3.62)$$

3.4.2 Localisation par la méthode d'optimisation de Levenberg-Marquardt

La méthode d'optimisation de Levenberg-Marquardt est un outil d'optimisation utilisé dans de nombreux domaines et couramment utilisé dans la robotique comme par exemple dans la thèse de Nicolas Morette [Morette, 2009] pour la navigation en robotique mobile. Nous allons utiliser cette méthode pour répondre à notre problématique de localisation.

Nous proposons de définir la fonction J comme étant notre critère d'optimisation :

$$J = \sum_{n=1}^{\text{nombre total de capteurs}} (U_n(x, y) - U_{n \text{ mesurée}})^2 \quad (3.63)$$

avec, $U_{n \text{ mesurée}}$ la réponse du capteur n et U_n la réponse simulée du capteur n en fonction des coordonnées x et y estimées de la personne.

Sur la figure (3.11), la procédure pour l'optimisation par Levenberg-Marquardt est décrite. Pour plus de détail sur l'algorithme nous renvoyons le lecteur à la thèse de [Tertois, 2003]. Pour résumer, on calcule le pas de Levenberg en fonction du gradient et du hessien du critère J défini par (3.63). Durant chaque itération, l'estimée est déterminé à l'aide du gradient et du hessien du critère (G et H) :

$$P(i) = P(i-1) - (H + \lambda I)^{-1}G \quad (3.64)$$

I est la matrice identité.

Au cours de l'itération, si le critère diminue, on diminue le paramètre λ pour se rapprocher de la méthode de Gauss-Newton, c'est-à-dire que le calcul de l'estimée présenté dans l'équation (3.64) sera équivalent à :

$$P(i) = P(i-1) - H^{-1}G \quad (3.65)$$

Par contre, si le critère augmente, le paramètre λ est augmenté pour se rapprocher de la méthode du gradient.

3.4.2.1 Simulations

On réalise un premier test de simulation sur une pièce équipée par deux capteurs en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt. La figure 3.12 donne le résultat pour deux types de situation : la personne se déplace dans la zone de couverture des deux capteurs (fig. 3.12A) et la personne se situe sur la zone d'un des capteurs (fig. 3.12B et C). Le modèle de la réponse du capteur utilisé est celui proposé par l'équation (2.32) (page 80). On rappelle que pour ce capteur, nous avons identifié un modèle composé de trois parties en fonction de l'angle. Sur la figure 3.12, nous avons dessiné le champ de détection avec un rayon arbitraire pour la partie centrale mais le programme prend en compte l'ensemble du modèle. Une marche aléatoire est simulée et représentée en rouge sur les graphes en trait continu à gauche dans la figure et par des croix rouges ($\times$) à droite. Les points estimés sont représentés par des croix bleues (+) sur le graphe de droite. Les trois premiers résultats présentés dans la figure 3.12 mettent en évidence que les coordonnées auront une meilleure estimation si la pièce est couverte dans son ensemble par au moins deux capteurs.

La figure 3.13 nous conforte dans cette hypothèse. Nous avons placé un troisième capteur dans la pièce, ce qui permet d'avoir une zone recoupée par trois capteurs et plusieurs zones recoupées par deux capteurs. Ainsi, pour des zones couvertes par deux ou trois capteurs, les résultats sont très satisfaisants comme on peut le voir sur les graphes A et C de la figure 3.13. Par contre si la trajectoire de la personne se trouve loin de la couverture de plusieurs capteurs, l'estimation des coordonnées est très mauvaise comme le montre le graphe B.

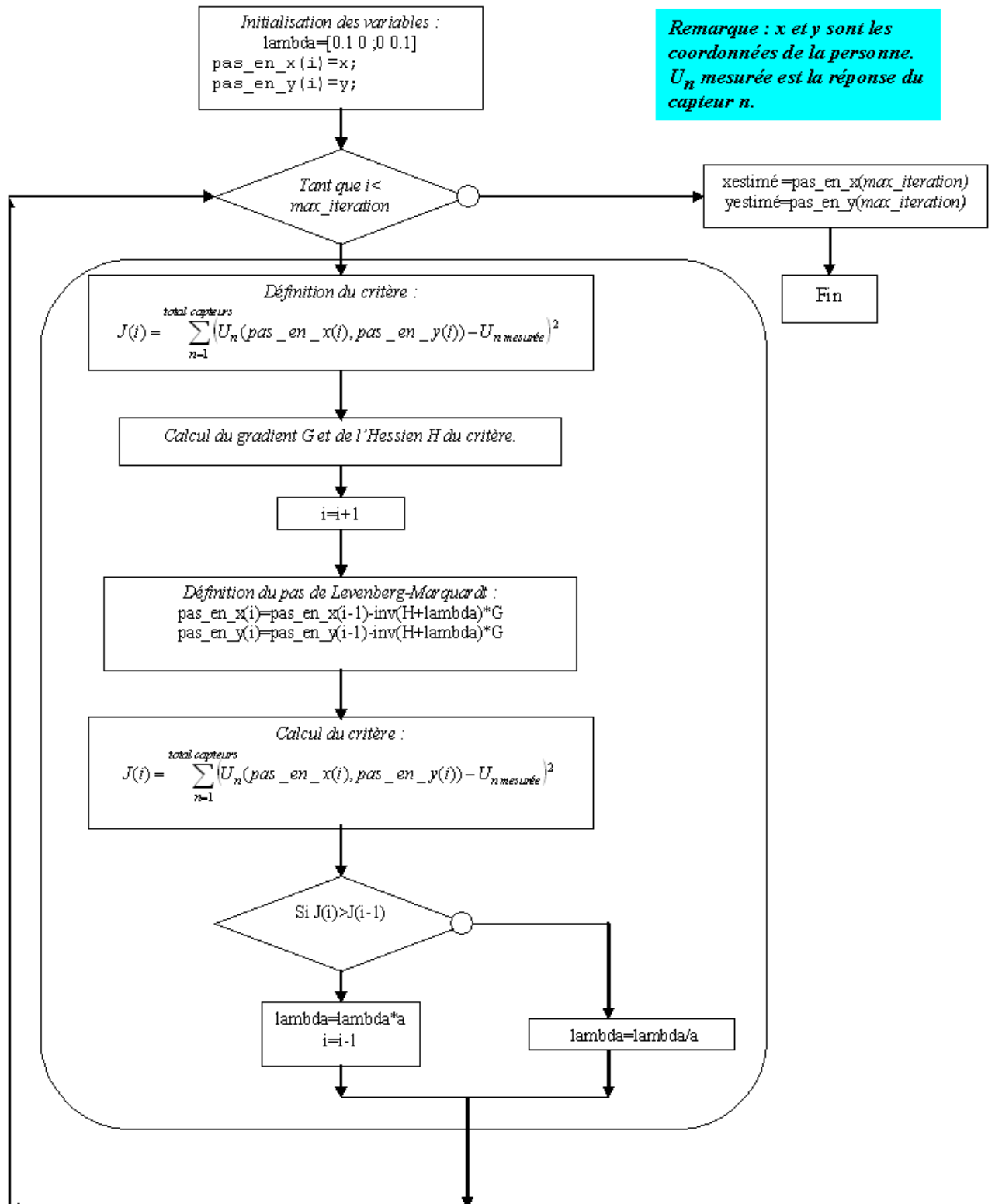


FIGURE 3.11 – Algorithme de Levenberg-Marquardt pour la localisation d'une personne à l'aide de n capteurs

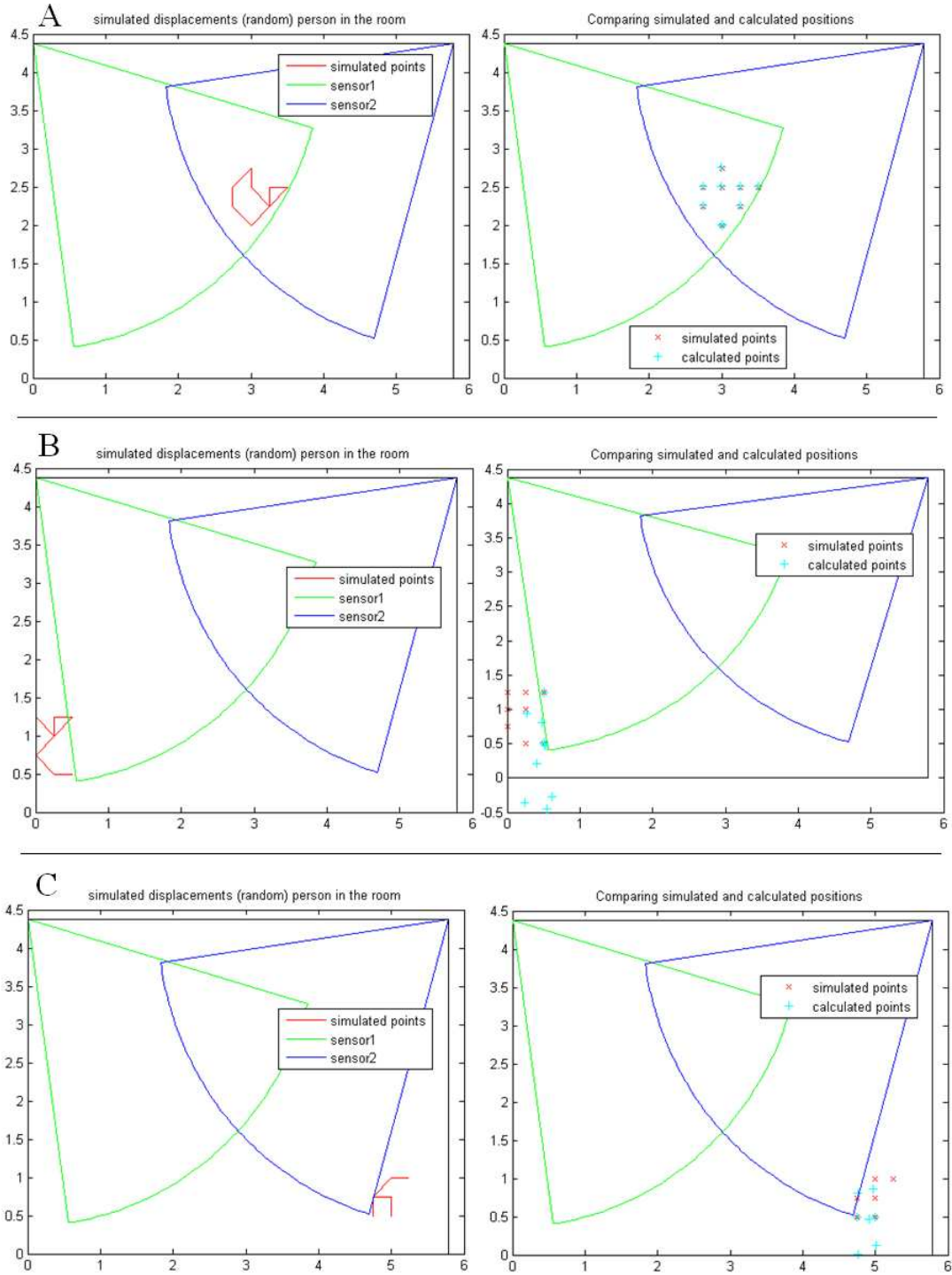


FIGURE 3.12 – Simulation d’une marche aléatoire et de la localisation par l’algorithme de Levenberg-Marquardt pour deux capteurs

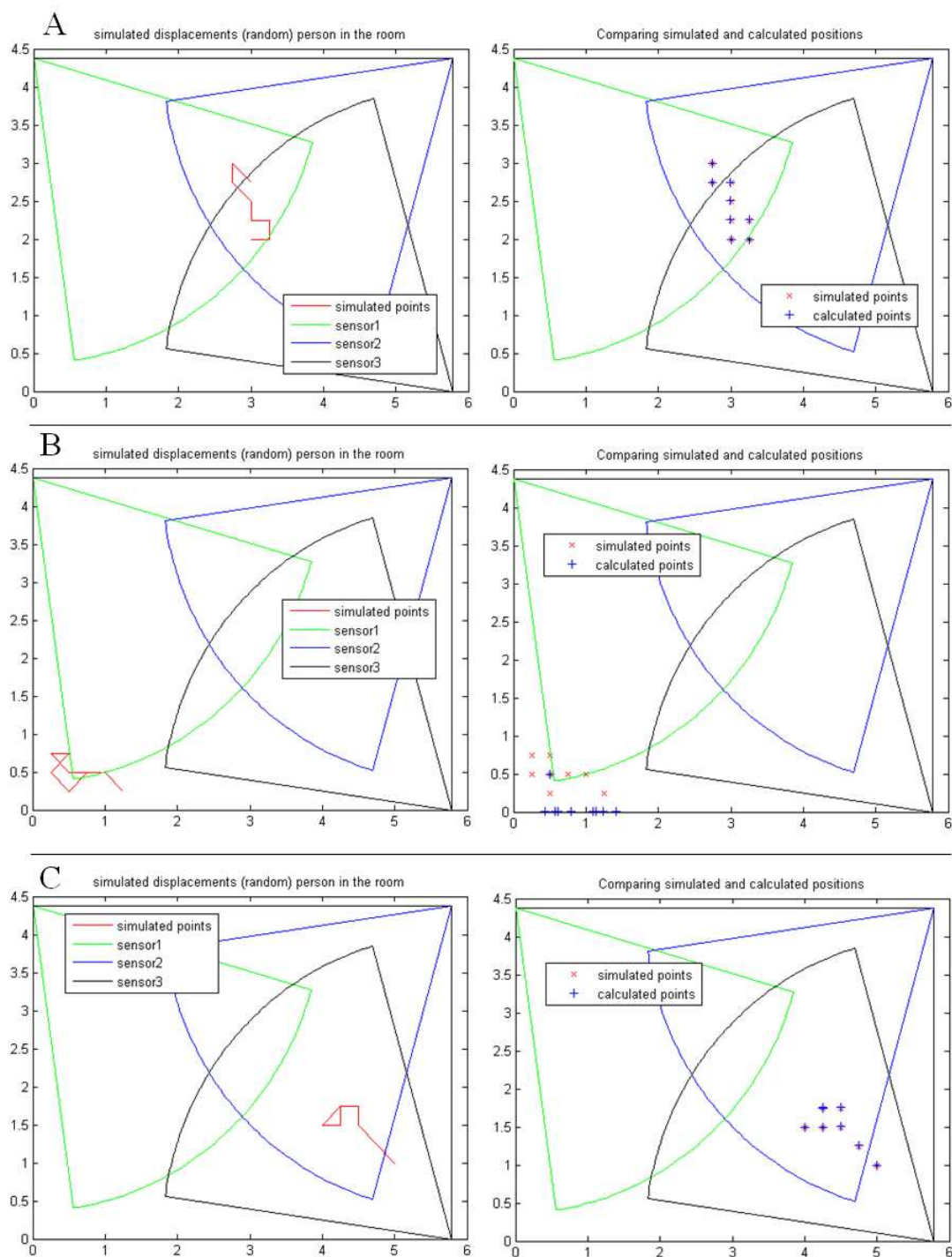


FIGURE 3.13 – Simulation d'une marche aléatoire et de la localisation par l'algorithme de Levenberg-Marquardt pour trois capteurs

3.4.2.2 Informations supplémentaires à la localisation à l'aide de l'algorithme de Levenberg-Marquardt

L'utilisation d'un modèle simplifié de la réponse du capteur et d'un algorithme d'optimisation sur un réseau de capteurs nous a permis de mettre en œuvre une méthode de localisation et de suivi de la personne. Dans le paragraphe 2.5, nous avons établi un modèle de la réponse du capteur prenant en compte les coordonnées dans l'espace de la cible mais aussi en fonction de sa température. On propose d'utiliser l'algorithme de Levenberg-Marquardt pour déterminer les coordonnées de la personne et sa température. En effet, la température de la cible est un élément important qui influe fortement la réponse du capteur infrarouge. La température de notre corps n'est pas forcément à 37 °C (c'est ce qui a été présenté dans le chapitre 1). On imagine la situation suivante : nous sommes en hiver, il fait froid dehors et la personne rentre dans la pièce. La température de la personne sera forcément plus froide qu'en temps normal, il faudra attendre un peu de temps pour que la personne se réchauffe. Cette situation simple, mais courante dans la vie de tous les jours, met bien en évidence la nécessité d'avoir une estimation par rapport à la température. Une nouvelle simulation est proposée par rapport à ce scénario simple, c'est-à-dire que la personne est à 35 °C et se réchauffe jusqu'à 37 °C. Pour notre simulation, nous proposons de simplifier le modèle proposé par l'équation (2.20) (page 73) :

$$U_{model} = \frac{0,048 \times T_{cible} - 0,608}{(0,66 + r)^2} \times (0,00015\alpha^2 + 0,0256\alpha + 1,165) + 0,04 \times T_{sensor} + 1,06 \quad (3.66)$$

Dans l'équation (3.66), on ne prend pas en compte l'angle azimuth pour travailler en deux dimensions et on suppose que le capteur n'est pas encapsulé pour que son champ de détection ne soit pas altéré. On se place dans la même pièce que dans l'expérience présentée dans la partie 3.4.2.1, mais on ajoute un quatrième capteur pour une meilleure couverture de détection de la pièce.

Pour avoir notre nouvelle information, il faut redéfinir notre critère d'optimisation en fonction des coordonnées de la personne (x, y) et de sa température (T_{cible}) :

$$J = \sum_{n=1}^{\text{nombre total de capteurs}} (U_n(x, y, T_{cible}) - U_{n \text{ mesurée}})^2 \quad (3.67)$$

La figure 3.14 nous montre que l'ajout d'un nouveau paramètre dans le critère de l'algorithme, n'empêche pas une bonne estimation des coordonnées de la position de la personne. On remarque sur la figure que la marche simulée correspond aux points calculés par l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Une bonne estimation de la marche implique donc que nous avons pu estimer correctement la température de la personne, ce que nous confirme la figure 3.15.

Il est intéressant de noter qu'à l'aide de cette méthode d'optimisation et du modèle de la réponse du capteur, nous sommes capable de retirer de nombreuses informations ; à condition que le nombre de paramètres à estimer soit inférieur ou égal au nombre de réponses disponibles des capteurs, autrement dit, il faut avoir au minimum autant d'équations que d'inconnues, ce qui explique l'intérêt d'avoir un réseau de capteurs.

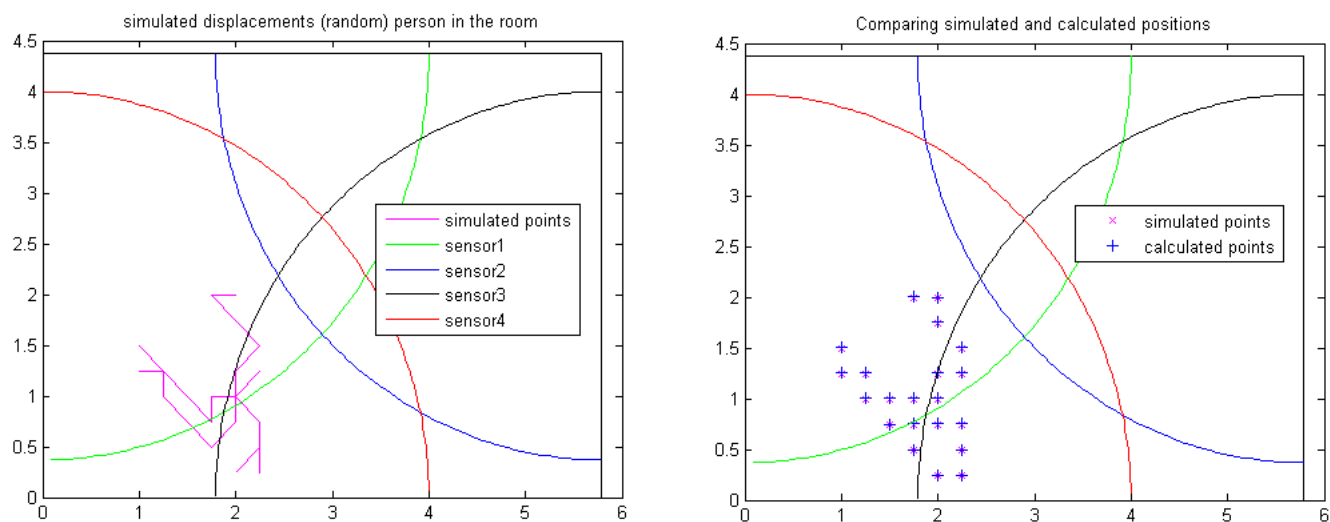


FIGURE 3.14 – Simulation d'une marche aléatoire et de la localisation par l'algorithme de Levenberg-Marquardt pour quatre capteurs

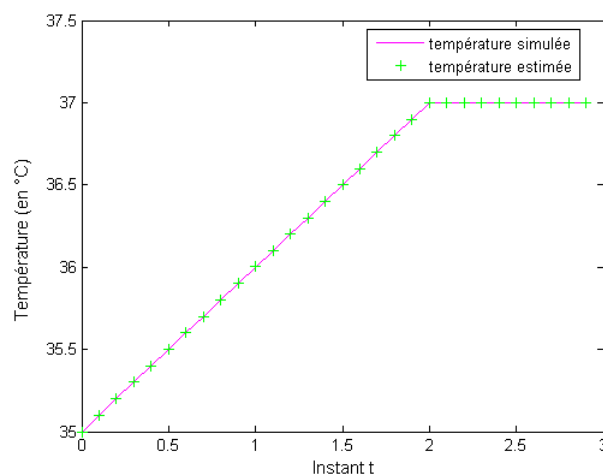


FIGURE 3.15 – Simulation d'une évolution de température et estimation par l'algorithme de Levenberg-Maarquardt

Finalement, cet algorithme peut nous permettre d’avoir un “caphom” plus performant que les solutions actuelles. Les habitués des détecteurs de mouvement peuvent observer, selon le modèle en leur possession, que des détections intempestives peuvent survenir lorsqu’un animal domestique passe dans la pièce. Ce genre de détection peut être désagréable pour l’utilisateur qui ne désire peut-être pas que le système de gestion de l’éclairage allume la lumière pour son animal. De la même façon que nous avons pu déterminer la température, nous pouvons envisager de différencier un humain d’un animal en utilisant le modèle de l’équation 2.20 (page 73). Effectivement, nous avons un modèle qui donne la réponse du capteur en fonction de ces coordonnées dans l’espace et comme le montre la figure 3.16, nous sommes en général plus grand que nos animaux et donc nos coordonnées sont identifiables à l’aide de l’algorithme de localisation par Levenberg-Maarquardt. Comme nous le montre la figure 3.17, nous avons la possibilité, à l’aide d’un réseau de capteurs, d’identifier la cible en fonction de sa taille ; à savoir, dans le cas présenté sur la figure 3.17, 1,75 m pour la personne et 0,75 m pour un animal domestique.

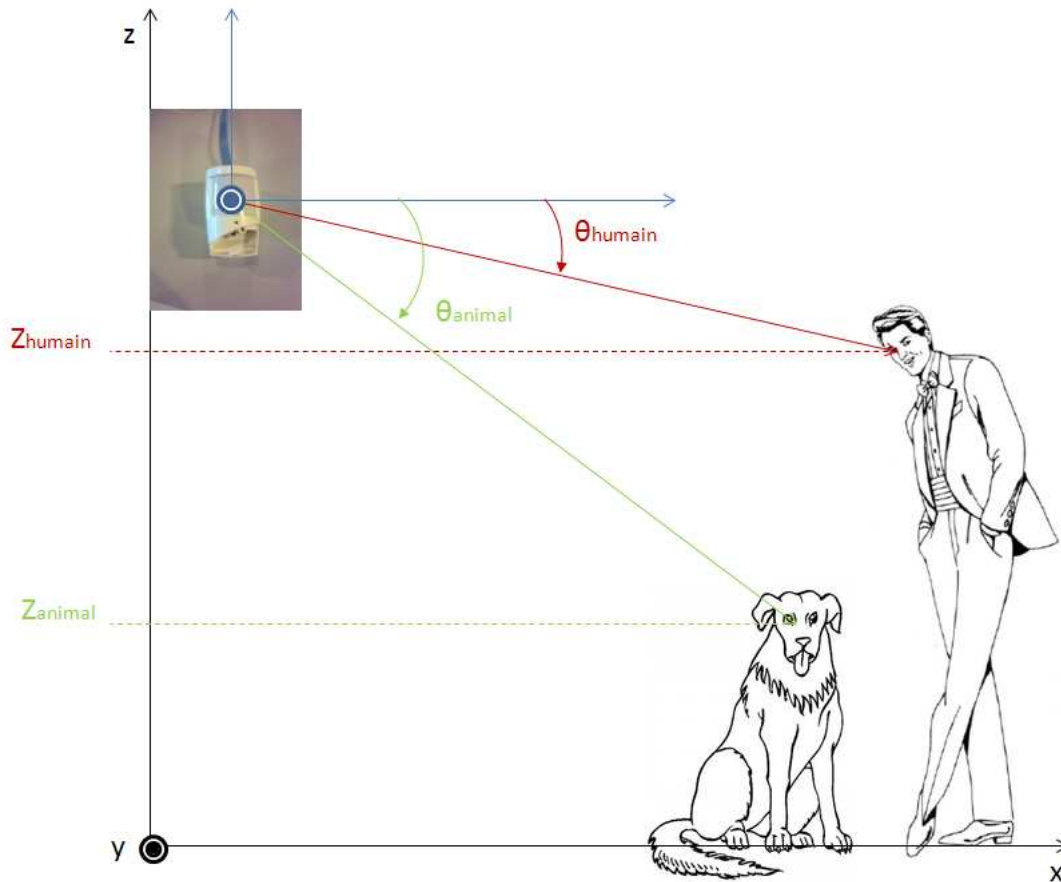


FIGURE 3.16 – Identification d’un humain ou d’un animal à l’aide du capteur

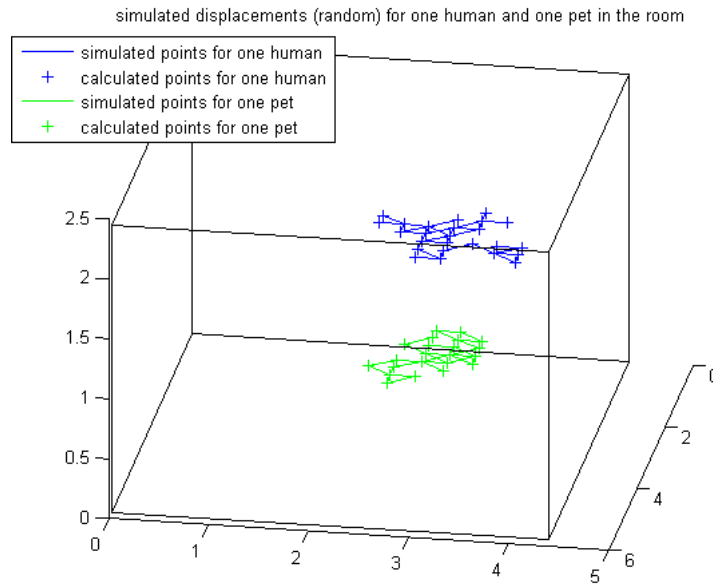


FIGURE 3.17 – Simulation d’une marche aléatoire d’une personne et d’un animal et localisation par l’algorithme de Levenberg-Marquardt à l’aide de quatre capteurs

3.5 Conclusion sur la localisation

Nous avons, dans cette partie, proposé deux technologies pour la localisation. La première technologie proposée est un réseau de capteurs de type “tout ou rien”, l’exemple bien connu de ce type de capteur pour notre application sont les détecteurs de mouvement. Utiliser les chaînes de Markov cachées nous a permis de poser le problème de manière très intuitive comme en témoigne la représentation graphique de notre étude donnée par la figure 3.4 (page 96). Bien que les coordonnées de la personne ne soient pas données par des valeurs, la personne est localisée sur une zone de la pièce. Une fois le découpage en zones réalisé, les zones peuvent être identifiées par rapport à leur fonctionnalité, à savoir si c’est une zone de passage ou une zone avec un taux d’occupation significatif (par exemple, présence d’un lit, d’un bureau, d’une armoire, ou autre). À l’aide de la méthode de Baum-Welch, la matrice de transition A et la matrice d’observation B peuvent être soumises à un apprentissage permettant l’amélioration du modèle de Markov caché. Un bon apprentissage peut permettre d’atteindre un certain niveau d’immunité face aux fausses détections. Ainsi, à partir d’une séquence d’observation de la réponse des différents capteurs, le chemin parcouru à travers les différentes zones peut être retrouvé (algorithme de Viterbi). Les éléments qui composent ce modèle permettent aussi de prévoir la prochaine zone occupée par la personne.

La deuxième technologie est un capteur qui apporte une information supplémentaire à la présence comme les coordonnées de la personne dans l’espace. Ces informations peuvent être recueillies à l’aide des capteurs de type thermopile présentés dans le chapitre 2.5. Nous avons donc proposé l’étude d’une pièce équipée de capteurs infrarouges de type thermopile dont la réponse est utilisée pour déterminer les coordonnées dans l’espace. Ces coordonnées doivent être déduites des différentes réponses du réseau de capteurs. Une méthode d’optimisation par la

méthode de Levenberg-Marquardt est utilisée pour l'estimation des coordonnées de la personne dans la pièce. Les résultats obtenus en simulation sont très prometteurs à condition d'avoir un recouvrement de la pièce par un nombre suffisant de capteurs.

Il est à souligner qu'il est difficile de proposer un moyen de localiser une personne dans une pièce à l'aide d'un seul capteur. Utiliser un réseau de capteurs nous permet de répondre à la problématique de localisation d'une personne. Bien entendu, multiplier le nombre de capteurs aura une influence sur le coût final du système de localisation mais permettra dans la première méthode d'avoir plus de zones d'occupation (ce qui n'est pas forcément nécessaire) et dans la deuxième méthode, une estimation plus précise des coordonnées. Cependant, la plus grande difficulté des systèmes de localisation est la localisation de plusieurs personnes présentes dans la pièce.

CHAPITRE 4

Test sur un appartement témoin

Sommaire

4.1	L'Appartement pilote	117
4.2	Les équipements à disposition	118
4.3	Expérimentation avec un habitant	119
4.3.1	Résultats obtenus	119
4.3.2	Impression de l'habitant	123
4.3.3	Première approche de localisation de la personne	123
4.3.4	Installation des capthoms	129
4.4	Validation de la méthode de localisation	131
4.5	Les perspectives	134

Nous avons présenté, dans le chapitre 1, de nombreux projets sur le maintien à domicile à travers des travaux de recherche sur l'habitat intelligent. Le projet CAPTHOM avait pour vocation de répondre aussi aux besoins liés au maintien à domicile. Nous avons eu la possibilité de réaliser quelques expériences dans un appartement témoin équipé pour l'aide à la personne.

4.1 L'Appartement pilote

Un appartement témoin est mis à notre disposition au sein de l'EPHAD (Établissement d'Hébergement pour Personnes Âgées Dépendantes) de Bellevue à Bourges. L'objectif de cet appartement, créé dans le cadre du projet MADONAH (Maintien et Assistance Diurne Ou Nocturne pour personnes Âgées et/ou Handicapées), est de :

- participer au maintien à domicile de personne dépendante ou handicapée,
- tester en réel des dispositifs technologiques nouveaux pour des personnes âgées et/ou handicapées,
- mettre à disposition un plateau technologique au service des réseaux gérontologiques,
- favoriser le transfert de nouvelles technologies.

Dans cet objectif, un appartement de 100m² a été aménagé comportant les pièces suivantes :

- une cuisine,
- une pièce de vie,
- une chambre,
- une salle de bain.



FIGURE 4.1 – Photos de l'appartement prototype de l'EPHAD de Bellevue

Dans les partenaires scientifiques du projet MADONAH, nous allons trouver certains acteurs du projet CAPTHOM :

- le pôle de compétitivité S2E2 (Sciences et Systèmes de l'Énergie Électrique),
- l'Institut PRISME,
- la société SOREC,
- le Cresitt Industrie,
- Legrand Industrie,
- le Pôle Capteurs Automatismes.

Bien sûr à cette liste, nous devons compter sur la participation de la résidence de Bellevue.

4.2 Les équipements à disposition

Chaque salle est équipée de capteurs et de commandes qui sont reliés à une passerelle permettant l'acquisition des actions dans la pièce. Toutes les données sont consultables sur internet à l'adresse <http://madonah.dyndns.org/PERvision/> ; ce site a été réalisé par nos partenaires de Legrand et permet de voir l'utilisation des différents produits dans ce lieu d'expérimentation :

- dans le séjour :
 - 1 détecteur de mouvement qui surveille la pièce,
 - 2 commandes des volets roulants (Montée/Descente) pour chaque fenêtre, et une troisième centralisée pour commander les volets de toutes les fenêtres en même temps,
 - 1 commande pour l'éclairage ;
- dans la cuisine :
 - 1 détecteur de mouvement qui surveille la pièce,
 - 1 commande pour l'éclairage,
 - 1 commande des volets roulants,
 - 1 capteur de fuite d'eau,
 - 1 détecteur de fumée,
 - 1 sonde de température dans le frigo ;
- dans la salle de bain :
 - 2 commandes de la porte automatique (une à l'intérieur et l'autre à l'extérieur de la salle de bain),
 - 1 commande pour l'éclairage,
 - 1 commande des volets roulants,
 - 1 commande pour l'ouverture et la fermeture de la fenêtre,
 - 1 commande pour l'ouverture et la fermeture du robinet de la baignoire,
 - 1 commande pour l'ouverture et la fermeture de la bonde de la baignoire,
 - 2 détecteurs de mouvement qui surveillent la pièce sur deux angles différents,
 - 2 capteurs de fuite d'eau, un pour surveiller la baignoire, le second pour les WC ;
- dégagement :
 - 1 commande pour l'éclairage,
 - 1 détecteur de présence pour surveiller la zone,
 - 1 sonde de température pour mesurer la température intérieure,
 - 1 commande de la porte d'entrée automatique ;
- chambre :
 - 1 commande des volets roulants,

- 1 commande pour l’ouverture et la fermeture de la fenêtre,
- 3 détecteurs de mouvement, le premier vise la pièce dans sa globalité, les deux autres sont placés de chaque côté du lit et ont un très faible angle d’ouverture,
- 1 capteur de fuite d’eau RF,
- 1 commande pour l’éclairage.

Notons que les produits que nous nommons “commande” ici sont en fait des produits proposés et commercialisés par notre partenaire Legrand et ne sont pas de simples interrupteurs. En effet, ils peuvent être intégrés dans des scénarios qui lient les informations apportées par les détecteurs de mouvements pour effectuer une commande comme l’éclairage. Cette liste d’équipement n’est pas exhaustive, en effet, nous pouvons retrouver dans l’appartement d’autres détails qui sont installés pour aider la personne. Par exemple, une télécommande est mise à la disposition de la personne pour commander certains éléments de l’appartement. La cuisine est équipée d’un plan de travail et d’un évier qui montent ou qui descendent par simple commande, ce qui est très pratique pour des personnes en fauteuil roulant par exemple. À l’extérieur un lecteur de badge est installé, ce qui permet d’ouvrir la porte automatique à l’aide d’un badge spécial.

Pour nos essais, nous nous concentrons particulièrement sur les détecteurs de mouvement (PIR) dont le placement est donné par la figure 4.2. Nous avons installé, dans la salle de bain, deux capteurs de type thermopile non encapsulé (représenté en vert sur la figure 4.2).

Nous proposons un algorithme simple de localisation de la personne dans l’appartement. Lorsque un capteur dans une pièce est excité, l’algorithme considère que la personne est dans cette pièce. Finalement, c’est le dernier capteur qui détecte qui détermine le lieu où se trouve la personne. Les détecteurs de mouvement sont placés de manière à avoir le meilleur champ de détection dans la pièce, ce qui est déterminant pour pouvoir localiser au mieux l’habitant.

4.3 Expérimentation avec un habitant

Dans le cadre du maintien à domicile, la participation d’une personne âgée dans nos tests est un réel atout pour la validation des systèmes testés au sein de l’appartement. Un homme de plus de 80 ans s’est porté volontaire pour vivre dans l’appartement pendant un mois environ. Cette personne est valide, c’est-à-dire, qu’elle est complètement indépendante (fait son ménage et sa cuisine seule). Cette expérience permet de valider les équipements mis à sa disposition et de cerner les améliorations à apporter dans l’appartement.

4.3.1 Résultats obtenus

Sur la figure 4.3, l’activité de la personne dans l’appartement est retracée à l’aide des réponses des capteurs placés dans l’appartement. On note que la personne se lève régulièrement pour aller aux toilettes. À cet effet, il est prévu que lorsque la personne se lève la nuit et est détectée par un des capteurs à côté du lit, l’éclairage qui mène à la salle de bain s’allume. Cette commande répond très clairement à l’observation faite que de nombreux accidents (chutes) surviennent la nuit à cause d’un manque d’éclairage.



FIGURE 4.2 – Placement des capteurs dans l'appartement

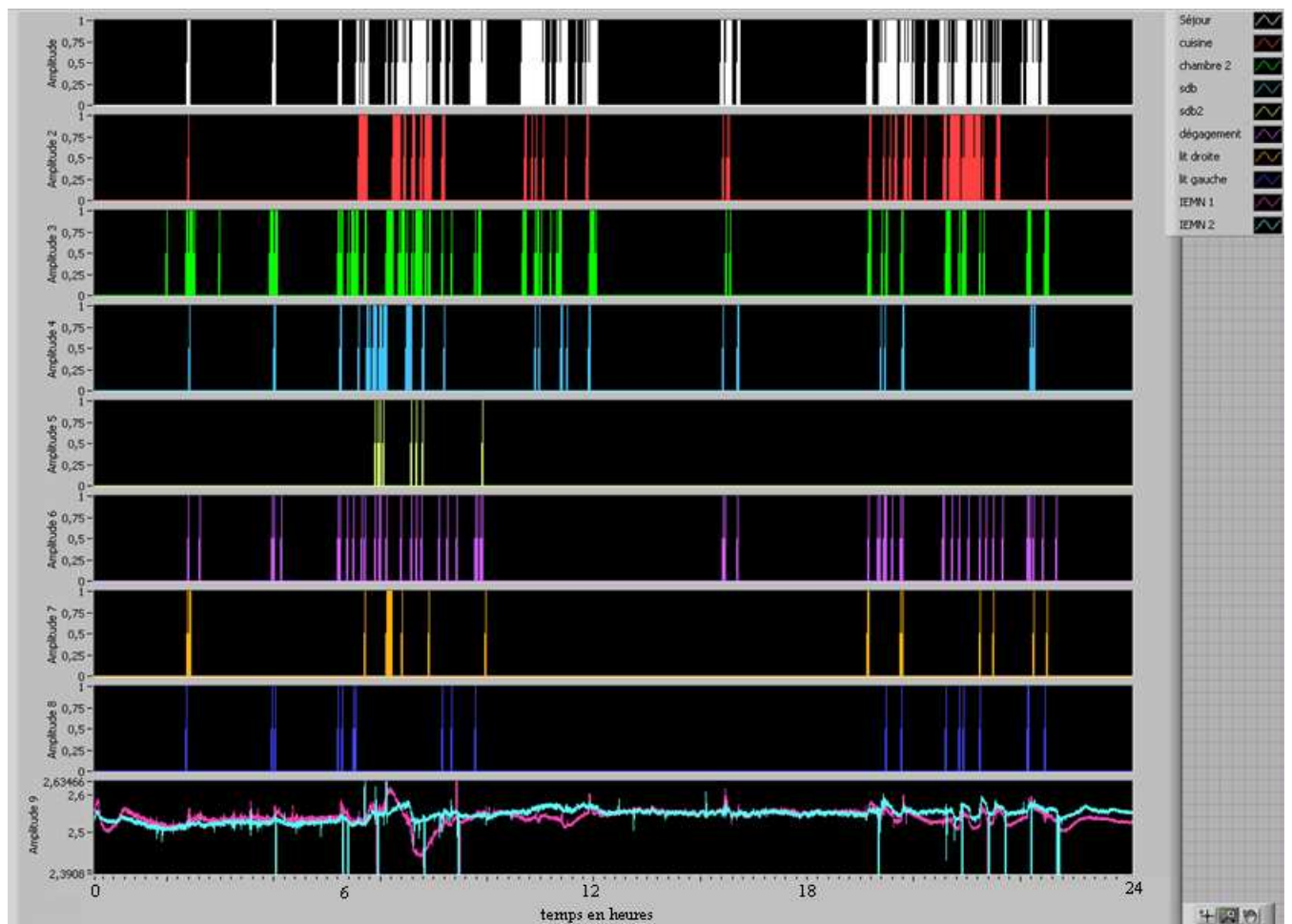


FIGURE 4.3 – Exemple de résultats obtenus des réponses des capteurs au cours d’une journée

La figure 4.3 montre aussi des périodes où les capteurs n’enregistrent aucun mouvement. Rien d’alarmant, en fait, notre sujet a seulement l’habitude de sortir régulièrement l’après-midi. Une information d’entrées et de sorties nous aiderait à faire la différence entre une absence et une situation où la personne a fait un malaise (plus de mouvements détectables) ce qui nécessite une intervention.

Les résultats obtenus pour les thermopiles sont encourageants car on observe une excitation du capteur quand il y a quelqu’un dans la pièce. Par contre, la réponse est perturbée notamment par la buée qui se dépose sur le capteur. De nouveaux prototypes seront proposés pour palier à ce problème, en utilisant, par exemple, un capteur encapsulé.

Il est reconnu que les personnes âgées ont leurs habitudes au quotidien [Chan *et al.*]. L’expérimentation le montre très clairement comme nous le montre la figure 4.4 où le temps d’occupation dans chaque pièce est représenté. Sur la figure, une première moyenne a été calculée en prenant en compte tous les jours et une deuxième moyenne est calculée en ne prenant pas en compte les cinq premiers jours que nous avons considéré comme des jours servant de “rodage” pour que la personne prenne ses repères. Le temps passé dans chaque pièce peut permettre de créer un modèle sur les habitudes de la personnes et ces données peuvent être utilisées à des fins médicales : par rapport à son temps passé dans la salle de bain ou pour suivre l’évolution d’une maladie dégénérative (de type Alzheimer par exemple) [Giroux *et al.*, 2008]. Un modèle des habitudes peut permettre aussi une meilleure gestion des ressources énergétiques de l’appartement.

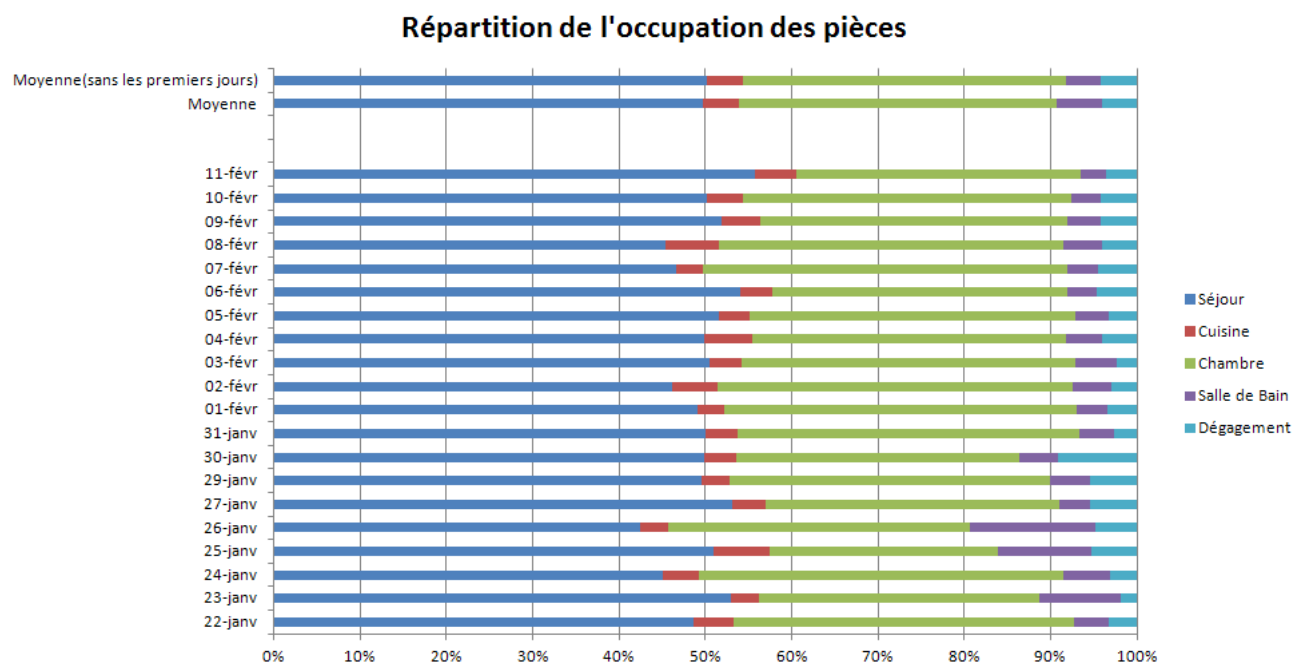


FIGURE 4.4 – Répartition du temps de séjour

4.3.2 Impression de l'habitant

Notre volontaire a vraiment apprécié son séjour dans l'appartement. Même si certaines technologies le dépassent, il a su très vite se familiariser avec les technologies que lui offraient la maison. Cependant, il a noté quelques désagréments. La lumière qui s'éteint quand il reste dans la salle de bain un certain temps, notamment quand il est sous la douche. Cette situation l'a obligé à faire de grands signes aux capteurs de mouvements pour que la lumière s'allume à nouveau. La lumière s'éteint car les capteurs ne détectent aucun mouvement dans la pièce. L'autre problème est qu'après s'être levé pour aller aux toilettes la nuit, il retourne dans son lit et la lumière s'éteint mais elle se rallume juste après alors qu'il est toujours dans son lit et qu'il n'a pas l'intention de se lever. Dans ce cas, nous avons une erreur de détection qu'il faut gérer.

4.3.3 Première approche de localisation de la personne à l'aide d'une Chaîne de Markov Cachée

Dans le chapitre 3, nous avons proposé une première approche de l'utilisation d'une HMM pour la localisation d'une personne dans une pièce équipée de plusieurs capteurs dont le champ de détection se recoupe et forme plusieurs zones. Nous proposons d'utiliser une HMM pour la gestion de l'éclairage dans l'appartement témoin. Nous allons utiliser les données obtenues lors de la campagne d'acquisition avec la personne dans l'appartement pour adapter le modèle. La figure 4.5 donne les transitions attendues en théorie par notre modèle.

Les N états du modèle (avec $N = 5$) sont donnés par :

$$S = \{\text{séjour, cuisine, chambre, salle de bain, dégagement}\} \quad (4.1)$$

À l'aide des données sur les habitudes de l'habitant, nous avons calculé la distribution de la probabilité de transition des états $A = a_{ij}$ (i est la pièce où se trouve la personne à t et j est la pièce où se trouve la personne à $t + 1$), où

$$a_{ij} = \frac{\text{nombre de cas de transition } i \text{ à } j}{\text{total des cas de transition de } i \text{ vers un autre état}} \quad (4.2)$$

Nous avons donc traité les données à notre disposition pour calculer la matrice A :

$$A = \begin{bmatrix} 0,93 & 0,01 & 0,01 & 0,01 & 0,04 \\ 0,35 & 0,64 & 0,00 & 0,00 & 0,01 \\ 0,26 & 0,00 & 0,72 & 0,00 & 0,02 \\ 0,05 & 0,00 & 0,00 & 0,80 & 0,15 \\ 0,22 & 0,04 & 0,04 & 0,33 & 0,37 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Pour calculer la matrice d'observation B , nous définissons M symboles d'observation possibles

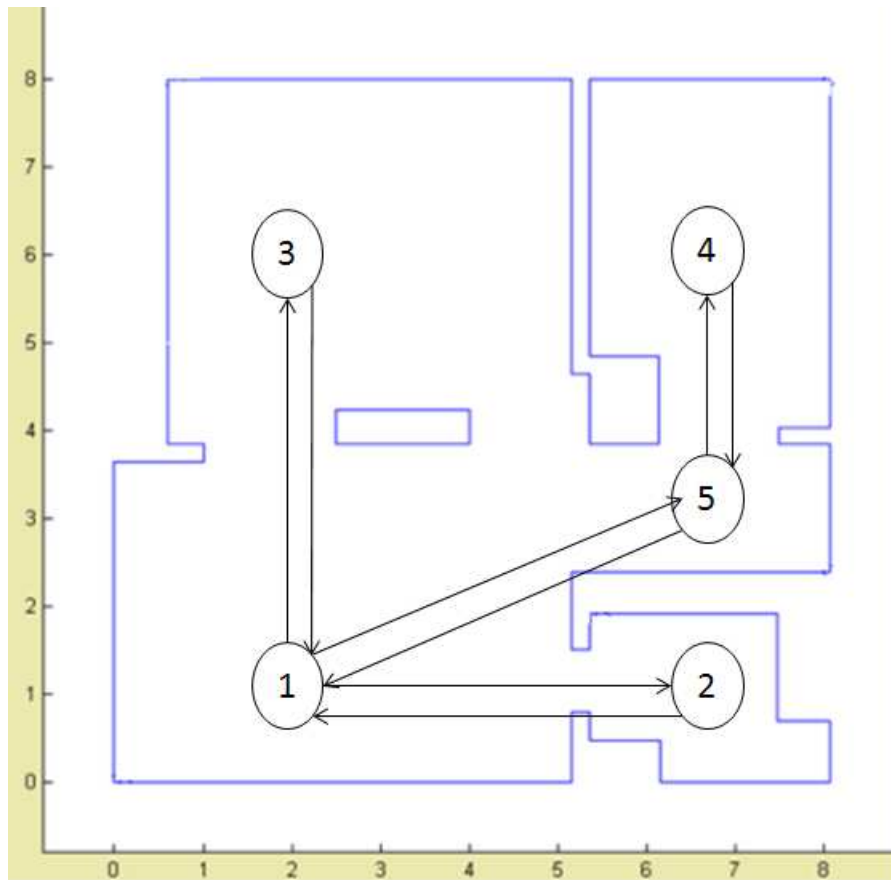


FIGURE 4.5 – Schéma du modèle de Markov

(avec $M = 8$) :

- V_1 = détection du capteur du séjour
- V_2 = détection du capteur de la cuisine
- V_3 = détection du capteur de la chambre
- V_4 = détection du premier capteur de salle de bain
- V_5 = détection du deuxième capteur de la salle de bain
- V_6 = détection du capteur du dégagement
- V_7 = détection du capteur à gauche du lit
- V_8 = détection du capteur à droite du lit

À l'aide des données sur les habitudes de l'habitant, nous avons calculé la distribution de la probabilité d'observation des symboles à l'état j , où

$$b_j(k) = \frac{\text{nombre de cas d'observation du symbole } V_k \text{ à l'état } j}{\text{total des cas d'observation du symbole } V_k} \quad (4.4)$$

Nous avons donc traité les données à notre disposition pour calculer la matrice B :

$$B = \begin{bmatrix} 1,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,99 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,01 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,99 & 0,01 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Nous réalisons une simulation sur le modèle obtenu pour les observations suivantes :

$$O = V_3 V_1 V_5 V_5 V_4 V_5 V_1 V_3 V_3 V_3 V_3 V_3 V_3 V_3 V_3 V_5 V_3 V_3 V_3 V_3 V_3 V_3 V_3 \quad (4.6)$$

Nous précisons que l'observation O prise pour la simulation sont des observations réelles effectués lors des tests avec la personne âgée. Le chemin réel et attendu pour l'observation O de l'équation 4.6 est donc :

$$\text{Chemin réel} = S_3 S_1 S_5 S_5 S_4 S_5 S_1 S_3 S_3 S_3 S_3 S_3 S_3 S_3 S_3 S_5 S_3 S_3 S_3 S_3 S_3 S_3 S_3 \quad (4.7)$$

On rappelle que la correspondance des états est donnée par l'équation 4.1.

La figure 4.6 nous donne le résultat de la simulation. Le chemin estimé par le modèle HMM correspond au chemin réel pris par la personne.

Sur la figure 4.6, nous avons représenté en bleu le chemin qui correspond directement à l'observation. Lorsqu'il n'y a pas d'erreur de détection, il est normal qu'il n'y ait pas de contradiction entre le résultat de l'observation et le chemin réel. Cependant, si une erreur de détection apparaît dans une séquence d'observation, il est important que le modèle puisse estimer le chemin malgré cette erreur. On suppose que la personne prend le même chemin donné par l'équation 4.7. Nous

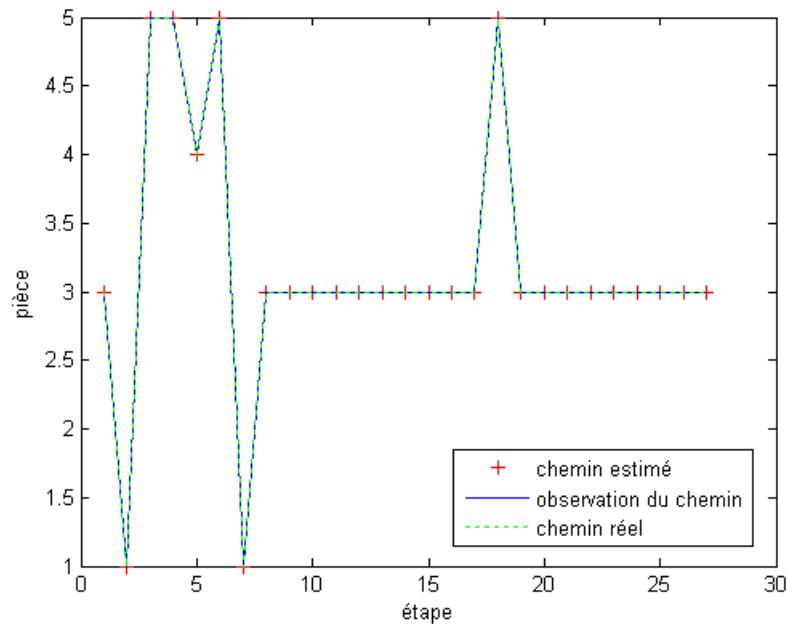


FIGURE 4.6 – Résultat de la simulation pour l'interprétation du chemin pris selon le modèle HMM

repreons la séquence d'observation O et nous remplaçons $O_{11} = V_3$ par $O_{11} = V_2$ pour simuler une erreur de détection :

$$O = V_3 V_1 V_5 V_5 V_4 V_5 V_1 V_3 V_3 V_3 V_2 V_3 V_3 V_3 V_3 V_3 V_5 V_3 V_3 V_3 V_3 V_3 V_3 V_3 V_3 V_3 \quad (4.8)$$

Ce qui, mal interprété, signifie qu'à $t = 11$, la personne est dans la cuisine selon les capteurs, bien qu'en réalité la personne soit dans sa chambre, comme nous l'indique la représentation du chemin réel de la figure 4.7.

La figure 4.7 est un résultat qui peut étonner car nous savons qu'il est impossible d'aller de la chambre à la cuisine sans passer par le séjour au moins une fois et vice versa. Cependant, la matrice d'observation B est formelle : lorsque le capteur de la cuisine détecte, nous sommes sur à 100% qu'il y a une personne dans la cuisine ($b_2(2) = 1$). On précise que cette erreur de détection prise dans notre exemple n'est pas le reflet de ce que nous avons observé durant les tests, elle a été prise arbitrairement pour mettre en évidence les possibilités d'adaptation du modèle. En effet, le modèle peut être corrigé à l'aide d'un apprentissage si le problème est récurrent sur un jour entier. Une nouvelle simulation peut être réalisée à l'aide d'une nouvelle matrice d'observation qui prend en compte les erreurs de détection possibles :

$$B = \begin{bmatrix} 1,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,80 & 0,20 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,30 & 0,69 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,01 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,99 & 0,01 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

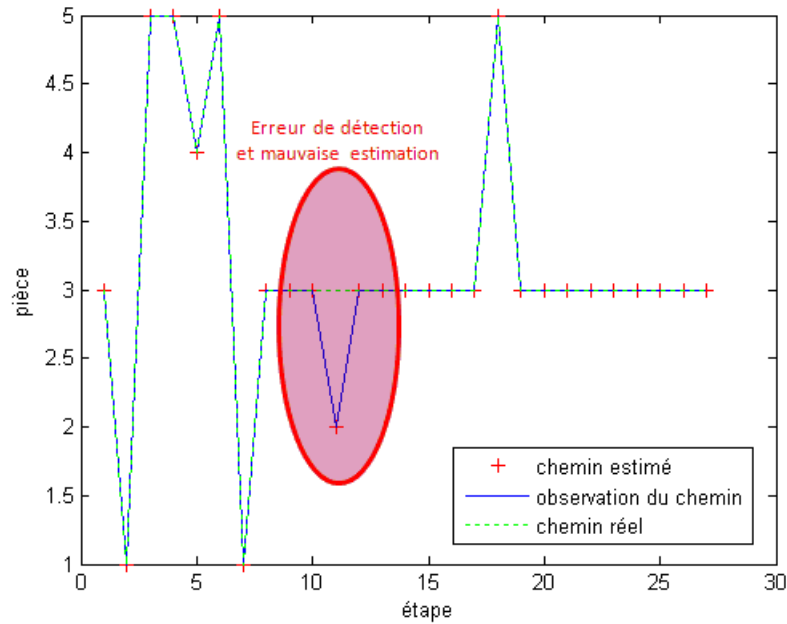


FIGURE 4.7 – Résultat de la simulation pour l'interprétation du chemin pris selon le modèle HMM avec une erreur de détection

À l'aide de cette nouvelle matrice d'observation, nous pouvons avoir une estimation du chemin qui correspond au chemin réel pris par la personne en corrigeant l'erreur de détection dans la séquence d'observation comme nous le montre la figure 4.8.

Pour assurer une meilleure détection et localisation de la personne, nous pourrions couper la journée en plusieurs parties. Chaque partie aurait son modèle $\lambda = (A, B, \Pi)$ permettant de gérer le passage d'une pièce à une autre et les réponses des capteurs. On peut proposer de couper la journée en quatre par exemple. La première partie peut correspondre à l'activité de la personne âgée de 0 h à 6 h ; selon la figure 4.3 (page 121) et les autres résultats obtenus les autres jours, l'habitant se lève souvent la nuit pour aller de sa chambre aux toilettes. La deuxième partie de 6 h à 12 h correspond à son réveil (si ce n'est pas déjà fait) et à l'activité dans les différentes pièces comme le ménage ou la cuisine. Durant la troisième partie de la journée de 12 h à 18 h, la personne s'absente généralement pendant longtemps. À l'heure actuelle, si la gestion de la lumière se faisait à l'aide de notre algorithme de localisation simple, la lumière dans le séjour serait toujours allumée quand la personne est sortie. On rappelle qu'avant le test, nous avons implémenté en aval de l'acquisition de la réponse des capteurs, un système de localisation en temps réel basique qui prend en compte la dernière détection. En effet, le dernier capteur qui détecte la personne avant sa sortie est le capteur dans le séjour. Heureusement, pour l'instant, la gestion de la lumière est effectuée à l'aide d'une temporisation, donc si le capteur dans le séjour ne détecte aucun mouvement pendant un certain temps défini lors de l'installation du système alors la lumière est éteinte systématiquement, ce qui signifie que la lumière est allumée pour rien le temps de la temporisation. Finalement, pour la troisième partie de la journée, il faut que notre HMM soit capable de donner une information supplémentaire, à savoir la sortie de la personne, pour une meilleure gestion de l'éclairage. La dernière partie de la journée de 18 h à

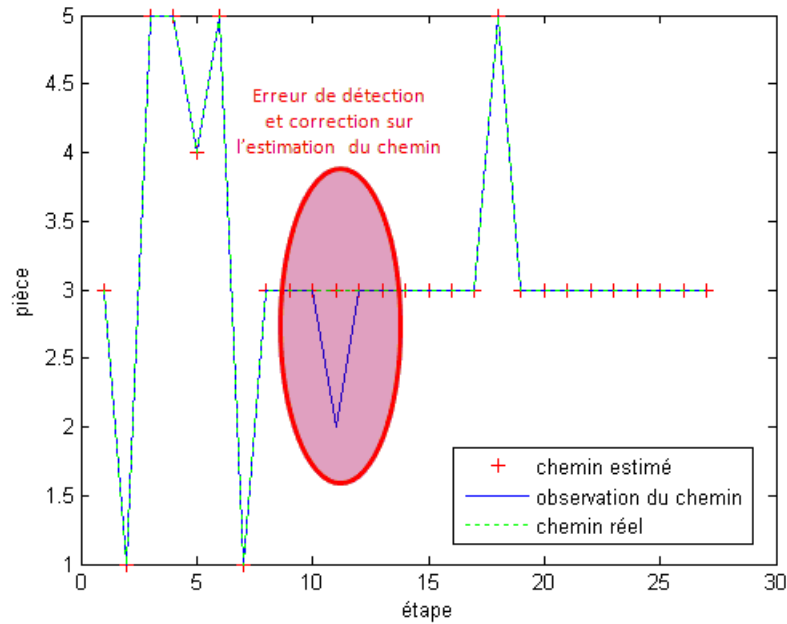


FIGURE 4.8 – Résultat de la simulation pour l'interprétation du chemin pris selon le modèle HMM avec une correction de l'erreur de détection

24 h correspond aux activités liées à la cuisine, à la salle de bain et dans le séjour pour finir à la fin dans la chambre pour dormir.

Nous proposons de calculer la nouvelle matrice de transition A et la matrice d'observation B par rapport à la première partie de la journée de notre acquisition et de confronter le nouveau modèle obtenu pour cette portion de la journée à l'observation présentée dans l'équation 4.8 qui est, on le précise, une séquence réellement obtenue dans cette même partie de journée. Nous obtenons donc pour un calcul des probabilités de transition de 0 h à 6 h pour la matrice A suivantes :

$$A = \begin{bmatrix} 0,59 & 0,00 & 0,11 & 0,25 & 0,05 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,01 & 0,00 & 0,97 & 0,00 & 0,02 \\ 0,05 & 0,00 & 0,00 & 0,63 & 0,32 \\ 0,14 & 0,00 & 0,37 & 0,13 & 0,36 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Nous voyons que sur cette nouvelle matrice A , aucun passage vers la cuisine n'est possible. Nous calculons aussi la matrice d'observation B en prenant en compte l'erreur de détection possible dans la cuisine :

$$B = \begin{bmatrix} 1,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,00 & 0,03 & 0,92 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,05 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

À l'aide de ce nouveau modèle, nous obtenons le même résultat obtenu sur la figure 4.8.

L'avantage de couper la journée en plusieurs parties et d'avoir plusieurs modèles est de pouvoir traiter les données obtenues par les capteurs en fonction des habitudes spécifiques à la partie de la journée en cours, ce qui évite par exemple de prendre en compte des transitions possibles dans une autre partie de la journée mais pas dans la partie en cours. Dans notre cas obtenu par l'habitation d'une personne âgée, nous nous sommes rendu compte que la personne bougeait beaucoup la nuit pour aller aux toilettes mais qu'elle n'allait jamais à la cuisine entre minuit et 6 h.

Il sera important d'avoir l'information d'entrée ou de sortie de la personne. En effet, on peut aussi créer un modèle qui génère une alarme au cas où les détecteurs ne détectent aucun mouvement pendant un certain temps. Par exemple, si on décide qu'aucune activité enregistrée pendant plus de 30 *min* est alarmant, on risque d'avoir des mauvaises alarmes quand la personne s'absente et que l'on ne sache pas qu'elle est sortie. C'est pour cette raison qu'un système de comptage ou de détection d'entrée/sortie sera installé pour les prochains tests.

4.3.4 Installation des capthoms

En parallèle de ces tests sur le site, l'application présentée dans la partie 2.4 est en cours de prototypage. Les exigences des industriels ont légèrement changé par rapport au placement du capteur. Le capteur doit être placé à la place de l'interrupteur de la pièce. Le prototype est donc composé de deux parties (voir figure 4.9) :

- le capteur de type thermopile et son électronique pour le traitement de sa réponse,
- une partie pour commander la lumière.

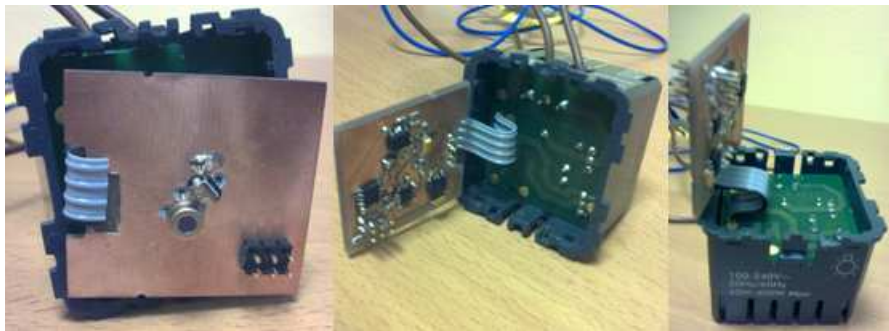


FIGURE 4.9 – Photos du prototype

Malheureusement, le prototype a un défaut qui n'a pas pu être repéré lors de nos tests présentés dans la partie 2.4 page 80 car la partie qui commande la lumière était encore inexistante dans notre montage. En effet, la partie qui commande la lumière s'échauffe et perturbe le signal. Nous avons vu que le signal dépend de la température de la cible mais aussi de la température du capteur lui-même. Or la partie qui a été rajoutée chauffe énormément dans le boîtier ce qui rend difficile le traitement du signal. Nous avons obtenu le résultat présenté sur la figure 4.10 suite à deux tests. Le prototype est placé dans une boîte pour l'isoler de toutes perturbations (courant d'air). Lors du premier test (courbe en blanc sur la figure 4.10), le capteur est placé en entier avec la partie contrôle de la lumière qui chauffe le capteur. Comme les tests sont réalisés dans un environnement relativement isolé, normalement le signal devrait être constant. C'est le type de

résultat que nous avons obtenu lors du deuxième test (courbe en rouge sur la figure 4.10) où le capteur est isolé de la partie commande. Ce dernier test confirme bien que la partie commande influe fortement sur le signal. Une solution proposée est d'utiliser un modèle de la réponse du capteur à l'aide de la méthode de caractérisation que nous avons proposé dans cette thèse pour prendre en compte la température pour l'interprétation du signal.

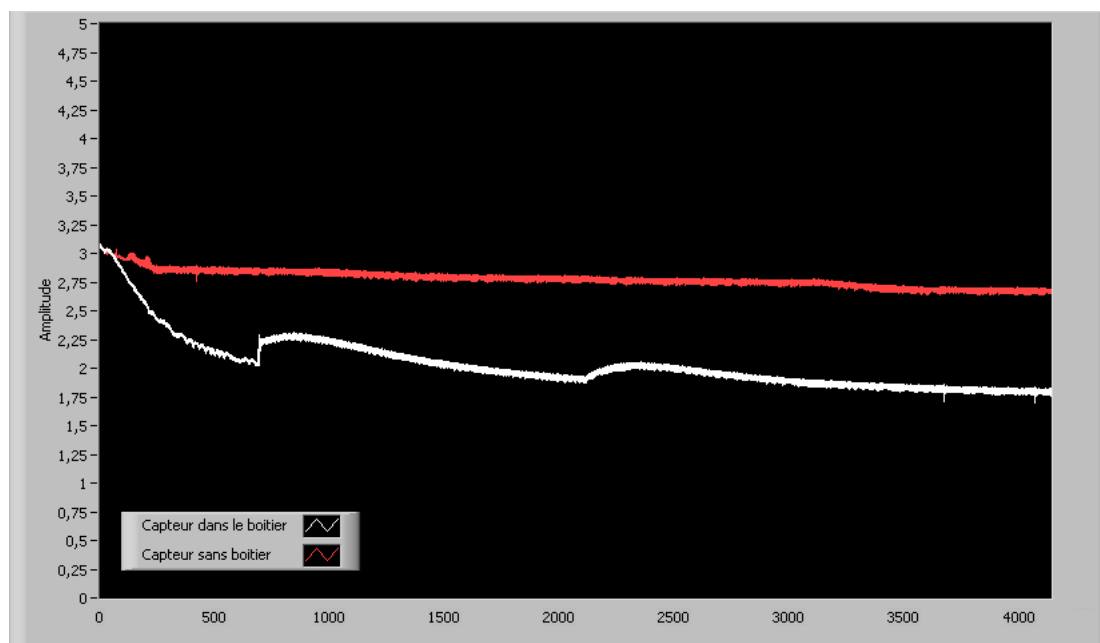


FIGURE 4.10 – Résultat du signal du prototype

Il est prévu de réaliser d'autres prototypes utilisant des thermopiles. Contrairement au prototype précédent, ces capteurs ne seront pas installés à la place d'un interrupteur. Une pièce pourra contenir plusieurs de ces prototypes pour réaliser un zonage de la pièce. Nous pourrions ainsi tester les solutions proposées en simulation dans le chapitre 3. L'avantage de l'utilisation de ce genre de dispositif est de pouvoir avoir une information de présence et pas de mouvement seulement comme c'est souvent le cas avec les capteurs dits "de présence" aujourd'hui. Les tests du capthom dans un appartement comme celui du GIS MADONAH est de pouvoir tester le comportement du capteur dans un environnement réel.

Le prototype du capthom étendu basé sur la vision est aussi en cours de finalisation et il est prévu de le tester dans l'appartement prototype. L'algorithme a été développé par Yannick Benezeth durant le projet CAPTHOM et offre de très bons taux de détection [Benezeth, 2009]. Nous pouvons ainsi à l'aide d'une caméra avoir une information sur la présence et sur le nombre de personnes dans la pièce. Il est à noter que ces travaux sont repris par Damien Brulin pour avoir une information de localisation et de position de la personne (assis, debout, couché), avec la finalité de pouvoir détecter une chute. Bien entendu, les participants du projet CAPTHOM ont conscience du caractère intrusif que peut avoir l'utilisation d'une caméra dans un habitat. Cependant, il est prévu qu'aucune image ne puisse être communiquée à l'extérieur par le capteur, seules les informations demandées autres que l'image peuvent être récupérées. L'intimité de la personne est ainsi respectée. Les tests, sur une personne qui habite pendant quelques jours dans l'appartement, nous diront si le produit est acceptable dans la vie courante ou s'il produit une

gène dans le quotidien. Il nous incombe aussi la responsabilité d'avoir un capteur avec un design discret.

4.4 Validation de la méthode de localisation

Une méthode d'optimisation a été proposée dans la partie 3.4.2 (page 104) pour la localisation d'une personne à l'aide d'un réseau de capteurs de type thermopile. Il sera très intéressant de tester notre méthode de localisation dans le cadre de la vie quotidienne lorsque l'appartement accueille un volontaire pendant une période significative (minimum un mois, pour que la personne s'habitue au lieu). Bien entendu, avant d'équiper cet appartement pilote, nous proposons de réaliser quelques tests pour valider le travail réalisé en simulation dans la partie 3.4.2.1 (page 105).

Nous délimitons un espace rectangulaire de $1,5 \times 2$ m, avec un capteur dans chaque coin (soit quatre capteurs). Les capteurs sont des thermopiles (A2TPMI23) fabriquées par Perkin Elmer. Un modèle de la réponse de ces capteurs a été établi à l'aide de la méthode de caractérisation qui a été proposée dans le chapitre 2 (page 83) :

$$U_{\text{modèle}} = \frac{0,0078 \times T_{\text{cible}} - 0,1673}{(0,25 + r)^2} \times (-0,00021\theta^2 - 0,0014\theta + 1,07) \times (-0,00022\alpha^2 - 0,0031\alpha + 0,99) + 2,32 \quad (4.12)$$

On rappelle que T_{cible} est la température de la cible, r est la distance entre la cible et le capteur, α est l'angle de la cible par rapport au capteur et θ l'azimuth. Il est à noter que ces capteurs détectent correctement une cible seulement à moins de 2 m, ce qui nous amène à réaliser notre test dans un espace relativement petit (voir la photo 4.11).

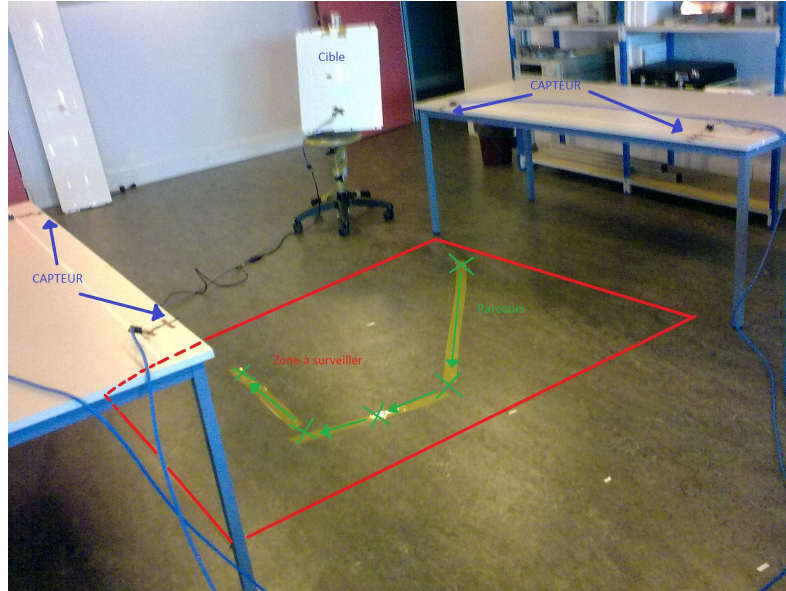


FIGURE 4.11 – Zone de test pour la localisation

La cible utilisée est une plaque chauffante que l'on peut réguler à une température voulue. On réalise un parcours de cinq points pour deux températures de la cible : 30 et 35°C. La réponse

en chaque point est recueillie pour être traitée par notre algorithme de localisation. Les résultats obtenus sont donnés par les figures 4.12, 4.13, 4.14 et 4.15.

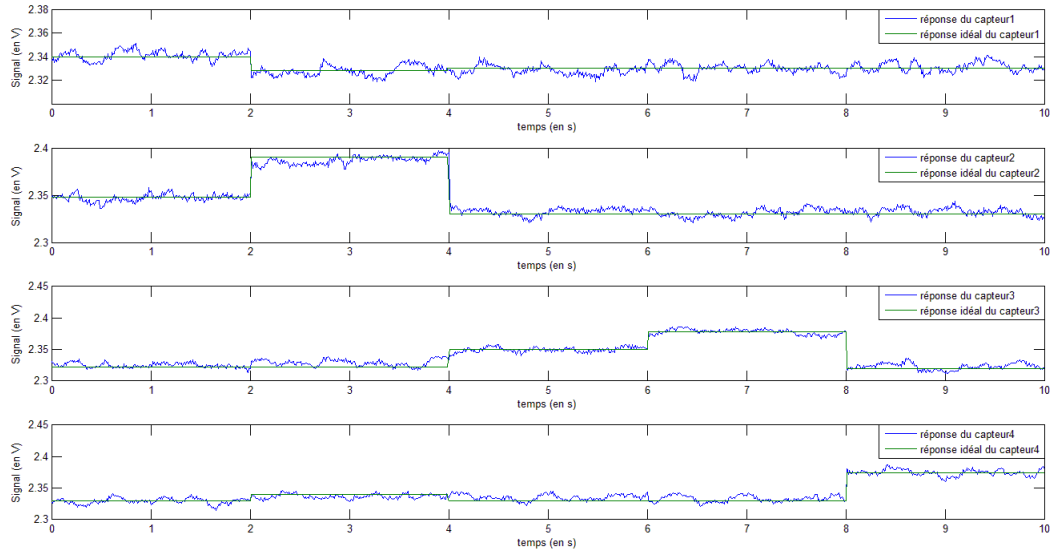


FIGURE 4.12 – Réponse des capteurs pour une cible à $30^{\circ}C$

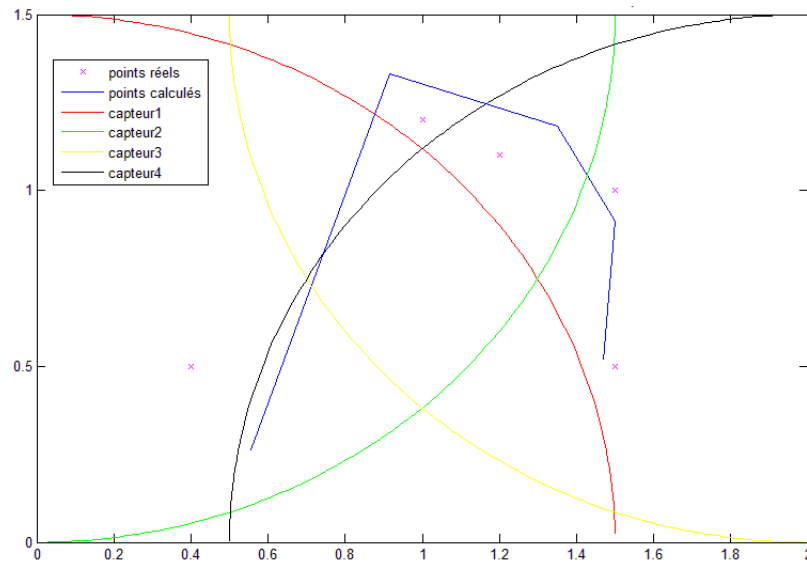


FIGURE 4.13 – Estimation des coordonnées d'une cible à $30^{\circ}C$ dans un réseau de quatre capteurs

Nous avons remarqué que les résultats pour une cible à $35^{\circ}C$ sont plus proches de la réalité que les résultats pour une cible à $30^{\circ}C$. En effet, plus la cible est chaude et plus important est le flux infrarouge soumis au capteur. Moins la température de la cible est élevée et plus grande sera l'influence des flux perturbateurs (essentiellement les courants d'air) sur le flux infrarouge à détecter. Nos perspectives dans le cadre de la localisation d'une personne par un algorithme

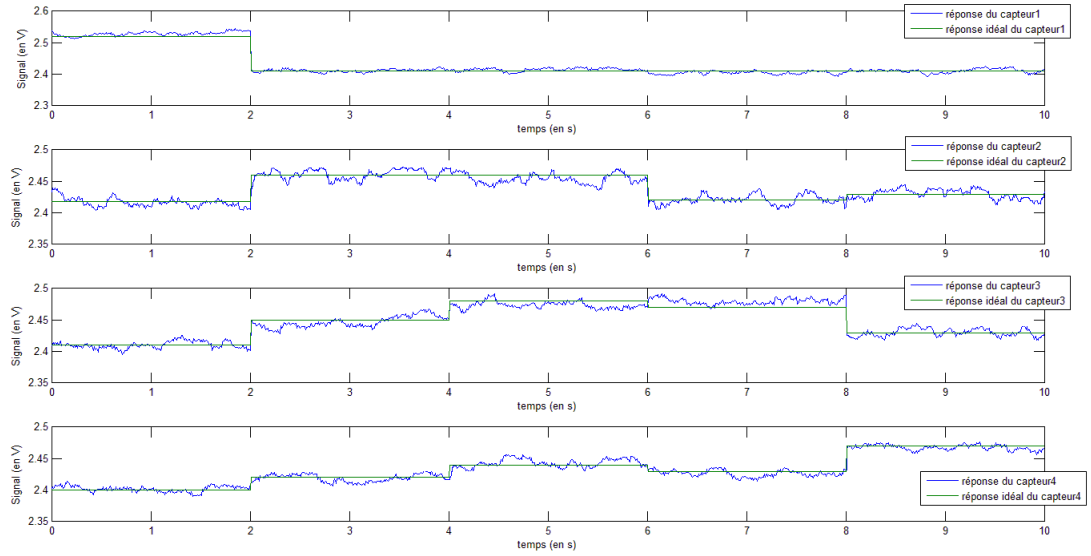


FIGURE 4.14 – Réponse des capteurs pour une cible à $35^{\circ}C$

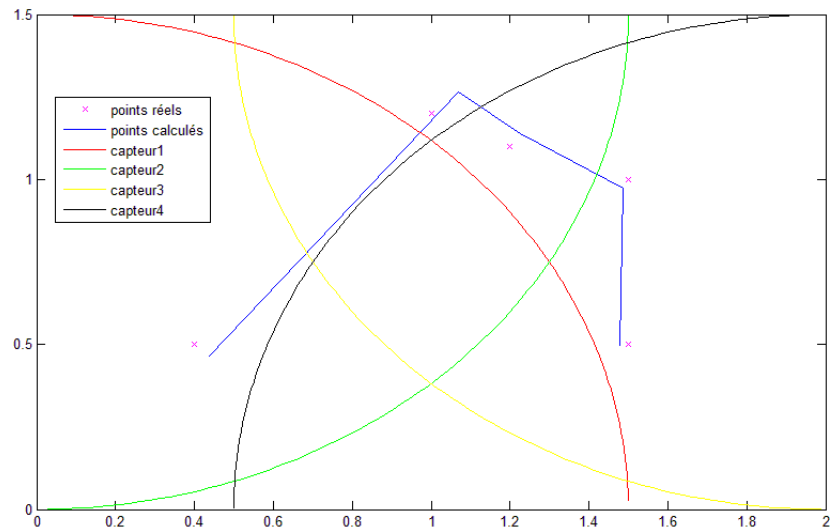


FIGURE 4.15 – Estimation des coordonnées d'une cible à $35^{\circ}C$ dans un réseau de quatre capteurs

de Levenberg-Marquardt sont de réaliser des tests dans un espace plus grand à l'aide soit de capteurs ayant une portée plus importante soit en utilisant plus de capteurs pour couvrir la zone à surveiller. Il sera important de voir l'influence des murs et des meubles dans une pièce sur la réponse du capteur et l'estimation des coordonnées de la cible. La possibilité de pouvoir estimer les coordonnées en x , en y et surtout en z peut être un axe de recherche très intéressant pour le maintien à domicile dans le domaine de la détection de chute.

4.5 Les perspectives

Nous allons devoir améliorer l'installation sachant qu'un nouveau patient est prévu pour le mois d'Octobre 2010. Nous allons régler le problème de détection dans la salle de bain en ajoutant un nouveau capteur ou en jouant sur la temporisation des détecteurs de mouvement déjà en place. Une autre solution pour gérer ce genre de problème est d'utiliser un modèle de Markov. D'autant plus que nous avons obtenu, avec cette expérience, une base d'apprentissage d'environ un mois de vie. Les simulations des HMM sont très prometteuses. Nous allons réussir à avoir une information de présence et de localisation dans l'appartement. À l'aide des observations qui sont données par la réponse des capteurs, nous pouvons envisager de remplacer les temporisations présentes dans les scénarios de détection mis en place actuellement. Connaissant les habitudes de la personne, il sera intéressant d'établir un modèle pour différents moments de la journée afin d'optimiser l'estimation que devra calculer le modèle.

Actuellement, le système installé dans l'appartement témoin est incapable de donner l'information du nombre de personnes présentes dans la pièce. Un modèle pour identifier le nombre de personnes peut être proposé en utilisant les HMM. L'idéal est de rajouter un système de surveillance ou de comptage des entrées et des sorties, au niveau de la porte d'entrée. Ce système sera installé pour confirmer si l'appartement est vide ou pas, ce qui est une information importante pour diagnostiquer un événement alarmant et qui nécessite donc une intervention extérieure.

D'autres besoins méritent notre attention notamment la détection de chutes à l'aide de système non intrusif qui nécessite de porter un badge ou qui utilise la vision. Aujourd'hui, le projet CAPTHOM met au point le capthom étendu à base de vision dont la réponse en sortie exclut toute émission d'image, mais il ne doit pas être exclu les solutions qui apparaissent comme plus acceptables pour des personnes pas encore habituées à ce genre de technologie. Nous pensons utiliser notamment des tapis sensibles à la pression, ce qui nécessite d'utiliser un algorithme capable de différencier une marche et une chute.

Bien entendu, il est prévu d'installer de nouveaux prototypes de capthoms basiques dans l'appartement pour avoir une information non pas de mouvement mais de présence. Nous espérons ainsi pouvoir localiser la personne dans l'appartement mais aussi dans la pièce où elle se trouve. Dans le cadre du maintien à domicile, le traitement des habitudes à l'aide de capteur de présence (et non de mouvement) peut être une information déterminante dans le traitement des habitudes de la personne âgée pour détecter les situations alarmantes ou pour le suivi d'une personne touchée par une maladie dégénérative (Alzheimer).

Il apparaît clairement aujourd'hui que la gestion automatique de nos ressources est une alternative mise en avant pour la gestion de confort d'une part et pour réaliser des économies sur l'énergie. Le projet CAPTHOM est un projet très ambitieux visant à innover dans la détection de présence qui est un domaine considéré comme résolu par l'utilisation des détecteurs de mouvement pour de nombreuses personnes (particuliers ou professionnels). Malheureusement, ces systèmes ne sont pas fiables à cause de nombreux cas de non-détection quand la personne est immobile par exemple. Cependant, le rapport qualité/prix pour ce genre de produit procure aux détecteurs de mouvement une très grande popularité et cela malgré les désagréments encourus.

Finalement, il existe de nombreux moyens efficaces de détecter une personne pour une situation donnée. La difficulté vient du cahier des charges qui demande que le capteur à développer soit efficace quelle que soit la situation. Pour répondre à la problématique de CAPTHOM, nous avons donc dû réaliser un état de l'art et une veille technologique sur le sujet. Puisque la présence d'une personne peut être caractérisée par les effets des différents phénomènes physiques qui lui sont liés, le meilleur capteur de présence serait un capteur qui prend en compte toutes ces informations. On imagine qu'un tel système risque d'être très cher puisque plusieurs technologies sont utilisées. Il faut donc faire un choix. Nous avons essayé de nombreux capteurs et réalisé de nombreux tests. Nous étions partis sur l'idée de réaliser un réseau de capteurs dont le recoupement des informations de natures technologiques différentes permettrait de répondre à notre problématique. Les axes de recherche sont très variés et nous avons décidé, finalement, de nous lancer dans la détection du flux d'émission infrarouge émis par la chaleur humaine. Paradoxalement, il n'y a dans ce choix aucune innovation technologique puisque les PIR utilisent déjà le rayonnement infrarouge. Mais l'innovation réside dans le fait que nous ne détectons pas le mouvement qui crée une variation du flux infrarouge perçu par le capteur mais que nous cherchons à détecter l'émission infrarouge qui se trouve dans la zone de détection.

Pour appréhender les problématiques liées à la détection de présence humaine, nous avons réalisé de nombreux tests en utilisant différents capteurs de diverses technologies (capteurs ultrasons, détecteurs de mouvements, détecteurs pyroélectriques, webcams, capteurs de CO₂, etc...). Une solution de surveillance des entrées et des sorties a été proposée à l'aide de deux capteurs

pyroélectriques permettant d'évaluer le nombre de personnes présentes dans la pièce. Lors de réunion avec nos partenaires industriels, nous avons recensé les besoins que doivent remplir le capthom, il a été ainsi construit des scénarios d'utilisation du capteur qui a fait l'objet de campagnes de mesure. Les résultats obtenus ont permis de mieux cerner les besoins à remplir.

Au fur et à mesure de l'avancement du projet et des travaux de recherches des quatre thèses en cours, il a été décidé avec les partenaires industriels que le projet CAPTHOM devait aboutir sur deux types de capteurs de présence : le capthom basique et le capthom étendu. Le premier est un capteur qui donne une réponse de type "tout ou rien", comme les PIR actuels, en fonction de la présence d'une ou plusieurs personnes. Le capthom basique ne doit utiliser qu'un seul type de technologie afin d'assurer un coût de commercialisation le plus bas possible. Le choix s'est porté sur la technologie thermopile. Le capthom étendu s'appuie sur l'utilisation de la vision. Il est prévu d'utiliser plusieurs technologies pour pouvoir détecter non seulement la présence d'une personne mais aussi avoir d'autres types d'informations comme le nombre de personnes, la localisation ou l'activité de la personne. Pour ce capteur, aucune limite de prix n'est fixée visant ainsi le marché haut gamme.

Ainsi, dans le cadre du développement du capthom basique, la technologie des capteurs de type thermopile permet d'entrevoir une nouvelle solution pour la détection de présence humaine pour des applications de type domotique. Nous avons eu la possibilité d'être en contact avec un laboratoire (IEMN) qui conçoit ce type de capteur dont le procédé original est breveté et qui possède une sensibilité supérieure au thermopile du commerce. Cependant, pour notre application de détection de présence, nous avons préféré l'utilisation de thermopiles commercialisées qui ont l'avantage d'être encapsulées ce qui leur confère une meilleure immunité aux perturbations communes aux habitats (par exemple, courant d'air). Nous avons veillé à réaliser de nombreux essais sur les capteurs pour valider nos attentes ce qui nous a amené à développer une méthode de caractérisation du capteur. Cette méthode de caractérisation nous permet d'obtenir un modèle de la réponse du capteur en fonction de la position relative entre le capteur et la cible notamment.

Un modèle, qui est fonction de la position de la cible, peut nous permettre d'avoir plus qu'une information de présence. Au cours de nombreux essais, nous avons pu remarquer l'influence de différents paramètres sur la réponse du capteur, à savoir, la position dans l'espace de la cible par rapport au capteur et la différence de température entre la cible et l'air ambiant. Puisque la réponse du capteur est donnée par trois paramètres de position (distance, angle et azimuth), il paraît possible de localiser une personne à l'aide d'un réseau de capteurs de type thermopile. Les simulations en trois dimensions de ce type de réseaux, à l'aide d'un algorithme d'optimisation pour l'estimation des coordonnées d'une personne, semblent très prometteuses. Cependant, les capteurs que nous avons en notre possession ont un angle d'ouverture assez faible. Pour avoir de bons résultats, il est nécessaire d'utiliser plusieurs capteurs pour avoir une meilleure couverture des zones de détection. Il se trouve que le projet CAPTHOM a permis le développement d'un logiciel de simulation permettant d'optimiser le choix du nombre de capteurs et leur placement dans une pièce.

Par rapport à la localisation d'une personne dans une pièce à l'aide d'un réseau de capteurs, nous avons déjà suivi cette piste avant même le choix d'utiliser des thermopiles. L'idée était d'utiliser des détecteurs de mouvement qui donnent une réponse du type "tout ou rien". Nous avons proposé d'utiliser une chaîne de Markov pour connaître le chemin qu'a pris une personne par rapport à un recoupement de zones de détection des capteurs. L'avantage de cette méthode

est la possibilité de faire évoluer le modèle pour qu'il soit plus robuste face aux mauvaises détections. Cependant, si ce modèle a été pensé pour l'utiliser avec des PIR, il n'en reste pas moins applicable sur les capthoms à venir.

A la fin de cette thèse, nous avons eu l'opportunité de nous pencher sur les problèmes liés au maintien à domicile avec l'utilisation d'un appartement prototype équipé pour répondre aux besoins des personnes handicapées ou âgées. L'appartement a été inauguré en mars 2009. Les premiers tests réalisés cette année sont donc capitaux pour l'amélioration du site. La possibilité d'héberger une vraie personne âgée au sein de l'appartement est un réel atout ajoutant une grande valeur aux résultats obtenus. La base de données obtenues pourra alimenter la simulation de nouveaux algorithmes de traitement des données (par exemple : HMM, logique floue, réseaux de neurones, ...). Les prochaines avancées et prototypes de capthoms pourront être testés et validés dans des conditions réelles.

Les perspectives de recherches suite à nos travaux sont énormes. En effet, il est à remarquer que le projet CAPTHOM se poursuit jusqu'à la fin de l'année 2010 avec les partenaires industriels. Aujourd'hui, il existe un prototype pour l'application de commande d'éclairage. Cependant, contrairement au dispositif expérimental, le prototype n'a pas de bons résultats à cause de l'échauffement de la partie commande du boîtier. Il sera donc nécessaire de trouver une solution pour compenser cette perturbation soit en utilisant un composant permettant de maintenir la température du boîtier, soit en utilisant un traitement des données prenant en compte la température du boîtier, par exemple, et en corrigeant la réponse du capteur selon le modèle établi par la méthode de caractérisation que nous avons défini au cours de cette thèse. La finalisation d'un prototype opérationnel serait un réel signe de succès pour le projet CAPTHOM qui a commencé en Octobre 2006.

Nous avons, au cours de cette thèse, proposé une automatisation du banc de tests. L'idée a dû être abandonnée à cause du temps qu'impliquerait la mise en place du dispositif. Aujourd'hui, la méthode de caractérisation nécessite l'intervention d'un opérateur qui est une source d'excitation sur le capteur infrarouge et le dépouillement des données est aussi très long à réaliser. Il serait donc intéressant aussi de réaliser un banc de tests qui déplace la cible ou le capteur à l'aide de moteurs asservis ce qui permettrait de réduire les erreurs de mesures. Le dépouillement des données peut être réalisé en parallèle des essais à l'aide d'un logiciel de traitement qui donnera le profil du modèle de la réponse du capteur.

Pour l'avenir, il serait très profitable de tirer partie des atouts qu'offre l'appartement témoin. Les premiers résultats obtenus au cours de la première session de mesures nous amènent à réfléchir sur les améliorations à apporter et les nouveaux équipements à développer. Une fois que les prototypes des capthoms basiques et étendus seront prêts, l'appartement témoin sera une plateforme de tests qui nous permettra de valider nos capteurs de présence dans des conditions réelles. Il sera très intéressant de proposer une architecture permettant la gestion des différents équipements en fonction des informations apportées par les capteurs. Ce travail a été commencé par l'élaboration d'une chaîne de Markov capable de localiser la personne dans son habitat. Nous pourrions aussi nous pencher sur les problématiques de reconnaissance d'activité, notamment de chutes dans le cadre du maintien à domicile.

Bibliographie

- Adami, A., T. Hayes et M. Pavel. «Unobtrusive monitoring of sleep patterns», in *Proceedings of 25th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, p. 1360–1363.
- Adlam, T., R. Faulkner, R. Orpwood, K. Jones, J. Macijauskiene et A. Budraitiene. 2004, «The installation and support of internationally distributed equipment for people with dementia», *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 8, n° 3, p. 253–257.
- Adosen. avril 2003, «la voix», *Adosen, l'éducation au service de la santé*, vol. 140, p. 20.
- Al-ani, T., Q. Le Ba et E. Monacelli. 2007, «On-line Automatic Detection of Human Activity in Home Using Wavelet and Hidden Markov Models Scilab Toolkits», in *IEEE International Conference on Control Applications, 2007. CCA 2007*, p. 485–490.
- Andoh, H., K. Watanabe, T. Nakamura et I. Takasu. 2004, «Network health monitoring system in the sleep», in *SICE 2004 Annual Conference*, vol. 2.
- Barnes, N., N. Edwards, D. Rose et P. Garner. 1998, «Lifestyle monitoring-technology for supported independence», *Computing & Control Engineering Journal*, vol. 9, p. 169.
- Baum, L. et J. Eagon. 1967, «An inequality with applications to statistical estimation for probabilistic functions of Markov processes and to a model for ecology», *Bull. Amer. Math. Soc.*, vol. 73, n° 3, p. 360–363.
- Baum, L. et G. Sell. 1968, «Growth transformations for functions on manifolds», *Pacific J. Math.*, vol. 27, n° 2, p. 211–227.
- Belconde, A. et F. Kratz. 2008, «Problèmes liés à la détection de présence humaine et modélisation», *6ème Colloque Capteurs*, vol. Bourges.
- Benezeth, Y. 2009, *Détection de la présence humaine par vision*, Thèse de doctorat, Université d'Orléans.

- Benezeth, Y., B. Emile, H. Laurent et C. Rosenberger. 2008, «A Real Time Human Detection System Based on Far Infrared Vision», *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5099, p. 76–84.
- Bonhomme, S. 2008, *Méthodologie et outils pour la conception d'un habitat intelligent*, Thèse de doctorat, L'université de Toulouse.
- Brunin, D., E. Courtial et G. Allibert. 2009, «Visual receding horizon estimation for human presence detection.», *ICRA 2009, Workshop People Detection and Tracking of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe*.
- Brunin, E., D. and Courtial, A. Y. et Y. Touré. 2008, «Détection de présence humaine par fusion de données avec filtrage de kalman», *6ème Colloque Capteurs, Bourges*.
- Brumitt, B., B. Meyers, J. Krumm, A. Kern et S. Shafer. 2000, «EasyLiving : Technologies for intelligent environments», *Lecture notes in computer science*, p. 12–29.
- Burchett, J., M. Shankar, A. Hamza, B. Guenther, N. Pitsianis et D. Brady. 2006, «Lightweight biometric detection system for human classification using pyroelectric infrared detectors», *Applied optics*, vol. 45, n° 13, p. 3031–3037.
- Burgard, W., D. Fox et S. Thrun. 1997, «Active mobile robot localization», vol. 15, p. 1346–1352.
- Burion, S. 2004, «Human detection for robotic urban search and rescue», *master's thesis, Robotics Inst., Carnegie Mellon Univ.*
- Campo, E., M. Chan et D. Esteve. 2003, «L'apprentissage des pratiques et des habitudes de vie, une clef de l'automatisation domotique», *signaux*, vol. 98.
- Campo, E., J. Di Rinaldi, D. Estève, N. Bailly et F. Benard. «Développement d'une nouvelle génération de gestionnaire d'énergie auto-configurable pour l'habitat : le concept ERGDOM», in *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, ISSN*, p. 1270–9840.
- Celler, B., W. Earnshaw, E. Ilisar, L. Betbeder-Matibet, M. Harris, R. Clark, T. Hesketh et N. Lovell. 1995, «Remote monitoring of health status of the elderly at home. A multidisciplinary project on aging at the University of New South Wales», *International journal of bio-medical computing*, vol. 40, n° 2, p. 147–155.
- Chan, M., E. Campo et E. D. «L'apprentissage des pratiques et des habitudes de vie, une clef de l'automatisation domotique», *signaux*, vol. 2004.
- Chan, M., E. Campo et D. Estève. 2005, «Assessment of activity of elderly people using a home monitoring system», *International Journal of Rehabilitation Research*, vol. 28, n° 1, p. 69.
- Chan, M., D. Estève, C. Escriba et E. Campo. 2008, «A review of smart homes-present state and future challenges», *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 91, n° 1, p. 55–81.
- Cislo, N., N. Smith-Guerin et S. ARBAOUI. 2007, «Fall detection for elderly people : State of the art and open issues», *Proceedings of the 33rd International Conference on Operational Research Applied to Health Service*, vol. ORAHS 2007.
- Close up. 2002, «Frequency range for pyroelectric detectors», .

- Csee-Métiers. 2006, «lexique», <http://www.csee.fr/divers/lexiqueCF.htm>.
- Das, S., D. Cook, A. Bhattacharya, E. Heierman III et T. Lin. 2002, «The role of prediction algorithms in the mavhome smart home architecture», *IEEE Wireless Communications*, p. 3.
- Das, S., N. Roy et A. Roy. 2006, «Context-aware resource management in multi-inhabitant smart homes : A framework based on Nash H-learning», *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 2, n° 4, p. 372–404.
- David, P. 2009, *Contribution à l'analyse de sûreté de fonctionnement des systèmes complexes en phase de conception : application à l'évaluation des missions d'un réseau de capteur de présence humaine*, Thèse de doctorat, Université d'Orléans.
- Deafblind. «http://www.deafblindinternational.org/standard/review1_h.html», (*accessed on August 21, 2007*).
- Diegel, O. 2005, «Intelligent automated health systems for compliance monitoring», *TENCON 2005 2005 IEEE Region 10*, p. 1–6.
- Dittmar, A., G. Delhomme et T. Pauchard. 1995, «Le corps humain-Un système thermique complexe-(The human body-a complex thermal system)», .
- Domotique News. Mai 2004, *Etat de l'art du marché*, Les cahiers de domotique News.
- Dorizzi, B., J. Leroux Les Jardins, P. Lamadelaine et C. Guerrier. 2004, «La biométrie», *technique de l'ingénieur*, vol. H 5 530.
- Elger, G. et B. Furugren. 1998, «" SmartBo"-An ICT and computer-based demonstration home for disabled people», *Improving the quality of life for the European citizen : technology for inclusive design and equality*, p. 392.
- Elite. «<http://www.elite-care.com>», (*accessed on March 28, 2007*).
- Escriba, C. 2005, *Conception, Réalisation et Caractérisation de capteurs infrarouges à thermopiles : Application à la détection de présence passive dans l'habitat*, Thèse de doctorat, l'université Paul Sabatier Toulouse III.
- Ess, D. V. 2003, «Pyroelectric infrared motion detector, psoc style», *Cypress Microsystems*, vol. AN2105.
- Fang, J., Q. Hao, D. Brady, B. Guenther et K. Hsu. 2006a, «Real-time human identification using a pyroelectric infrared detector array and hidden Markov models», *Optics Express*, vol. 14, n° 15, p. 6643–6658.
- Fang, J., Q. Hao, D. Brady, M. Shankar, B. Guenther, N. Pitsianis et K. Hsu. 2006b, «Path-dependent human identification using a pyroelectric infrared sensor and Fresnel lens arrays», *Optics Express*, vol. 14, n° 2, p. 609–624.
- Filloux, A. 1997, «Domotique», *Techniques de l'Ingénieur*, vol. C 3 781.
- Fontaine, N. 2003, *Livre Blanc sur les énergies*, débat national sur les énergies.
- Forney, G. 1973, «The viterbi algorithm», *proc. IEEE*, vol. 61, n° 3, p. 268–278.

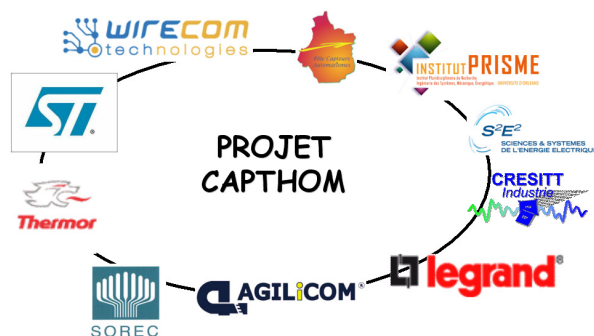
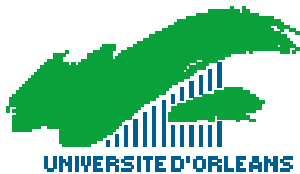
- Gerhome. 2010, «Services numériques de maintien à domicile des personnes âgées», <http://gerhome.cstb.fr/>.
- Giméec. 2008, «L'efficacité énergétique active», .
- Giroux, S., J. Bauchet, H. Pigot, D. Lussier-Desrochers, Y. Lachappelle et D. Lussier. 2008, «Pervasive behavior tracking for cognitive assistance», .
- Gobeau, J.-F. 2006, «DéTECTEURS de mouvement à infrarouge passif», *Colloque capteur*.
- Gouaux, F. 1999, *Optimisation d'un capteur optoélectronique de distance et de déplacement pour le contrôle non destructif*, Thèse de doctorat, Université de Nantes.
- Guentchev, K. et J. Weng. 1998, «Learning-based three dimensional sound localization using a compact non-coplanar array of microphones», in *Proceedings of the 1998 AAAI Symposium on Intelligent Environments*.
- Guillen, S., M. Arredondo, V. Traver, J. Garcia et C. Fernandez. 2002, «Multimedia telehomecare system using standard TV set», *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 49, n° 12, p. 1431–1437.
- Ha, K., K. Lee et S. Lee. 2006, «Development of PIR sensor based indoor location detection system for smart home», , p. 2162–2167.
- Haffar, M. 2007, *Etude et réalisation de matrices de microcapteurs infrarouges en technologie silicium pour imagerie basse résolution*, Thèse de doctorat, L'Université des sciences et technologie de Lille.
- Hagen, I., T. Holthe, D. Petrina, S. Cahill, J. Gilliard, R. Orpwood, T. Paivi et S. Bjorneby. 2001, «Can assistive technology enable people with dementia?», *Assistive technology : added value to the quality of life, AAATE'01*, p. 42.
- Hao, Q., D. Brady, B. Guenther, J. Burchett, M. Shankar et S. Feller. 2006, «Human tracking with wireless distributed pyroelectric sensors», *IEEE Sensors Journal*, vol. 6, n° 6, p. 1683.
- Hashimoto, K., T. Tsuruta, K. Morinaka et N. Yoshiike. 2000, «High performance human information sensor», *Sensors & Actuators : A. Physical*, vol. 79, n° 1, p. 46–52.
- Helal, S., W. Mann, H. El-Zabadani, J. King, Y. Kaddoura et E. Jansen. 2005, «The gator tech smart house : A programmable pervasive space», *Computer*, p. 50–60.
- Helal, S., B. Winkler, C. Lee, Y. Kaddourah, L. Ran, C. Giraldo et W. Mann. 2003, «Enabling location-aware pervasive computing applications for the elderly», in *Proceedings of the First IEEE Pervasive Computing Conference*.
- Honorato, J., I. Spiniak et M. Torres-Torriti. 2008, «Human Detection Using Thermopiles», .
- Hosokawa, T. et M. Kudo. 2005, «Person tracking with infrared sensors», *Lecture notes in computer science*, vol. 3684, p. 682.
- INRS. 2005, «détection de personnes par ondes radioélectriques», *aide mémoire*, vol. ED959.
- Intille, S. 2002, «Designing a home of the future», *IEEE pervasive computing*, p. 76–82.

- Isoda, Y., S. Kurakake et H. Nakano. 2004, «Ubiquitous sensors based human behavior modeling and recognition using a spatio-temporal representation of user states», in *18th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, vol. 1, p. 512.
- Ivanov, B., H. Ruser et M. Kellner. 2002, «Presence detection and person identification in Smart Homes», in *Int. Conf. Sensors and Systems, St. Petersburg*.
- Keller, H. J. 1984, «Passive infrared technology for security systems and law enforcement», *AES*.
- Kidd, C., R. Orr, G. Abowd, C. Atkeson, I. Essa, B. MacIntyre, E. Mynatt, T. Starner, W. Nuss-
letter *et al.*. 1999, «The aware home : A living laboratory for ubiquitous computing research», *Lecture notes in computer science*, p. 191–198.
- Kim, H., K. Ha, S. Lee et K. Lee. 2007, «Development of PIR Sensor based Indoor Location-Aware System using Bayesian Classifier», in *ISIS 2007*.
- Korhonen, I., R. Lappalainen, T. Tuomisto, T. Koobi, V. Pentikainen, M. Tuomisto et V. Tur-
janmaa. 1998, «TERVA : wellness monitoring system», in *Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 20, Citeseer, p. 1988–1991.
- Krumm, J., S. Harris, B. Meyers, B. Brumitt, M. Hale et S. Shafer. 2000, «Multi-camera multi-person tracking for easy living», in *IEEE Workshop on Visual Surveillance*, vol. 6.
- Laurin, E. 2000, *Système intelligent d'assistance à la perception dans la conduite de véhicule*, Thèse de doctorat, Sherbrooke (Québec), Canada.
- LeBellego, G., N. Noury, G. Virone, M. Mousseau et J. Demongeot. 2006, «A model for the mea-
surement of patient activity in a hospital suite», *IEEE Transactions on information technology in biomedicine*, vol. 10, n° 1, p. 92–99.
- Lesser, V., M. Atighetchi, B. Benyo, B. Horling, A. Raja, R. Vincent, T. Wagner, P. Xuan et
S. Zhang. «The intelligent home testbed», *environment*, vol. 2, p. 15.
- Ma, T., Y. Kim, Q. Ma, M. Tang et W. Zhou. 2005, «Context-aware implementation based on
CBR for smart home», vol. 4.
- Masuda, Y., M. Sekimoto, M. Nambu, Y. Higashi, T. Fujimoto, K. Chihara et Y. Tamura. 2005,
«An unconstrained monitoring system for home rehabilitation», *IEEE Engineering in Medicine
and Biology Magazine*, vol. 24, n° 4, p. 43–47.
- Mihailidis, A., B. Carmichael et J. Boger. 2004, «The use of computer vision in an intelligent en-
vironment to support aging-in-place, safety, and independence in the home», *IEEE Transactions
on Information Technology in BioMedicine*, vol. 8, n° 3, p. 238–247.
- Morette, N. 2009, *Contribution à la Navigation de robots mobiles : approche par modèle direct et
commande prédictive*, Thèse de doctorat, Université d'Orléans.
- Moser, M. C. 1998, «The neural network house : an environment that's adapts to its inhabitants»,
in *Proc. of the AAAI Spring Symposium on Intelligent Environments, Technical Report SS*,
vol. 98-02, p. 110–114.

- Murakita, T., T. Ikeda et H. Ishiguro. 2004, «Multisensor human tracker based on the markov chain monte carlo method», in *Proceedings of the Joint 2nd Int. Conf. on Soft Computing and Intelligent Systems and 5th Int. Symp. on Advanced Intelligent Systems*.
- Nishida, Y., T. Hori, T. Suehiro et S. Hirai. 2000, «Sensorized environment for self-communication based on observation of daily human behavior», in *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, p. 1364–1372.
- Noguchi, H., T. Mori et T. Sato. 2002, «Construction of network system and the first step of summarization for human daily action data in the sensing room», in *IEEE Workshop on Knowledge Media Networking, 2002. Proceedings*, p. 17–22.
- Noguchi, H., T. Mori et T. Sato. 2007, «Attentive Information Support with Massive Embedded Sensors in Room», *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4551, p. 883.
- Nougaret, L. 2007, *Elaboration et caractérisation de couches minces pyroélectriques de LiTaO₃ par pulvérisation cathodique RF magnetron pour applications détecteurs IR*, Thèse de doctorat.
- Noury, N., A. Fleury, R. Nocua, J. Poujaud, C. Gehin, A. Dittmar, G. Delhomme, J. Demongeot et E. McAdam. 2009, «Capteurs pour la télésurveillance médicale. Capteurs, algorithmes et réseaux», .
- Noury, N. et V. Rialle. 2003, «Habitat intelligent pour la santé : systèmes et équipements», *technique de l'ingénieur*.
- Orpwood, R., C. Gibbs, T. Adlam, R. Faulkner et D. Meegahawatte. 2005, «The design of smart homes for people with dementia user interface aspects», *Universal Access in the Information Society*, vol. 4, n° 2, p. 156–164.
- Perry, M., A. Dowdall, L. Lines et K. Hone. 2004, «Multimodal and ubiquitous computing systems : Supporting independent-living older users», *IEEE Trans Inf Technol Biomed*, vol. 8, n° 3, p. 258–70.
- Pigot, H., A. Mayers et S. Giroux. 2003, «The intelligent habitat and everyday life activity support», in *Proc. of the 5th International conference on Simulations in Biomedicine, April*, p. 2–4.
- Rabiner, L. 1990, «A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition», *Readings in speech recognition*, vol. 53, n° 3, p. 267–296.
- Rahal, Y., P. Mabillean et H. Pigot. 2007, «Bayesian filtering and anonymous sensors for localization in a smart home», vol. 2.
- Rantz, M., K. Marek, M. Aud, H. Tyrer, M. Skubic, G. Demiris et A. Hussam. 2005, «A technology and nursing collaboration to help older adults age in place», *Nursing Outlook*, vol. 53, n° 1, p. 40–45.
- Rashidi, P., G. Youngblood, D. Cook et S. Das. 2007, «Inhabitant guidance of smart environments», *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4551, p. 910.

- Ricquebourg, V., D. Menga, M. Delafosse, B. Marhic, L. Delahoche et A. Jolly-Desodt. 2008, «Sensor Failure Detection within the TBM Framework : A Markov Chain Approach», in *Proceedings of IPMU*, vol. 8, p. 323.
- Riedel, D., S. Venkatesh et W. Liu. 2005, «Spatial activity recognition in a smart home environment using a chemotactic model», in *Proc. International Conference on Intelligent Sensors Networks and Information Processing*, p. 5–8.
- Ruser, H. et V. Mágori. 1998, «Highly sensitive motion detection with a combined microwave-ultrasonic sensor», *Sensors & Actuators : A. Physical*, vol. 67, n° 1-3, p. 125–132.
- Schilz, J. 1999, «Thermoelectric Infrared Sensors (Thermopiles) for Remote Temperature Measurements ; Pyrometry», *Thermophysica minima. Perkin Elmer Optoelectronics*.
- Shankar, M., J. Burchett, Q. Hao, B. Guenther, D. Brady et al.. 2006, «Human-tracking systems using pyroelectric infrared detectors», *Optical Engineering*, vol. 45, p. 106 401.
- Statbel. 2005, «Taille moyenne et poids moyen de la population», [http ://www.statbel.fgov.be/fiGurEs/d25_fr.asp](http://www.statbel.fgov.be/fiGurEs/d25_fr.asp), vol. vu le 3 Mars 2009.
- Stellman, J. M. 2000, *Encyclopédie de sécurité et de santé au travail, Volume 2*, Édition 3.
- Synthèse. 2006, «Les nouvelles mensurations des français», *ifth*, vol. 12.
- Tamura, T., T. Togawa, M. Ogawa et M. Yoda. 1998, «Fully automated health monitoring system in the home», *Medical Engineering and Physics*, vol. 20, n° 8, p. 573–579.
- Tapia, E., S. Intille et K. Larson. 2004, «Activity recognition in the home using simple and ubiquitous sensors», *Lecture Notes in Computer Science*, p. 158–175.
- Tertois, S. 2003, *Réduction des effets des non-linéarités dans une modulation multiporteuse à l'aide de réseaux de neurones*, Thèse de doctorat, Université de Rennes 1.
- Tuomisto, M., T. Terho, I. Korhonen, R. Lappalainen, T. Tuomisto, P. Laippala et V. Turjanmaa. 2006, «Diurnal and weekly rhythms of health-related variables in home recordings for two months», *Physiology & behavior*, vol. 87, n° 4, p. 650–658.
- Ugur, B. et al.. 2007, «Falling Person Detection Using Multi-Sensor Signal Processing», *EUR-ASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2008.
- Vermeulen, C. et A. van Berlo. 1998, «A Model House as Platform for Information Exchange on Housing», *Gerontechnology : a sustainable investment in the future*, p. 337.
- Virone, G., N. Noury et J. Demongeot. 2002, «A system for automatic measurement of circadian activity deviations in telemedicine», *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 49, n° 12, p. 1463–1469.
- Vrignat, P., M. Avila, F. Duculty, B. Robles et F. Kratz. 2009, «Utilisation des chaînes de Markov cachées pour une évaluation des activités de maintenance dans le cadre d'un processus industriel pour l'agroalimentaire», .
- West, G., S. Greenhill et S. Venkatesh. 2005, «A probabilistic approach to the anxious home for activity monitoring», *COMPSAC-NEW YORK*, p. 335.

- Williams, G., K. Doughty et D. Bradley. 1998, «A systems approach to achieving CarerNet-an integrated and intelligent telecare system», *IEEE transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 2, n° 1, p. 1–9.
- Yamaguchi, A., M. Ogawa, T. Tamura et T. Togawa. «Monitoring behavior in the home using positioning sensors», vol. 4.
- Yamazaki, T. 2006, «Beyond the smart home», in *Hybrid Information Technology, 2006. ICHIT'06. International Conference on*, vol. 2.
- Yoshiike, N., K. Arita, K. Morinaka, K. Hashimoto, M. Kawaguri et A. Nishino. 1995, «Human information sensor», *Sensors & Actuators : A. Physical*, vol. 48, n° 1, p. 73–78.
- Yoshiike, N., K. Morinaka, K. Hashimoto, M. Kawaguri et S. Tanaka. 1999, «360° direction type human information sensor», *Sensors & Actuators : A. Physical*, vol. 77, n° 3, p. 199–208.
- Youcef, R. *et al.* 2008, «Location estimation in a smart home : system implementation and evaluation using experimental data», *International Journal of Telemedicine and Applications*, vol. 2008.
- Zhang, D. et M. MoUuari. 2004, «Aware home understanding life activities», in *Toward a human-friendly assistive environment : ICOST'2004, 2nd International Conference on Smart Homes and Health Telematics*, Ios Pr Inc, p. 186.



Nous tenons à remercier les partenaires du projet Capthom. Ce travail a été réalisé avec le soutien financier de la Région Centre et du Ministère de l'Industrie dans le cadre du projet Capthom du pôle S²E², www.s2e2.fr.



Antoine BELCONDE

Modélisation de la détection de présence humaine

Les travaux présentés dans ce manuscrit traitent de la détection de présence humaine à l'aide d'un ou plusieurs capteurs. Ces travaux ont été menés au sein de l'Institut PRISME dans le cadre du projet CAPTHOM du pôle de compétitivité S2E2.

Nous proposons une réflexion sur les phénomènes physiques en jeu pour la détection de présence humaine et un état de l'art des différents systèmes utilisés pour la détection de présence humaine aujourd'hui. La solution commerciale la plus prisée aujourd'hui est l'utilisation des détecteurs de mouvements basés sur la détection de la chaleur du corps humain, c'est-à-dire, la détection des émissions infrarouges. Le besoin de l'information de présence se fait ressentir dans de nombreux projets qui ont pour but de gérer les ressources énergétiques domestiques et/ou qui ont une vocation pour le maintien à domicile. Après une évaluation de plusieurs capteurs de différentes technologies à l'aide de scénarios basiques, notre intérêt s'est porté sur les capteurs de type thermopile. Ces capteurs ont fait l'objet d'une série de tests pour aboutir à la proposition d'un modèle de la réponse des capteurs. En parallèle, nous abordons la problématique de la localisation d'une personne dans une pièce. Deux méthodes sont proposées et ont pour point commun l'utilisation d'un réseau de capteurs. La première méthode utilise les chaînes de Markov cachées et permet de trouver le chemin parcouru par la personne et ouvre des perspectives sur le diagnostic des erreurs de détections des capteurs. La deuxième méthode permet d'obtenir les coordonnées dans l'espace d'une cible à l'aide d'une optimisation par Levenberg-Marquardt des coordonnées à l'aide des réponses des capteurs de type thermopile et de leur modèle.

Au final, nous nous sommes intéressés au cadre du maintien à domicile. Nous avons à notre disposition un appartement pilote qui a la particularité d'être entièrement domotisé. Une personne âgée a pu tester cet habitat durant plusieurs semaines. Les résultats obtenus nous confortent pour l'utilisation des capteurs étudiés et des méthodes de localisation développées.

Mots clés : capteur, détecteur de présence, réseau de capteur

Modeling the detection of human presence

The work presented in this manuscript deals with human detection by using one or more sensors. This work was done in the Institut PRISME within the framework of the CAPTHOM project of the pole of competitiveness S2E2.

We propose a reflection on the physical phenomena involved in the detection of human presence and state of the art of the various systems used to detect human presence today. The commercial solution is the most popular today is the sensors based on the detection of heat from the human body (the detection of infrared emissions). The information of presence is needed in many projects that aim to manage domestic energy resources and / or have a vocation for eldercare. After an evaluation of several sensors of different technologies using basic scenarios, this work focused on sensors type thermopile. These sensors have tested and we propose a model of the sensor response. In parallel, we address the problem of locating a person in a room. Two methods are proposed and have in common the use of a sensor network. The first method uses hidden Markov Models to find the path traveled by the person and gives new perspectives on the diagnosis of errors detection sensors. The second method provides the coordinates of a target using Levenberg-Marquardt optimization of coordinate with responses of thermopile sensors and their model.

Finally, we are interested in eldcare. We can use a test home who has the distinction of being fully Automated. An elderly person tested this habitat for several weeks. The results obtained confirm the use of sensors studied and developed methods of localization.

Keywords : sensor, presence sensor, sensor network